



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA
AGROALIMENTARIA

**CÁSCARA DE *Renealmia alpinia*: POTENCIAL ANTIMICROBIANO DEL
ACEITE ESENCIAL Y APROVECHAMIENTO COMO ADITIVO EN
PANIFICACIÓN**

TESIS

**Que como requisito parcial
para obtener el grado de:**

MAESTRO EN CIENCIAS Y TECNOLOGIA AGROALIMENTARIA

Presenta:

SAYURI HERNÁNDEZ VARGAS

Bajo la supervisión de: Diana Guerra Ramírez, Dra.



**Maestría en
Ciencia y Tecnología
Agroalimentaria**



Chapingo, Estado de México, 2025.

CÁSCARA DE *Renealmia alpinia*: POTENCIAL ANTIMICROBIANO DEL ACEITE
ESENCIAL Y APROVECHAMIENTO COMO ADITIVO EN PANIFICACIÓN

Tesis realizada por **SAYURI HERNÁNDEZ VARGAS** bajo la supervisión del Comité Asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado
de:

MAESTRO EN CIENCIAS

DIRECTOR:


DRA. DIANA GUERRA RAMÍREZ

CODIRECTOR:


DRA. DIANA BECERRA MORALES

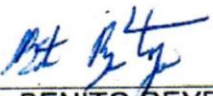
ASESOR:


DR. ELIEL MARTÍNEZ CRUZ

ASESOR:


DRA. MA. ROSA GONZALES TEPALE

ASESOR:


DR. BENITO REYES TREJO

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE APÉNDICES	viii
ABREVIATURAS USADAS	ix
DEDICATORIAS.....	x
AGRADECIMIENTOS	xi
DATOS BIOGRÁFICOS	xii
RESUMEN GENERAL.....	xiii
GENERAL ABSTRACT.....	xiv
1. Introducción general	1
2. Revisión de literatura.....	4
2.1 <i>Renealmia alpinia</i> (Rottb.) Mass	4
2.1.1. Distribución geográfica	4
2.1.2. Clasificación taxonómica	4
2.1.3. Descripción botánica.....	5
2.1.4. Composición química de la cáscara	6
2.2 Propiedades funcionales y usos de <i>Renealmia alpinia</i>	6
2.3 Aceites esenciales	7
2.3.1 Composición química de los aceites esenciales	9
2.4 Actividad antifúngica de los aceites esenciales	9
2.5 Valorización de subproductos agroindustriales	10
2.6 Literatura citada.....	13
3. PERFIL QUÍMICO Y POTENCIAL ANTIFÚNGICO DEL ACEITE ESENCIAL DE LA CÁSCARA DE <i>Renealmia alpinia</i>	18
Resumen.....	18

CHEMICAL PROFILE AND ANTIFUNGAL POTENTIAL OF THE ESSENTIAL OIL OF THE PEEL OF <i>Renealmia alpinia</i>	19
3.1 Introducción	20
3.2 Materiales y métodos.....	21n
3.2.1. Material vegetal y extracción del aceite esencial	21
3.2.2. Actividad antioxidante	21
3.2.3. Análisis GC/MS (cromatografía de gases-espectrometría de masas con trampa de iones).....	22
3.2.4. Ensayo antifúngico	23
3.2.5. Análisis estadístico.....	24
3.3. Resultados y discusión.....	24
3.3.1. Composición química.....	24
3.3.2. Actividad antioxidante	29
3.3.3. Actividad antifúngica	29
3.4. Conclusiones	32
3.5. Literatura citada.....	32
4. EFECTO DE LA CÁSCARA DE <i>Renealmia alpinia</i> EN LA CALIDAD DE UN PAN DE CAJA	37
Resumen.....	37
EFFECT OF THE PEEL OF <i>Renealmia alpinia</i> IN THE QUALITY OF A SANDWICH BREAD	38
4.1. Introducción	39
4.2. Materiales y métodos.....	40
4.2.1. Material vegetal y obtención de harina a partir de cáscara de <i>R. alpinia</i>	40
4.2.2. Evaluación de la calidad panadera.....	40
4.2.3. Análisis de color y perfil de textura (TPA) de los panes de caja adicionados con cáscaras de <i>R. alpina</i>	41
4.2.4. Composición proximal y mineral	42
4.2.5. Evaluación de las propiedades antioxidantes.....	42
4.2.6. Análisis microbiológico del pan de caja adicionado con cáscaras de <i>R. alpina</i>	44
4.2.7. Ensayo de toxicidad	44
4.3. Análisis estadístico	45
4.4. Resultados y discusión.....	45

