

Análisis cuantitativo de capsorrubina presente en el fruto de la palma de iraca (*Cardulovica palmata*) y su correlación con la etapa de maduración

Ilanyth Jhoanna Medina Chivata

Trabajo de Grado para Optar al Título de Química

Director

William Hidalgo Bucheli

Doctorado en Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Química

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi abuela Flor de María,

cuya presencia aún prospera en mi memoria. Este logro nace del amor que sembraste en mí.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander (UIS), por abrirme las puertas y forjarme profesionalmente con educación de calidad.

A mi director William Hidalgo, por acogerme como su estudiante. Por su orientación, paciencia, dedicación y acompañamiento durante el desarrollo de mi tesis de grado.

Al grupo de investigación de Bioquímica y Compuestos Naturales, por brindarme los recursos y equipos necesarios para llevarlo a cabo.

A mis compañeros de laboratorio, quienes hicieron de mi estadía allí días llenos de risas y buenos momentos; agradezco haber coincidido con ustedes y llevarme un pedazo de cada uno.

A mi familia, por su apoyo constante en cada aspecto de mi vida, dándome la fuerza y la confianza para llegar hasta aquí.

Tabla de contenido

Introducción	14
1. Objetivos.....	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivos específicos	17
2. Marco teórico.....	18
2.1 Descripción general de los carotenoides.....	18
2.2 Tipos de carotenoides	20
2.3. Capsorrubina.....	21
2.3.1. Descubrimiento de la capsorrubina.....	21
2.3.2. Propiedades físicas y químicas	22
2.3.3. Ruta de aparición de la capsorrubina	24
2.4. <i>Carludovica palmata</i> (palma de iraca)	26
2.4.1. Descripción general	26
2.4.2. Distribución geográfica de la siembra de la planta <i>Carludovica palmata</i> en Colombia	27
2.4.3. Usos comunes y económicos de <i>Carludovica palmata</i>	28
2.4.4. Estudios realizados alrededor de la palma de iraca	30

2.4.5. Uso de las infrutescencias para obtener carotenoides.....	31
2.5 Etapa de maduración y su relación con el contenido de carotenoides.....	31
2.6 Técnicas analíticas para el análisis cuantitativo y cualitativo de capsorrubina en extractos de infrutescencias	33
2.6.1 UV-VIS	33
2.6.2. FT-IR.....	34
2.6.3. UPLC-MS	35
2.6.4. HPLC-DAD	37
2.6.5 Principales carotenoides aislados e identificados en la literatura	38
3. Metodología	40
3.1. Selección de la materia prima	40
3.2. Preparación y extracción de la muestra de la especie vegetal <i>C. palmata</i>	42
3.2.1. Maceración.....	42
3.2.2. Proceso de extracción de la muestra	44
3.3 Análisis comparativo y cuantificación del extracto obtenido de la infrutescencia mediante UV-VIS	47
3.3.1. Análisis comparativo de los espectros UV-VIS obtenidos de las muestras biológicas	47
3.3.2. Cuantificación relativa de capsorrubina en los extractos vegetales.....	47

3.4. Evaluación de las muestras por FT-IR.....	48
3.5. Evaluación cualitativa por UPLC-MS	49
3.6. Evaluación cuantitativa por HPLC-DAD	51
3.6.1. Calibración y sensibilidad de los datos para la determinación de capsorrubina utilizando betacaroteno	53
3.6.2 Determinación de los límites de detección y cuantificación del método cromatográfico ...	54
4. Resultados y discusión.....	55
4.1. Porcentaje de rendimiento de las extracciones del fruto <i>C. palmata</i>	55
4.2 Identificación y cuantificación de capsorrubina por técnicas analíticas.....	56
4.2.1 Cuantificación relativa de capsorrubina en los extractos vegetales por UV-VIS.....	56
4.2.1.1 Análisis de componentes principales (PCA) a partir de los datos obtenidos por UV-VIS	58
4.2.2 Identificación mediante análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	60
4.2.3 Identificación de capsorrubina de las muestras obtenidas por cromatografía líquida de ultra rendimiento acoplado a masas (UPLC-MS/MS)	63
4.2.4 Identificación y cuantificación de capsorrubina por medio de HPLC-DAD.....	67
4.2.4.1 Figuras de mérito	71

4.4 Comparación entre las técnicas UV-VIS y HPLC-DAD utilizadas para la cuantificación relativa de los extractos de <i>C. palmata</i>	72
5. Conclusiones	75
Bibliografía	76
Apéndices.....	89

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades cromatográficas, espectroscópicas UV-VIS, masas (APCI+) y de infrarrojo de los principales carotenoides aislados e identificados.	40
Tabla 2. Clasificación por etapas de las muestras recolectadas.	43
Tabla 3. Imágenes de las muestras luego de la maceración.	46
Tabla 4. Resultados de las extracciones antes y después de la saponificación junto con su rendimiento.	57
Tabla 5. Cuantificación relativa de las muestras vegetales por UV-VIS.	60
Tabla 6. Frecuencias experimentales obtenidas por el método de regresión de mínimos cuadrados y sus referencias teóricas correspondientes (cm^{-1}) de bandas en los espectros IR del extracto de la infrutescencia de <i>Carludovica palmata</i>	60
Tabla 7. Cuantificación de las muestras por HPLC-DAD.	60
Tabla 8. Linealidad y sensibilidad determinadas por HPLC-DAD para la capsorrubina a partir de la curva de calibración del betacaroteno.	60

Lista de figuras

Figura 1. Betacaroteno y licopeno.	20
Figura 2. Diferencias estructurales entre carotenos y xantofilas.	21
Figura 3. Estructura química de la capsorrubina.	24
Figura 4. <i>Ruta de formación de la Capsorrubina.</i>	26
Figura 5. Carludovica palmata.....	28
Figura 6. Ubicación en Colombia de la palma Carludovica palmata..	28
Figura 7. Usos artesanales de la palma de Iraca..	45
Figura 8. Secciones en que se divide la infrutescencia.....	45
Figura 9. Proceso de extracción asistida por ultrasonido.....	48
Figura 10. Proceso de saponificación y lavado de la fase orgánica.....	49
Figura 11. PCA de las 11 muestras, cada una con tres réplicas.....	62
Figura 12. Espectro infrarrojo de los extractos de la infrutescencia de Carludovica palmata en diferentes etapas de maduración.	65
Figura 13. Cromatograma SIR por UPLC -MS del patrón de capsorrubina.....	68
Figura 14. Cromatograma SIR por UPLC -MS de la extracción a partir de la C. palmata.	69
Figura 15. Comparación de las etapas de maduración de la infrutescencia de la palma de iraca y capsorrubina.....	71

Apéndice

Apéndice A. Valores obtenidos de la extracción asistida por ultrasonido para las infrutescencias de <i>C. palmata</i>	82
Apéndice B. Fórmula para la cuantificación relativa por el método UV-VIS partiendo de la ecuación de Beer-Lambert.	83
Apéndice C. Cuantificación relativa de extractos de <i>C. palmata</i> por el método UV-VIS.....	83
Apéndice D. Análisis estadístico ANOVA para los resultados obtenidos por UV-VIS.	85
Apéndice E. Análisis estadístico de comparaciones múltiples para los resultados obtenidos por UV-VIS.	85
Apéndice F. PCA Biplot de las muestras de los extractos de <i>C. palmata</i> en las longitudes de onda características de la capsorrubina.	85
Apéndice G. Cromatograma de HPLC-DAD para la curva de calibración del β -caroteno.....	87
Apéndice H. Gráfica de la curva de calibración del β -caroteno para cuantificación por HPLC-DAD.....	85
Apéndice I. Datos de la curva de calibración del β -caroteno por HPLC-DAD.....	86
Apéndice J. Cuantificación de extractos de <i>C. palmata</i> por HPLC-DAD.....	86
Apéndice K. Análisis estadístico ANOVA para los resultados obtenidos por HPLC-DAD.....	86

Apéndice L. Análisis estadístico de comparaciones múltiples para los resultados obtenidos por HPLC-DAD	86
---	----

Resumen

Título: Análisis cuantitativo de capsorrubina presente en el fruto de la palma de iraca (*Cardulovica palmata*) y su correlación con la etapa de maduración*

Autor: Ilanyth Jhoanna Medina Chivata**

Palabras clave: Capsorrubina, Palma de iraca, Cromatografía (HPLC-DAD, UPLC-MS), Maduración de frutos

Descripción:

Carotenoides como la capsorrubina son compuestos bioactivos reconocidos por sus importantes propiedades antioxidantes y su potencial beneficio para la salud, siendo de interés para el desarrollo de alimentos funcionales. La infrutescencia de la palma de iraca (*Carludovica palmata*), actualmente un residuo utilizado principalmente para compost, representa un subproducto infrautilizado que podría ser una fuente no convencional de estos valiosos compuestos. Esta investigación tuvo como objetivo analizar la relación entre la maduración de la infrutescencia de *Carludovica palmata* y la cantidad de capsorrubina presente en ella. Para ello, se realizaron extracciones asistidas por ultrasonido y se emplearon métodos analíticos como espectrofotometría UV-VIS, FT-IR, HPLC-DAD y UPLC-MS para la caracterización y cuantificación del pigmento. Los análisis mostraron que la concentración de capsorrubina aumenta significativamente a medida que el fruto madura. Se observaron diferencias notables en la cuantificación entre UV-VIS y HPLC-DAD; UV-VIS reportó valores de $52,146 \pm 0,521 \mu\text{g/g}$ en la etapa verde del fruto, en la etapa intermedia se obtuvieron valores desde $101,962 \pm 0,334$ hasta $107,494 \pm 1,017 \mu\text{g/g}$ y en la etapa madura la cantidad de capsorrubina osciló valores entre $181,835 \pm 0,825$ hasta $209,824 \pm 1,795 \mu\text{g/g}$. Por otra parte, los valores obtenidos por HPLC-DAD en la etapa inicial (verde) fueron de $12,403 \mu\text{g/g}$, en la etapa intermedia la concentración encontrada varió desde $23,531 \mu\text{g/g}$ hasta $25,900 \mu\text{g/g}$ y, en la etapa madura, los valores transcurrieron desde $67,204 \mu\text{g/g}$ hasta $70,846 \mu\text{g/g}$. De lo anterior, es de resaltar que la infrutescencia madura de la palma de iraca posee niveles significativos de capsorrubina, un carotenoide bioactivo de interés. Este hallazgo resalta la utilidad potencial del fruto, actualmente considerado un residuo, como una fuente viable para la obtención de capsorrubina, abriendo nuevas oportunidades para su valorización y aplicación en la industria de alimentos funcionales dentro de un esquema de economía circular.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias, Escuela de Química. Director: William Hidalgo Bucheli.

Abstract

Title: Quantitative analysis of capsorubin present in the fruit of the iraca palm (*Cardulovica palmata*) and its correlation with the ripening stage*

Author: Ilanyth Jhoanna Medina Chivata**

Keywords: Capsorubin, Iraca palm, Chromatography (HPLC-DAD, UPLC-MS), Fruit ripening

Description:

Carotenoids, such as capsorubin, are bioactive compounds recognized for their significant antioxidant properties and potential health benefits, making them of interest for the development of functional foods. The infructescence of the Iraca palm (*Carludovica palmata*), currently a residue primarily used for compost, represents an underutilized byproduct that could be an unconventional source of these valuable compounds. This research aimed to analyze the relationship between the maturation of *Carludovica palmata* infructescence and the amount of capsorubin present within it. To achieve this, ultrasound-assisted extractions were performed, and analytical methods such as UV-VIS spectrophotometry, FT-IR, HPLC-DAD, and UPLC-MS were employed for the characterization and quantification of the pigment. The analyses showed that the concentration of capsorubin increases significantly as the fruit matures. Notable differences in quantification were observed between UV-VIS and HPLC-DAD; UV-VIS reported values of 52.146 ± 0.521 $\mu\text{g/g}$ in the green stage of the fruit, in the intermediate stage values ranging from 101.962 ± 0.334 to 107.494 ± 1.017 $\mu\text{g/g}$ were obtained, and in the mature stage, the amount of capsorubin ranged from 181.835 ± 0.825 to 209.824 ± 1.795 $\mu\text{g/g}$. On the other hand, the values obtained by HPLC-DAD in the initial (green) stage were 12.403 $\mu\text{g/g}$, in the intermediate stage the concentration found varied from 23.531 $\mu\text{g/g}$ to 25.900 $\mu\text{g/g}$, and, in the mature stage, the values ranged from 67.204 $\mu\text{g/g}$ to 70.846 $\mu\text{g/g}$. From the above, it is noteworthy that the mature infructescence of the Iraca palm possesses significant levels of capsorubin, a bioactive carotenoid of interest. This finding highlights the potential utility of the fruit, currently considered a residue, as a viable source for obtaining capsorubin, opening new opportunities for its valorization and application in the functional food industry within a circular economy framework.

* Degree Work

** Faculty of Sciences, Chemistry School. Director: William Hidalgo Bucheli.

Introducción

Los carotenoides son compuestos orgánicos liposolubles sintetizados por plantas, algas y algunos microorganismos, como bacterias y hongos. Estructuralmente hablando, estos pigmentos pertenecen a una extensa familia de terpenoides constituidos por un esqueleto principal de 40 carbonos y un sistema extendido de doble enlaces conjugados. (Fraser y Bramley, 2004) Así mismo, desempeñan funciones biológicas esenciales, tanto en organismos fotosintéticos como en aquellos que los consumen. En plantas, se localizan en los plástidos celulares, como los cloroplastos y cromoplastos, participando en procesos vitales como la captación de luz, la fotoprotección y la atracción de polinizadores. (Quian-Ulloa & Stange, 2021)

El descubrimiento y caracterización de los carotenoides ha avanzado progresivamente desde el siglo XIX, cuando los investigadores comenzaron a estudiar los compuestos responsables de la coloración de las plantas, identificando hasta la fecha más de 700 carotenoides en la naturaleza, los cuales aportan los tonos amarillos, naranjas y rojos característicos de frutas, verduras y flores. (Britton et al., 2004; Rodríguez-Amaya, 2015).

En cuanto al consumo de estos pigmentos naturales, estudios epidemiológicos han demostrado que los carotenoides contribuyen a la prevención de enfermedades crónicas, como el cáncer y las enfermedades cardiovasculares. (Krinsky & Johnson, 2005; Sies & Stahl, 2004).

En términos generales, varios estudios han reportado que dietas ricas en frutas y verduras se asocian con un menor riesgo de cáncer de pulmón, mama, próstata y vejiga. (Tanumihardjo, 2013; van Poppel et al., 1995). Por otro lado, en el campo cardiovascular, los carotenoides han mostrado efectos protectores mediante la reducción de la presión arterial, la mejora de la función

endotelial y el control de los niveles de lípidos sanguíneos (Sesso et al., 2005; Wang et al., 2006). Estos compuestos también juegan un papel clave en la fotoprotección ocular (Mares et al., 2006) y en la modulación de la función inmunitaria, (Hughes, 1999) lo que refuerza su importancia dentro de una dieta equilibrada basada en alimentos tales como vegetales, frutas y hortalizas.

En la actualidad, alrededor del 80-90% del suministro actual de carotenoides se satisface mediante síntesis química (Saini y Keum, 2019) En consecuencia, la cuota de mercado de los carotenoides naturales es considerablemente menor (24%) en comparación con los carotenoides sintéticos (76%) debido a sus altos costes (Market Research Report, 2016). De acuerdo con datos reportados por Mordor Intelligence, el valor de mercado relativamente bajo de los carotenoides sintéticos (250-2000 dólares kg^{-1}) parece ser uno de los principales factores que explican su enorme cuota de mercado, mientras que los carotenoides naturales de origen vegetal tienen un valor de mercado de 350-7500 dólares kg^{-1} (Mordor Intelligence, s.f). Sin embargo, cabe recalcar que, aunque el valor comercial de los carotenoides sintéticos sea asequible para la mayoría de compradores, no se asemeja a las propiedades, beneficios, y composición de los carotenoides extraídos a partir de materias primas naturales.

Debido a lo anterior, en los últimos años el enfoque de los científicos se ha inclinado a la búsqueda de especies vegetales no convencionales, que generen menores costos de producción y que, al mismo tiempo, ofrezcan características adecuadas para la extracción eficiente de carotenoides. Sus propiedades, naturaleza, bajo costo de obtención y amplia composición de elementos nutritivos, vitaminas, aceites, fibras y pigmentos (carotenoides) hace a especies vegetales, como *Cardulovica palmata* (o comúnmente conocida como palma de iraca), una opción favorable para el proceso de extracción. (Panesar et al., 2015) Esto se debe a su elevado contenido

de carotenoides y a su potencial para disminuir tanto los costos de obtención de materia prima como la generación de contaminantes durante la producción. (Murillo et al., 2021) Por ende, el presente trabajo tuvo como objetivo principal la extracción de carotenoides del fruto de la planta *Carludovica palmata* para el análisis de la relación existente entre la cantidad de capsorrubina presente en el fruto y la etapa de maduración en la que se encuentra, esto con el fin identificar en qué estado de maduración (verde, intermedio o maduro) se presenta la mayor concentración de capsorrubina. Este análisis permitirá optimizar los procesos de extracción, orientando las técnicas hacia el momento más adecuado del desarrollo del fruto para maximizar el rendimiento en la obtención de este pigmento. Además, los resultados contribuirán al desarrollo de metodologías más eficientes para la obtención de carotenoides, con potencial aplicación en diferentes industrias.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar la relación entre la maduración de la infrutescencia de la palma de iraca y la cantidad de capsorrubina presente en ella.

1.2 Objetivos específicos

Recolectar y clasificar la infrutescencia de la palma de iraca en diferentes etapas de maduración.

Identificar, cualificar y cuantificar la capsorrubina presente en el material biológico recolectado, mediante las técnicas UV-VIS, FT-IR, UPLC-MS y HPLC-DAD.

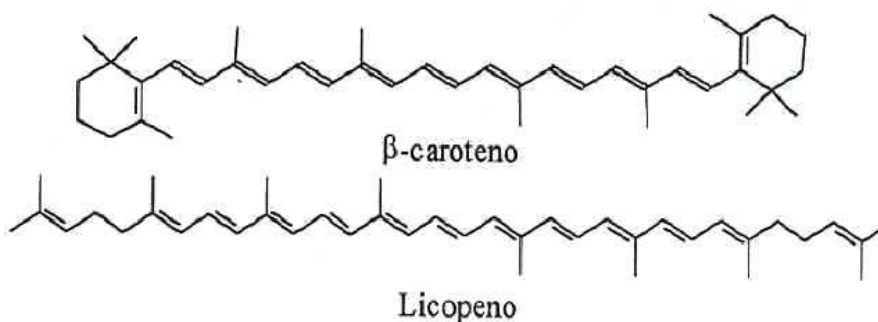
Determinar la correlación entre la cantidad de capsorrubina con el estado de maduración del fruto

2. Marco teórico

2.1 Descripción general de los carotenoides

Los carotenoides son compuestos naturales que se encuentran en una variedad de fuentes vegetales, así como en algunos microorganismos. En primer lugar, fueron descubiertos en el siglo XIX por Heinrich Wilhelm Ferdinand Wackenroder, quien los identificó en la zanahoria (Wackenroder, 1831). Posteriormente, se identificaron como los pigmentos responsables de los colores brillantes que se observan en frutas y verduras como zanahorias, tomates, y calabazas, y tienen un papel clave en el proceso de fotosíntesis de las plantas, por lo cual, los carotenoides son vitales para la vida de las plantas, ya que les permiten absorber la luz solar necesaria para la fotosíntesis, además de actuar como antioxidantes naturales que protegen las células vegetales de los daños causados por los radicales libres (Hashimoto et al., 2016; Nisar et al., 2015).

En términos químicos, los carotenoides pertenecen a la clase de compuestos conocidos como terpenos, formados por unidades repetidas de isopreno. Su estructura básica consiste en una cadena lineal de átomos de carbono e hidrógeno con enlaces dobles conjugados, lo que les permite absorber luz en el espectro azul-violeta, y es esta estructura la que les da sus colores vibrantes, de esta manera, los compuestos pueden tener diferentes estructuras dependiendo de la cantidad de átomos de carbono y la disposición de los enlaces dobles (Nisar et al., 2015); por ejemplo, el *beta-caroteno* o el *licopeno* (veáse en la **Figura 1**), son quizás de los carotenoides más conocidos, siendo el primero, un precursor de la vitamina A. Además de su coloración, los carotenoides tienen propiedades bioquímicas que los hacen cruciales para la salud humana. (Krinsky & Johnson, 2005).

