



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Posgrado en Ciencias Químicas

Estudio fotoquímico y termogravimétrico de Z-Norbixina obtenida por la saponificación de Z-Bixina

Tesis que para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias Químicas

Presenta:

González Ortiz Víctor Manuel

Directora de Tesis:

Dra. Denisse Atenea de Loera Carrera

Codirector de Tesis:

Dr. Oswaldo Eliecer Cárdenas González

SAN LUIS POTOSÍ, S. L. P.

Septiembre, 2025



REPOSITORIO INSTITUCIONAL



UASLP-Sistema de Bibliotecas
Repositorio Institucional Tesis digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en este Trabajo Terminal está protegido por la Ley Federal de Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos.

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde se obtuvo, mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto o con fines de lucro, reproducción, edición o modificación será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Estudio fotoquímico y termogravimétrico de Z-Norbixina obtenida por la saponificación de Z-Bixina © 2025 por González Ortiz Víctor Manuel se distribuye bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International

Este proyecto se realizó en el laboratorio de Fotoquímica y Síntesis Orgánica de la Facultad de Ciencias Químicas adscrito a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, en el periodo comprendido entre agosto del 2023 y agosto del 2025, bajo la dirección de la Dra. Denisse Atenea de Loera Carrera y Codirección del Dr. Oswaldo Eliecer Cárdenas González, el trabajo fue apoyado por la Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)

El programa de Maestría en Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí pertenece al sistema nacional de posgrados de calidad (SNP) del CONAHCYT, registro 000519. Con numero de beca otorgada por CONAHCYT: 1320341. Numero de CVU: 1320341

Los datos del trabajo titulado "Estudio fotoquímico y termogravimétrico de Z-Norbixina obtenida por la saponificación de Z-Bixina" se encuentran bajo el resguardo de la Facultad de Ciencias Químicas y pertenecen a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias Químicas
Programa de Maestría

Formato M15

Solicitud de Registro de Tesis Maestría

San Luis Potosí SLP a 24/ 06 / 2025

Comité Académico

En atención a: Coordinador/a del Posgrado

Por este conducto solicito a Usted se lleve a cabo el registro de tema de tesis de Maestría, el cual quedo definido de la siguiente manera: Estudio fotoquímico y termogravimétrico de Z-Norbixina obtenida por la saponificación de Z-Bixina que desarrollará el/la estudiante: Víctor Manuel González Ortiz bajo la dirección y/o Codirección de: Dra. Denisse Atenea de Loera Carrera y Dr. Oswaldo Eliecer Cárdenas González

Asimismo, le comunico que el proyecto en el cual trabajará el alumno involucrará el manejo de animales de experimentación, estudios con seres humanos o muestras derivadas de los mismos, el manejo y/o generación de organismos genéticamente modificados y requiere de aval de Comité de Ética e investigación de la FCQ.

(Complete la opción que aplique en su caso):

Sí debido a que: _____

No

No Aplica

Sin otro particular, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E

Víctor Manuel Gonzalez Ortiz
Estudiante del Posgrado en
Ciencias Químicas

Dra. Denisse Atenea de Loera Carrera y
Dr. Oswaldo Eliecer Cárdenas González



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Posgrado en Ciencias Químicas

**Estudio fotoquímico y termogravimétrico de Z-Norbixina
obtenida por la saponificación de Z-Bixina**

Tesis que para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias Químicas

Presenta:

González Ortiz Víctor Manuel

SINODALES

Presidente: Dr. Oswaldo Eliecer Cárdenas González

Secretario: Dr. Rodolfo González Chávez

Vocal: Dra. Denisse Atenea de Loera Carrera

Vocal: Dra. Lluvia Itzel López López

SAN LUIS POTOSÍ, S. L. P.

Septiembre, 2025

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORIAL ACADÉMICO

Dra. Denisse Atenea de Loera Carrera

Directora de tesis

Facultad de Ciencias Químicas - UASLP

Dr. Oswaldo Eliecer Cárdenas González

Co-Director de tesis

Facultad de Ciencias Químicas - UASLP

Dra. Gabriela Navarro Tovar

Miembro extendido del comité tutorial

Investigadora por México – SECIHTI

Facultad de Ciencias Químicas - UASLP



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias Químicas
Programa de Maestría

Formato M5

Carta Cesión de Derechos

San Luis Potosí SLP a 27 de agosto de 2025

En la ciudad de *San Luis Potosí* el día 27 del mes de *agosto* del año 2025. El que suscribe *Víctor Manuel González Ortiz* Alumno del programa de posgrado en *Ciencias Químicas* adscrito a la *Facultad de Ciencias Químicas* manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo terminal, realizado bajo la dirección de: *Dra. Denisse Atenea de Loera Carrera* y cede los derechos del trabajo titulado “*Estudio fotoquímico y termogravimétrico de Z-Norbixina obtenida por la saponificación de Z-Bixina*” a la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí**, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir de forma total o parcial texto, gráficas, imágenes o cualquier contenido del trabajo si el permiso expreso del o los autores. Éste, puede ser obtenido directamente con el autor o autores escribiendo a la siguiente dirección *manuel090199@gmail.com*. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Víctor Manuel González Ortiz

Estudiante del Posgrado en ciencias Químicas



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias Químicas
Programa de Maestría

Formato M28

Carta de Análisis de Similitud

San Luis Potosí SLP a 2 de septiembre del 2025

L.B. Reyna Nayeli Ortiz Quintero
Biblioteca de Posgrado FCQ

Asunto: Reporte de porcentaje de similitud de tesis de grado

Por este medio me permito informarle el porcentaje de similitud obtenido mediante Ithenticate para la tesis titulada “Estudio fotoquímico y termogravimétrico de Z-Norbixina obtenida por la saponificación de Z-Bixina” presentada por el autor González Ortiz Víctor Manuel. La tesis es requisito para obtener el grado de Maestría en el Posgrado en Ciencias Químicas. El análisis reveló un porcentaje de similitud de 11% excluyendo referencias y metodología.

Agradezco sinceramente su valioso tiempo y dedicación para llevar a cabo una exhaustiva revisión de la tesis. Quedo a su disposición para cualquier consulta o inquietud que pueda surgir en el proceso.

Sin más por el momento, le envío un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E

Dr. Fidel Martínez Gutiérrez.

Coordinador Académico del Posgrado
en Ciencias Químicas.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer infinitamente a la **Dra. Denisse de Loera**, por guiarme y confiar en mí, por darme la oportunidad de formar parte de un grupo de investigación tan especial y bonito como lo es IRAACH, además de todas sus enseñanzas y consejos a lo largo de estos 2 años.

A mi comité tutelar la **Dra. Gabriela Navarro** por su apoyo, confianza y enseñanzas durante todo el proceso.

A mi co-asesor el **Dr. Oswaldo Cárdenas** por todo el apoyo.

A mis sinodales la **Dra. Lluvia López** y el **Dr. Rodolfo Gonzalez** por su tiempo y consejos.

A mis compañeros de laboratorio **Isa, Fer, Perla y Gilmer** por hacer el proceso más fácil, por aconsejarme y compartir tantos momentos bonitos junto a ellos que sin dudarlo fueron parte clave en este logro.

A mis gordos **Rafa e Iván**, por ser gran parte de mi apoyo en los momentos donde no encontraba claridad y por mostrarme el significado de la palabra amistad.