4.4.1.	Calidad panadera de pan de caja adicionado con harina de cáscara de <i>R. alpinia</i>	45
4.4.2.	Análisis proximal y mineral del pan de caja adicionado con harina de cáscara de <i>R. alpinia</i>	49
4.4.3.	Análisis de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante	52
4.4.4.	Ensayo de toxicidad	53
4.4.5.	Análisis microbiológico del pan de caja adicionado con cáscaras de <i>R. alpina</i>	54
4.5.	Conclusiones	57
4.6.	Literatura citada.....	57
5.	APÉNDICES	64

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1A. Composición química del aceite esencial de la cáscara de <i>Renealmia alpinia</i> (Rottb.) Mass. Parte I (Compuestos del 1 al 9).....	26
Cuadro 1B. Compuestos identificados en el aceite esencial de la cáscara de <i>Renealmia alpinia</i> (Rottb.) Mass. Parte II (Compuestos del 9 al 18).....	27
Cuadro 1C. Compuestos presentes en el aceite esencial de la cáscara de <i>Renealmia alpinia</i> (Rottb.) Mass. Parte III (Compuestos del 18 al 24).....	28
Cuadro 2. Características de la calidad panadera, color y propiedades texturales del pan de caja adicionado con harina de cáscara de <i>R. alpinia</i>	46
Cuadro 3. Composición proximal y mineral de la cáscara de <i>R. alpinia</i>	50
Cuadro 4. Composición proximal del pan de caja adicionado con diferentes porcentajes de harina de cáscara de <i>Renealmia alpinia</i>	51
Cuadro 5. Fenoles totales, flavonoides, antocianinas, ABTS y FRAP en cáscara de <i>R. alpinia</i> y en el pan de caja elaborado con diferentes porcentajes de HRA.	53
Cuadro 6. Evaluación de toxicidad (CL ₅₀) de la cáscara de <i>Renealmia alpinia</i> y del pan de caja elaborado con diferentes porcentajes de HRA sobre <i>Artemia salina</i> a diferentes concentraciones.....	54
Cuadro 7. Recuento de mohos y levaduras, mesófilos aerobios y coliformes totales en los panes de caja adicionados con diferentes porcentajes de harina de cáscara de <i>R. alpinia</i>	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Inhibición del crecimiento micelial (mm) de <i>Alternaria</i> y <i>Curvularia</i> spp. con y sin AE a los 7 días de inoculación en condiciones in vitro: a) <i>Curvularia</i> spp. sin AE, b) <i>Curvularia</i> spp. con AE, c) <i>Alternaria</i> spp. sin AE, d) <i>Alternaria</i> spp. con AE.	30
Figura 2. Efecto del aceite esencial de <i>Renealmia alpinia</i> (Rottb.) Mass sobre el porcentaje de inhibición (%) frente a <i>Curvularia</i> spp. y <i>Alternaria</i> spp. durante los 7 días en condiciones in vitro.	30
Figura 3. Representación gráfica de los parámetros de color L*, a* y b* en los panes elaborados con diferentes formulaciones de harina de cáscara de <i>R. alpinia</i> . Luminosidad (L*) en una escala de 0 (oscuridad) a 100 (luminosidad), eje rojo-verde con color rojo (+a*) y verde (-a*) y eje amarillo-azul valor con amarillo (+b*) y azul (-b*). Testigo (HT0, 100 % de harina de trigo refinada), HRA = harina de cáscara de <i>R. alpinia</i> ; HRA1 (1 % de HRA), HRA2 (2.5 % de HRA) y HRA3 (5 % de HRA).	47
Figura 4. Efecto de la harina de cáscara de <i>R. alpinia</i> en la elaboración de un pan de caja con diferentes porcentajes. Testigo (HT0, 100 % de harina de trigo refinada), HRA = harina de cáscara de <i>R. alpinia</i> ; HRA1 (1 % de HRA), HRA2 (2.5 % de HRA) y HRA3 (5 % de HRA).	48
Figura 5. Alteraciones visuales de moho en los panes elaborados con diferentes formulaciones de harina de cáscara de <i>R. alpinia</i> durante su tiempo de almacenamiento. Se muestran las formulaciones: (a) HT0: 100 % de harina de trigo refinada, (b) HRA1: 1 % de harina de cáscara de <i>R. alpinia</i> , (c) HRA 2: 2.5 % de harina de cáscara de <i>R. alpinia</i> y (d) HRA 3: 5 % de harina de cáscara de <i>R. alpinia</i>	56