Figura 1.*Betacaroteno y licopeno.*

Nota: Imagen tomada del artículo de Meléndez-Martínez *et al.* (2004)

Una de las propiedades más destacadas de los carotenoides es su capacidad para funcionar como antioxidantes, por un lado, esto significa que pueden neutralizar los radicales libres, moléculas inestables que pueden causar daño celular y están asociadas con el envejecimiento y el desarrollo de enfermedades crónicas, como enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer. (Krinsky & Johnson, 2005; Rao & Rao, 2007) Asimismo, algunos carotenoides, como el beta-caroteno, se convierten en vitamina A en el cuerpo humano, una vitamina esencial para la salud ocular y el sistema inmunológico. (Krinsky & Johnson, 2005) Por lo tanto, la importancia de los carotenoides no solo radica en su rol dentro de las plantas, sino también en sus beneficios para la salud humana, lo que los convierte en nutrientes valiosos que deben ser incluidos en la dieta.

A pesar de sus beneficios, los carotenoides son compuestos sensibles al calor, la luz y el oxígeno, lo que puede afectar su estabilidad en alimentos y su capacidad para proporcionar estos beneficios. Por ejemplo, la exposición prolongada a temperaturas altas o a la luz puede degradar los carotenoides y reducir su efectividad. (Boon *et al.*, 2010; Pénicaud *et al.*, 2011) Además, la

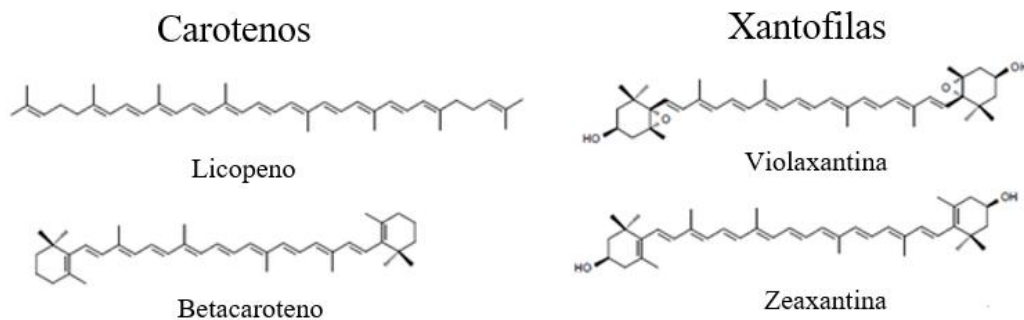
forma en que los carotenoides se encuentran en los alimentos puede influir en su absorción por el cuerpo. Por esta razón, la conservación adecuada de los alimentos ricos en carotenoides es esencial para mantener sus propiedades nutricionales, de acuerdo con esto, la madurez de los frutos y verduras puede influir en la cantidad y calidad de los carotenoides presentes, lo que demuestra la relación entre estos compuestos y las etapas de desarrollo de las plantas. (Liu et al., 2012)

2.2 Tipos de carotenoides

Los carotenoides se dividen principalmente en dos grandes grupos: los carotenos y las xantofilas. Los dos grupos son compuestos naturales que se encuentran en las plantas, pero tienen algunas diferencias estructurales y funcionales, por lo cual, los carotenos son una clase de carotenoides que no contienen átomos de oxígeno en su estructura química, mientras que las xantofilas sí lo tienen, de esta manera, las diferencias estructurales influyen en sus propiedades, su color y su función tanto en las plantas como en los seres humanos, estas diferencias se pueden observar en la **Figura 2**.

Figura 2.

Diferencias estructurales entre carotenos y xantofilas.



Nota: Realizada por el autor de este documento.

2.3. Capsorrubina

La capsorrubina es un carotenoide que pertenece al grupo de las xantofilas, que son compuestos que, a diferencia de otros carotenoides, contienen oxígeno en su estructura química. Estos pigmentos son los responsables de los colores amarillos, naranjas y rojos que se observan en diversas frutas y verduras, por lo cual, aunque la capsorrubina no es un precursor directo de la vitamina A, su función antioxidante es de gran importancia, ya que ayuda a neutralizar los radicales libres y protege a las células del daño oxidativo (Rodríguez-Amaya, 2016; Britton et al., 2008). Su presencia es especialmente notable en frutas como el pimiento rojo, donde no solo tiene un papel estético, sino que también contribuye a la defensa de la planta contra factores ambientales adversos como la radiación solar intensa, el estrés térmico, el déficit hídrico y el daño oxidativo inducido por patógenos o heridas (Álvarez Salas, 2015); asimismo, este carotenoide podría correlacionarse con el grado de maduración de ciertos frutos, de forma similar a lo reportado para otros pigmentos en diferentes frutos y verduras (Azcón-Bieto & Talón, 2013).

2.3.1. Descubrimiento de la capsorrubina

El descubrimiento de la capsorrubina se produjo en el contexto de la investigación de los pigmentos vegetales, particularmente los carotenoides presentes en plantas de interés alimenticio. De esta manera, fue identificada por primera vez gracias a los pioneros trabajos de Zechmeister y Chohnoky en la década de 1930. Utilizando cromatografía de adsorción sobre CaCO_3 , lograron aislar este compuesto a partir de extractos de pimentón, aunque con un rendimiento mínimo (0.003%) (Zechmeister & Chohnoky, 1936). Su metodología, basada en técnicas analíticas de la época (como degradación oxidativa y espectroscopía UV visible), permitió postular una estructura

preliminar con 9 dobles enlaces conjugados y una fórmula molecular errónea ($C_{40}H_{60}O_4$) (Britton et al., 1995). La corrección de esta fórmula llegó en 1957, cuando Chohnoky y Szabolcs demostraron que la estructura correcta era $C_{40}H_{56}O_4$, empleando técnicas avanzadas como polarimetría y comparación con estándares sintéticos (Chohnoky & Szabolcs, 1957). Este hallazgo reveló que la capsorrubina era un isómero funcional de la capsantina, diferenciándose en la posición de sus grupos cetona e hidroxilo (Rodríguez-Amaya, 2016).

2.3.2. Propiedades físicas y químicas

Este carotenoide xantofílico mayoritario en frutos maduros de *Capsicum*, destaca por sus propiedades únicas, avaladas por múltiples estudios científicos. Físicamente, se presenta como un sólido cristalino rojo, soluble en solventes orgánicos como acetona y cloroformo, pero insoluble en agua (Rodríguez-Amaya, 2016). Su estructura, determinada mediante difracción de rayos X por Maoka et al. (2001), reveló un sistema de 9 dobles enlaces conjugados y grupos funcionales cetona ($C=O$) e hidroxilo ($-OH$) (véase en la **Figura 3**), responsables de sus máximos de absorbancia entre 450–505 nm (Britton, 1995), lo que le confiere su coloración intensa y estabilidad térmica moderada ($<100^{\circ}C$). Sin embargo, Pérez-Gálvez et al. (2004) demostraron que es susceptible a degradación por luz UV y radicales libres, limitando su aplicación en sistemas no protegidos.

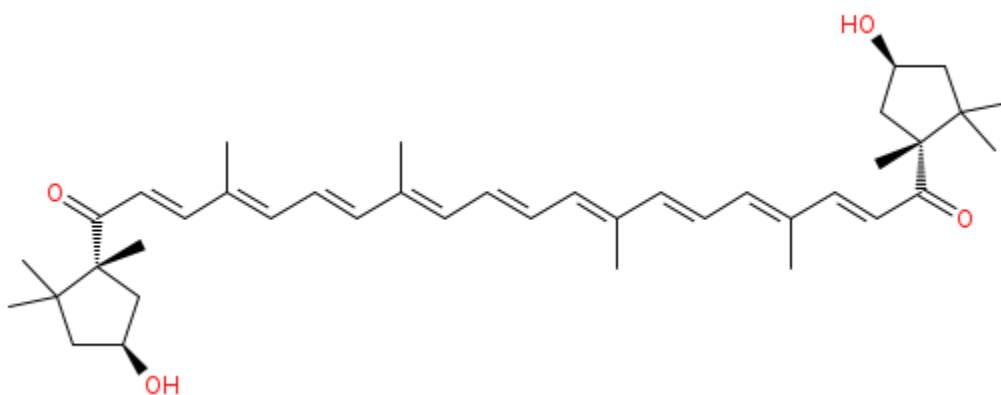
Químicamente, la capsorrubina exhibe una reactividad notable. Molnár et al. (2006) identificaron su capacidad para quelar metales y neutralizar especies reactivas de oxígeno (ROS), atribuida a sus grupos policetónicos. Esta propiedad se correlaciona con su elevada actividad antioxidante, cuantificada por Kim et al. (2016) mediante el ensayo ORAC (12,000 $\mu\text{mol TE/g}$), superando a antioxidantes como el α -tocoferol. Además, su polaridad, mayor que la de

carotenoides no oxigenados (como el β -caroteno), facilita su interacción con matrices lipídicas, aunque su biodisponibilidad en humanos es baja (<5%) sin la presencia de lípidos dietarios, como reportó Failla et al. (2014).

Biológicamente, la capsorrubina ha mostrado potencial terapéutico en estudios in vitro e in vivo. Lee et al. (2018) observaron que inhibe la producción de óxido nítrico (NO) y citoquinas proinflamatorias (TNF- α , IL-6) en macrófagos, mediante la supresión de la vía NF- κ B. En oncología, Park et al. (2019) demostraron su efecto apoptótico en células de cáncer de colon (HT-29), regulando las proteínas Bax/Bcl-2. Estos hallazgos sugieren aplicaciones en nutracéuticos y terapias coadyuvantes, aunque su uso industrial como colorante (E160c) ya está establecido (Fernández-García et al., 2012).

Figura 3.

Estructura química de la capsorrubina.



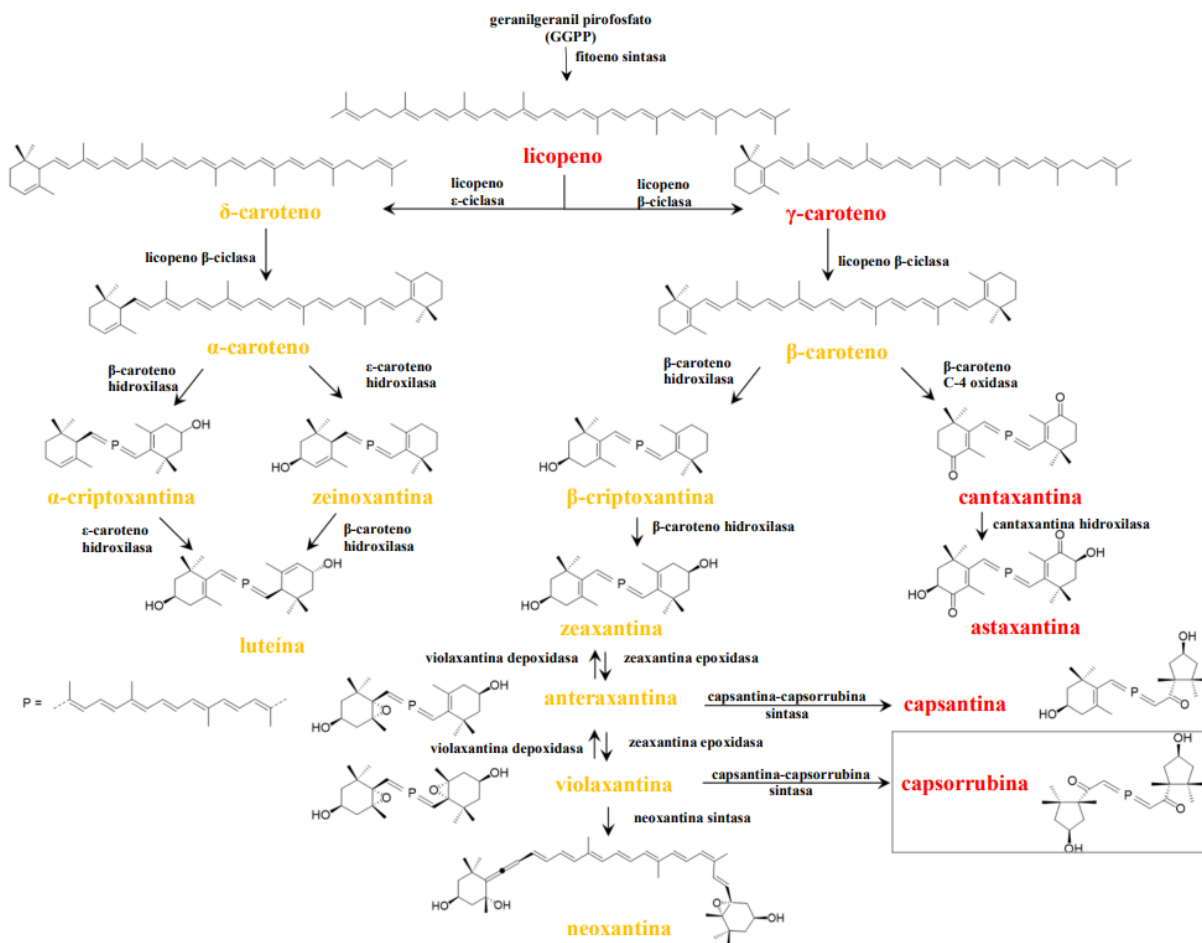
Nota: Elaboración propia.

2.3.3. Ruta de aparición de la capsorrubina

La biosíntesis de la capsorrubina en las plantas sigue una ruta específica dentro de los plástidos, donde los carotenoides se sintetizan a partir de la síntesis del geranylgeranyl pirofosfato (GGPP), un intermediario clave derivado de la ruta del metileritritol fosfato (MEP), activa en los plástidos. A partir del GGPP, la ruta continúa con la formación del fitoeno, que se convierte sucesivamente en fitoflueno, licopeno y otros carotenoides cíclicos como la capsantina y finalmente capsorrubina (veáse en la **Figura 4**). (Murillo *et al.*, 2024)

Figura 4.

Ruta de formación de la Capsorrubina.



Nota: Imagen modificada del artículo de Murillo *et al.* (2024)

La formación de este pigmento implica reacciones de oxigenación, lo que la clasifica dentro del grupo de las xantofilas. Aunque no se puede presentar una "secuencia biosintética" detallada en este contexto, es importante destacar que la formación de la capsorrubina es un proceso que depende de factores genéticos y ambientales. En este sentido, la intensidad de la coloración roja en los frutos, por ejemplo, está directamente relacionada con la cantidad de este pigmento presente (Bourmaud *et al.*, 2018).

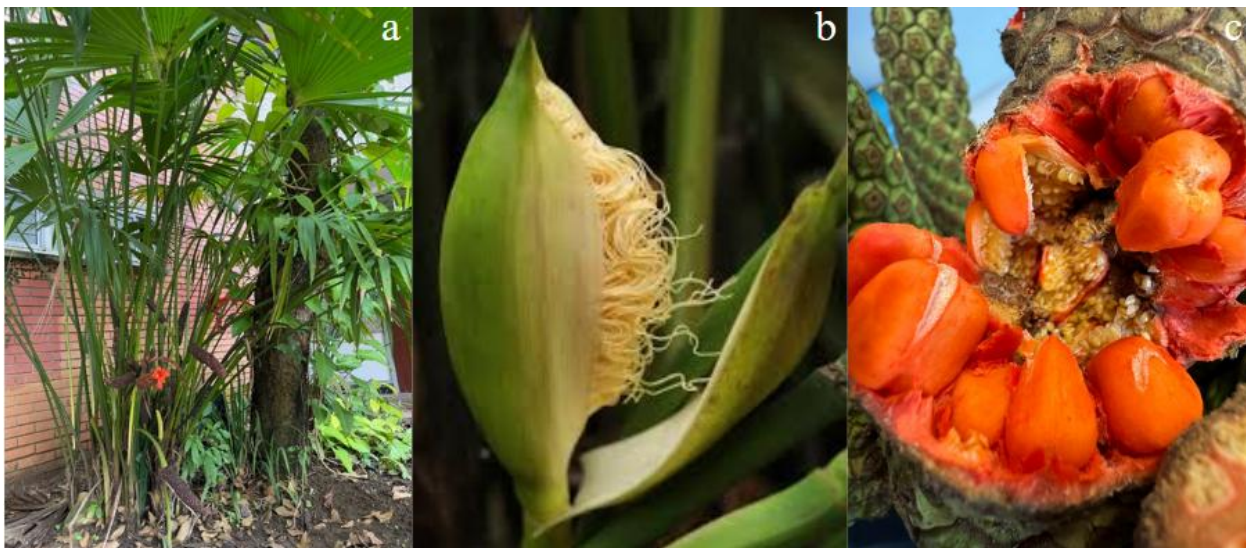
2.4. *Carludovica palmata* (palma de iraca)

2.4.1. Descripción general

Carludovica palmata (Cyclanthaceae), conocida comúnmente como palma de iraca o jipijapa, es una especie herbácea perenne nativa de la región neotropical, que se distribuye desde el sur de México hasta Ecuador, principalmente en bosques húmedos tropicales entre 0-1,500 msnm (Kew Science, s.f). Morfológicamente, esta especie se caracteriza por presentar hojas palmadamente lobuladas de 30-100 cm de diámetro, con venación paralela y pecíolos de 1-2 m de longitud (véase en la **Figura 1-a**) (National Parks Board, s.f.). Las inflorescencias, descritas en detalle por Hammel, B. E. (1986), consisten en espádices cilíndricos que contienen flores unisexuales agrupadas en espirales, donde las masculinas presentan numerosos estambres y las femeninas muestran estigmas sésiles (véase en la **Figura 1-b**). Los frutos son bayas carnosas de 1-2 cm que contienen semillas pequeñas (véase en la **Figura 1-c**) (<5 mm), dispersadas principalmente por fauna silvestre como murciélagos y aves frugívoras (National Parks Board Singapore, s.f.)

Figura 5.

Carludovica palmata.



Nota: Foto tomada por el autor de este documento.

2.4.2. Distribución geográfica de la siembra de la planta *Carludovica palmata* en Colombia

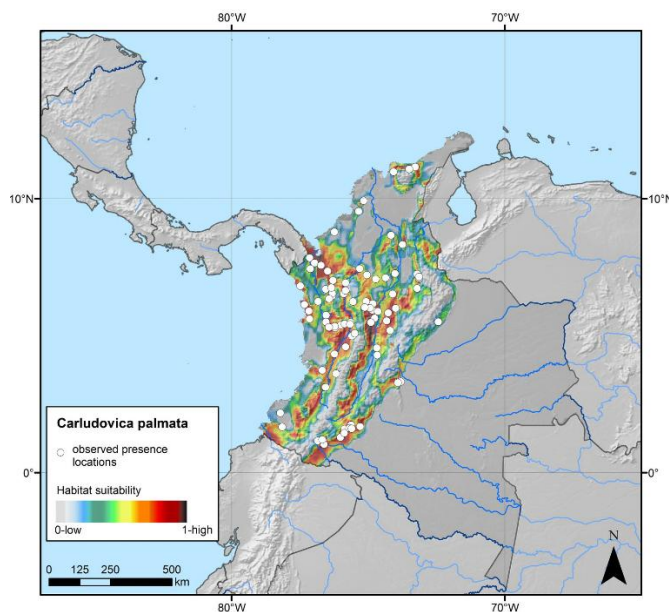
Carludovica palmata presenta una distribución característica en el territorio colombiano, concentrándose principalmente en tres regiones biogeográficas (véase en la **Figura 6**). Los registros de herbario y observaciones de campo indican que su presencia se limita a zonas con condiciones ambientales específicas.

En la región Andina, específicamente el departamento de Nariño, donde se desarrolla entre los 2,000 y 2,800 metros sobre el nivel del mar en bosques montanos húmedos (García *et al.*, 2018). En la región pacífica, particularmente en el departamento del Chocó, la especie habita zonas de bosque muy húmedo tropical con precipitaciones superiores a 4,000 mm anuales, mostrando preferencia por áreas cercanas a los ríos. Finalmente, en la región Caribe, se encuentran

poblaciones en la Sierra Nevada de Santa Marta, entre los 500 y 1,500 metros de altitud, asociadas a bosques nublados con alta humedad relativa (Cárdenas-López *et al.*, 2021)

Figura 6.