A **mi familia** por acompañarme y ayudarme en todas las decisiones que e tomado y por no dejarme caer en especial **a mi madre**.

A todas las personas que de alguna manera influyeron en mí, por ser parte de mi formación y enseñarme lo bonito que es tanto la investigación como la docencia.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas las personas que de alguna manera me han enseñado y guiado en la vida. A mi mamá que es mi fuerza y ejemplo para buscar cada día salir adelante y ser mi sustento sin importar nada.

A mis amigos por mostrarme lo bonito que es compartir la vida con personas tan especiales como ellos.

A todos mis seres queridos en especial a mi padre que me acompañan desde el cielo porque a pesar del poco o mucho tiempo que compartí con ellos son pieza importante en lo que soy hoy en día.

Quiero dedicar este trabajo a todas las personas que han llegado a mi vida ya sea para quedarse o solo un paso breve por ella. Pero sin duda alguna, quiero dedicarle todo este esfuerzo y trabajo a él Víctor de 11 años, a ese niño que se le venía la vida encima, a ese niño que un sin fin de personas se cansaron de repetirle que no podría, a ese niño que no tenía amigos, a ese niño que en algún momento perdió sus sueños. A Víctor de 11 años quiero decirle que lo logramos, logramos tener muchos amigos, supiste salir adelante con ayuda de muchas personas y con tu propio esfuerzo, logramos pertenecer a algún lugar.

Este trabajo está dedicado principalmente a todas las personas que en algún momento de su vida han perdido las esperanzas y han tocado fondo, para todos aquellos a los que les han dicho no puedes y para todos los que no han perdido el miedo.

RESUMEN

En la actualidad, el uso de productos naturales en búsqueda de innovar en diversas industrias ha generado un gran interés. Entre ellos, los carotenoides debido a que presentan múltiples propiedades son un ejemplo de ello. Sin embargo, el uso de estos productos genera la necesidad de estudiar su comportamiento debido a sus limitaciones que podrían poner en riesgo la integridad de sus propiedades. En este trabajo se evaluaron los parámetros de extracción de Z-norbixina (Z-NRX) un apocarotenoide encontrado en las semillas de *Bixa orellana* Linn. Se estudiaron diferentes condiciones de extracción utilizando como materia prima directamente la semilla, así como su obtención a partir de Z-bixina (Z-BXN). La caracterización del producto se realizó mediante espectroscopía UV-Vis, IR, TGA y HPLC. Se determinó que una simple extracción alcalina en la semilla produce norbixilato con un valor de razón de banda III/II del 30%. Se obtuvo Z-NRX con 94% de pureza obtenida mediante la saponificación de Z-BXN y una razón de banda III/II del 34.06%. Además, se analizó la degradación de la molécula bajo diferentes fuentes de irradiación, el estudio fotoquímico mostró que la exposición a luz solar en solución genera su degradación en un tiempo menor a 2 h. Finalmente, los análisis de HPLC y TGA permiten observar que la degradación genera una elaidinización de la molécula, así como una degradación en cascada hasta la producción de CO₂. Por lo que se estableció una metodología para la obtención de Z-NRX y se demostró su baja estabilidad frente a la luz y la temperatura, lo que resalta la necesidad de condiciones de preservación adecuadas para mantener su funcionalidad.

Palabras clave: Carotenoides, *Bixa orellana*, apocarotenoide, norbixina, fotodegradación

ABSTRACT

Currently, the use of natural products as a means of innovation in various industries has generated great interest. Among them, carotenoids stand out due to their multiple properties. However, the use of these products highlights the need to study their behavior, given their limitations that could compromise the integrity of their properties. In this study, the extraction parameters of Z-norbixin (Z-NRX), an apocarotenoid found in the seeds of *Bixa orellana* Linn, were evaluated. Different extraction conditions were studied using the seed directly as the raw material, as well as through its production from Z-bixin (Z-BXN). Product characterization was performed using UV-Vis spectroscopy, IR, TGA, and HPLC. It was determined that a simple alkaline extraction from the seed produces norbixylate with a band III/II ratio value of 30%. Z-NRX with 94% purity was obtained through the saponification of Z-BXN, with a band III/II ratio of 34.06%. Furthermore, the degradation of the molecule under different irradiation sources was analyzed. The photochemical study showed that exposure of the molecule in solution to sunlight led to its degradation in less than 2 h. Finally, HPLC and TGA analyses revealed that the degradation results in elaidinization of the molecule, as well as a cascade degradation process leading to the production of CO₂. Therefore, a methodology for the isolation of Z-NRX was established, and its low stability under light and temperature was demonstrated, emphasizing the need for appropriate preservation conditions to maintain its functionality.

Keywords: Carotenoid, *Bixa Orellana*, apocarotenoid, norbixin, photodegradation.

ÍNDICE GENERAL

GLOSARIO	XVII
1. INTRODUCCIÓN	- 1 -
2. ANTECEDENTES	- 4 -
2.1 Carotenoides	- 4 -
2.1.1 Apocarotenoides	- 7 -
2.2 <i>Bixa orellana</i> Linn	- 9 -
2.2.1 Z-Bixina (Z-BXN).....	- 10 -
2.2.2 Z-Norbixina (Z-NRX).....	- 11 -
2.3 Fotodegradación	- 13 -
3. JUSTIFICACIÓN.....	- 15 -
4. HIPÓTESIS	- 15 -
5. OBJETIVOS.....	- 15 -
5.1 Objetivo General.....	- 15 -
5.2 Objetivos específicos.....	- 15 -
6. MATERIALES Y MÉTODOS	¡Error! Marcador no definido.
6.1 Reactivos y equipos.....	¡Error! Marcador no definido.
6.2 Metodología experimental.....	¡Error! Marcador no definido.
6.2.1 Extracción de norbixilato a partir de la semilla de <i>Bixa orellana</i> Linn ..	¡Error! Marcador no definido.
6.2.2 Remoción de sodio por columna de intercambio catiónico .	¡Error! Marcador no definido.
6.2.3 Obtención de Z-norbixina de semilla de <i>Bixa orellana</i> Linn	¡Error! Marcador no definido.
6.2.4 Obtención de Z-NRX a partir de Z-BXN por saponificación	¡Error! Marcador no definido.
6.2.5 Degradación fotoquímica de Z-NRX.....	¡Error! Marcador no definido.
6.3 Caracterización de Z-NRX.....	¡Error! Marcador no definido.
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	¡Error! Marcador no definido.