LISTA DE APÉNDICES

Cuadro A 1. Ingesta diaria de metales (DMI) e Índice de riesgo a la salud (HRI) en $\mu\text{g día}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de la cáscara de <i>Renealmia alpinia</i> (Rottb.) Mass.....	64
---	----

ABREVIATURAS USADAS

ABST: ácido 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico).

C3G: Cianidina-3-glucósido

DPPH: 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo

EAG: Equivalentes de ácido gálico

ET: Equivalentes de Trolox

FRAP: Poder antioxidante reductor férrico

GC-MS: Cromatografía de Gases-Espectrometría de Masas

ICP-MS: Espectrometría de masas de plasma de acoplamiento inductivo

DEDICATORIAS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el financiamiento otorgado para la realización de los estudios del posgrado.

Al laboratorio de Productos Naturales del Departamento de Preparatoria Agrícola, por permitir el acceso a sus instalaciones y proporcionar los recursos necesarios para llevar a cabo la fase experimental.

A la Dra. Diana Guerra Ramírez, quien con su conocimiento y experiencia me otorgó su invaluable apoyo durante el proceso y culminación de este trabajo de investigación, compartiendo su confianza y enseñanza.

A la Dra. Diana Becerra Morales, por su enseñanza, paciencia, tiempo, conocimientos compartidos y el apoyo técnico brindado en cada etapa de este trabajo de investigación.

Al Dr. Eliel Martínez Cruz por su disposición y colaboración en este trabajo de investigación, por permitirnos el acceso a las instalaciones del Laboratorio de Calidad de Trigo del Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX-INIFAP).

A la Dra. Ma. Rosa González Tepale por su disposición y valiosa participación, asesoramiento y orientación impartido para el cromatógrafo de gases.

Al Dr. Benito Reyes Trejo por su disposición, aportes y orientación en este trabajo de investigación.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el financiamiento otorgado para la realización de los estudios del posgrado.

A mis padres, quienes con su ejemplo de perseverancia, esfuerzo y superación han sabido forjarme en todo momento. Por su sacrificio en brindarme lo mejor y poder culminar mis estudios superiores.

A mis compañeros del laboratorio, gracias por el apoyo y el conocimiento compartido, gracias por brindarme su pequeña amistad que hizo que cada día de trabajo fuera más ameno.

A las personas que son parte del Laboratorio de Calidad de Trigo, que de manera directa o indirecta contribuyeron a esta investigación, por sus observaciones, sugerencias y apoyo técnico.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre:	Sayuri Hernández Vargas
Fecha de nacimiento:	30 de julio de 1998
Lugar de nacimiento:	Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
CURP:	HEVS980730MCSRRY01
Profesión:	Ingeniero Agrónomo Tropical
Cedula profesional:	13104279

Desarrollo académico

Bachillerato:	Preparatoria en Ciencias-Biológicas Florinda Lazo León, Chiapas
Licenciatura:	Ingeniero Agrónomo Tropical

RESUMEN GENERAL

CÁSCARA DE *Renealmia alpinia*: POTENCIAL ANTIMICROBIANO DEL ACEITE ESENCIAL Y APROVECHAMIENTO COMO ADITIVO EN PANIFICACIÓN