Ubicación en Colombia de la palma Carludovica palmata.



Nota: Datos tomados del Royal Botanic Gardens Kew (2025).

2.4.3. Usos comunes y económicos de *Carludovica palmata*

Su principal aplicación se centra en la elaboración de artesanías, donde las hojas jóvenes ("chupones") son procesadas mediante técnicas ancestrales para producir la reconocida "paja toquilla". Este material es la base para tejer los famosos sombreros de iraca (comercializados internacionalmente como "Panamá hat"), así como otros productos como cestas, abanicos y tapetes, que destacan por su finura y durabilidad (véase en la **Figura 7**) (García *et al.*, 2018).

La economía alrededor de la palma de iraca (*Carludovica palmata*) es significativa, especialmente en el departamento de Nariño. De acuerdo con el Informe de Gestión 2023 de Artesanías de Colombia, la cadena productiva de la iraca beneficia a numerosas familias, donde la actividad artesanal (centrada en el tejido de sombreros y otros productos) representa un eje económico fundamental, particularmente para las mujeres artesanas (Artesanías de Colombia, 2024). Otros usos incluyen aplicaciones en arquitectura vernácula, donde las hojas maduras se emplean como cubiertas para viviendas, y en medicina tradicional, donde infusiones de sus hojas se usan para aliviar afecciones digestivas (Torres et al., 2020).

En cuanto al comercio exterior, las exportaciones colombianas de artesanías alcanzaron un valor de USD 5,7 millones en 2022, dentro de las cuales se incluyen productos elaborados con palma de iraca. Estos representaron una porción relevante del total exportado, con categorías como cestería alcanzando el 19,6 % (ProColombia, 2024).

Figura 7.

Usos artesanales de la palma de Iraca.



Nota: Figura tomada de Artesanías Colombia (2025).

2.4.4. Estudios realizados alrededor de la palma de iraca

Los estudios iniciales sobre *Carludovica palmata* (Zambrano-Arteaga et al., 2020; Sánchez et al., 2021) se enfocaron en superar los desafíos de propagación mediante el desarrollo de protocolos de germinación in vitro y sistemas de inmersión temporal (Minchala-Buestán, 2022), logrando eficiencias superiores al 85% en producción de plántulas. Investigaciones paralelas (Moo-Huchin et al., 2019; Mora-Espinosa et al., 2021) demostraron las excepcionales propiedades mecánicas de sus fibras celulósicas, con resistencia a tracción de 45-60 MPa, lo que permitió su aplicación como refuerzo en biocompuestos.

El avance más actual en la investigación de esta especie ha sido el descubrimiento del potencial bioactivo de sus infrutescencias. Estudios recientes de Galviz-Quezada et al. (2019) han identificado altas concentraciones de compuestos fenólicos (112 mg GAE/g extracto) con notable actividad antioxidante (94% de inhibición DPPH), obtenidos mediante procesos de extracción ultrasónica optimizados. Complementariamente, los estudios de Murillo et al. (2021) han revelado que las infrutescencias poseen un perfil carotenogénico excepcional, destacándose la presencia de capsorrubina en concentraciones significativas (45 $\mu\text{g/g}$ peso seco), junto con otros carotenoides como β -caroteno (18 $\mu\text{g/g}$) y luteína (15 $\mu\text{g/g}$). Estos pigmentos naturales muestran una capacidad antioxidante específica contra radicales peroxilo, con valores ORAC que alcanzan los 1200 μmol de equivalentes de trolox por gramo, superando a muchas fuentes vegetales convencionales. La combinación de estos compuestos bioactivos en las infrutescencias sugiere posibles efectos sinérgicos que podrían potenciar sus propiedades biológicas.

2.4.5. Uso de las infrutescencias para obtener carotenoides

El fruto de la palma de iraca, que generalmente se desecha, representa una alternativa sostenible y económica para la obtención de carotenoides como la capsorrubina, por un lado, estos carotenoides naturales tienen ventajas significativas frente a los obtenidos de forma artificial, ya que los sintéticos no son tan saludables y pueden tener efectos secundarios a largo plazo; además, los carotenoides extraídos de materias primas como el tomate o el pimiento suelen ser excesivamente costosos debido a las complejidades en su cultivo y procesamiento, por lo tanto, aprovechar las infrutescencias de la palma de iraca no solo reduciría el desperdicio, sino que también permitiría obtener un producto de alta calidad a un costo competitivo, mejorando así las oportunidades económicas para las comunidades rurales que cultivan esta planta (Torres & González, 2018).

2.5 Etapa de maduración y su relación con el contenido de carotenoides

Durante el proceso de maduración de los frutos, se producen transformaciones fisiológicas y bioquímicas que influyen significativamente en la composición pigmentaria, particularmente en el contenido de carotenoides. Diversos estudios han demostrado que el contenido total de carotenoides aumenta progresivamente a lo largo de las diferentes etapas de maduración. Este incremento está asociado con la transición del estado inmaduro al estado completamente maduro del fruto, siendo más pronunciado en variedades rojas en comparación con las amarillas o verdes (Rahman, Buckle y Edwards, s.f.).

Durante la maduración, se produce una reorganización del sistema plastidial, caracterizada por la degradación de los cloroplastos y la formación de cromoplastos, lo cual facilita la

acumulación de carotenoides como α -caroteno y β -caroteno, considerados los principales pigmentos en frutos completamente maduros (Choo, s.f.). Este fenómeno está estrechamente vinculado a la carotenogénesis activa, la cual se intensifica con el avance del proceso de maduración.

En investigaciones realizadas con cultivares de *Capsicum annum*, se ha observado que, una vez iniciado el proceso de maduración, la biosíntesis de carotenoides se orienta exclusivamente hacia compuestos con anillos β , como β -caroteno, zeaxantina, capsantina y capsorrubina, entre otros. Esta transformación implica la desaparición de carotenoides con anillos ϵ , como la luteína, y refleja una actividad enzimática específica de las ciclohidasas que dirigen la síntesis hacia la serie β,β (Hornero-Méndez, Gómez-Ladrón de Guevara y Mínguez-Mosquera, s.f.).

En el caso específico de los pimientos jalapeños, se ha documentado un aumento significativo en el contenido total de carotenoides (TCC) desde las primeras etapas de maduración (frutos marrones) hasta la madurez avanzada (frutos 75% rojos), alcanzando valores de hasta 1178.4 $\mu\text{g/g}$ de peso seco. Este aumento está acompañado por una mayor diversidad de carotenoides detectados, aunque algunos como la violaxantina tienden a disminuir, mientras que otros como la capsantina y el β -caroteno muestran un patrón ascendente (Cervantes-Paz et al., s.f.).

2.6 Técnicas analíticas para el análisis cuantitativo y cualitativo de capsorrubina en extractos de infrutescencias

2.6.1 UV-VIS

La espectroscopía ultravioleta-visible (UV-VIS, ultraviolet-visible spectroscopy) se basa en la absorción de radiación electromagnética en el rango ultravioleta y visible por parte de una muestra, lo que provoca transiciones electrónicas en los enlaces o átomos de la molécula. La técnica consiste en hacer pasar un haz de luz a través de la muestra y medir la cantidad de luz absorbida a longitudes de onda específicas, generando un espectro que refleja las transiciones electrónicas características de los compuestos presentes. Dado que las transiciones electrónicas para cada molécula dependen de su estructura química, cada compuesto exhibe un espectro con bandas de absorción específicas. La presencia de estas bandas en longitudes de onda características permite identificar la presencia de ciertos compuestos, mientras que la intensidad de las bandas está relacionada con la concentración de los mismos en la muestra, siguiendo la Ley de Beer-Lambert (Skoog, Holler & Crouch, 2018). El espectro de UV-VIS es la representación de la absorbancia de la muestra en función de la longitud de onda. Las variaciones en las posiciones y formas de las bandas de absorción se deben a la estructura química del compuesto y a su entorno, lo que permite identificar no solo la presencia de ciertos compuestos, sino también obtener información sobre su concentración y pureza. Por esta razón, el UV-VIS es ampliamente utilizado para la cuantificación de compuestos como los carotenoides, que presentan bandas de absorción características en el rango visible (entre 400 y 500 nm), lo que facilita su identificación y medición precisa (Britton, 1995).

2.6.2. FT-IR

La espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR, Fourier-transform infrared spectroscopy) se basa en la absorción de radiación infrarroja por parte de una muestra, lo que provoca vibraciones moleculares características de los enlaces químicos presentes. La técnica consiste en irradiar la muestra con un haz de luz infrarroja y medir la intensidad de la radiación absorbida en función del número de onda, generando un espectro que refleja las frecuencias de vibración de los grupos funcionales. Dado que las vibraciones de los enlaces químicos para cada molécula son únicas, cada compuesto exhibe un espectro característico con bandas de absorción específicas. La presencia de estas bandas en posiciones características permite identificar la presencia de grupos funcionales o compuestos específicos, mientras que la intensidad de las bandas está relacionada con la concentración de los mismos en la muestra (Stuart, 2004).

La espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR, Fourier-transform infrared spectroscopy) se basa en la absorción de radiación infrarroja por parte de una muestra, lo que provoca vibraciones moleculares características de los enlaces químicos presentes. La técnica consiste en irradiar la muestra con un haz de luz infrarroja y medir la intensidad de la radiación absorbida en función del número de onda, generando un espectro que refleja las frecuencias de vibración de los grupos funcionales. Dado que las vibraciones de los enlaces químicos para cada molécula son únicas, cada compuesto exhibe un espectro característico con bandas de absorción específicas. La presencia de estas bandas en posiciones características permite identificar grupos funcionales o compuestos específicos, mientras que la intensidad de las bandas está relacionada con la concentración de los mismos en la muestra (Stuart, 2004).

En el caso de pigmentos como los carotenoides, el análisis por FT-IR permite identificar características estructurales particulares, debido a su sistema conjugado de dobles enlaces y grupos funcionales asociados. Los carotenoides, incluyendo la capsorrubina, presentan bandas de absorción típicas en las siguientes regiones: entre 3000–2800 cm^{-1} correspondientes a las vibraciones de elongación (stretching) de los enlaces C–H en grupos alquilo; alrededor de 1650–1550 cm^{-1} asociadas a las vibraciones de elongación de los enlaces C=C del sistema conjugado; y bandas en torno a 1000–950 cm^{-1} atribuidas a vibraciones de flexión (out-of-plane bending) de los enlaces C–H en alquenos trans (Socrates, 2001; Lin et al., 2015). Además, la presencia de grupos funcionales oxigenados en carotenoides oxigenados (xantofilas) como la capsorrubina puede generar señales adicionales, por ejemplo, bandas cerca de 1700 cm^{-1} correspondientes a vibraciones C=O de carbonilos.

El espectro de FT-IR, al representar la absorbancia o transmitancia de la muestra en función del número de onda, permite así no solo confirmar la presencia de los sistemas conjugados y grupos funcionales característicos de los carotenoides, sino también evaluar interacciones moleculares y cambios conformacionales en el pigmento, aspectos relevantes para su caracterización en matrices biológicas.

2.6.3. UPLC-MS

La cromatografía líquida de ultra alta resolución (UPLC, ultra-performance liquid chromatography) acoplada a espectrometría de masas (MS) se basa en la separación de los componentes de una mezcla mediante su interacción diferencial con una fase estacionaria y una

fase móvil a altas presiones, seguida de su identificación basada en la relación masa/carga (m/z) de los iones generados. La técnica consiste en inyectar la muestra en un sistema donde es transportada por una fase móvil a través de una columna packed con partículas de fase estacionaria de tamaño muy reducido (generalmente menores a $2\ \mu\text{m}$). Dado que los componentes de la muestra interactúan de manera diferente con la fase estacionaria, cada compuesto se eluye a un tiempo de retención característico, lo que permite su separación. Posteriormente, los compuestos separados son ionizados y detectados en función de su m/z , proporcionando información estructural adicional que facilita su identificación (Swartz, 2005).

El cromatograma obtenido es la representación de la señal del detector (típicamente absorbancia o intensidad de iones) en función del tiempo de retención. Las variaciones en los tiempos de retención y en las características espectrales (m/z , patrón de fragmentación) se deben a las propiedades químicas de los compuestos, como su polaridad, tamaño molecular, estructura y afinidad por la fase estacionaria, lo que permite identificar y cuantificar los componentes de la mezcla con alta resolución, sensibilidad y especificidad.

Por esta razón, la UPLC-MS es ampliamente utilizada para el análisis de compuestos complejos, como los carotenoides, ya que ofrece una separación eficiente en tiempos cortos, detección precisa a bajas concentraciones, y permite confirmar la identidad de los compuestos mediante su patrón de fragmentación característico (Nováková et al., 2006).

2.6.4. HPLC-DAD

La cromatografía líquida de alta resolución acoplada a un detector de arreglo de diodos (HPLC-DAD, high-performance liquid chromatography with diode-array detection) se basa en la separación de los componentes de una mezcla mediante su interacción diferencial con una fase estacionaria y una fase móvil, seguida de la detección simultánea de los compuestos separados utilizando un detector de arreglo de diodos. La técnica consiste en inyectar la muestra en un sistema donde es transportada por una fase móvil a través de una columna packed con partículas de fase estacionaria. Dado que los componentes de la muestra interactúan de manera diferente con la fase estacionaria, cada compuesto se eluye a un tiempo de retención característico, lo que permite su separación. El detector de arreglo de diodos mide la absorbancia de los compuestos en un rango de longitudes de onda, generando espectros UV-VIS que son únicos para cada compuesto (Snyder, Kirkland & Dolan, 2010). El cromatograma de HPLC-DAD es la representación de la señal del detector en función del tiempo de retención, mientras que los espectros UV-VIS proporcionan información adicional sobre la identidad y pureza de los compuestos. Las variaciones en los tiempos de retención y en los espectros de absorción se deben a las propiedades químicas de los compuestos, como su polaridad, tamaño y estructura molecular, lo que permite identificar y cuantificar los componentes de la mezcla con alta precisión. Por esta razón, el HPLC-DAD es ampliamente utilizado para el análisis de compuestos complejos, como los carotenoides, ya que combina una separación eficiente con la capacidad de obtener información espectral que facilita la identificación y cuantificación de estos pigmentos (Rivera & Canela-Garayoa, 2012).

2.6.5 Principales carotenoides aislados e identificados en la literatura

Con el fin de complementar la identificación y caracterización de los carotenoides presentes en los extractos de infrutescencias, se integraron los resultados obtenidos mediante las técnicas analíticas empleadas (UV-VIS, FT-IR, HPLC-DAD y UPLC-MS). Cada técnica aporta información específica relacionada con las propiedades estructurales y espectroscópicas de los compuestos analizados, permitiendo así una identificación más robusta y precisa.

En la siguiente tabla se resumen las principales señales características observadas para la capsorrubina y otros carotenoides relevantes, incluyendo los máximos de absorción en UV-VIS, las bandas de absorción en FT-IR, los iones moleculares ($[M+H]^+$) y fragmentos en MS, así como los tiempos de retención determinados por HPLC-DAD:

Tabla 1.

Propiedades cromatográficas, espectroscópicas UV-VIS, espectrometría de masas (APCI+) y de infrarrojo de los principales carotenoides aislados e identificados.

Carotenoide	$\lambda_{\text{máx}}$ (nm)	$[M+H]^+$ (m/z)	Patrón de fragmentación HPLC-MS/(APCI+) MS (m/z)	Señales principales IR (cm^{-1})
β-Caroteno	432, 454, 478	537.422	457.3 $[MH-80]^+$, 444.3 $[M-92]^+$, 413.3, 400.3, 177.1, 137.1	965 ($\gamma=C-H$), 1380 ($\delta C-H$), 1610 ($\nu C=C$), 2960 ($\nu_{\text{as}}CH_3$), 3030 ($\nu=CH$)
Luteína	421, 448, 472	5.694.124	551.4 $[M-18]^+$, 533.3 $[M-18-18]^+$, 495.4 $[M-18-56]^+$, 477.3 $[MH-92]^+$, 430.2 $[MH-139]^+$, 175.1, 135.1	965 ($\gamma=C-H$), 1044 ($\nu C=O$), 1377 (δCH_3), 1615 ($\nu C=C$), 2920 ($\nu_{\text{as}}CH_3$), 3015 ($\nu=CH$)

Zeaxantina	426, 450, 478	5.694.147	551.4 [M-18] ⁺ , 533.4 [M-18-18] ⁺ , 477.3 [MH-92] ⁺ , 416.2 [MH-153] ⁺ , 175.1, 135.1	965 (γ =C-H), 1044 (ν C=O), 1377 (δ CH ₃), 1615 (ν C=C), 2920 (ν asCH ₃), 3015 (ν =CH)
Violaxantina	414, 440, 468	6.014.015	583.3 [M-18] ⁺ , 565.3 [M-18-18] ⁺ , 521.3 [MH-80] ⁺ , 509.3 [MH-92] ⁺ , 221.1, 181.1	965 (γ =C-H), 1030 (ν C=O), 1100 (ν C-O), 1630 (ν C=C), 2850 (ν asCH ₃), 3410 (ν OH)
Anteraxantina	426, 450, 476	5.854.103	567.3 [M-18] ⁺ , 549.3 [M-18-18] ⁺ , 505.3 [MH-80] ⁺ , 493.3 [MH-92] ⁺ , 353.2, 181.1	965 (γ =C-H), 1035 (ν C=O), 1100 (ν C-O), 1610 (ν C=C), 2920 (ν asCH ₃)
Neoxantina	418, 442, 471	6.014.041	583.4 [M-18] ⁺ , 565.3 [M-18-18] ⁺ , 547.4 [MH-18-18-18] ⁺ , 521.3 [MH-80] ⁺ , 509.3 [MH-92] ⁺ , 393.2, 221.2, 181.1	965 (γ =C-H), 1046 (ν C=O), 1452 (δ CH ₃), 1616 (ν C=C), 2852 (ν asCH ₃), 3410 (ν OH)
Capsantina	474, 496	5.854.086	567.3 [M-18] ⁺ , 549.3 [M-18-18] ⁺ , 505.3 [MH-80] ⁺ , 493.3 [MH-92] ⁺ , 127.1, 109.1	964 (γ =C-H), 1049 (ν C=O), 1455 (δ CH ₃), 1583 (ν C=C), 1665 (ν C=O), 2870 (ν asCH ₃), 2920 (ν asCH ₂)
Capsorrubina	450, 474, 481	6.014.032	583.4 [M-18] ⁺ , 565.3 [M-18-18] ⁺ , 521.3 [MH-80] ⁺ , 509.3 [MH-92] ⁺ , 221.2, 181.2, 127.1, 109.1	961 (γ =C-H), 1051 (ν C=O), 1375 (δ CH ₃), 1544 (ν C=C), 1583 (ν C=O), 2873 (ν =CH ₂), 3433 (ν OH)

Nota: Adaptado de Feng et al., 2022.




3. Metodología


3.1. Selección de la materia prima

La recolección del material vegetal fue realizada por el Dr. Rodrigo Hoyos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (UNAL), en total fueron recolectadas cinco infrutescencias, cada una en una etapa de diferente maduración, las cuales se clasificaron de acuerdo a lo descrito en la siguiente tabla:

Tabla 2.

Clasificación por etapas de las muestras recolectadas.