7.1 Extracción de Z-NRX a partir de semilla de <i>Bixa orellana</i> Linn	¡Error! Marcador no definido.
7.1.1 Extracción como norbixilato	¡Error! Marcador no definido.
7.1.2 Conversión de norbixilato a Z-NRX y cuantificación del sodio retirado por columna.	¡Error! Marcador no definido.
7.1.3 Extracción directa de Z-NRX como diácido.....	¡Error! Marcador no definido.
7.2 Obtención de Z-NRX a partir de Z-BXN por medio de una reacción de saponificación	¡Error! Marcador no definido.
7.3 Evaluación de la estabilidad fotoquímica de la Z-NRX	¡Error! Marcador no definido.
7.4 Estudio termogravimétrico	¡Error! Marcador no definido.
7.5 Perspectivas a futuro: resultados preliminares ...	¡Error! Marcador no definido.
8. CONCLUSIONES	- 16 -
9. BIBLIOGRAFÍA	- 19 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Uso de los carotenoides en diferentes ámbitos sociológicos	5
Figura 2: Unidad básica del isopreno	6
Figura 3: Subclasificación de los carotenoides	7
Figura 4: Ejemplo de funciones biológicas	8
Figura 5: Semilla y planta de Bixa Orellana Linn	9
Figura 6: Estructura de la molécula Z-Bixina	11
Figura 7: Estructura de la molécula Z-Norbixina	12
Figura 8: Estudios realizados con norbixina como molécula de interés	13
Figura 9: Resumen de metodologías de obtención de Z-NRX	18
Figura 10: Espectro de UV-Vis de norbixilato	22
Figura 11: Espectro de FTIR de norbixilato	23
Figura 12: Espectro de FTIR de Z-NRX obtenido en columna	24
Figura 13: Espectro de UV-Vis de Z-NRX	26
Figura 14: Espectro de FTIR de Z-NRX extraído de forma directa	27
Figura 15: Espectro de UV-Vis de Z-NRX obtenida de Z-BXN	28
Figura 16: Espectro de FTIR de Z-NRX obtenida a partir de Z-BXN	29
Figura 17: Espectros comparativos entre Z-BXN y Z-NRX	31
Figura 18: Espectro de RMN de Z-NRX	32
Figura 19: Espectro de radiación solar en periodo de 12 a 14 p.m.	33
Figura 20: Espectros UV-Vis de degradación de Z-NRX en solución por exposición a luz artificial (A) lampara blanca de 410 nm y (B) lampara negra de 365 nm	34

Figura 21: Espectro de UV-Vis de degradación de Z-NRX en solución por exposición a luz solar	35
Figura 22: Comparativa de espectros UV-Vis de degradación con lampara negra para (A) Z-BXN y (B) Z-NRX bajo las mismas condiciones	37
Figura 23: Degradación e isomerización de Z-NRX a E-NRX por exposición a luz artificial de (A) lámparas blancas de 410 nm y (B) lámparas negras de 365 nm monitoreados por HPLC	39
Figura 24: Degradación e isomerización de Z-NRX a E_NRX por exposición a luz solar monitoreada por HPLC	40
Figura 25: Cinética de degradación para (A) lámpara blanca de 410 nm y (B) lámpara negra de 365 nm y (C) luz solar	42
Figura 26: Espectro TGA para Z-NRX	43
Figura 27: Espectro TGA para Z-BXN	44
Figura 28: Espectro de TGA para norbixilato	45
Figura 29: Espectro comparativo entre Z-NRX sin tratamiento y Z-NRX tras 24 h de exposición a luz artificial	46
Figura 30: Espectro comparativo entre Z-NRX sin tratamiento y Z-NRX tras 2 h de exposición a luz solar	47
Figura 31: Espectros de degradación de Z-NRX disueltos en aceite vegetal expuestos a irradiación por (A) lámparas blancas de 410 nm y (B) lámparas negras de 365 nm.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Análisis proximal de la semilla de <i>Bixa orellana</i> (Camacaro et al., 2018)	2
Tabla 2: Propiedades y usos de la <i>Bixa orellana</i> Linn	9
Tabla 3: Resultados de extracción de norbixilato (n=3)	22
Tabla 4: Resultados de extracción de Z-NRX (n=3)	25
Tabla 5: Obtención de Z-NRX a partir de Z-BXN (n=3)	28
Tabla 6: Valores de razón de banda III/II de las diferentes extracciones de Z-NRX	29
Tabla 7: Comparación de valores de banda de FTIR para Z-NRX	30
Tabla 8: Valores de razón de banda III/II donde se lleva a cabo el desplazamiento batocrómico	35
Tabla 9: Cambio de valores de razón III/II para cada fuente de irradiación	36
Tabla 10: Valores de decaimiento de la concentración respecto al tiempo de exposición para luz artificial	38
Tabla 11: Valores de decaimiento de la concentración respecto al tiempo de exposición para luz solar	40
Tabla 12: Constantes cinéticas para Z-NRX a diferentes fuentes de irradiación	41

GLOSARIO

Annatto: Extracto crudo obtenido de la *Bixa Orellana*.

CET: Condiciones estándares de trabajo, son condiciones de calentamiento que se repiten en ciertas metodologías.

DMSO: Dimetilsulfóxido **nm:** Nanómetros.

FTIR-ATR: Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada.

HPLC: Cromatografía líquida de alta resolución por sus siglas en inglés.

mM: Milimolar.

RMN: Resonancia Magnética Nuclear

RSD: Desviación estándar relativa

TGA: Análisis termogravimétrico

UV-Vis: Ultravioleta visible

Z-NRX: Z-norbixina apocarotenoide utilizado para el estudio.

Z-BXN: Z-bixina.

μm: Micrómetros.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen un sin fin de productos provenientes de la naturaleza que por sus propiedades químicas y biológicas han dado a notar una diversidad de aplicaciones en los que pueden ser utilizados. Uno de ellos es el achiote, comúnmente utilizado en la cocina como sazónador y colorante natural, tiene sus raíces históricas en países latinoamericanos, cuenta con múltiples propiedades como tener actividad antimicrobiana y antifúngica, antioxidante, anticancerígena y antiinflamatoria. Sin embargo, estudios realizados hablan acerca de que las propiedades antes mencionadas varían según sea la región en la cual fue cultivada la planta, por ejemplo, las plantas cultivadas en Colombia, Yucatán y Brasil han demostrado mejores cualidades anticancerígenas, en cambio, las obtenidas en Nigeria y Bangladés resultaron más eficientes contra *E. coli* (Guerrero *et al.*, 2025).

Con el paso del tiempo, diversas industrias han mostrado un creciente interés en las múltiples propiedades de la planta y su fruto, científicamente conocida como *Bixa orellana* Linn. Su uso principal se centra en la fabricación de colorantes los cuales provienen principalmente de los apocarotenoides Z-bixina y Z-norbixina empleados como aditivos para otorgar color a productos alimenticios como embutidos, lácteos y cereales.

El uso de la *Bixa orellana* no solamente radica en el color y sabor que les brinda a los alimentos, ya que como se mencionó en conjunto se cuentan con un gran número de propiedades que lo hacen excepcional en su implementación en diferentes industrias como la textil, cosmética, farmacéutica, energética, entre otras (Devanand *et al.*, 2025).

Parte importante al momento de trabajar con esta clase de matrices es conocer su composición, por lo cual, la caracterización es primordial y puede variar en diferentes técnicas que permitan una identificación cualitativa y cuantitativa. El achiote está compuesto principalmente por Z-bixina, además de algunos metabolitos secundarios en menor cantidad.

En la Tabla 1 se muestra el análisis proximal de la semilla de *B. orellana*. Es importante conocer todo acerca de la semilla para poder darle el mejor uso posible, por lo cual se ha estudiado su estabilidad tanto en conjunto como cada uno de sus apocarotenoides.

Tabla 1: Análisis proximal de la semilla de *Bixa orellana* (Camacaro et al., 2018).