La incorporación de subproductos de frutas y oleaginosas en alimentos mejora significativamente sus características nutricionales, sensoriales y su potencial nutracéutico. Considerando lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial antimicrobiano del aceite esencial de las cáscaras de *R. alpinia* y su uso como aditivo en pan de caja. La cáscara de *R. alpinia* fue analizada para conocer su composición proximal y propiedades antioxidantes; asimismo, el aceite esencial de las cáscaras frescas se obtuvo mediante la técnica de hidrodestilación. Después se determinó el perfil de compuestos volátiles por CG-MS; además, el aceite esencial se probó contra *Alternaria* spp. y *Curvularia* spp. Por otra parte, se preparó harina de *R. alpinia* (HRA) y se adicionó en porcentajes de 1, 2.5 y 5 % para la elaboración de un pan de caja, el cual se analizó para conocer su composición proximal y propiedades antioxidantes. Se encontró que la cáscara de los frutos de *R. alpinia* contiene un alto porcentaje de fibra (22.97 %). Además, la cáscara de *R. alpinia* presentó un contenido fenólico total de 31.52 mg EAG g⁻¹ bs, y la capacidad antioxidante fue de 54.88 y 47.71 mg ET·g⁻¹ bs utilizando los ensayos ABTS y FRAP, respectivamente. El rendimiento del aceite esencial fue de 1 % e inhibió los radicales DPPH· y ABTS·+ en 91.23 y 22.79 %, respectivamente. Los principales compuestos del aceite esencial fueron monoterpenos como el bornano (32.22 %) y α-pineno (10.15 %); además, dicho aceite mostró un 71 % de inhibición contra *Curvularia* spp. Finalmente, los resultados de esta investigación evidenciaron que la HRA puede emplearse como aditivo natural en productos de panificación como el pan de caja, sin afectar negativamente sus parámetros de calidad; además, aporta compuestos bioactivos útiles para mejorar las propiedades funcionales y alargar su vida de anaquel.

Palabras clave: *Renealmia alpinia*, actividad antifúngica, capacidad antioxidante, aceite esencial, panificación, harina de cáscaras.

Tesis de Maestría en Ciencias. Posgrado en Ciencias y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Sayuri Hernández Vargas.

Director de tesis: Diana Guerra Ramírez, Dra.

Codirector: Diana Becerra Morales, Dra.

GENERAL ABSTRACT

***Renealmia alpinia* PEEL: ANTIMICROBIAL POTENTIAL OF THE ESSENTIAL OIL AND USE AS A BREADMAKING ADDITIVE**

The incorporation of fruit and oilseed by-products into foods significantly improves their nutritional and sensory characteristics and their nutraceutical potential. Considering the above, the objective of this study was to evaluate the antimicrobial potential of the essential oil of *R. alpinia* peel and its use as an additive in sandwich bread. The peel of *R. alpinia* was analyzed for its proximate composition and antioxidant properties; likewise, the essential oil of the fresh peels was obtained by the hydrodistillation technique. The volatile compound profile was then determined by CG-MS; in addition, the essential oil was tested against *Alternaria* spp. and *Curvularia* spp. On the other hand, *R. alpinia* flour (HRA) was prepared and added in percentages of 1%, 2.5%, and 5% for the preparation of sandwich bread, which was analyzed to determine its proximate composition and antioxidant properties. It was found that the peel of *R. alpinia* fruits contains a high percentage of fiber (22.97 %). In addition, the *R. alpinia* peel had a total phenolic content of 31.52 mg EAG g⁻¹ bs, and the antioxidant capacity was 54.88 and 47.71 mg ET·g⁻¹ bs using the ABTS and FRAP assays, respectively. The yield of the essential oil was 1%, and it inhibited DPPH· and ABTS·+ at 91.23% and 22.79%, respectively. The main compounds of the essential oil were monoterpenes, primarily bornane (32.22%) and α-pinene (10.15%). In addition, this oil indicates a 71% inhibition against *Curvularia* spp. Finally, the results of this research indicated that HRA can be used as a natural additive in bakery products such as sandwich bread, without negatively affecting its quality parameters. It also provides useful bioactive compounds that can enhance functional properties and extend its shelf life.

Keywords: *Renealmia alpinia*; antifungal activity; antioxidant capacity; essential oil; Bakery products; peel flour.