Etapas	Descripción	Imagen
A	Infrutescencia inmadura color verde ligeramente oscuro, internamente poco carnosa y sin tejidos blandos.	
B	Infrutescencia intermedia color verde, levemente carnosa y con tejidos blandos de color anaranjado claro.	
C	Infrutescencia madura de color verde amarillento, con tejidos interno blando de color rojo intenso. (Abierta)	

D	Infrutescencia madura de color verde amarillento, con tejidos interno blando de color rojo intenso. (Cerrada)	
---	---	---

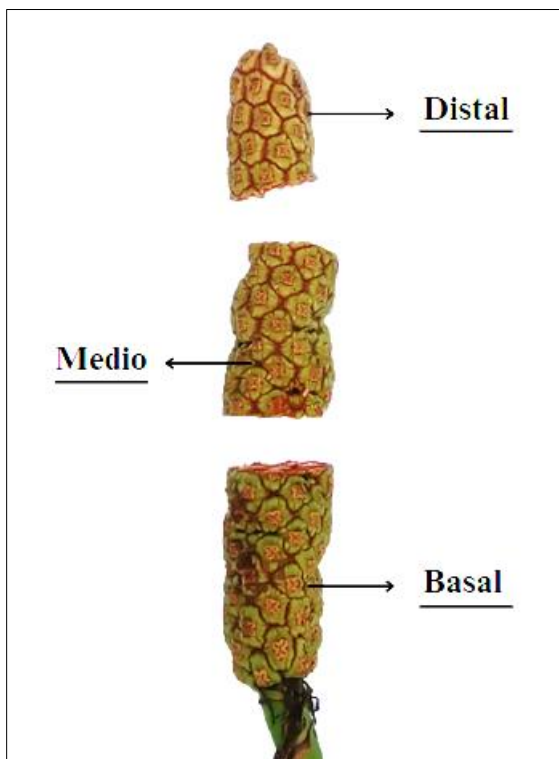
Nota: Elaboración propia.

La elección de la etapa de maduración de la infrutescencia se realizó de acuerdo con los parámetros elegidos en el documento de Hoyos y colaboradores (Hoyos et al., 2022).

Por otra parte, de las cinco muestras recolectadas, las muestras 1 y 2 fueron tomadas enteras (como muestra biológica completa), mientras que, las muestras de la 3 a la 5 fueron seccionadas en tres partes: basal, media y distal, dando en total 11 muestras para analizar. **(Figura 8)**

Figura 8.

Secciones en que se divide la infrutescencia.



Nota: Foto tomada por el autor de este documento.

3.2. Preparación y extracción de la muestra de la especie vegetal *C. palmata*

3.2.1. Maceración







Las infrutescencias en diferentes etapas de maduración fueron recolectados, seleccionados visualmente para descartar muestras en mal estado, y limpiados cuidadosamente con agua destilada para eliminar residuos de suciedad o material externo. Posteriormente, los frutos fueron cortados en pequeños fragmentos de tamaño uniforme, facilitando así un secado más eficiente. Los fragmentos obtenidos se colocaron en bandejas de acero inoxidable y se sometieron a un






precongelamiento a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Una vez congelados, los fragmentos fueron liofilizados en un equipo de congelación a vacío, hasta obtener un material completamente seco.

Las muestras previamente liofilizadas del fruto fueron maceradas en un mortero haciendo uso de nitrógeno líquido (con el fin de conservar los componentes de la infrutescencia) hasta alcanzar una consistencia uniforme y sin fragmentos grandes de fruto (véase en la **Tabla 3**). El procedimiento anterior, se llevó a cabo en condiciones de poca iluminación y un tiempo breve, con el objetivo de minimizar la degradación de los componentes de la infrutescencia. Posteriormente, el macerado obtenido fue colocado en tubos Falcon con capacidad de 20 mL, recubiertos con aluminio y almacenados en un congelador a una temperatura de -30°C hasta su posterior análisis.

Tabla 3.

Imágenes de cada una de las 11 muestras de interés después de la maceración.

Muestra 1. 	Muestra 2. 	Muestra 3. 
Verde entera (A)	Madura entera (D)	Basal abierta madura (C)
Muestra 4. 	Muestra 5. 	Muestra 6. 
Medio abierta madura (C)	Distal abierta madura (C)	Basal sin abrir madura (D)

Muestra 7. 	Muestra 8. 	Muestra 9. 
Medio sin abrir madura (D)	Distal sin abrir madura (D)	Basal color intermedio (B)
Muestra 10. 	Muestra 11. 	
Medio color intermedio (B)	Distal color intermedio (B ²)	

3.2.2. Proceso de extracción de la muestra

Parte a: Extracción con acetona asistida con ultrasonido.

La metodología utilizada para la extracción de la infrutescencia fue basada en la propuesta de Murillo et al., 2021, con algunas modificaciones. El proceso dio inicio con el pesaje de 1 g de la muestra del fruto en un tubo Falcon con capacidad de 25 mL. Luego, se le adicionaron 7 mL de acetona por cada gramo de muestra pesado. Posteriormente, se dispuso el tubo Falcon en el sonicador (Elmasonic Easy 30H, Signen, Alemania) a una temperatura de 25°C durante 25 minutos, con el fin de facilitar la liberación de los compuestos del macerado (véase en la **Figura 9**). Seguidamente, se centrifugó en la centrífuga compacta (HERMLE z206 A, Wehingen,

² Las letras en paréntesis indican la etapa de maduración en la que están clasificadas.

Alemania) durante 15 minutos a 3000 rpm lo que permitió separar las fases y obtener con mayor facilidad el sobrenadante (véase en la **Figura 9**). Finalmente, se dispuso el sobrenadante en un vial previamente pesado, recubierto con aluminio y se dejó secar a temperatura ambiente en una cabina de extracción.

Figura 9.

Proceso de extracción asistida por ultrasonido.



Fuente: Tomada por el autor de este documento.

Parte b: Saponificación.

La segunda parte de la extracción dio inicio con la adición de 2 mL de éter etílico y la saponificación con 1,5 mL de hidróxido de potasio KOH metanólico 0,5 M, el extracto se dejó en agitación durante 8 horas y, pasado el tiempo se adicionó 5 mL de éter etílico y 5 mL de acetato de etilo para llevarse a un embudo de separación, en donde, se realizaron lavados con una solución saturada de cloruro de sodio. Se recolectó la fase orgánica y se repitió el proceso de lavado hasta que el pH de la fase acuosa fuera neutro (siendo el pH inicial básico, entre 11-14). Una vez

recolectada la fase orgánica, se dispuso en un vial previamente pesado, se dejó secar a poca luz y se almacenó en una nevera a -20°C para su posterior análisis.

Figura 10.

Proceso de saponificación y lavado de la fase orgánica.



Fuente: Tomada por el autor de este documento.

3.3 Análisis comparativo y cuantificación del extracto obtenido de la infrutescencia mediante UV-VIS

Se preparó una solución con 2,0 mg de cada extracto obtenido de las infrutescencias y se disolvió en 1,0 mL de Etanol (grado HPLC). Posteriormente, se dispuso la dilución en una celda de cuarzo y se tomó el espectro UV-VIS haciendo uso del espectrofotómetro de doble haz (UV-1800 SHIMADZU, Kyoto, Japón), realizando un barrido desde 200 hasta 800 nm.

3.3.1. Análisis comparativo de los espectros UV-VIS obtenidos de las muestras biológicas

A partir de los datos obtenidos de los espectros UV-VIS de cada muestra, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) utilizando la plataforma de bioinformática MetaboAnalyst 6.0 (MetaboAnalyst, 2024). El PCA es una técnica estadística multivariada que permite reducir la dimensionalidad de grandes conjuntos de datos, conservando la mayor parte de la variabilidad original. Esto se logra mediante la transformación de las variables originales en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas, denominadas componentes principales. En el presente estudio, el PCA se empleó con el objetivo de identificar patrones, diferencias y similitudes en los perfiles espectrales de las muestras correspondientes a distintas etapas de maduración.

3.3.2. Cuantificación relativa de capsorrubina en los extractos vegetales

La cuantificación relativa de la capsorrubina presente en cada una de las once muestras se realizó mediante espectrofotometría UV-Vis, siguiendo la metodología descrita por Rodríguez-Amaya (2001). El procedimiento consistió en medir la absorbancia de las soluciones previamente obtenidas a la longitud de onda de máxima absorción característica de la capsorrubina. Para ello,

las muestras fueron disueltas en un solvente adecuado (etanol en grado HPLC) que permite una adecuada solubilización del carotenoide sin alterar su espectro de absorción.

La absorbancia (A) de cada extracto se registró utilizando una celda de cuarzo de 1 cm de paso óptico. Posteriormente, la concentración de capsorrubina en la solución se calculó empleando la ley de Beer-Lambert, según la ecuación 3:

$$x (\mu g) = \frac{A \cdot y (mL) \cdot 10^6}{A_{1cm}^{1\%} \cdot 100} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde x es la cantidad de capsorrubina en microgramos (μg), y el volumen de la solución en mililitros (mL) utilizado en la medición, y $A_{1cm}^{1\%}$ el coeficiente de absorción específico para capsorrubina, reportado en la literatura como 1353.3 para soluciones en solventes apolares (Britton, 1995).

$$x \left(\frac{\mu g}{g} \right) = \frac{x (\mu g)}{\text{peso de la muestra (g)}}$$

Ecuación 4

Este procedimiento permitió una comparación relativa de la concentración de capsorrubina entre las diferentes muestras. Cabe resaltar que, para asegurar la confiabilidad de los resultados, se trabajó bajo condiciones controladas de luz y temperatura, minimizando la degradación fotooxidativa de los carotenoides durante el proceso analítico.

3.4. Evaluación de las muestras por FT-IR

Se tomó aproximadamente 1 mg del extracto de la infrutescencia y se colocó en el módulo de reflexión total atenuada (ATR) de un espectrofotómetro infrarrojo (FT/IR-4X, Jasco Inc,

Japón), las muestras se midieron en un rango espectral de 4000 a 400 cm^{-1} . Para el análisis se empleó una resolución de 4 cm^{-1} y 20 barridos durante un tiempo estimado de 01:20 minutos.

Los espectros obtenidos mediante FT-IR fueron graficados utilizando la herramienta digital OriginPro en su versión 9. Así como identificar las principales diferencias entre cada una de las muestras evaluadas. Los datos cargados a MetaboAnalyst correspondieron a las matrices de absorbancia relativas a las bandas características de los grupos funcionales detectados en cada muestra.

3.5. Evaluación cualitativa por UPLC-MS

Previo al análisis por UPLC-MS, a todos los extractos obtenidos de la infrutescencia se les realizó un clean-up extracción en fase sólida (SPE), utilizando una columna de extracción LiChrolut RP-18 (100 mg fase sólida) la cual fue acondicionada siguiendo las instrucciones del fabricante (Merck). Posterior a ello, cada muestra del extracto vegetal (aprox. 2 mg) fue disuelta en una disolución 70:30 de Acetonitrilo:MeOH, se adicionó el cartucho de SPE y se pasó inicialmente un volumen de agua (tipo I). Luego, para recuperar la muestra de capsorrubina (y demás componentes del extracto), se pasó una solución de metanol acuoso (80% v/v, tres volúmenes). Finalmente, la fase orgánica se dejó evaporar a temperatura ambiente, bajo condiciones de oscuridad, para luego resuspender en 500 μL de MeOH (grado HPLC), se filtraron utilizando filtro PTFE hidrofílico (ALWSCI technologies) con tamaño de poro 0,22 μm .

La caracterización de los extractos de infrutescencias de *C. palmata* se realizó utilizando un sistema de cromatografía líquida de ultra alta resolución acoplado a espectrometría de masas (UPLC-MS). Se empleó un equipo Acquity UPLC H-Class Plus (Waters, Milford, MA, USA)

acoplado a un gestor de muestras FTN-H y un gestor de disolventes cuaternarios. La separación cromatográfica se llevó a cabo utilizando una columna Acquity UPLC® BEH C18 (1.7 μm , 2.1 \times 50 mm; Waters, Milford, MA, USA). La detección se efectuó mediante un espectrómetro de masas de simple cuadrupolo Acquity QDa (Waters, Milford, MA, USA). El análisis se realizó en modo de ionización positiva (ES+), con un voltaje de cono de 20 V, temperatura de fuente de 120 °C y energía del capilar de 0.80 kV. El sistema utilizó como fase móvil un gradiente constituido por solvente A (agua con 0,01 % de ácido fórmico) y solvente B (acetonitrilo al 100 %). El programa de gradiente consistió en una condición inicial de 70 % de solvente A y 30 % de solvente B, incrementándose linealmente hasta alcanzar 100 % de acetonitrilo entre el minuto 1 y el 17; posteriormente, entre los minutos 17 y 18, se restableció la condición inicial de 70 % de agua y 30 % de acetonitrilo. El flujo de fase móvil se mantuvo constante a 0.3 mL/min durante todo el análisis. El volumen de inyección fue de 2 μL y la temperatura de la columna se mantuvo a temperatura ambiente (26 °C).

La adquisición de datos de masas se realizó en un intervalo de 1 a 18 minutos, registrando un rango de masas de 70–700 m/z . El análisis de los extractos se llevó a cabo tanto en modo de escaneo completo (*Full scan*) como en modo de registro de iones seleccionados (SIR) para los iones de interés con m/z 287 y 601.

La adquisición de datos se obtuvo por el software MassLynx 4.2, seguidamente, se procesaron los datos utilizando el TargetLynx para obtener los cromatogramas de masas.

3.6. Evaluación cuantitativa por HPLC-DAD

Los extractos obtenidos de la infrutescencia fueron tratados mediante la extracción en fase sólida (SPE), utilizando como solvente MetOH y una columna de extracción LiChrolut RP-18. Una vez realizado el tratamiento de las muestras, se pesaron 2 mg del extracto seco, se le adicionaron 1 mL Metanol, obteniendo una concentración final de 2 mg/mL. Posteriormente, las muestras fueron filtradas haciendo uso de un filtro de jeringa de PTFE hidrofílico (ALWSCI technologies) con tamaño de poro 0,22 μm con anillo exterior.

Luego, se evaluaron las muestras por cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) haciendo uso de un cromatógrafo líquido de alta eficiencia (Agilent Technologies 1100, CA, USA), que consta de bomba cuaternaria Agilent Technologies con desgasificador, con precisión de flujo <0,3% RSD, pulsaciones <1%, rango de flujo programable constante de 1 mL/min, precisión de operación de 0-40 MPa y un detector UV-VIS con arreglo de diodos (DAD). El monitoreo de las señales se realizó en tres longitudes de onda específicas para el compuesto a analizar (210, 450 y 481 nm). La separación se llevó a cabo en una columna C₁₈ LiChrospher 100 RP-18, RT 250 mm, 4,6 mm (5 μm de tamaño de partícula), (Merck KGaA, Darmstadt, Alemania) utilizando como fase móvil solución de Metanol acuoso (88% v/v). El análisis se realizó en modo isocrático, con un tiempo de análisis de 30 minutos y volumen de inyección de muestra de 5 μL .

La cuantificación se realizó mediante estándar externo utilizando un patrón de beta-caroteno (>95% pureza HPLC), y se construyó una curva de calibración en un rango de concentración de 0,0025-0,04 mM, cubriendo las concentraciones esperadas de las muestras. Cada solución se inyectó por triplicado. Para la cuantificación de capsorrubina, se utilizó la ecuación de la recta de

la curva de calibración de beta-caroteno y se realizó la conversión al analito de interés asumiendo un factor de respuesta relativo (FRR) de 0,5 para la capsorrubina respecto al β -caroteno; lo anterior, fundamentado en la comparación de sus coeficientes de absorción molar para los dos compuestos.

Según lo reportado en el manual "A Guide to Carotenoid Analysis in Foods" de Delia B. Rodriguez-Amaya, el β -caroteno en etanol presenta un coeficiente de absorción de 2620 en su máxima de absorción a 450 nm, bajo condiciones de temperatura controlada (Rodriguez-Amaya, 2001). Por otro lado, en el artículo "Carotenoid profile of two capsorubin-rich tropical plants" de Murillo et al. (2021), la capsorrubina disuelta en etanol y medida a 455 nm mostró un coeficiente de absorción de 1353.3. Ambas mediciones fueron realizadas a longitudes de onda similares y bajo condiciones comparables, lo que permite establecer una relación directa entre las intensidades de absorción de ambos compuestos.

Dado que el coeficiente de absorción de la capsorrubina es aproximadamente la mitad del valor reportado para el β -caroteno bajo condiciones equivalentes (1353.3 frente a 2620), se asumió un factor de respuesta relativo de 0,5 para la capsorrubina en los análisis cromatográficos. Esta aproximación permite estimar cuantitativamente el contenido de capsorrubina utilizando una curva de calibración construida con β -caroteno, ajustando las áreas de los picos correspondientes por el FRR adoptado.

Aunque se reconoce que esta suposición introduce cierta incertidumbre debido a posibles diferencias en la respuesta del detector o en la linealidad fuera del rango evaluado, se considera una alternativa válida en ausencia de un estándar puro de capsorrubina.

3.6.1. Calibración y sensibilidad de los datos para la determinación de capsorrubina utilizando betacaroteno

La linealidad y sensibilidad del método cromatográfico se determinaron mediante la curva de calibración usando betacaroteno. El coeficiente de determinación (R^2) de la curva de calibración se utilizó como indicador de la linealidad del método. La sensibilidad se determinó con base en la pendiente de la recta con un nivel de confianza 0,995. En la ecuación 6 se observa una recta ajustada, donde A es la ordenada de origen y B la pendiente. Los valores A y B se determinaron, según Miller y Miller (Miller, J, Miller, 2002) (Ecuaciones 6 y 7), así:

$$y = A + BX \quad \text{Ecuación 5}$$

$$A = \bar{y} + B\bar{X} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$B = \frac{Q_{xy}}{Q_{xx}} = \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde: \bar{X} = promedio de los datos, \bar{y} = respuesta en cada punto, y_i =promedio respuesta de patrones.

Para A y B la incertidumbre se calculó, según Miller y Miller (Miller, J, Miller, 2002), de esta manera:

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}{m-2}} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$S_A = S_{y/x} \sqrt{\frac{1}{m} + \frac{\bar{x}^2}{Q_{xx}}} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$S_B = \frac{S_{y/x}}{\sqrt{Q_{xx}}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde \bar{y} = respuesta estimada en cada punto, y_i = respuesta experimental de cada sustancia patrón, m = número total de punto en la curva de calibración, $S_{y/x}$ = desviación estándar de residuos de la regresión lineal, S_A = incertidumbre de A, S_B = incertidumbre de B.

3.6.2 Determinación de los límites de detección y cuantificación del método cromatográfico

Los LOD y LOQ de la técnica cromatográfica se determinaron, usando las ecuaciones 11 y 12, respectivamente:

$$LOD = 3 \frac{S_y}{B} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$LOQ = 10 \frac{S_y}{B} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde: S_y = desviación estándar de residuos de la regresión lineal, B =pendiente de la curva.

4. Resultados y discusión

4.1. Porcentaje de rendimiento de las extracciones del fruto *C. palmata*

Los rendimientos de las extracciones realizadas en las infrutescencias de *Carludovica palmata* se calcularon utilizando la **ecuación 9**, la cual relaciona la cantidad de extracto resultante con la cantidad de material vegetal empleado.

$$\% \text{Rendimiento de la extracción} = \frac{\text{Peso del extracto obtenido (g)}}{\text{Peso del material vegetal fresco (g)}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 9}$$

En la **tabla 4**, se muestra los resultados obtenidos en el rendimiento de extracción posterior al proceso de saponificación de las muestras. Los resultados muestran una buena reproducibilidad y con rendimientos entre 3,33 y 3,89%, lo cual indica una eficiencia baja de extracción con el método de extracción por ultrasonido con acetona en fruto seco de *C. palmata*. Sin embargo, estos valores están en relación similar con los reportados para matrices vegetales similares ricas en carotenoides (Cano et al., 2018; Rodríguez-Amaya, 2001)

Tabla 4.

Porcentaje de rendimiento en la extracción posterior a la saponificación.