Análisis	Base húmeda (%)	Base seca (%)
Humedad	9.30	-----
Proteína	16.15	17.80
Ceniza	5.05	5.56
Grasa	3.39	3.73
Carbohidratos	66.11	72.82
Fibra cruda	9.19	101.13
Calcio	0.39	0.42
Fósforo	0.43	0.47
Hierro	0.08	0.06
Potasio	1.42	1.56
Zinc	76.07	83.37
Magnesio	0.30	0.36

Entre la variedad de compuestos que se presentan en el achiote, son los apocarotenoides los que destacan como compuestos de interés. Sin embargo, su estabilidad frente a la exposición a la luz representa un factor importante al momento de buscar su correcto aprovechamiento. Al fenómeno que sufren este tipo de moléculas se le llama fotodegradación.

Se ha estudiado la estabilidad de la Z-bixina en solución expuesta a los factores mencionados, los resultados indicaron que son muy sensible a la luz, esto lo demostraron al observar cómo se perdía más rápido la coloración de una bebida cuando se almacenaba a exposición de la luz en contraste con la oscuridad, pasando de una vida útil de poco más de un año a solo una semana (Gallardo *et al.*, 2015). Además, se ha estudiado su comportamiento variando las concentraciones del colorante y los disolventes en el cual se descubrió que para el caso de algunos de ellos

la concentración es inversamente proporcional al valor de su cinética de degradación, siendo de primer o segundo orden dependiendo del disolvente (Cárdenas *et al.*, 2023)

En contraste, la Z-norbixina ha sido objeto de un análisis limitado en lo que respecta a su estabilidad. Considerando que posee estructura y propiedades similares a la Z-bixina, resulta fundamental comprender su comportamiento y los factores que afectan su integridad. Hasta el momento, los antecedentes disponibles indican, de forma general, que al igual que la Z-bixina, la Z-norbixina es sensible a la luz y a la temperatura.

Además, su degradación puede seguir una cinética de primer o segundo orden, dependiendo de las condiciones a las que se expongan (Parvin *et al.*, 2011). Si bien entre ambas moléculas existe un parecido en su estructura química, es primordial entender como la presencia de 2 grupos de ácidos carboxílicos altera el comportamiento ante los factores de riesgo ya mencionados.

2. ANTECEDENTES

2.1 Carotenoides

Los carotenoides son pigmentos liposolubles de origen natural, sintetizados por diversos organismos como plantas, algas y bacterias. Su amplia distribución en la naturaleza, junto con sus múltiples propiedades, los convierte en compuestos de gran interés para distintas industrias. Algunas de las propiedades que se mencionan y se han logrado identificar con mayor relevancia en los carotenoides son:

- Antioxidantes
- Antiinflamatorias
- Antiangiogénicas
- Antriproliferativas

Sin embargo, a pesar de que se cuente con un sin fin de cualidades extraordinarias hay una serie de contraindicaciones o factores que afectan y ponen en riesgo su integridad en los diferentes productos generados entre los cuales destacan:

1. Baja solubilidad en agua
2. Baja disponibilidad
3. Inestabilidad química
4. Exposición a condiciones ambientales como calor, luz u oxígeno
5. Interacción con iones metálicos y iones

Contrario a la creencia de que su única función es otorgar coloración a frutas y vegetales, los carotenoides cumplen diversos roles biológicos. Estudios han demostrado su participación en procesos como la polinización, la dispersión de semillas y la manifestación de color en plumas y picos de aves, así como en la piel y los músculos de ciertos peces (Meléndez *et al.*, 2007). Aunque no todos sus mecanismos de acción están completamente esclarecidos, estos ejemplos reflejan la amplia gama de funciones y aplicaciones potenciales que poseen.

Según reportes científicos, en el año 2011 se habían aislado y caracterizado aproximadamente 600 carotenoides. Una década después, en 2021, se informó que esta cifra había superado los 750 compuestos identificados (Akram *et al.*, 2021). Sin embargo, es importante destacar que la mayoría de estos carotenoides no se encuentran presentes en alimentos de consumo habitual.

El uso de los carotenoides puede ir desde la generación de alimentos modificados hasta la generación de diferentes productos de interés industrial, en la Figura 1 se pueden observar algunos de los usos más relevantes reportados en ámbitos donde los carotenoides han intervenido como en aspectos biológicos, preventivos de enfermedades e industriales.



Figura 1: Uso de los carotenoides en diferentes ámbitos sociológicos.

Químicamente los carotenoides son clasificados o conocidos como tetraterpenos esto por el hecho de que están constituidos por 8 unidades de grupos isopreno (Figura 2).

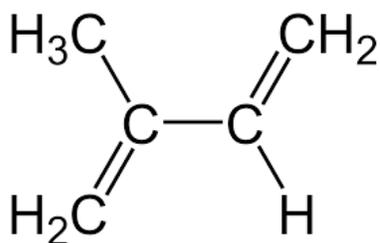


Figura 2: Unidad básica del isopreno.

Los carotenoides si bien tienen una estructura parecida debido a su unidad fundamental cuentan con una clasificación básica que los divide en dos grandes grupos: los carotenos y las xantofilas.

- Los carotenos: se caracterizan principalmente por carecer de oxígeno en sus grupos terminales.
- Las xantofilas: a diferencia de los carotenos, estas si contienen oxígeno en su estructura, principalmente como grupos aldehído, carboxilo, ceto o metoxi.

Una vez reconocida la división de los carotenoides en dos grandes grupos, es importante señalar que no todos cumplen con la llamada "regla de los 40", la cual hace referencia a la presencia de 40 átomos de carbono en su cadena estructural. Las excepciones a esta regla suelen estar relacionadas con escisiones o modificaciones estructurales en la cadena carbonada del compuesto.

Dado estos casos existen subclasificaciones haciendo énfasis en su estructura con algunos grupos funcionales en su contenido, el número de carbonos que los conforman (más o menos números de carbonos) o algunas otras propiedades (Figura 3).

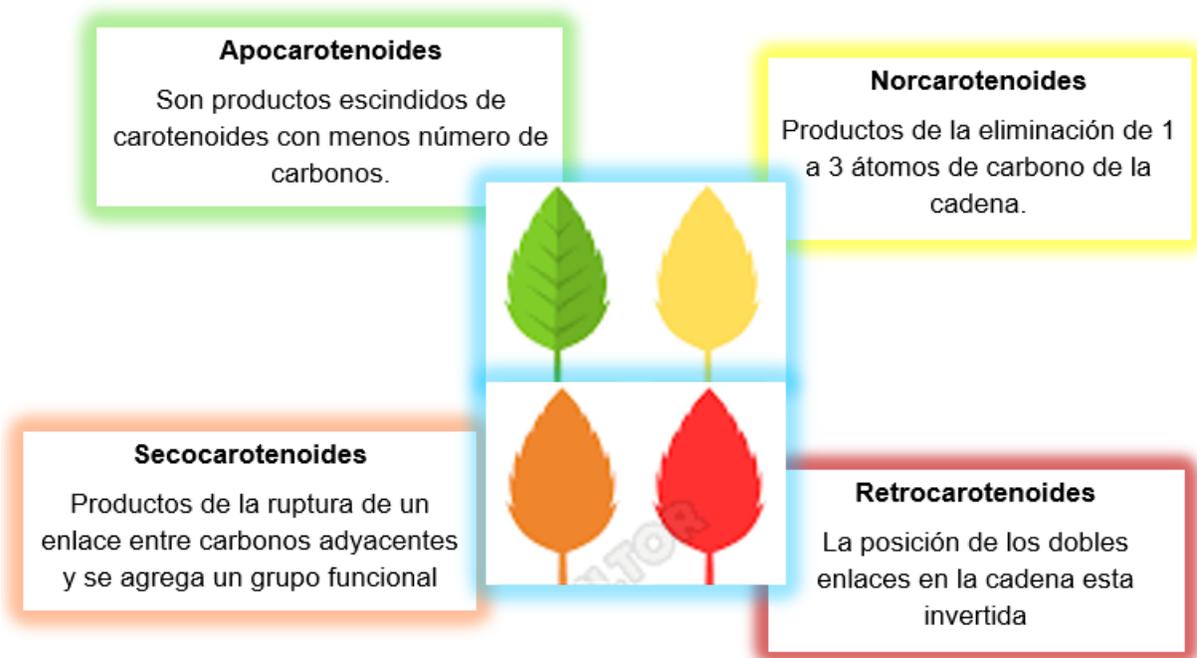


Figura 3: Subclasificación de los carotenoides.