Master of Science Thesis,
Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Sayuri Hernández Vargas.
Thesis advisor: Diana Guerra Ramírez, Dra.
Co-director: Diana Becerra Morales, Dra.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La creciente demanda de alimentos funcionales y aditivos naturales ha impulsado la búsqueda de nuevas fuentes de compuestos bioactivos como compuestos fenólicos, alcaloides, flavonoides, carotenoides, glucósidos, taninos, saponinas, terpenoides y vitaminas con efectos positivos en la salud, los cuales pueden ser utilizados en el desarrollo de nuevos productos alimenticios, agentes o aditivos naturales (Lazcano *et al.*, 2023; Areti *et al.*, 2024). Particularmente, el grano de trigo es el segundo cereal más consumido en México y los productos de panificación forman parte de la canasta básica en la dieta de la población mexicana, ya que aportan carbohidratos, proteínas, fibras, antioxidantes y vitaminas (Wieser *et al.*, 2020). Debido a esto, la incorporación de subproductos de frutas y oleaginosas en diferentes alimentos ha contribuido a mejorar sus características nutricionales y sensoriales, incrementando el contenido de proteína, fibra, minerales, así como también cualidades deseables como propiedades antioxidantes, antimicrobianas y antihipertensivas (Pérez-Marroquín *et al.*, 2023; Pop *et al.*, 2021).

Algunas especies del género *Renealmia* se han identificado como fuentes importantes de metabolitos secundarios bioactivos, presentes en sus frutos, tallos, hojas y semillas, con propiedades biológicas (Fernández *et al.*, 2010). *R. alpinia*, conocida como x'kijit en lengua totonaca, es una planta silvestre comestible aprovechada en la comunidad de Ecatlán, municipio de Jonotla, Puebla, México, principalmente para elaborar un platillo tradicional con los arilos del fruto, los cuales poseen una coloración amarilla; color característico del platillo (Vázquez *et al.*, 2023). Sin embargo, las cáscaras del fruto generalmente suelen desecharse. Se espera que la cáscara de *Renealmia alpinia* también contenga metabolitos secundarios, de interés, en particular,

antocianinas que puedan ser incorporadas en los alimentos para mejorar su potencial nutracéutico.

Dado que existen pocos estudios sobre la cáscara de *R. alpinia*, el objetivo de esta investigación fue determinar el potencial antimicrobiano del aceite esencial y evaluar el aprovechamiento de la harina de cáscara de *R. alpinia* (HRA) como aditivo en panificación, con el fin de proponer alternativas de aprovechamiento de este subproducto.

En este trabajo se desarrollaron dos temas principales:

a) “Perfil químico y potencial antifúngico del aceite esencial de la cáscara de *Renealmia alpinia*”, en el cual se presentan los resultados de la composición química del aceite esencial, la actividad antioxidante y la actividad antifúngica contra *Alternaria* spp. y *Curvularia* spp.

b) “Efecto de la cáscara de *Renealmia alpinia* en la calidad de un pan de caja”, donde se analizan los efectos de la adición en 1, 2,5 y 5 % de la harina de cáscara de *R. alpinia* en la calidad panadera, propiedades nutricionales y vida de anaquel de un pan de caja.

1.1. Literatura citada

- Areti, H. A., Muleta, M. D., Abo, L. D., Hamda, A. S., Adugna, A. A., Edae, I. T., Daba, B. J., & Gudeta, R. L. (2024). Innovative uses of agricultural by-products in the food and beverage sector: A review. *Food Chemistry Advances*, 5, 100838. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100838>
- Fernández, M. C. W., Pereañez, J. A., & Rodríguez, D. (2010). Antiophidian properties evaluation of ethanol extract and fractions obtained from *Renealmia alpinia* (Rottb.) Mass (Zingiberaceae) cultivated in vitro. *Vitae*, 17, 75–82. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.4979>
- Lazcano-Hernández, C., Hernández, H. A., García, C. L., Pérez, E. E., Contreras, L. E., & Pérez, F. J. (2023). Extracción de compuestos bioactivos a partir de los subproductos de la tuna (*Opuntia ficus-indica* spp.): Tendencias y aplicaciones recientes en alimentos. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1), 785–794. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.101>