Muestra	Etapa	Peso inicial [g]	Rendimiento, % ± s (n=3)
Verde entera	A	1,0003	3,64 ± 0,025
Madura entera	D	1,0004	3,89 ± 0,030
Basal abierta madura	C	1,0003	3,42 ± 0,026
Medio abierta madura	C	1,0013	3,41 ± 0,021
Distal abierta madura	C	1,0003	3,73 ± 0,025
Basal cerrada madura	D	1,0014	3,44 ± 0,015
Medio cerrada madura	D	1,0014	3,42 ± 0,030
Distal cerrada madura	D	1,0014	3,37 ± 0,015

Basal intermedia	B	1,0014	3,54 ± 0,030
Medio intermedia	B	1,0013	3,33 ± 0,023
Distal intermedio	B	1,0013	3,51 ± 0,026

Nota: Elaboración propia

4.2 Identificación y cuantificación de capsorrubina por técnicas analíticas

4.2.1 Cuantificación relativa de capsorrubina en los extractos vegetales por UV-VIS

Los resultados obtenidos mediante espectrofotometría UV-Vis se encuentran reportados en la **Tabla 5**; los resultados muestran que el contenido de capsorrubina en las infrutescencias de *Carludovica palmata* varía significativamente en función de la etapa de maduración del fruto. La muestra inmadura (verde entera) registró la menor concentración del pigmento (52,146 µg/g de material fresco), mientras que las muestras completamente maduras (abiertas o sin abrir) alcanzaron valores cercanos a los 204 µg/g de material fresco. Esta tendencia indica una acumulación progresiva de capsorrubina a medida que avanza la maduración fisiológica del fruto, como ha sido ampliamente documentado para otros carotenoides en frutas tropicales (Rodríguez-Amaya, 2015; Goodwin, 1980).

El análisis estadístico mediante ANOVA evidenció diferencias altamente significativas entre los diferentes estados de maduración ($F = 5942$; $p < 0,0001$), confirmando que la variabilidad en la concentración de capsorrubina no es producto del azar, sino que está directamente relacionada con el grado de desarrollo del fruto (**Véase el Apéndice D**) Con el fin de profundizar dichas diferencias encontradas, se realizó un test de comparaciones múltiples (**Apéndice E**), cuyos resultados revelaron diferencias significativas ($p < 0.0001$) en todas las comparaciones de la etapa “verde” con los demás estados (maduros e intermedios). Entre los grupos maduros e intermedios,

se observaron variaciones significativas en la variable estudiada, sugiriendo una maduración no uniforme, diferencias inherentes a la posición de los frutos dentro de la estructura, o la presencia de otros carotenoides en las secciones.

Los valores obtenidos para las muestras de maduración intermedia (entre 101 y 107 $\mu\text{g/g}$) respaldan la idea de un proceso gradual de acumulación del pigmento, intermedio entre los estados inmaduros y maduros. Esta transición pigmentaria ha sido asociada en otras especies a cambios en la relación clorofila/carotenoide durante la maduración (Kays & Paull, 2004).

Al comparar los resultados obtenidos con los reportados por Murillo et al. (2024) en su estudio "Changes in the Carotenoids of *Zamia dressleri* Leaves during Development", se observa una concordancia significativa. En dicho estudio, el contenido de capsorrubina en el fruto de *Zamia dressleri* varía desde valores de 51 hasta 1233 $\mu\text{g/g}$ de material fresco. Aquí, el valor máximo encontrado (204 $\mu\text{g/g}$ de material fresco) concuerda con los reportes previos, considerando las diferencias metodológicas existentes.

Tabla 5.

Cuantificación relativa de capsorrubina en las muestras vegetales por UV-VIS.

Muestra	Etapas	Cantidad de capsorrubina ($\mu\text{g/g}$) \pm s
Verde entera	A	52,146 \pm 0,521
Madura entera	D	209,824 \pm 1,795
Basal abierta madura	C	184,483 \pm 1,372
Medio abierta madura	C	184,310 \pm 1,318
Distal abierta madura	C	204,265 \pm 1,622
Basal cerrada madura	D	185,604 \pm 1,006
Medio cerrada madura	D	186,438 \pm 1,482
Distal cerrada madura	D	181,835 \pm 0,825
Basal intermedia	B	107,273 \pm 0,789

Medio intermedia	B	101,962 ± 0,334
Distal intermedio	B	107,494 ± 1,017

Nota: Elaboración propia.

4.2.1.1 Análisis de componentes principales (PCA) a partir de los datos obtenidos por UV-VIS

El análisis de componentes principales (PCA) permitió establecer una clara diferenciación entre tres grupos de muestras, los cuales se distribuyen de forma definida dentro del espacio multivariado representado en el gráfico. En primer lugar, el grupo correspondiente al estado 1, es decir, las muestras verdes, se localiza en el extremo izquierdo de la gráfica, lo que sugiere que poseen características físico-químicas notablemente distintas en comparación con el resto de las muestras analizadas, y que reflejan su menor grado de madurez y posible menor contenido de carotenoides u otros metabolitos asociados al desarrollo de la infrutescencia. (Guavita., *et al*, 2018)

Por otro lado, en la zona central del gráfico se agrupan las muestras del 2 al 8, todas ellas correspondientes al estado maduro, tanto en su forma abierta como cerrada. La cercanía entre estas muestras dentro del espacio de componentes indica que comparten un perfil químico similar, aunque se perciben pequeñas variaciones internas que podrían estar vinculadas a diferencias sutiles en el grado de madurez, la exposición a la luz o la posición dentro de la infrutescencia. (Dalgo, Cuvi, & Guerrero, 2014) Esta agrupación sugiere un comportamiento homogéneo dentro del estado maduro, en línea con estudios previos que señalan cómo los carotenoides tienden a estabilizarse en etapas avanzadas del desarrollo. (Rodríguez-Amaya, 2001).

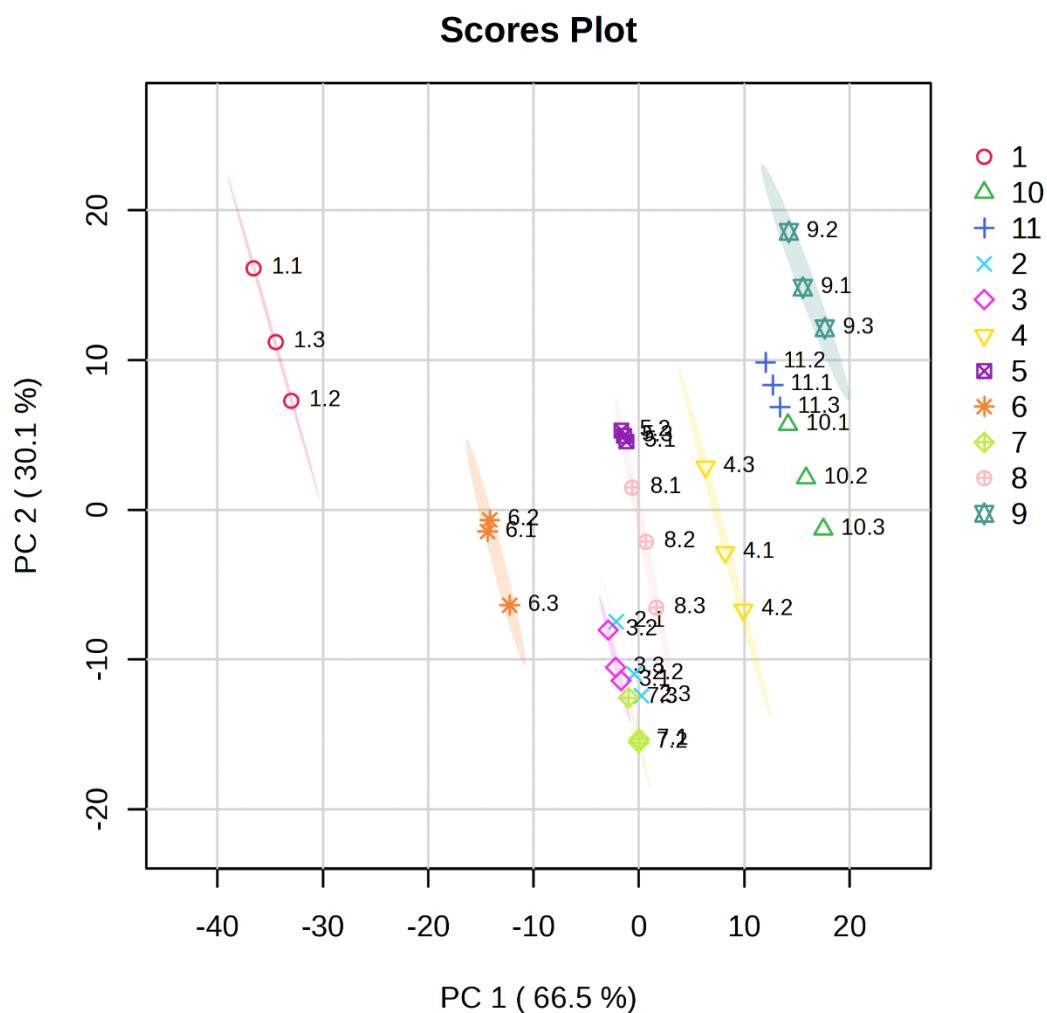
En la parte superior derecha del gráfico se sitúan las muestras 9, 10 y 11, que representan un estado intermedio de maduración. Este grupo aparece claramente separado tanto del grupo

verde como del grupo maduro, lo que evidencia que presenta un perfil químico propio, posiblemente caracterizado por una transición en la concentración de pigmentos como la capsorrubina, y otros compuestos que varían progresivamente con el avance de la madurez.

Con el fin de complementar el estudio, se realizó un análisis de componentes principales Biplot (**Apéndice F**), en el cual se evidenció una distribución clara de los estados de maduración en función de sus características espectrales, específicamente longitudes de onda propias de la capsorrubina. Los estados maduros se agruparon en la zona central del gráfico, lo que indica que comparten propiedades espectrales similares, particularmente en las regiones del espectro donde la capsorrubina presenta mayor absorbancia (450-550 nm). Los estados verdes por otra parte, permanecen separadas del grupo principal, mostrando así una composición química distinta, característica de los estadios tempranos de maduración donde aún predominan otros pigmentos y componentes. Finalmente, en los estados intermedios se observa una transición gradual en las propiedades espectrales acuñado al avance en el proceso de maduración.

Figura 11.

PCA de las 11 muestras, cada una con tres réplicas técnicas.



Nota: Imagen realizada en el software MetaboAnalyst.

4.2.2 Identificación mediante análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

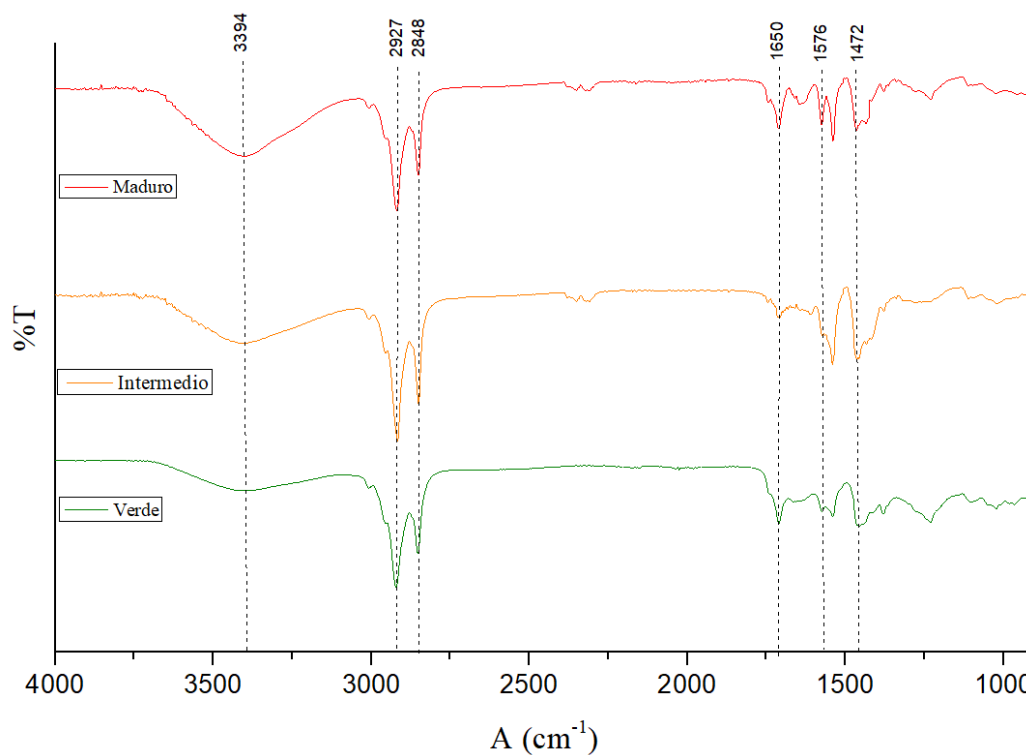
Los espectros de FTIR de los extractos obtenidos de los extractos de las infrutescencias de *Carludovica palmata* graficados en la **Figura 12**, mostraron bandas de frecuencia prominentes a 3394 cm^{-1} , correspondiente a las vibraciones de estiramiento O-H, característica de los grupos

hidroxilo presentes en el grupo de xantofilas. Asimismo, se registraron señales en 2927 cm^{-1} y 2848 cm^{-1} relacionadas al estiramiento C-H alifático de los grupos metileno ($-\text{CH}_2$) y metilo ($-\text{CH}_3$), comunes en la cadena hidrocarbonada de carotenoides. La banda en 1576 cm^{-1} , correspondiente al estiramiento C=C conjugado representa la presencia de un sistema extendido de enlaces dobles conjugados. Adicionalmente, la señal en 1472 cm^{-1} fue atribuida a la deformación angular de C-H en grupos metilo, presente en las estructuras terminales del carotenoide.

Estos resultados coinciden con los perfiles espectrales reportados por Lóránd et al. (2002), quienes en su estudio experimental identificaron bandas características de carotenoides oxigenados (capsorrubina y capsantina) en regiones similares, y con los cálculos teóricos realizados por Requena et al. (2008), quienes asignaron con precisión las frecuencias vibracionales de capsorrubina mediante teoría del funcional de la densidad (DFT). Según este último estudio, los modos vibracionales O-H y C=C en capsorrubina aparecen en las regiones de $\sim 3380\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$ y $1570\text{--}1580\text{ cm}^{-1}$, respectivamente, lo que concuerda estrechamente con los datos experimentales observados. Asimismo, se identificó una banda en 1650 cm^{-1} correspondiente al estiramiento C=O, en concordancia con el intervalo esperado ($1650\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$), lo que refuerza la asignación estructural propuesta.

Figura 12.

Espectro infrarrojo de los extractos de la infrutescencia de Carludovica palmata en diferentes etapas de maduración.



Nota: Imagen realizada por el autor de este documento.

Tabla 6.

Frecuencias experimentales obtenidas por el método de regresión de mínimos cuadrados y sus referencias teóricas correspondientes (cm⁻¹) de bandas en los espectros IR del extracto de la infrutescencia de Carludovica palmata.

Señales asociadas a la capsorrubina		
Experimental	Teórica (Requena <i>et al.</i> , 2009)	Señal
1472	1375	$\delta_s(CH_3)$
1576	1561	$\nu(C = C)$
1650	1646	$\nu(C = O)$
2848	2972	$\nu_{as}(CH_3, CH_2)$
2927		
3394	3433	$\nu(O - H)$

Nota: Elaboración propia.

4.2.3 Identificación de capsorrubina de las muestras obtenidas por cromatografía líquida de ultra rendimiento acoplado a masas (UPLC-MS/MS)

La presencia de capsorrubina en los extractos de *C. palmata* fue verificada mediante el análisis por UPLC-MS/MS en modo SIR (Selected Ion Recording), utilizando como guía un patrón estándar de referencia del compuesto “capsorrubina”. En la **Figura 13** se presenta el cromatograma de masas del patrón de capsorrubina, el cual mostró un tiempo de retención de 14,19 minutos, y en cuyo espectro de masas se observa un ion molecular predominante a m/z 601,47, el cual corresponde al ion $[M+H]^+$ de la capsorrubina ($C_{40}H_{56}O_4$; masa monoisotópica 600,41 uma). Este ion presenta una fragmentación característica con una pérdida de agua (-18 uma), generando un fragmento a m/z 583,46, lo que indica la presencia de grupos hidroxilo susceptibles de deshidratación, concordante con la estructura de capsorrubina que posee funciones oxigenadas en ambos extremos del sistema conjugado. (Jeknic et al., 2012; Rivera & Canela-Garaoya, 2012). Adicionalmente, se observaron fragmentos a m/z 127,1 y 109,1, productos de escisiones en las regiones terminales del cromóforo, probablemente derivados del rompimiento de los anillos β -ciclados. (van Breemen *et al.*, 2012)

Asimismo, se realizó la corrida cromatográfica bajo las mismas condiciones experimentales para el extracto de *C.palmata* (véase la **Figura 14**), obteniéndose un tiempo de retención muy similar (14,28 minutos), y la detección de los mismos iones de fragmentación característicos nombrados con anterioridad.

Los hallazgos son consistentes con lo reportado por Jeknic *et al.* (2012) y Feng et al. (2022), quienes también identificaron la capsorrubina utilizando técnicas de HPLC acoplada a

espectrometría de masas. En particular, el segundo estudio destaca la relevancia del ion 109,1 m/z como una señal distintiva, ya que este fragmento, junto con los de 601,4 m/z y 583,4 m/z , forma un perfil de fragmentación distintivo de la capsorrubina. Por tanto, la coincidencia tanto en el tiempo de retención como en los iones detectados entre el extracto, el patrón y los datos previos en la literatura, respaldan de forma sólida la identificación de este carotenoide como capsorrubina.

Figura 13.

Cromatograma SIR por UPLC -MS/MS del patrón de capsorrubina.