Dentro de los carotenoides esta un grupo de gran interés que son los apocarotenoides estos destacan por sus propiedades particulares que no comparten con los carotenoides íntegros, son productos derivados de la escisión oxidativa de carotenoides. Una de sus principales características es la presencia de grupos funcionales terminales en una o ambas extremidades de la molécula, los cuales no necesariamente son iguales. Estas particularidades, sumadas a las propiedades inherentes de los carotenoides, hacen de los apocarotenoides tengan gran valor y novedad en diversas áreas de investigación y aplicación.

2.1.1 Apocarotenoides

El término apocarotenoide deriva del prefijo griego apo, que significa “sin” o “cerca de”. En el ámbito químico, se utiliza para describir a aquellas moléculas que han sufrido una fragmentación estructural, comúnmente como consecuencia de reacciones de oxidación (Walter *et al.*, 2010). Este tipo de escisión puede originarse a través de mecanismos fotoquímicos, reacciones químicas que comprometen la integridad de la

molécula o, con mayor frecuencia, mediante procesos de oxidación catalizados por enzimas específicas.

Sin importar la forma por la cual se obtengan los apocarotenoides, todos tienen la particularidad de cumplir con una gran variedad de funciones biológicas importantes, además de las propiedades particulares con las que cuentan. En la Figura 4 se muestran algunas de las diferentes funciones biológicas en las que participan esta clase de moléculas.

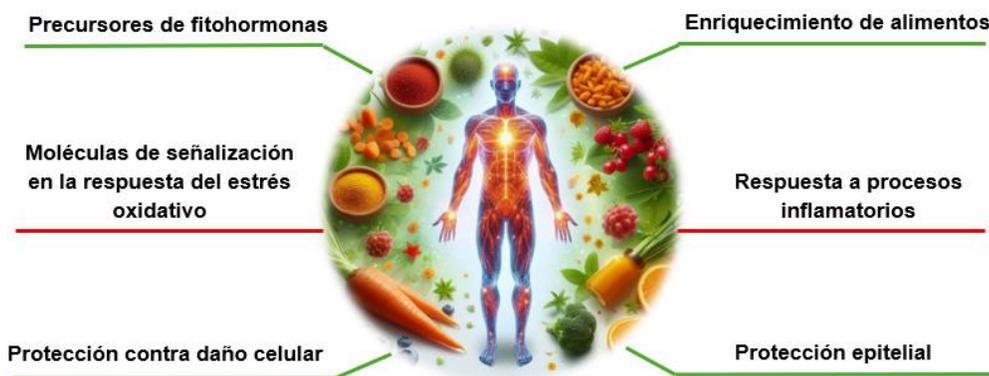


Figura 4: Ejemplo de funciones biológicas.

De manera más específica, existe una amplia variedad de apocarotenoides provenientes de diversos productos naturales, muchos de los cuales se encuentran en plantas y vegetales que forman parte habitual de la dieta humana. Algunos ejemplos representativos son los siguientes (Meléndez *et al.*, 2007):

- β -apo-8-carotenal: Pigmento presente principalmente en el níspero y en cítricos.
- Crocetina: Apocarotenoide característico del azafrán.
- Apo-8-zeaxantinal: Uno de los seis apocarotenoides identificados en el pimentón rojo.
- Z-bixina y Z-norbixina: Compuestos encontrados en las semillas de achiote (*Bixa orellana* Linn).

Entre estos, destacan especialmente los apocarotenoides presentes en las semillas de achiote. En años recientes, sus propiedades han despertado un creciente interés, particularmente en Sudamérica, donde existen registros históricos de su uso ancestral

en aplicaciones como tintes para textiles, pigmentos para el cuerpo y colorantes para bebidas (Giuliano *et al.*, 2003).

2.2 *Bixa orellana* Linn

La *Bixa orellana* Linn (Figura 5) es un arbusto originario de América del Sur, comúnmente conocido como achiote. Su semilla es la fuente principal de compuestos de interés, siendo tradicionalmente utilizada en la industria alimentaria, textil y farmacéutica. Actualmente, se exploran nuevas aplicaciones en industrias en las que sus propiedades puedan ser aprovechadas, lo que ha incrementado el interés científico y comercial en esta especie.



Figura 5: Semilla y planta de *Bixa orellana* Linn.

Con frecuencia, al utilizar una planta con fines funcionales, suele aprovecharse únicamente una parte específica, como las hojas o el fruto. Sin embargo, en el caso de *Bixa orellana*, se han identificado múltiples propiedades tanto en la planta (hojas y tallo) como en sus semillas. En la Tabla 2 se muestra una comparación entre las propiedades o usos reportados para cada una de estas partes.

Tabla 2: Propiedades y usos de la *Bixa orellana* Linn (Prathima *et al.*, 2016).

Propiedades o usos de <i>Bixa orellana</i> Linn	
Planta o tallo	Semilla
<ul style="list-style-type: none"> • Uso como astringente • Tratamiento contra la epilepsia, fiebre • Utilizado para combatir la disentería e ictericia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizadas en tratamiento contra gonorrea • Utilizado como antipruriginosos • Bueno contra tumores bucales • Utilizados como purgantes

Al contar con antecedente de usos importantes en medicina tradicional y algunos estudios previos más formales, es necesario conocer el contenido de todos los compuestos presentes en la planta, por lo cual, se han realizado estudios fitoquímicos que revelaron la presencia de: carotenoides, terpenoides, tocotrienoles y flavonoides (Prathima *et al.*, 2016).

A pesar de que el contenido en el achiote es variado la semilla está compuesta principalmente por dos componentes: Z-bixina y Z-norbixina. Estas moléculas presentan diferencias estructurales mínimas, sin embargo, su solubilidad es parecida teniendo un carácter liposoluble. En términos de composición, entre el 70-80% del annatto (extracto crudo) corresponde a Z-bixina, y el porcentaje restante a Z-norbixina. Las moléculas del achiote son clasificadas dentro del rango de carotenoides, estos pigmentos son asociados a las coloraciones amarillos, naranjas y rojos de ciertas frutas o verduras, debido a la presencia de una cadena de dobles enlaces conjugados (Meléndez *et al.*, 2004).