- Pérez-Marroquín, X. A., Estrada, F. A. G., García, C. A., Aguirre-A. G., & León, L. A. (2023). Agro-food waste as an ingredient in functional beverage processing: Sources, functionality, market, and regulation. *Foods*, 12(8), 1583. <https://doi.org/10.3390/foods12081583>
- Pop, C., Suharoschi, R., & Pop, O. L. (2021). Dietary fiber and prebiotic compounds in fruits and vegetables food waste. *Sustainability*, 13(13), 7219. <https://doi.org/10.3390/su13137219>
- Vázquez, J. J. B., Casas, A., Ramírez, M. H., Martínez, B. A., Torres, G. I., Abad, F. I., Beltrán, R. L., Larios, C., Olvera, E. A., Miranda, G. M. A., Lotero, E., & Vallejo, M. (2023). Ethnobotany of the Nahua people: Plant use and management in the Sierra Negra, Puebla, Mexico. *Ethnobotany of Mountain Regions*, 453–516. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99357-3_19
- Wieser, H., Koehler, P., & Scherf, K. A. (2020). Nutritional value of wheat. *Wheat - An Exceptional Crop*, 133–148. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821715-3.00006-X>

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 *Renealmia alpinia* (Rottb.) Mass

2.1.1. Distribución geográfica

Renealmia alpinia conocida comúnmente como cardamomo, cargamomo, cherimole, guilimole, bexo, huashmole, huele mole, ixquihit, tapicón, xke'jekpá'hlhma' y xquijit en los estados de Oaxaca y Puebla, es una planta nativa de bosques tropicales pertenecientes a la familia Zingiberaceae (Lascurain-Rangel *et al.*, 2022).

El género *Renealmia*, que comprende aproximadamente 85 especies neotropicales, es el único género de la familia Zingiberaceae, presente en América tropical, con una amplia distribución e importancia etnobotánica. Esta especie, en particular, se distribuye desde el sur de México hasta Suramérica tropical y Antillas Menores, incluyendo a países como Perú, Brasil, Guyana, Surinam, Venezuela y Colombia (Charry *et al.*, 2024). Aún con la amplia distribución e importancia etnobotánica, existe un número limitado de estudios fitoquímicos, taxonómicos y biológicos sobre las diferentes especies de este género.

2.1.2. Clasificación taxonómica

De acuerdo con Maas (1977), la especie se clasifica taxonómicamente de la siguiente manera:

Reino: Plantae

División Magnoliophyta

Orden: Zingiberales

Clase: Liliopsida

Familia: Zingiberaceae

Género: *Renealmia*

Especie: *alpinia*

Nombre científico: *Renealmia alpinia* (Rottb.) Mass

2.1.3. Descripción botánica

Galván *et al.* (2020) y Negrelle (2015) la describen como una planta herbácea de aproximadamente 2 a 5 m de altura, con hojas angostamente elípticas con un largo entre 30 y 110 cm, y un ancho de 5 a 20 cm. Las hojas presentan un ápice acuminado con una base cuneada, vainas lisas y un pecíolo de hasta 30 mm de largo. Su inflorescencia en forma de racimos emerge de la parte basal del rizoma con una longitud de 12 a 55 cm y un ancho de 4 a 8 cm. Presenta una cima escorpioide y brácteas triangulares, agudas, herbáceas, ligeramente pubescentes y caducas, de color rosa tornándose a rojo. Las bractéolas son tubulares, al igual que el cáliz de las flores, que presentan una coloración de rosado a rojo, y una corola de color amarillo a rojo, con una longitud de 18 a 32 mm. El fruto de tipo cápsula elipsoide, es coronado por los restos del cáliz, con una longitud entre 15 y 35 mm. El fruto presenta una coloración característica; durante su desarrollo posee un color rojo, que gradualmente va tornándose entre morado y negro, cuando comienza su maduración. Por último, las semillas de tipo elíptico se encuentran rodeadas por un arilo de color amarillo anaranjado, con textura cremosa.

2.1.4. Composición química de la cáscara

Dentro de la familia Zingiberaceae se ha identificado una amplia diversidad de compuestos químicos, como terpenoides, diarilheptanoides, cumarinas, quinoides y arilalcaloides. Entre los compuestos fenólicos, destacan principalmente los flavonoides, los cuales han sido reportados en diferentes especies de esta familia (Gevú *et al.*, 2024).