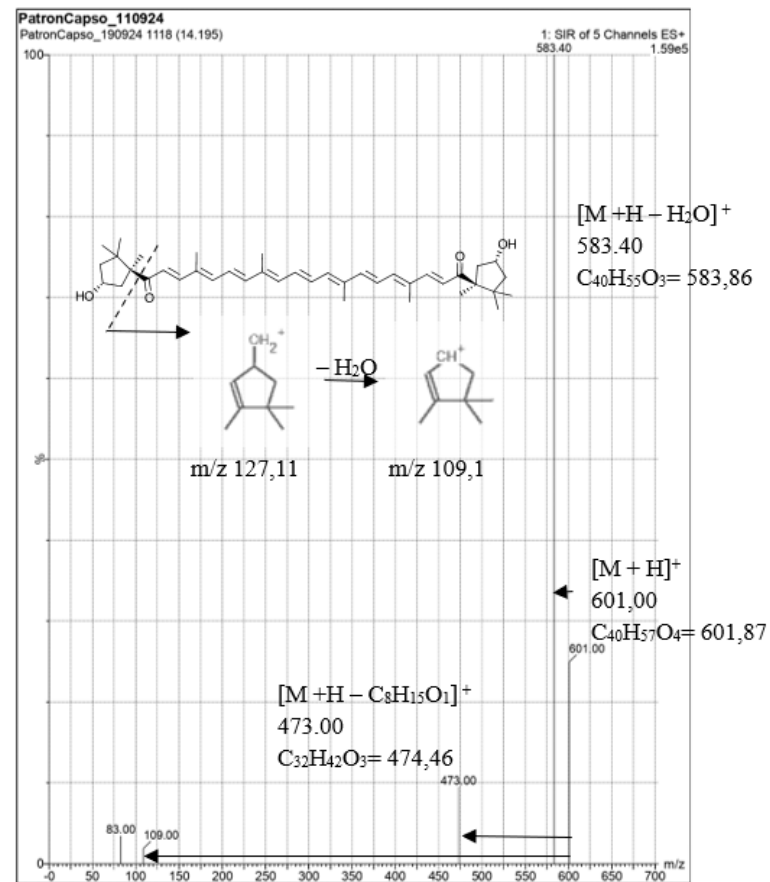
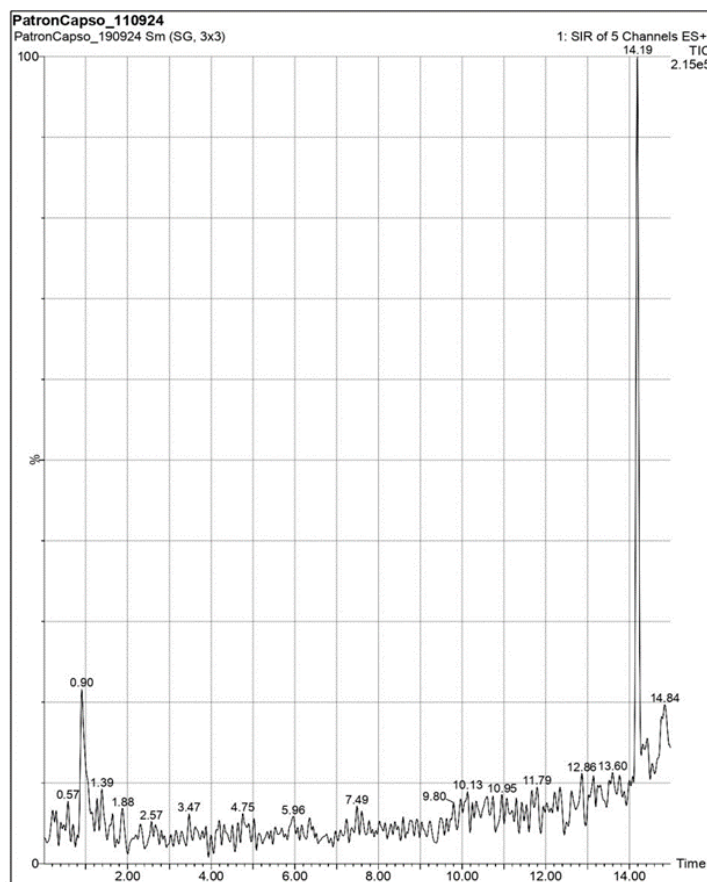
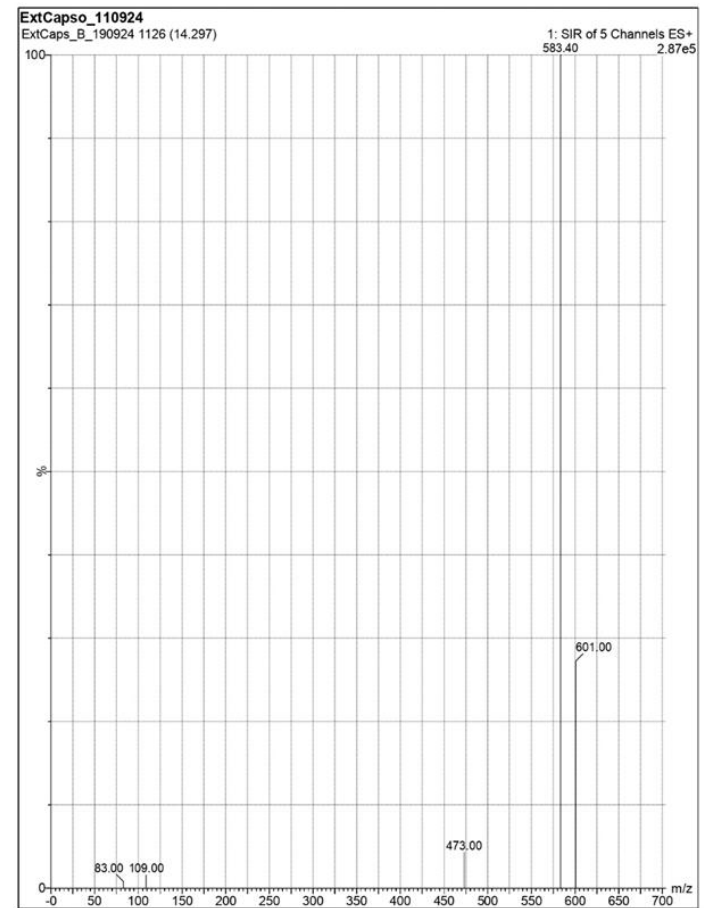
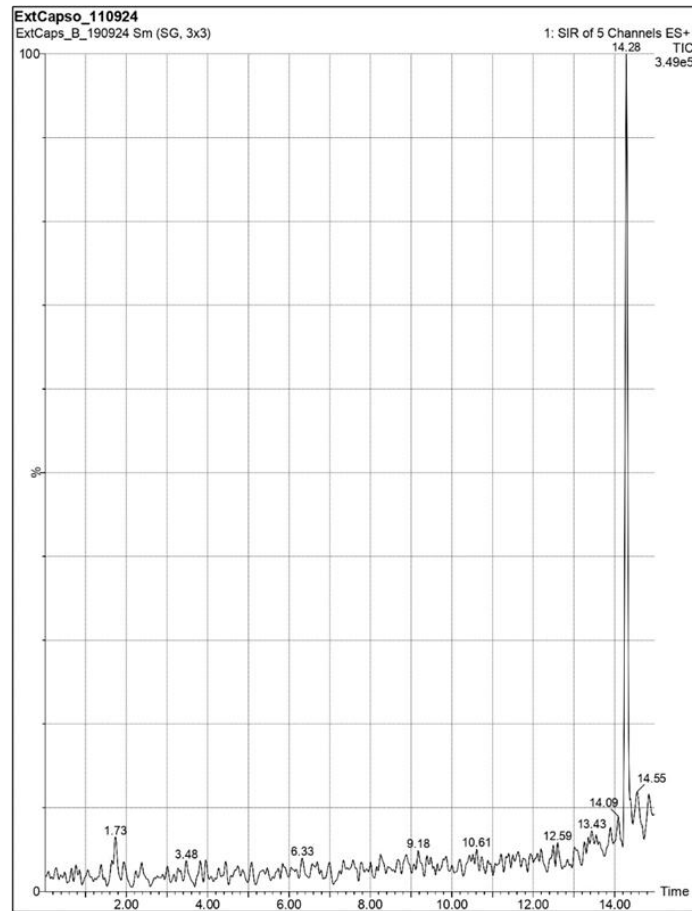


Figura 14.

Cromatograma SIR por UPLC -MS/MS del extracto vegetal C. palmata.



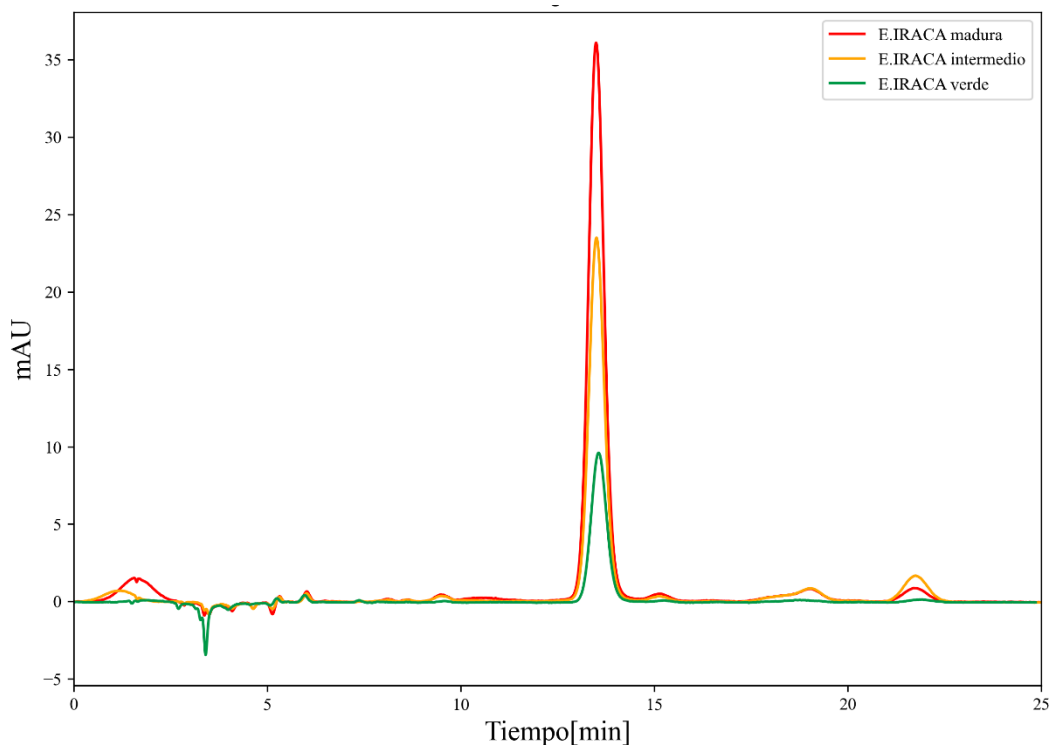
4.2.4 Identificación y cuantificación de capsorrubina por medio de HPLC-DAD

La capsorrubina fue identificada en los extractos de infrutescencia de *Carludovica palmata* mediante análisis por HPLC-DAD, sustentado en la comparación con datos previamente reportados en la literatura. En particular, el estudio realizado por Murillo et al. (2021) describe la presencia de este carotenoide en infrutescencias de la misma especie, con un tiempo de retención cercano al minuto 15 y una longitud de onda máxima de absorción de 451 nm, bajo condiciones cromatográficas específicas. En nuestro análisis, la señal correspondiente apareció en el minuto 13, lo cual podría atribuirse a diferencias en el tipo de columna utilizada, dado que el presente estudio empleó una columna C18 en lugar de una C30 como en el artículo citado. No obstante, la cercanía entre ambos tiempos de retención junto con la identificación realizada mediante UPLC-MS/MS respalda la presencia de capsorrubina en los extractos analizados.

En la **Figura 15** se aprecia el cromatograma de los extractos de *C. palmata* en los tres estados característicos del fruto: verde, intermedio y maduro. Se identifica un patrón claro de intensificación en la señal atribuida a la capsorrubina a medida que avanza el desarrollo del fruto. La señal correspondiente al pico de capsorrubina muestra una menor intensidad en la etapa verde, incrementa en la fase intermedia y alcanza su máximo en la etapa madura, lo cual sugiere una acumulación progresiva del carotenoide conforme progresa la maduración. Este comportamiento se encuentra respaldado por la literatura, donde se ha documentado una interacción creciente en el contenido de carotenoides de las frutas durante la maduración. (Meléndez-Martínez, Vicario, & Francisco, 2004)

Figura 15.

Comparación de las etapas de maduración de la infrutescencia de la palma de iraca y capsorrubina (2,0 mg/ml).



La concentración de capsorrubina se determinó mediante cromatografía líquida de alta resolución acoplada a un detector de arreglo de diodos (HPLC-DAD), empleando como referencia una curva de calibración externa basada en β -caroteno (**Apéndice E**). Los datos obtenidos se ajustaron a un modelo de regresión lineal (**véase en la Tabla 8**), y las concentraciones calculadas de los extractos se corrigieron mediante un factor de respuesta de 0,5 para compensar las variaciones en la respuesta espectral entre los distintos carotenoides. Este factor se estableció a partir de la relación entre los coeficientes de absorción específica ($A^{1\%}$) reportados en la literatura. De acuerdo con Rodríguez-Amaya (1999), el β -caroteno presenta un coeficiente de 2620 en etanol

a 450 nm, mientras que Murillo et al. (2021) determinaron un valor de 1353,3 para la capsorrubina bajo las mismas condiciones, lo que permitió establecer una correlación cuantitativa entre ambos compuestos.

En la **Tabla 7** se presenta la cuantificación de capsorrubina en microgramos por gramo de material fresco de las infrutescencias de *C. palmata* en diferentes estados de maduración. Inicialmente, se observa que la concentración más baja de capsorrubina se encuentra en el estado verde ($12,403 \pm 0,385 \mu\text{g/g}$). Esta observación de diferencias notables entre los estados de maduración es estadísticamente significativa, con base en los resultados obtenidos del Análisis de Varianza (ANOVA), el cual arrojó un valor de $p < 0,0001$ (**Véase en el Apéndice K**), indicando que existen diferencias significativas en la concentración de capsorrubina entre al menos uno de los estados de maduración.

Al examinar los estados intermedios, se aprecia un aumento considerable en la concentración de capsorrubina, oscilando entre $23,531 \pm 0,828$ y $25,900 \pm 1,432 \mu\text{g/g}$. Este incremento significativo desde el estado verde hasta los estados intermedios se confirma mediante el test de comparaciones múltiples (**Apéndice L**), donde todas las comparaciones entre el estado verde y los estados intermedios mostraron diferencias significativas (valor $p < 0,0001$).

Las concentraciones más elevadas de capsorrubina se encuentran en las infrutescencias clasificadas como maduras, tanto abiertas como cerradas, alcanzando valores de hasta $70,846 \pm 0,462 \mu\text{g/g}$. La significancia de estas diferencias entre el estado verde y todos los estados maduros también fue confirmada por el test de comparaciones múltiples (valor $p < 0,0001$ en cada caso). Este resultado sugiere que la acumulación principal de capsorrubina ocurre durante las etapas de

desarrollo previas a la madurez total, estabilizándose una vez alcanzada la maduración fisiológica, independientemente de si la infrutescencia está abierta o cerrada.

Por otro lado, la variación en la concentración de capsorrubina entre las diferentes secciones (basal, medio y distal) dentro de una misma etapa de maduración avanzada (maduro abierto y maduro cerrado) no presenta diferencias significativas, como se evidencia en los valores de p ajustado ($> 0,05$) obtenidos en el test de comparaciones múltiples para estas comparaciones (**Véase el apéndice L**). Esto respalda la hipótesis de una distribución homogénea del pigmento en las etapas finales de maduración. De manera similar, en el **Apéndice L** se detallan las comparaciones entre las secciones en el estado intermedio tampoco revelaron diferencias significativas (p ajustado $> 0,05$).

En conjunto, la evidencia proporcionada por el ANOVA y el test de múltiples comparaciones apoya firmemente la observación inicial del aumento sustancial de capsorrubina desde el estado verde hacia la madurez. Este patrón concuerda con el modelo de transición de plástidos de cloroplastos a cromoplastos (Giovannoni, 2007), donde la degradación de clorofilas se acompaña de una acumulación de carotenoides como la capsorrubina. Una vez que la infrutescencia alcanza la madurez, la concentración de este pigmento se estabiliza y se distribuye de manera uniforme a lo largo de la estructura.

Tabla 7.

Cuantificación relativa de capsorrubina en las muestras por HPLC-DAD.

Muestra	Etapa	μg de Capsorrubina/g de material fresco, valor \pm (n=3)
---------	-------	---

Verde entera	A	12,403 ± 0,385
Madura entera	D	68,956 ± 0,911
Basal abierta madura	C	69,328 ± 1,495
Medio abierta madura	C	68,951 ± 0,232
Distal abierta madura	C	67,204 ± 2,232
Basal cerrada madura	D	68,668 ± 0,232
Medio cerrada madura	D	69,529 ± 0,138
Distal cerrada madura	D	70,846 ± 0,462
Basal intermedio	B	23,531 ± 0,828
Medio intermedio	B	25,900 ± 1,432
Distal intermedio	B	24,931 ± 0,101

Nota: Elaboración propia.

4.2.4.1 Figuras de mérito

En la **Tabla 8** se muestran el límite de detección (LOD) con un valor de 2,852921 μM y el límite de cuantificación (LOQ) correspondiente a 9,509736 μM por el método de HPLC-DAD para la cuantificación de capsorrubina. El coeficiente de regresión lineal $R^2 = 0,994$ permite validar el análisis como un método lineal en el rango de concentraciones evaluadas (0,0025-0,04 mM) de la sustancia patrón (véase la curva de calibración en el **Apéndice H**), en este caso el β -caroteno.

Tabla 8.

Linealidad y sensibilidad determinadas por HPLC-DAD para la capsorrubina a partir de la curva de calibración del betacaroteno.

Carotenoide	Capsorrubina
Fórmula	$\text{C}_{40}\text{H}_{56}\text{O}_4$
Ecuación	$y = 60581x - 81,231$
Rango dinámico	0,0025-0,04
R^2	0,9937

S_A	57,6109308	
S_B	2790,44005	
μM	LOD	2,852921
	LOQ	9,509736

Nota: Elaboración propia.

4.4 Comparación entre las técnicas UV-VIS y HPLC-DAD utilizadas para la cuantificación relativa de los extractos de *C. palmata*

La cuantificación de capsorrubina en las infrutescencias de *C. palmata* mediante dos técnicas espectrofotométricas, UV-VIS y HPLC-DAD, reveló diferencias notables en las concentraciones obtenidas. Los resultados derivados de la espectrofotometría UV-VIS mostraron valores de concentración de capsorrubina considerablemente mayores en comparación con los obtenidos por HPLC-DAD. Esta disparidad se hace aún más evidente al considerar los valores de cuantificación obtenidos por cada método en las distintas etapas de maduración. Mientras que la espectrofotometría UV-VIS indicó un contenido de capsorrubina que aumentaba progresivamente de $52,454 \pm 0,521$ μg/g en frutos inmaduros a aproximadamente $204,722 \pm 1,622$ μg/g en frutos completamente maduros, el análisis por HPLC-DAD mostró un patrón similar de acumulación con la maduración, pero con valores absolutos significativamente menores, pasando de $12,403 \pm 0,385$ μg/g en el estado verde a concentraciones de hasta $70,846 \pm 0,462$ μg/g en infrutescencias maduras. Esta diferencia cuantitativa sustancial entre los métodos, particularmente en las etapas de madurez donde el UV-VIS reportó niveles considerablemente superiores (aproximadamente 208,387 μg/g frente a 70,846 μg/g por HPLC-DAD), sugiere que la espectrofotometría UV-VIS podría estar

sobreestimando la concentración real de capsorrubina. Esto probablemente se deba a que mide la absorbancia combinada de varios carotenoides presentes en el extracto cuyas absorbancias se solapan, y cuyas concentraciones relativas podrían variar ligeramente entre las secciones y etapas de maduración. (Hendry & Houghton, 1996) La capacidad del HPLC-DAD para separar individualmente los componentes antes de la detección permite una cuantificación mucho más específica y precisa de la capsorrubina, minimizando las interferencias de otros pigmentos y explicando por qué este método mostró homogeneidad en las secciones maduras/intermedias, mientras que el UV-VIS detectó diferencias estadísticas posiblemente influenciadas por la variabilidad de otros carotenoides co-extraídos a medida que avanza la maduración.

Más allá de la precisión analítica, la cantidad de capsorrubina encontrada en las infrutescencias maduras, que según el análisis por HPLC-DAD alcanza valores superiores a los 70 $\mu\text{g/g}$ de material fresco, es un hallazgo de considerable interés. La capsorrubina es un carotenoide que, al igual que otros carotenoides, es reconocido por ser un metabolito secundario bioactivo con importantes propiedades antioxidantes (Murillo *et al.*, 2021), antiinflamatorias y potencial en la prevención de diversas enfermedades crónicas. (Murakami *et al.*, 2000) Su capacidad para neutralizar radicales libres y modular respuestas celulares (Hirayama *et al.*, 1994) lo posiciona como un compuesto promisorio para ser incorporado dentro de las dietas como parte de los llamados alimentos funcionales.

La presencia de capsorrubina en la infrutescencia de la palma de iraca abre una ventana de oportunidad para darle una utilidad más allá de su destino actual como material de desecho o compost. Este fruto, actualmente subutilizado, podría ser valorizado como una fuente natural de un carotenoide bioactivo, explorando su potencial para la elaboración de extractos ricos en

capsorrubina o incluso su incorporación directa en productos alimenticios funcionales. Esto no solo añadiría valor económico a un subproducto agrícola, sino que también se alinearía perfectamente con los principios de la economía circular, transformando un desecho en un recurso valioso y contribuyendo a un aprovechamiento más sostenible de los cultivos de *C. palmata*. Así, la cuantificación de capsorrubina, subraya el potencial nutracéutico de este fruto y su posible rol en la cadena de valor agroindustrial.

5. Conclusiones

Aunque el método de extracción por ultrasonido con acetona presentó un rendimiento moderado (3,33–3,89%), su reproducibilidad y la consistencia con estudios previos en matrices vegetales similares respaldan su utilidad para este tipo de compuestos.

Este estudio logró recolectar y clasificar las infrutescencias de *Carludovica palmata* en diferentes etapas de maduración (verde, intermedia y madura), identificando y cuantificando exitosamente la capsorrubina mediante técnicas analíticas avanzadas. Los resultados demostraron que el contenido de este carotenoide varía significativamente con el grado de maduración, aumentando desde 12,4 $\mu\text{g/g}$ en frutos verdes hasta 70,8 $\mu\text{g/g}$ en frutos maduros, confirmado por análisis estadísticos robustos (ANOVA, $p < 0,0001$). Las técnicas espectroscópicas (UV-VIS, FT-IR) y cromatográficas (UPLC-MS/MS, HPLC-DAD) validaron la presencia estructural de capsorrubina, mostrando perfiles espectrales y de fragmentación característicos, con una clara correlación entre la madurez del fruto y la acumulación del pigmento.