Algunas de las propiedades más destacadas de los apocarotenoides son su capacidad antioxidante, antitumoral y antimicrobiana (Vázquez, 2023). Estas características han despertado un creciente interés por explorar aplicaciones más allá de sus usos tradicionales o previamente reportados.

2.2.1 Z-Bixina (Z-BXN)

La Z-bixina (Z-BXN) es el principal apocarotenoide presente en el extracto crudo de *Bixa orellana*, representando aproximadamente el 80% del contenido total. Su estructura (Figura 6) se caracteriza por la presencia de dos grupos funcionales terminales distintos: un ácido carboxílico y un éster. Además, debido a su uso frecuente como colorante comestible, está clasificada con el código alimentario E-160b(i).

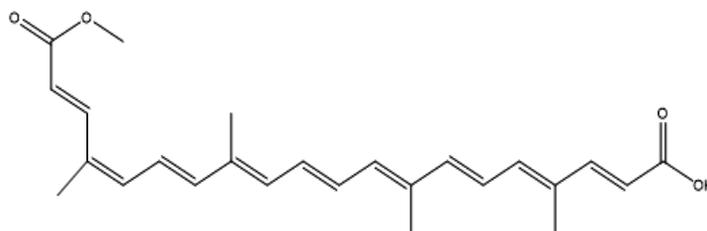


Figura 6: Estructura química de la Z-bixina.

Esta molécula tiene un carácter liposoluble, por lo cual es insoluble en agua, pero soluble en disolventes orgánicos. Generalmente este tipo de moléculas presentan una serie de retos, uno de ellos es su estabilidad, ya que existen múltiples factores pueden generar la degradación o isomerización de esta. La forma isomerizada más estable es la *E*-bixina la cual se puede obtener mediante calentamiento a 130°C (Cárdenas, 2023).

Algunos de los estudios en animales reportan el uso de la Z-bixina contra la diabetes al reducir la glucosa en sangre, disminuir el colesterol y las lipoproteínas. Además, se ha reportado que tiene capacidad de producir apoptosis en células cancerígena de hígado (González, 2020).

2.2.2 Z-Norbixina (Z-NRX)

Como se mencionó anteriormente, la Z-norbixina (Z-NRX) es también un apocarotenoide presente en la semilla de *Bixa orellana*, representando aproximadamente el 20 % del contenido del annatto. La Z-norbixina es una molécula análoga a la Z-BXN, ya que ambas comparten una estructura similar. Sin embargo, a diferencia de la Z-BXN, que posee dos grupos funcionales terminales distintos, la Z-NRX presenta dos grupos carboxilo en ambos extremos, como se muestra en la Figura 7.

Así mismo, es considerada un colorante de uso alimentario con una tonalidad que varía entre amarillo-rojo/marrón principalmente y según el CODEX alimentario recibe el código de clasificación E-160b(ii) por su obtención por método alcalino.

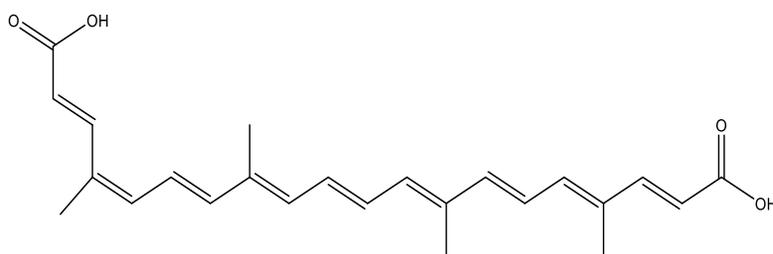


Figura 7: Estructura química de la Z-norbixina.

Principalmente por las propiedades que tiene como colorante es que la molécula resulta de gran utilidad e importancia en la industria alimentaria (Imbarex, 2019). Algunos de los usos más comúnmente son:

- Embutidos y lácteos
- Cereales y confitería
- Bebidas isotónicas y licores destilados

El hecho de que el annatto sea utilizado en la producción de algunos alimentos habla de la baja toxicidad que tiene, la OMS ha declarado un consumo recomendado 0.065 mg/Kg de peso al día (Lourido *et al.*, 2010). Aunque exceder su consumo en general no ocasiona afecciones al consumidor, existiendo algunas excepciones en donde los individuos han presentado síntomas alérgicos por el consumo.

Además de ser utilizada en alimentos, se han reportado algunas otras propiedades que la hace especialmente interesante en el área de la investigación. Algunas de ellas son: su capacidad antitumoral, antiinflamatoria y antiséptica, además de ser antibacteriana, antioxidante y cicatrizante (Rocha *et al.*, 2012).

Considerando las propiedades previamente descritas de la Z-NRX, diversos estudios han identificado esta molécula como un compuesto de interés, dada su aplicabilidad en múltiples áreas científicas y tecnológicas como se muestra en la Figura 8. No obstante, es imprescindible reconocer las limitaciones asociadas a su uso, especialmente los factores que pueden inducir su degradación, los cuales representan un desafío para su estabilidad y funcionalidad en aplicaciones específicas.



Figura 8: Estudios realizados con norbixina como molécula de interés.

Al tener la molécula pura expuesta a múltiples factores ambientales es propensa a sufrir una oxidación debido a su carácter insaturado. Así mismo, punto clave en la degradación de la molécula es la pérdida de su coloración rojiza, además de que la desaparición de los enlaces conjugados, por la escisión de la molécula o a raíz de una isomerización puede generar pérdida de sus potenciales propiedades curativas (Benítez *et al.*, 2010). Dentro de las variables que se deben de cuidar para evitar la degradación de esta, se encuentran las siguientes: luz, temperatura, pH, medio de dispersión y catalizadores metálicos.

Dado que diversos factores pueden actuar de manera conjunta para inducir procesos de fotodegradación, resulta fundamental comprender cómo estos afectan la estabilidad de la Z-norbixina. En este contexto, identificar las condiciones que representan un mayor riesgo para su integridad es un aspecto clave, ya que permite proponer estrategias orientadas a mitigar o prevenir su deterioro.

2.3 Fotodegradación

La fotodegradación es considerada una reacción producida por la influencia de la luz y naturalmente puede ser generada en la atmósfera, superficie del suelo y agua.

Generalmente este método es utilizado en búsqueda de la eliminación de contaminantes como en la degradación de plásticos, tintas y compuestos orgánicos, con el objetivo de transformarlos en sustancias más simples y menos tóxica (Ding *et al.*, 2021).

Este proceso ocurre de forma natural principalmente por exposición a la luz solar y puede ser clasificado en dos categorías principales:

- Fotodegradación directa: es cuando la molécula es expuesta directamente a la radiación y está la absorbe, producto de ello causa la generación de radicales libres.
- Fotodegradación inducida: cuando la degradación es iniciada por radicales libres generados a partir de la descomposición de moléculas de bajo peso molecular, comúnmente llamados sensibilizadores.

Así mismo existen una serie de factores que afectaran la eficiencia en el proceso de fotodegradación como lo son la intensidad y el tipo de luz, el pH, la presencia de materia orgánica disuelta y la composición que se tenga en el medio disuelto (Guo *et al.*, 2022).

Si bien generalmente es una técnica que utiliza la luz solar, con el paso de tiempo se ha implementado el uso de lampara de luz ultravioleta, las cuales son capaces de emitir a cierta longitud de onda determinada permitiendo que la experimentación sea más controlable al tener una irradiación constante.