El fruto de *Renealmia alpinia* contiene un alto contenido de carotenoides presentes en la pulpa. Sin embargo, en el pericarpio se ha reportado la presencia de pigmentos ricos en antocianinas, así como también una fuente importante de compuestos fenólicos con alta capacidad antioxidante (Jiménez-González *et al.*, 2021). Actualmente, existe una falta de información sobre la composición química de la cáscara de *R. alpinia*, la cual podría ser aplicada en la industria alimentaria.

2.2 Propiedades funcionales y usos de *Renealmia alpinia*

Gómez-Betancur y Benjumea (2014) destacan que los compuestos aislados de especies de la familia Zingiberaceae, por ejemplo, raíz de jengibre (*Zingiber officinale*) (Edo *et al.*, 2025), presentan un amplio espectro de actividades biológicas y farmacológicas, que incluyen propiedades antifúngicas, antibacterianas, antipalúdicas, antioxidantes, antiulcerosas, antitumorales e hipotérmicas. Dentro de esta familia, el género *Renealmia* ha sido estudiado por sus usos en la medicina tradicional, especialmente como agente antiofídico en pueblos indígenas de Colombia y en las islas del Caribe. Además, se le atribuyen otras propiedades como insecticida, nematicida, larvicida y usos terapéuticos para tratar dolores de cabeza, dolor abdominal y como febrífugo (Fernández *et al.*, 2010).

Renealmia alpinia, es una especie con múltiples aplicaciones tanto culinarias como etnomedicinales. En México, sus frutos comestibles se utilizan como especia debido a su sabor picante. Los arilos son utilizados en la preparación de platillos tradicionales por pueblos indígenas; por ejemplo, en la Sierra norte de Puebla, la étnica totonaca utiliza los arilos para la elaboración de una sopa tradicional llamada “X’kijit”. Las hojas son utilizadas como envoltorios para tamales u otros tipos de alimentos. De las semillas se extrae aceite para freír frituras (Aguilar, 2019). Mientras que las cáscaras de color morado oscuro, que comúnmente se desechan, son una fuente de colorantes naturales, debido a su alto contenido de flavonoides, y son utilizadas principalmente para la coloración de artesanías y textiles (Noriega *et al.*, 2011).

En cuanto a sus propiedades etnomedicinales, *R. alpinia* ha sido estudiada por su actividad antioxidante y antiinflamatoria, dado el contenido de carotenoides, monoterpenos, diterpenos y sesquiterpenos. En comunidades rurales como Veracruz, Oaxaca y Puebla, el fruto se utiliza regularmente como un antiemético (Luna *et al.*, 2018). Por otra parte, Al-Shabib *et al.* (2017) han señalado que *R. alpinia* posee un prometedor potencial como aditivo alimentario o componente natural en la industria alimentaria. Los pigmentos de la cáscara y el aceite extraído de las semillas podrían usarse como agentes saborizantes y colorantes naturales, que ayuden a mejorar el contenido nutricional, los atributos de color, sabor y aportar propiedades antioxidantes en alimentos convencionales.

2.3 Aceites esenciales

Los aceites esenciales son mezclas complejas de compuestos volátiles e hidrófobos, sintetizados como metabolitos secundarios por las plantas, extraídos de flores, brotes, semillas, hojas, madera, frutos, raíces, ramas y corteza (Maiti *et al.*, 2022; Manzoor *et al.*, 2023). Se constituyen como la clase más amplia de metabolitos secundarios de las plantas, desempeñando

funciones ecológicas como atrayentes de polinizadores y agentes defensivos que protegen a las plantas de depredadores, microorganismos, insectos y otros animales. Asimismo, tiene importantes funciones fisiológicas como hormonas vegetales y pigmentos sintéticos (Requejo, 2020; González-Moreno *et al.*, 2022). De acuerdo con la norma ISO 9235:2013, el término 2.11 define el aceite esencial como el producto obtenido a partir de una materia prima natural de origen vegetal, por destilación al vapor, por procesos mecánicos o por destilación en seco, después de la separación de la fase acuosa, en su caso, por procesos físicos.