Estos hallazgos destacan el potencial de *C. palmata* como fuente natural de capsorrubina, con aplicaciones prometedoras en la industria de alimentos funcionales y suplementos nutricionales, dada su alta concentración en etapas maduras y sus propiedades bioactivas. Futuras investigaciones podrían optimizar los métodos de extracción para mejorar el rendimiento, mientras que los datos obtenidos proporcionan una base valiosa para explorar el aprovechamiento sostenible de este recurso vegetal en estrategias de innovación alimentaria. La combinación de resultados analíticos, estadísticos y comparativos con literatura consolida este trabajo como un referente para estudios posteriores sobre carotenoides en especies tropicales.

Bibliografía

- Álvarez Salas, L. Á. (2014). Plantas promisorias de uso alimenticio del Darién, Caribe colombiano. *Boletín de Antropología Universidad de Antioquía*, 29(48), 41-65.
<https://doi.org/10.17533/udea.boan.v29n48a02>
- Armoza, A., Haim, Y., Bashiri, A., Wolak, T., & Paran, E. (2013). Tomato extract and the carotenoids lycopene and lutein improve endothelial function and attenuate inflammatory NF- κ B signaling in endothelial cells. *Journal of hypertension*, 31(3), 521–529.
<https://doi.org/10.1097/HJH.0b013e32835c1d01>
- Artesanías de Colombia. (2024). Informe de Gestión 2023. Recuperado el 19 de enero de 2025, de https://www.google.com/search?q=https://www.artesantiasdecolombia.com.co/Documents/Contenido/45101_info_gestion_v4_01022024_ajus_1_ventas_contratos.pdf
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal* (2a ed.). Barcelona: McGraw-Hill.
- Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2000). Types of Seed Dormancy. En *Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination* (cap. 3, pp. 27-47). Academic Press.
- Bennett, B. C., Alarcón, R., & Cerón, C. (1992). The ethnobotany of *Carludovica palmata* Ruiz & Pavón (*Cyclanthaceae*) in Amazonian Ecuador. *Economic Botany*, 46, 233-240.
<https://doi.org/10.1007/BF02866622>

- Boon, C. S., McClements, D. J., Weiss, J., & Decker, E. A. (2010). Role of iron and lipid oxidation in the degradation of carotenoids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(1), 49–55. <https://doi.org/10.1021/jf902951a>
- Bourmaud, A., Beaugrand, J., Shah, D. U., Placet, V., & Baley, C. (2018). Towards the design of high-performance plant fibre composites. *Progress in Materials Science*, 97, 347-408. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.05.005>
- Britton, G. (1995). Structure and properties of carotenoids in relation to function. *The FASEB Journal*, 9(15), 1551-1558. <https://doi.org/10.1096/fasebj.9.15.8529834>
- Britton, G., Liaaen-Jensen, S., & Pfander, H. (2004). *Carotenoids: Handbook*. Birkhäuser Basel. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7836-4>
- Britton, G. (2008). Functions of intact carotenoids. En *Carotenoids: volume 4: Natural functions* (pp. 189-212). Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7499-0_10
- Cholnoky, L., Szabó, D., & Szabolcs, J. (1957). Untersuchungen über Die Carotinoidfarbstoffe II. Die Struktur des Capsanthins und des Capsorubins. *Justus Liebigs Annalen der Chemie*, 606(1), 194-208. <https://doi.org/10.1002/jlac.19576060121>
- Dhole, S. M., Khedekar, P. B., & Amnerkar, N. D. (2012). Comparison of UV spectrophotometry and high performance liquid chromatography methods for the determination of repaglinide in tablets. *Pharmaceutical methods*, 3(2), 68–72. <https://doi.org/10.4103/2229-4708.103875>

- Failla, M. L., Chitchumronchokchai, C., Ferruzzi, M. G., Goltz, S. R., & Campbell, W. W. (2014). Unsaturated fatty acids promote bioaccessibility and basolateral secretion of carotenoids and α -tocopherol by Caco-2 cells. *Food & function*, 5(6), 1101-1112. <https://doi.org/10.1039/C3FO60599J>
- Fernández-García, E., Carvajal-Lérida, I., Jarén-Galán, M., Garrido-Fernández, J., Pérez-Gálvez, A., & Hornero-Méndez, D. (2012). Carotenoids bioavailability from foods: From plant pigments to efficient biological activities. *Food Research International*, 46(2), 438-450. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.06.007>
- Fraser, P. D., & Bramley, P. M. (2004). The biosynthesis and nutritional uses of carotenoids. *Progress in Lipid Research*, 43(3), 228-265. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2003.10.002>
- Galviz-Quezada, A., Ochoa-Aristizábal, A. M., Zabala, M.E.A., Ochoa, S., Osorio-Tobón J.F. (2019). Valorization of iraca (*Carludovica palmata Ruiz & Pav.*) infructescence by ultrasound-assisted extraction: An economic evaluation. *Food. Bioprod. Process.* 118,91-102. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.08.016>
- García, C. A., Bermúdez, J. L., Rodríguez, M. E., & Sánchez, A. H. (2003). Papel de los carotenoides en la protección ocular. *Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología*, 78(1), 25-29.
- García-Ramírez Y., Freire-Seijo M., Tejada M., & Reyes, M. 2007. Germinación in vitro de semillas de *Dentocalamus strictus* (Rosb.) Nees. *Bioteología Vegetal*, 7(1),41-44.

- Giovannoni, J. J. (2007). Fruit ripening mutants yield insights into ripening control. *Current opinion in plant biology*, 10(3), 283-289. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.04.008>
- Gómez, T. J., Sánchez, M. A., & Rivera, L. R. (2011). El manejo de semilla de *Carludovica palmata* Ruiz & Pav. (*Palma jipi*) para la producción de plantas. VI Reunión Nacional de Innovación Forestal, León, México.
- Gómez, M., Torres, L., & Salgado, L. (2011). Evaluación de carotenoides en frutos tropicales mediante espectrofotometría UV-VIS. *Revista Latinoamericana de Química*, 39(1), 62-70.
- Guzmán, J., & Rodríguez, P. (2019). Distribución y características ecológicas de la palma de iraca (*Carludovica palmata*) en Colombia. *Revista Colombiana de Botánica*, 28(1), 101-112.
- Grainger, D. W., et al. (2022). Dietary carotenoids and chronic disease prevention: Advances and perspectives. *Nutrients*, 14(6), 1205. <https://doi.org/10.3390/nu14061205>
- Grainger, D. W., et al. (2024). Carotenoids in plant biology: Function, biosynthesis, and applications. *Annual Review of Plant Biology*, 75(1), 101-128. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-041322-123456>
- Guavita-Vargas, J., Avellaneda-Torres, L. M., Solarte, M. E., & Melgarejo, L. (2018). Carotenoides, clorofilas y pectinas durante la maduración de variedades de guayaba (*Psidium guajava* L.) de Santander, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(2), 379–389. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i2.7898>
- Hammel, B. E. (1986). *Cyclanthaceae*. *Selbyana*, 9(1), 196–202. <http://www.jstor.org/stable/41888806>

- Hashimoto, H., Uragami, C., & Cogdell, R. J. (2016). Carotenoids and photosynthesis. *Subcellular Biochemistry*, 79, 111–139. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39126-7_5
- Harling, G., Wilder, G. J., & Eriksson, R. (1998). Cyclanthaceae. En K. Kubitzki (Ed.), *The families and genera of vascular plants. Flowering plants monocotyledons* (Vol. 3, pp. 202-215). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Hendry, G. A. F., & Houghton, J. D. (Eds.). (1996). *Natural food colorants*. Springer Science & Business Media.
- Hughes, D. A. (1999). Effects of carotenoids on human immune function. *Proceedings of the Nutrition Society*, 58(3), 713-718. <https://doi.org/10.1017/S0029665199000939>
- Hoyos Sánchez, R. A., Chicaiza Finley, D., & Zambrano Arteaga, J. C. (2020). In vitro multiplication of iraca palm (*Carludovica palmata* Ruiz & Pavón). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 73(1), 9039-9046. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v73n1.80139>
- Karrer, P., & Jucker, E. (1930). Über die Capsanthin- und Capsorubinfarbstoffe. *Helvetica Chimica Acta*, 13(1), 1030–1035. <https://doi.org/10.1002/hlca.193001301124>
- Kew Science. (s.f.). *Carludovica palmata* Ruiz & Pav. En *Plants of the World Online*. Royal Botanic Gardens, Kew. Recuperado el 19 de enero de 2025, de <https://powo.science.kew.org/taxon/297578-1>

- Krinsky, N. I., & Johnson, E. J. (2005). Carotenoid actions and their relation to health and disease. *Molecular Aspects of Medicine*, 26(6), 459–516. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2005.10.001>
- Li, X., Chen, B., & Zhang, X. (2019). Protective effects of carotenoids on cardiovascular health: A review. *Journal of Functional Foods*, 57, 430-439. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.04.040>
- Lin, Y., Ren, X., Wang, Z., & Wu, X. (2020). Protective effects of dietary carotenoids on cardiovascular health: Evidence from epidemiological studies. *Food Science & Nutrition*, 8(9), 5203-5219. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1840>
- Liu, C., Wang, Y., Lu, Y., & Zhang, Y. (2012). Influence of maturity on carotenoid content and antioxidant activity of yellow-fleshed kiwifruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(47), 11475–11481. <https://doi.org/10.1021/jf303361k>
- Madhulika, S., Jaiswal, U., & Jaiswal, V. S. (2000). Thidiazuron-induced in vitro flowering in *Dendrocalamus strictus* Nees. *Current Science*, 79(11), 1529-1530.
- Mares, J. A., LaRowe, T. L., Snodderly, D. M., et al. (2006). Predictors of optical density of lutein and zeaxanthin in retinas of older women in the Carotenoids in Age-Related Eye Disease Study, an ancillary study of the Women's Health Initiative. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 84(5), 1107–1117. <https://doi.org/10.1093/ajcn/84.5.1107>

- Market Research Report. (2016). Carotenoids market by type, application & geography – Global forecast to 2021. MarketsandMarkets. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/carotenoids-market-158421566.html>
- Martínez, H., Pérez, S., & Cuellar, F. (2017). La palma de iraca: características, cultivo y potencial económico. *Revista Agroforestal*, 21(3), 23-31.
- Meléndez-Martínez, A. J., Vicario, I. M., & Heredia, F. J. (2004). Estabilidad de los pigmentos carotenoides en los alimentos. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 54(2), 209-215. Recuperado el 19 de enero de 2025, de https://www.google.com/search?q=http://ve.scielo.org/scielo.php%3Fscript%3Dsci_arttext&pid=S0004-06222004000200011&lng=es&tlng=es
- Minchala-Buestán, N., Hoyos-Sánchez, R. A., & Correa-Londoño, G. A. (2023). Micropropagation of iraca palm (*Carludovica palmata Ruiz y Pav*) using a temporary immersion system. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 59, 563-573. <https://doi.org/10.1007/s11627-023-10362-4>
- Mordor Intelligence. (s.f.). *Tendencias del mercado de carotenoides para piensos*. Mordor Intelligence. Recuperado el 19 de enero de 2025, de <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/global-feed-carotenoids-market-industry/market-trends>
- Moussa, H., Margolis, A. H., Dubé, P.-A., & Odongo, J. (1998). Factors affecting the germination of doum palm (*Hyphaene thebaica Mart.*) seeds from the semiarid zone of Niger, West

- Africa. *Forest Ecology and Management*, 104(1-3), 27-41. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00230-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00230-2)
- Mukunthakumar, S., & Mathur, J. 1992. Artificial seed production in the male bamboo *Dendrocalamus strictus* L. *Plant. Science*, 87(1), 109-113. [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(92\)90198-U](https://doi.org/10.1016/0168-9452(92)90198-U)
- Muñoz-R M, Tuberquia-M D. 1999. Estudio preliminar para el manejo sostenible de *Carludovica palmata* como materia prima en la producción de papel artesanal en Cabo corrientes Choco, Colombia. *Actualidades Biológicas*, 21(71),87-96.
- Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473-497.
- Murillo, E., Castiblanco, R., & Becerra, J. (2021). Evaluación de pigmentos naturales obtenidos a partir de infrutescencias de *Carludovica palmata* para aplicaciones alimentarias. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 50(1), 32-42. <https://doi.org/10.15446/rcqf.v50n1.90224>
- Murillo, E., Deli, J., Nagy, V., Molinar-Toribio, E., Sándor, V., Marton, K., & Agócs, A. (2021). Carotenoid profile of two capsorubin-rich tropical plants. *Journal of Food Composition and Analysis*, 97, 103798. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103798>
- Murillo, E., Nagy, V., Menchaca, D., Deli, J., & Agócs, A. (2024). Changes in the Carotenoids of *Zamia dressleri* Leaves during Development. *Plants*, 13(9), 1251. <https://doi.org/10.3390/plants13091251>

- National Parks Board Singapore. (n.d.). *Carludovica palmata Ruiz & Pav. FloraFaunaWeb*. Recuperado el 19 de enero de 2025, de <https://www.nparks.gov.sg/florafauanaweb/flora/1/7/1783>
- Nisar, N., Li, L., Lu, S., Khin, N. C., & Pogson, B. J. (2014). *Carotenoid metabolism in plants. Molecular Plant*, 8(1), 68–82. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2014.12.007>
- Nováková, L., Matysová, L., & Solich, P. (2005). Advantages of application of UPLC in pharmaceutical analysis. *Talanta*, 68(3), 908-918. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2005.05.059>
- Panesar, P. S., Marwaha, S. S., & Chopra, H. K. (2015). *Biotechnology in the valorization of agro-industrial by-products: A review*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10214-8>
- Perera, C. O., & Yen, G. M. (2007). Functional properties of carotenoids in human health. *International Journal of Food Properties*, 10(2), 201–230. <https://doi.org/10.1080/10942910601045271>
- Pénicaud, C., Achir, N., Dhuique-Mayer, C., Dornier, M., & Bohuon, P. (2011). Degradation of β -carotene during fruit and vegetable processing or storage: Reaction mechanisms and kinetic aspects: A review. *Fruits*, 66(6), 417–440. <https://doi.org/10.1051/fruits/2011041>
- ProColombia. (2024). *Este 19 de marzo Colombia celebra el Día Internacional del Artesano con récord de exportaciones*. Recuperado el 17 de enero de 2025, de <https://procolombia.co/sala-de-prensa/noticias/este-19-de-marzo-colombia-celebra-el-dia-internacional-del-artesano-con-record-de-exportaciones>.

- Quian-Ulloa, R., & Stange, C. (2021). Carotenoid biosynthesis and plastid development in plants: The role of light. *International journal of molecular sciences*, 22(3), 1184. <https://doi.org/10.3390/ijms22031184>
- Rao, A. V., & Rao, L. G. (2007). Carotenoids and human health. *Pharmacological Research*, 55(3), 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2007.01.012>
- Requena, A., Cerón-Carrasco, J. P., Bastida, A., Zúñiga, J., & Miguel, B. (2008). A density functional theory study of the structure and vibrational spectra of β -carotene, capsanthin, and capsorubin. *The Journal of Physical Chemistry A*, 113(44), 12549–12558. <https://doi.org/10.1021/jp905090g>
- Ríos, J., Martínez, L., & Salazar, J. (2021). Estudio fitoquímico y actividad antioxidante de infrutescencias de *Carludovica palmata*. *Revista Colombiana de Química*, 50(1), 76-89.
- Rivera, S., & Canela-Garayoa, R. (2012). Analytical tools for the analysis of carotenoids in diverse materials. *Journal of Chromatography A*, 1224, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.12.025>
- Rodríguez-Amaya, D. B. (2001). A guide to carotenoid analysis in foods (Vol. 71). Washington, DC: ILSI press.
- Rodríguez-Amaya, D. B. (2015). Food carotenoids: Chemistry, biology and technology. John Wiley & Sons.

- Saini, R. K., & Keum, Y. S. (2019). Carotenoid extraction methods: A review of recent developments. *Food Chemistry*, 240, 90-103. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.099>
- Sesso, H. D., Buring, J. E., Norkus, E. P., Gaziano, J. M. (2005). Plasma lycopene, other carotenoids, and retinol and the risk of cardiovascular disease in women. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 79(1), 47–53. <https://doi.org/10.1093/ajcn/79.1.47>
- Sevillano, A. (s.f.). Estudio de carotenoides por HPLC-DAD en frutas tropicales [Tesis de licenciatura, Universidad de Panamá]. Repositorio Institucional Digital de la Universidad de Panamá. https://up-rid.up.ac.pa/8211/3/alejandrino_sevillano.pdf
- Sies, H., & Stahl, W. (2004). Nutritional protection against skin damage from sunlight. *Annual Review of Nutrition*, 24, 173–200. <https://doi.org/10.1146/annurev.nutr.24.012003.132402>
- Socrates, G. (2001). Infrared and Raman characteristic group frequencies: *Tables and charts*. John Wiley & Sons.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2018). Principles of instrumental analysis. Boston, MA: Cengage Learning.
- Snyder, L. R., Kirkland, J. J., & Dolan, J. W. (2010). Introduction to modern liquid chromatography (3rd ed.). Wiley.
- Stuart, B. (2004). Infrared spectroscopy: Fundamentals and applications. John Wiley & Sons.
- Swartz, M. E. (2005). Ultra performance liquid chromatography (UPLC): an introduction. *LC-GC North America*, 23(5), S8+.

<https://link.gale.com/apps/doc/A132850499/AONE?u=anon~c31dbce6&sid=googleScholar&xid=9c0c502c>

Tanumihardjo, S. A. (2013). Carotenoids: Epidemiology of health effects. En *Carotenoids* (pp. 13–29). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22144-6_2

Torres, R., & González, F. (2018). Aprovechamiento sostenible de infrutescencias de *Carludovica palmata* para la obtención de carotenoides. *Revista Ciencias Agropecuarias*, 35(2), 145-156.

van Breemen, R. B., Dong, L., & Pajkovic, N. D. (2011). Atmospheric Pressure Chemical Ionization Tandem Mass Spectrometry of Carotenoids. *International journal of mass spectrometry*, 312, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2011.07.030>

van Poppel, G., Goldbohm, R. A., & Verhoeven, D. T. (1995). Epidemiologic evidence for beta-carotene in prevention of cancer and cardiovascular disease. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 62(6 Suppl), 1393S–1402S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/62.6.1393S>

Wackenroder, H. W. F. (1831). Ueber das in Möhren enthaltene krystallisirte orangegelbe Farbstoff. *Journal für Chemie und Physik*, 63, 321–330.

Wang, Y., Chung, S. J., & Song, W. O. (2006). Plasma and dietary carotenoid, retinol and tocopherol concentrations and risk of cardiovascular disease in the US population. *European Journal of Clinical Nutrition*, 60(10), 1360–1369. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602456>

Zechmeister, L., & v. Chohnoky, L. (1936). Untersuchungen über den Paprika-Farbstoff. IX.

Partieller Abbau des Capsanthins. Justus Liebigs Annalen der Chemie, 523(1), 101-118.

<https://doi.org/10.1002/jlac.19365230106>

Apéndices

Apéndice A. Valores obtenidos de la extracción con acetona asistida por ultrasonido para las infrutescencias de *Carludovica palmata*.