Finalmente, además de sus aplicaciones previamente mencionadas, esta técnica resulta óptima para evaluar la estabilidad de moléculas susceptibles a condiciones ambientales adversas. Esto la convierte en una herramienta viable para analizar el comportamiento fotoquímico de la Z-norbixina, brindando información importante para su integridad y mantener sus propiedades.

3. JUSTIFICACIÓN

La Z-NRX es un apocarotenoide presente en las semillas de *Bixa orellana* Linn, caracterizado por sus múltiples propiedades que la hacen adecuada para aplicaciones en diversas industrias de interés. Al tratarse de un compuesto natural, cuya estructura consiste en una cadena carbonada con múltiples insaturaciones, es altamente susceptible a procesos de degradación inducidos por la exposición a la luz o a variaciones de temperatura. El estudio del comportamiento al ser sometida a ambientes hostiles es fundamental ya que impactaría en gran medida las condiciones para alargar la vida de anaquel en productos en los que se utilizan o potenciar y garantizar la eficacia de sus propiedades.

4. HIPÓTESIS

La Z-NRX presentará menor estabilidad que la Z-BXN debido a la diferencia en la reactividad de sus grupos funcionales al ser sometida a irradiación lumínica presentando una constante de degradación (K) mayor que la Z-BXN obtenida bajo las mismas condiciones.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Optimizar las condiciones de extracción y así mismo estudiar el comportamiento fotoquímico y termogravimétrico de la Z-NRX.

5.2 Objetivos específicos

1. Aislar Z-NRX a partir de la semilla de *Bixa orellana* Linn mediante una reacción de saponificación.
2. Obtener Z-NRX a partir de Z-BXN mediante una reacción de saponificación.
3. Evaluar la estabilidad fotoquímica de la Z-NRX mediante exposición a irradiación solar y artificial.
4. Realizar un estudio termogravimétrico de la Z-NRX.
5. Comparar la estabilidad fotoquímica de la Z-NRX con la Z-BXN

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizó la metodología para la obtención de Z-NRX, así como su estabilidad fotoquímica y térmica. Para lo cual se abordaron principalmente dos vertientes: la obtención de la Z-NRX a partir de la semilla de *Bixa orellana* y la conversión de Z-BXN a Z-NRX por medio de reacción de saponificación.

Como primer punto se observó que la saponificación directa de la semilla no fue efectiva, a diferencia de lo reportado en la literatura obteniendo como producto la formación de norbixilato.

Los análisis para la caracterización permitieron concluir lo siguiente:

- En el análisis UV-Vis se identificaron las bandas características de los apocarotenoides y una razón de banda III/II con un valor inferior al esperado para Z-NRX, esto debido a la presencia del sodio en la muestra.
- Por otro lado, el espectro obtenido por FTIR mostró un cambio en las bandas características de la Z-NRX, al presentar ausencia de bandas importantes como OH y un desplazamiento hacia mayores números de onda por la presencia de iones metálicos lo cual reforzó la hipótesis de que la conversión no fue completa.

Como alternativa, se evaluó el uso de una columna de intercambio catiónico para convertir norbixilato a Z-NRX de donde se pudo deducir:

- A pesar de lograr la remoción del sodio esta estrategia no resultó viable, ya que la proporción entre resina y muestra es desfavorable.
- Aunque la resina puede regenerarse, se considera que en la búsqueda de escalar la metodología esto incrementa los costos operativos y complica el proceso de extracción.

Se optó por utilizar técnicas complementarias en búsqueda de hacer la extracción más eficiente por lo cual se probaron técnicas complementarias de lo cual se puede concluir que:

- Al realizar una extracción liquido-líquido y acidificación, se observó que al ser caracterizada por FTIR esta tenía la presencia de las bandas características de OH además del resto de grupos funcionales.
- Se obtuvo una razón de banda III/II con un valor inferior al de la Z-BXN siendo igual a 34.03%. Sin embargo, el uso de estas técnicas representó un incremento en el tiempo y costos de la extracción.
- El uso de esta variante presentó dificultades al observarse la presunta formación de micelas en la extracción liquido-liquido lo cual dificultaba la separación de las fases y no era óptima la recuperación reflejándose en el rendimiento de reacción el cual fue de 3-10% aprox.

Además, se probó trabajar con la conversión de Z-BXN a Z-NRX por medio de una saponificación donde los resultados arrojaron lo siguiente:

- Se obtuvo una pureza máxima del 94% resultando la metodología más eficiente, con un rendimiento mayor a las otras técnicas.
- En este caso el valor de la razón de banda III/II fue igual al de la extracción liquido-liquido, y el espectro de FTIR mostró las bandas características para la Z-NRX donde se mostraron más definidas en comparativa con el resto.

En el estudio de la estabilidad fotoquímica se evaluaron tres fuentes de irradiación: lámparas negras (365 nm), lámparas blancas (410 nm) y luz solar.

- La fuente de irradiación que mostró mejor resultado fue la luz solar al completar su degradación en un tiempo máximo de 90 min esta rápida degradación bajo luz solar pone en evidencia su baja estabilidad.
- Los resultados mostraron que, entre las fuentes artificiales, las lámparas de 365 nm fueron las más eficaces, ya que completaron la degradación de la Z-NRX en un periodo de 9 horas, mientras que las lámparas de 410 nm requirieron 15 horas.

- Adicionalmente, en los tres tratamientos se observó un desplazamiento batocrómico de 5 nm, indicando alteraciones en la estructura de la molécula asociadas al proceso de degradación y elaidinización.
- Se realizó un análisis por HPLC permitió observar el proceso en la degradación en donde la parte más destacable es punto donde se igualan entre la degradación de la Z-NRX y la formación de E-NRX en las primeras 3 horas de exposición y para la luz solar en 20 min.
- La máxima generación que se dio de E-NRX estuvo en un rango de 81-83% para fuentes artificiales y un 64% aproximadamente para luz solar. Una vez se alcanzó el punto máximo prosiguió a la degradación completa.

Por último, el análisis termogravimétrico se pudo observar:

- Para la Z-NRX la formación de 3 bandas de degradación generalmente asociadas con la formación de aromáticos, fragmentos de colorante, cenizas y productos de escisión para la Z-NRX.
- Para el norbixilato no mostro información relevante debido a la presencia del sodio, lo cual genero únicamente ceniza.

De forma general, se puede afirmar que, a diferencia de lo que reportan diversos autores, la Z-NRX no puede obtenerse directamente de la semilla mediante una simple saponificación, además de que escasamente soluble en agua en su forma de ácido libre.