Muestra	Peso inicial [g]	Sin saponificar [g]	Saponificado [g]	Rendimiento	Desviación estándar	Promedio del rendimiento
1.1	1,0003	0,0367	0,0252	3,6689	0,0252	3,6422
1.2	1,0003	0,0364	0,0250	3,6389		
1.3	1,0003	0,0362	0,0254	3,6189		
2.1	1,0004	0,0387	0,0278	3,8685	0,0305	3,8951
2.2	1,0004	0,0393	0,0283	3,9284		
2.3	1,0004	0,0389	0,0277	3,8884		
3.1	1,0003	0,0344	0,0238	3,4390	0,0266	3,4189
3.2	1,0004	0,0339	0,0239	3,3886		
3.3	1,0003	0,0343	0,0236	3,4290		
4.1	1,0013	0,0341	0,0243	3,4056	0,0209	3,4121
4.2	1,0014	0,0340	0,0246	3,3952		
4.3	1,0013	0,0344	0,0244	3,4355		
5.1	1,0003	0,0374	0,0263	3,7389	0,0252	3,7355
5.2	1,0003	0,0376	0,0264	3,7589		
5.3	1,0003	0,0371	0,0262	3,7089		
6.1	1,0014	0,0345	0,0241	3,4452	0,0151	3,4420
6.2	1,0013	0,0343	0,0243	3,4255		
6.3	1,0014	0,0346	0,0238	3,4552		
7.1	1,0013	0,0342	0,0243	3,4156	0,0300	3,4153
7.2	1,0014	0,0339	0,0247	3,3853		
7.3	1,0014	0,0345	0,0246	3,4452		
8.1	1,0014	0,0336	0,0238	3,3553	0,0153	3,3686
8.2	1,0014	0,0337	0,0235	3,3653		
8.3	1,0014	0,0339	0,0238	3,3853		
9.1	1,0014	0,0352	0,0248	3,5151	0,0300	3,5452
9.2	1,0013	0,0355	0,0246	3,5454		
9.3	1,0014	0,0358	0,0249	3,5750		
10.1	1,0013	0,0336	0,0233	3,3556	0,0231	3,3290
10.2	1,0013	0,0332	0,0235	3,3157		
10.3	1,0013	0,0332	0,0236	3,3157		
11.1	1,0013	0,0352	0,0245	3,5154	0,0263	3,5053
11.2	1,0014	0,0353	0,0247	3,5251		

11.3	1,0013	0,0348	0,0242	3,4755		
------	--------	--------	--------	--------	--	--

Apéndice B. Fórmula para la cuantificación relativa por el método UV-VIS partiendo de la ecuación de Beer-Lambert.

$$x (\mu g) = \frac{A \cdot y (mL) \cdot 10^6}{A_{1cm}^{1\%} \cdot 100}$$

$$x \left(\frac{\mu g}{g} \right) = \frac{x (\mu g)}{\text{peso de la muestra (g)}}$$

$$y (mL) = 1,5$$

$$A_{1cm}^{1\%} = 1353.3$$

Apéndice C. Cuantificación relativa de la capsorrubina por el método UV-VIS.

Muestra	445 nm (A)	x (µg)	Regla de 3	x (µg/g)	Promedio	Desviación estándar
1.1	0,258	2,8597	52,4751	52,4593	52,1457	0,5212
1.2	0,260	2,8818	52,4496	52,4338		
1.3	0,257	2,8486	51,5595	51,5441		
2.1	0,972	10,7737	208,4704	208,3871	209,8237	1,7948
2.2	0,973	10,7847	211,9203	211,8356		
2.3	0,971	10,7626	209,3322	209,2485		
3.1	0,971	10,7626	185,1164	185,0609	184,4834	1,3728
3.2	0,974	10,7958	182,9894	182,9162		
3.3	0,976	10,8180	185,5287	185,4731		
4.1	0,973	10,7847	183,8800	183,6412	184,3100	1,3177
4.2	0,975	10,8069	183,7176	183,4607		
4.3	0,976	10,8180	186,0696	185,8280		
5.1	0,988	10,9510	204,7839	204,7224	204,2650	1,6218
5.2	0,987	10,9399	205,6706	205,6089		
5.3	0,985	10,9178	202,5244	202,4636		
6.1	0,971	10,7626	185,6545	185,3950	185,6038	1,0064
6.2	0,973	10,7847	184,9584	184,7183		
6.3	0,975	10,8069	186,9597	186,6983		
7.1	0,983	10,8956	186,3146	186,0727	186,4377	1,4819
7.2	0,987	10,9399	185,4317	185,1725		
7.3	0,985	10,9178	188,3313	188,0680		
8.1	0,973	10,7847	181,1838	180,9305	181,8350	0,8249
8.2	0,976	10,8180	182,2833	182,0285		
8.3	0,973	10,7847	182,8015	182,5459		
9.1	0,546	6,0519	106,5130	106,3641	107,2730	0,7890
9.2	0,548	6,0740	107,8142	107,6743		
9.3	0,544	6,0297	107,9317	107,7808		
10.1	0,550	6,0962	102,4163	102,2833	101,9616	0,3338
10.2	0,555	6,1516	102,1170	101,9845		
10.3	0,553	6,1295	101,7491	101,6170		
11.1	0,555	6,1516	108,2687	108,1281	107,4945	1,0169
11.2	0,553	6,1295	108,1850	108,0337		
11.3	0,552	6,1184	106,4598	106,3215		

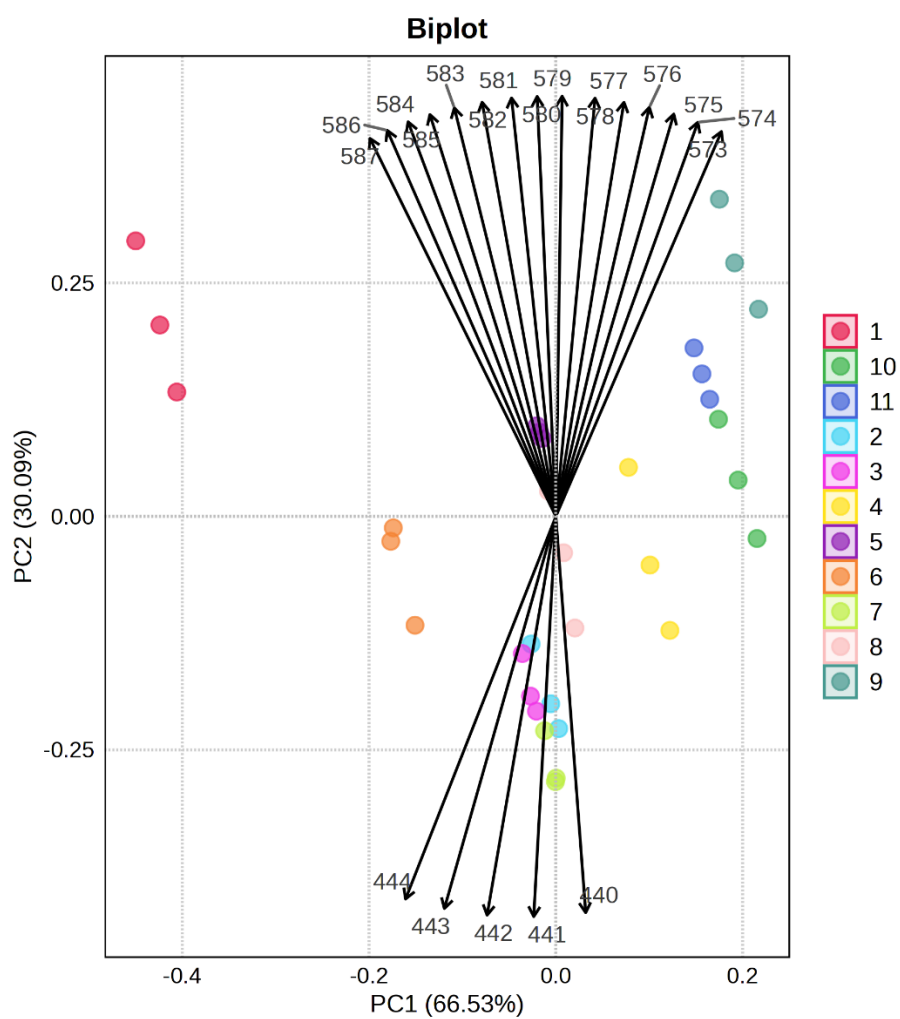
Apéndice D. Análisis estadístico ANOVA para los resultados obtenidos por UV-VIS.

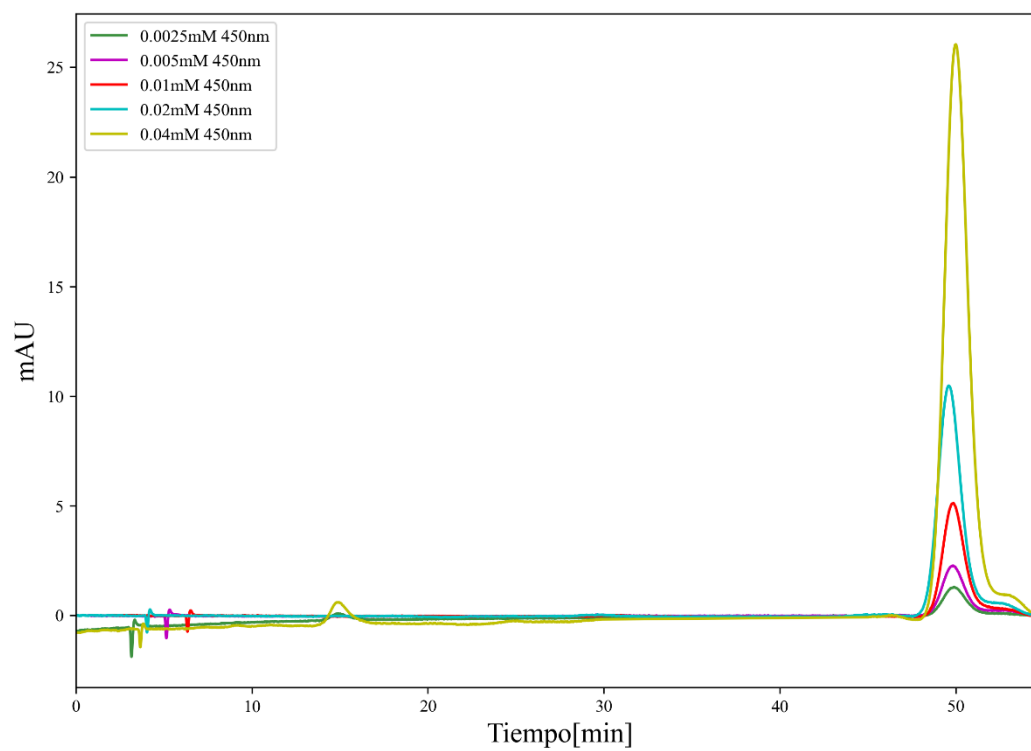
Tabla ANOVA	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	Valor P
Tratamiento (entre columnas)	83198	10	8320	F = 5942	P<0,0001
Residual (Dentro de columnas)	30,8	22	1,4	-	-
Total	83229	32	-	-	-

Apéndice E. Análisis estadístico de comparaciones múltiples para los resultados obtenidos por UV-VIS.

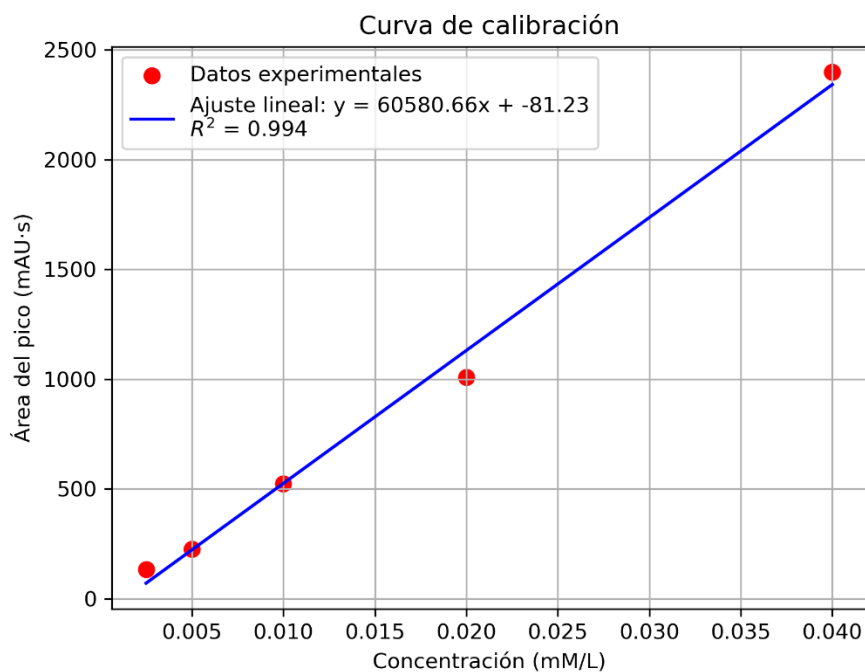
Test de múltiples comparaciones	Diferencia de medias	Intervalo de confianza del 95 % de la diferencia	¿Es significativa?	Valor de P ajustado
Verde vs. Entero Mad	-157,7	-161,1 to -154,2	Sí	<0,0001
Verde vs. Basal Abierto Mad	-132,3	-135,8 to -128,9	Sí	<0,0001
Verde vs. Medio Abierto Mad	-132,2	-135,6 to -128,7	Sí	<0,0001
Verde vs. Distal Abierto Mad	-152,1	-155,6 to -148,7	Sí	<0,0001
Verde vs. Basal Cerrado Mad	-133,5	-136,9 to -130,0	Sí	<0,0001
Verde vs. Medio Cerrado Mad	-134,3	-137,7 to -130,8	Sí	<0,0001
Verde vs. Distal Cerrado Mad	-129,7	-133,1 to -126,2	Sí	<0,0001
Verde vs. Basal Intermedio	-55,13	-58,58 to -51,67	Sí	<0,0001
Verde vs. Medio Intermedio	-49,82	-53,27 to -46,36	Sí	<0,0001
Verde vs. Distal intermedio	-55,35	-58,80 to -51,89	Sí	<0,0001
Basal Abierto Mad vs. Medio Abierto Mad	0,1734	-3,280 to 3,627	No	>0,9999
Basal Abierto Mad vs. Distal Abierto Mad	-19,78	-23,24 to -16,33	Sí	<0,0001
Medio Abierto Mad vs. Distal Abierto Mad	-19,96	-23,41 to -16,50	Sí	<0,0001
Basal Cerrado Mad vs. Medio Cerrado Mad	-0,8339	-4,288 to 2,620	No	0,998
Basal Cerrado Mad vs. Distal Cerrado Mad	3,769	0,3152 to 7,223	Sí	0,0249
Medio Cerrado Mad vs. Distal Cerrado Mad	4,603	1,149 to 8,056	Sí	0,0035
Basal Intermedio vs. Medio Intermedio	5,311	1,858 to 8,765	Sí	0,0007
Basal Intermedio vs. Distal intermedio	-0,2214	-3,675 to 3,232	No	>0,9999
Medio Intermedio vs. Distal intermedio	-5,533	-8,987 to -2,079	Sí	0,0004

Apéndice F. PCA Biplot de las muestras de los extractos de *C. palmata* en las longitudes de onda características de la capsorrubina.



Apéndice G. Cromatograma de HPLC-DAD para la curva de calibración del β -caroteno.

Apéndice H. Gráfica de la curva calibración del β -caroteno para cuantificación por HPLC-DAD.



Apéndice I. Datos de la curva de calibración del β -caroteno por HPLC-DAD

mM	Área	Y ajustado
0,0025	132,1221	70,2215
0,005	226,1005	221,674
0,01	522,7726	524,579
0,02	1009,27	1130,389
0,04	2398,579	2342,009
S_{y,x}	85,09698442	-
S_B	2790,440047	-
S_A	57,6109308	-

Apéndice J. Cuantificación de extractos de capsorrubina por HPLC-DAD.

Muestra	Área	X (mM)	µg/g	Promedio	Desviación estándar
1.1	274,84433	0,001598	12,094547	12,402536	0,3850255
1.2	287,36252	0,0017013	12,876528		
1.3	282,22461	0,0016589	12,555575		
1.4	274,66739	0,0015965	12,083494		
2.1	1198,42725	0,0092207	69,788495	68,955962	0,9116478
2.2	1196,96118	0,0092086	69,696913		
2.3	1171,20203	0,008996	68,087803		
2.4	1173,80872	0,0090175	68,250636		
3.1	1172,69873	0,0090083	68,181298	69,328148	1,4954779
3.2	1168,09161	0,0089703	67,893502		
3.3	1212,42065	0,0093362	70,662628		
3.4	1211,02051	0,0093246	70,575165		
4.1	1184,22461	0,0091035	68,901291	68,951241	0,0376584
4.2	1185,34143	0,0091127	68,971056		
4.3	1184,92346	0,0091092	68,944947		
4.4	1185,60742	0,0091149	68,987672		
5.1	1141,66675	0,0087522	66,242807	67,204073	1,1794644
5.2	1139,78894	0,0087367	66,125504		
5.3	1172,5351	0,009007	68,171076		
5.4	1174,22925	0,009021	68,276906		
6.1	1179,62775	0,0090655	68,614137	68,667928	0,2324639
6.2	1175,57611	0,0090321	68,361041		
6.3	1183,38031	0,0090965	68,84855		
6.4	1183,37128	0,0090964	68,847986		
7.1	1164,09711	0,0089373	67,643976	69,528967	2,2321589
7.2	1162,5675	0,0089247	67,548425		
7.3	1224,91589	0,0094393	71,443175		
7.4	1225,51007	0,0094442	71,480292		
8.1	1213,78326	0,0093474	70,747747	70,845948	0,1385233
8.2	1214,44238	0,0093529	70,788921		
8.3	1218,64227	0,0093875	71,051278		
8.4	1214,55322	0,0093538	70,795845		
9.1	444,15723	0,0029954	22,671107	23,530779	0,8277626
9.2	448,99847	0,0030353	22,973527		

9.3	469,78796	0,0032069	24,272195		
9.4	468,73285	0,0031982	24,206285		
10.1	514,53601	0,0035762	27,067496	25,900032	1,4323346
10.2	516,82532	0,0035951	27,210503		
10.3	475,26593	0,0032521	24,614391		
10.4	476,76025	0,0032645	24,707737		
11.1	481,90024	0,0033069	25,028819	24,931335	0,1008617
11.2	481,55237	0,003304	25,007089		
11.3	478,76651	0,003281	24,833063		
11.4	479,13959	0,0032841	24,856368		

Apéndice K. Análisis estadístico ANOVA para los resultados obtenidos por HPLC-DAD.

Tabla ANOVA	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F	Valor P
Tratamiento (entre columnas)	23355	10	2335	F= 2070	P<0,0001
Residual (Dentro de columnas)	37,23	33	1,128	-	-
Total	23392	43	-	-	-

Apéndice L. Análisis estadístico ANOVA para los resultados obtenidos por HPLC-DAD.

Test de múltiples comparaciones	Diferencia de medias	Intervalo de confianza del 95 % de la diferencia	¿Es significativa?	Valor de P ajustado
Verde vs. Entero Mad	-56,55	-59,15 to -53,96	Sí	<0,0001
Verde vs. Basal Abierto Mad	-56,93	-59,52 to -54,33	Sí	<0,0001
Verde vs. Medio Abierto Mad	-56,55	-59,14 to -53,96	Sí	<0,0001
Verde vs. Distal Abierto Mad	-54,8	-57,39 to -52,21	Sí	<0,0001
Verde vs. Basal Cerrado Mad	-56,27	-58,86 to -53,67	Sí	<0,0001
Verde vs. Medio Cerrado Mad	-57,13	-59,72 to -54,53	Sí	<0,0001
Verde vs. Distal Cerrado Mad	-58,44	-61,04 to -55,85	Sí	<0,0001
Verde vs. Basal Intermedio	-11,13	-13,72 to -8,535	Sí	<0,0001
Verde vs. Medio Intermedio	-13,5	-16,09 to -10,90	Sí	<0,0001
Verde vs. Distal intermedio	-12,53	-15,12 to -9,935	Sí	<0,0001
Basal Abierto Mad vs. Medio Abierto Mad	0,3769	-2,216 to 2,970	No	>0,9999
Basal Abierto Mad vs. Distal Abierto Mad	2,124	-0,4692 to 4,717	No	0,1916
Medio Abierto Mad vs. Distal Abierto Mad	1,747	-0,8462 to 4,340	No	0,4409
Basal Cerrado Mad vs. Medio Cerrado Mad	-0,861	-3,454 to 1,732	No	0,9841
Basal Cerrado Mad vs. Distal Cerrado Mad	-2,178	-4,771 to 0,4153	No	0,1667
Medio Cerrado Mad vs. Distal Cerrado Mad	-1,317	-3,910 to 1,276	No	0,7973
Basal Intermedio vs. Medio Intermedio	-2,369	-4,963 to 0,2241	No	0,0983
Basal Intermedio vs. Distal intermedio	-1,401	-3,994 to 1,193	No	0,7342
Medio Intermedio vs. Distal intermedio	0,9687	-1,625 to 3,562	No	0,9642