Es fundamental desarrollar estrategias que permitan proteger la molécula frente a condiciones ambientales adversas, con el fin de conservar sus propiedades funcionales y evitar su degradación, esto con el fin de ser utilizados en diferentes industrias como en el fortalecimiento de cremas tópicos contra la protección antioxidante, en el estudio de tiempo de vida media de productos que lo contengan, en la funcionalización de partículas con fines medicinales y en la generación de copolímeros o polímeros.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Alexander, P., & González, A. (2020, May 20). Bixina: principal pigmento extraído del achiote (Bixa orellana L.). *MasScience*. <https://www.masscience.com/la-bixina/>
2. Akram, S., Mushtaq, M., & Waheed, A. (2021). β -Carotene: Beyond provitamin A. *In A Centum of Valuable Plant Bioactives Elsevier*. (pp. 1–31). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822923-1.00008-X>
3. Benítez, R., Lenis, L., Luis, A., & Paz, J. (2010). Incremento de la estabilidad de bixina, norbixina y geraniol por acomplejamiento con β -cyclodextrina. *El Hombre y La Máquina*, 94–99.
4. Camacaro, J., Gómez, J., Jiménez, M., Vega, C., & Manganiello, L. (2018). Un colorante liposoluble de semillas de Onoto (Bixa Orellana L.) como insumo para la industria alimentaria. *Revista INGENIERÍA UC*, vol. 25, núm. 2. <https://www.redalyc.org/journal/707/70757669017/html/>
5. Cárdenas, O. (2023). Caracterización del extracto de bixina según el método de obtención a partir de la semilla de Bixa orellana linn (achiote), y estudios de su estabilidad foto y sonoquímica [Tesis de doctorado]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias Químicas.
6. Da Silva, E. C., Da Silva Coutinho, M. A., Matos, A. Z. G., Damacena, D. H. L., Alves, A. L., Da Silva, D., Viana, V. G. F., & Viana, D. D. S. F. (2020). Extração E Caracterização Térmica E Mineralógica Do Corante Extraído Das Sementes De Urucum / Thermal and Mineralogical Extraction and Characterization of Dye Extracted from Urucum Seeds. *Brazilian Applied Science Review*, 4(6), 3730-3737. <https://doi.org/10.34115/basrv4n6-035>
7. Devanand, P. S., Radha, P., Kumar, P., Sivakumar, B., Sivaprakash, M., Kiruba, M., Raja, N., Utharasu, S., Mangammal, P., Anand, G., Mathivanan, M., & Revathi, R. (2025). Unveiling the multifaceted attributes of Bixa orellana: An insight into its chemical composition,

- industrial application and cultural significance. *Plant Science Today*.
<https://doi.org/10.14719/pst.6046>
8. Dinache, A., Pascu, M.-L., & Smarandache, A. (2021). Spectral Properties of Foams and Emulsions. *Molecules*, 26(24), 7704. <https://doi.org/10.3390/molecules26247704>
 9. Ding, L., Yu, X., Guo, X., Zhang, Y., Ouyang, Z., Liu, P., Zhang, C., Wang, T., Jia, H., & Zhu, L. (2021). The photodegradation processes and mechanisms of polyvinyl chloride and polyethylene terephthalate microplastic in aquatic environments: Important role of clay minerals. *Water Research*, 208, 117879. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117879>
 10. Dudev, T., & Lim, C. (2006). Effect of Carboxylate-Binding Mode on Metal Binding/Selectivity and Function in Proteins. *Accounts Of Chemical Research*, 40(1), 85-93. <https://doi.org/10.1021/ar068181i>
 11. Gallardo-Cabrera, C., y Rojas-Barahona, A. (2015). Estudio de estabilidad de una formulación acuosa del colorante Annatto. *Revista Internacional de Investigación Alimentaria*, 22 (5), 2149-2154.
 12. Giuliano, G., Al-Babili, S., & von Lintig, J. (2003). Carotenoid oxygenases: cleave it or leave it. *Trends in Plant Science*, 8(4), 145–149. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(03\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(03)00053-0)
 13. Guerrero-Lagunes, L. A., Ruiz-Posadas, L. M., Cadena-Iñiguez, J., Soto-Hernández, R. M., Avendaño-Arrazate, C. H., Aguirre-Medina, J. F., Soto-Mendoza, C., & Aguirre-Cadena, J. F. (2025). The Bioprospecting of Bixa orellana L. for the Selection of Characters with Biological Activity. *Metabolites*, 15(2), 115. <https://doi.org/10.3390/metabo15020115>
 14. Guo, Z., Kodikara, D., Albi, L. S., Hatano, Y., Chen, G., Yoshimura, C., & Wang, J. (2022). Photodegradation of organic micropollutants in aquatic environment: Importance, factors and processes. *Water Research*, 231, 118236. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118236>

15. IMBAREX S.A. (2019) Natural colors and ingredients, <https://www.imbarex.com/es/>
16. Liu, H., Zhang, J., Xiong, Y., Peng, S., McClements, D. J., Zou, L., Liang, R., & Liu, W. (2022). Improving norbixin dispersibility and stability by liposomal encapsulation using the <sc>pH</sc> -driven method. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(5), 2070–2079. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11546>
17. Lorenz-Fonfria, V. A. (2020). Infrared Difference Spectroscopy of Proteins: From Bands to Bonds. *Chemical Reviews*, 120(7), 3466-3576. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00449>
18. Lourido Pérez, Hetzel de la C., & Martínez Sánchez, Gregorio. (2010). La Bixa orellana L. en el tratamiento de afecciones estomatológicas, un tema aún por estudiar. *Revista Cubana de Farmacia*, 44(2), 231-244. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75152010000200012&lng=es&tlng=es.
19. Meléndez-Martínez, Antonio J., Vicario, Isabel M., & Heredia, Francisco J. (2004). Estabilidad de los pigmentos carotenoides en los alimentos. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 54(2), 209-215. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222004000200011&lng=es&tlng=es.
20. Meléndez-Martínez, Antonio J, Vicario, Isabel M, & Heredia, Francisco J. (2007). Pigmentos carotenoides: consideraciones estructurales y fisicoquímicas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 57(2), 109-117. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S000406222007000200002
21. Meñaca, E. v., Restrepo, J., & Colmenares, A. J. (2018). Antioxidant activity of the inclusion complex of bixa orellana seeds extract in β -cyclodextrin obtained by supercritical CO₂. *Revista Vitae*, 83–91. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v25n2a04>

22. Møller, A. H., Jahangiri, A., Danielsen, M., Madsen, B., Joernsgaard, B., Vaerbak, S., Hammershøj, M., & Dalsgaard, T. K. (2020). Mechanism behind the degradation of aqueous norbixin upon storage in light and dark environment. *Food Chemistry*, 310, 125967. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125967>
23. Parvin, K., Aziz, M. G., Sarker, M. S. H., & Sill, H. P. (2011). Degradation kinetics of water-soluble annatto extract and sensory evaluation of annatto colored yoghurt. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 9(3–4), 139–142. <https://www.wfpublisher.com/Abstract/2239>
24. Prathima, D. & Asadhi, Sujitha & Usha, Rayalcheruvu. (2016). Phytochemical screening and antimicrobial activity of bixa Orellana linn. 8. 1078-1082. <https://ijppr.com/volume8issue7/>
25. Rocha, R., Bolognesil, B., Gaspari, G., & Gomes, G. (2012). Carotenoides bixina e norbixina extraídos do urucum (*Bixa orellana* L.) como antioxidantes em produtos cárneos. *Ciência Rural*, 42(8), 0103-8478. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000800029>
26. Vázquez, G. (2023). Expresión heteróloga y caracterización funcional de un aldehído deshidrogenasa de *Bixa orellana* potencialmente implicada en la biosíntesis de bixina. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/2887/1/PCB_M_Tesis_2023_Gabriela_Vazquez_Gomez.pdf
27. Walter, M. H., Floss, D. S., & Strack, D. (2010). Apocarotenoids: hormones, mycorrhizal metabolites and aroma volatiles. *Planta*, 232(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00425-010-1156-3>