En cuanto, a los métodos de extracción de aceites esenciales, se han empleado diversas técnicas convencionales, que incluyen la maceración y la extracción por reflujo. También, se han utilizado otros métodos, tales como la hidrodestilación, hidrofusión, destilación por arrastre de vapor, extracción con disolventes, extracción asistida por ultrasonido, métodos de extracción por Soxhlet y extracción con fluido supercrítico. Entre estas técnicas, la hidrodestilación simple o con una trampa de Clevenger es una de las más empleadas (Cevallos *et al.*, 2023). El método de hidrodestilación consiste en llevar a ebullición una suspensión compuesta por agua y el material vegetal, con el fin de condensar y recolectar los vapores en una fase fría. Este método se caracteriza por el contacto directo entre el agua en ebullición y el material vegetal. Al ser muy alta la presión de vapor de los aceites esenciales, es posible lograr una mezcla de vapor de agua y aceites esenciales, que al pasar por un medio frío como un refrigerante recto o de rosario, el aceite esencial es separado del agua por diferencia de densidades, ya que los compuestos orgánicos volátiles suelen tener una menor densidad que el agua (Villamizar-Véliz y Aular, 2022).

2.3.1 Composición química de los aceites esenciales

La composición química de los aceites esenciales exhibe una amplia gama de compuestos volátiles, producidos a partir del metabolismo secundario de las plantas. Por lo general, las plantas contienen combinaciones de unidades de cinco átomos de carbono o isoprenos altamente volátiles como metabolitos secundarios que forman parte de los hemiterpenoides (C5), monoterpenoides (C10), sesquiterpenoides (C15) y diterpenoides (C20), compuestos que se encuentran mayoritariamente en los aceites esenciales obtenidos (Ebrahimzadeh *et al.*, 2023; Subramanya *et al.*, 2022). Específicamente, los monoterpenos y sesquiterpenos se encuentran mayoritariamente en los aceites esenciales (Wani *et al.*, 2021). Por otra parte, en los aceites esenciales pueden encontrarse moléculas que contienen grupos funcionales con oxígeno, por ejemplo, alcoholes (mentol), éteres (eucalipto), aldehídos (cinamaldehído), cetonas (alcanfor, mentona), y ésteres (salicilato de metilo), principalmente son compuestos derivados del isopreno que resultan de la modificación química de los terpenos, que suelen estar presentes en los aceites esenciales (González-Moreno *et al.*, 2022).

2.4 Actividad antifúngica de los aceites esenciales

Los aceites esenciales (AE) extraídos de numerosas plantas, especialmente de importancia medicinal, contienen compuestos bioactivos que han demostrado un amplio espectro de actividades biológicas. Estas propiedades funcionales se atribuyen a la presencia de compuestos orgánicos como fenoles, terpenos, cetonas, aldehídos, sulfuros, aminas y alcoholes, que permiten establecer su efecto bactericida, antimicótico, antiparasitario, antiviral, insecticida, antimicrobiano, antiinflamatorio, antitumoral y antioxidante (Palacios *et al.*, 2020; Rashidinejad y Jafari, 2020). Entre estas propiedades, la actividad antifúngica ha sido objeto de investigación para su aplicación en la medicina como en la industria alimentaria. Los compuestos responsables

incluyen los fenoles, terpenos, alcoholes, alifáticos, aldehídos, cetonas, ácidos o isoflavonoides, destacándose los compuestos fenólicos y los terpenos como los principales responsables de esta actividad biológica (Abd-Rashed *et al.*, 2021; Wang y Salvi, 2023). La mayoría de estos compuestos se encuentran comúnmente en los aceites esenciales extraídos de plantas pertenecientes a familias como *Acoraceae*, *Apiaceae*, *Asteraceae*, *Cupressaceae*, *Geraniaceae*, *Illiciaceae*, *Lamiaceae*, *Lauraceae*, *Myristicaceae*, *Myrtaceae*, *Oleaceae*, *Pinaceae*, *Poaceae*, *Rosaceae*, *Santalaceae* y *Zingiberaceae*. Esta familia es rica en terpenos con propiedades antifúngicas, tales como alcanfor, carvacrol, 1,8-cineol, citral, p-cimeno, geraniol, linalol, mentoles, pinenos, terpinenos, tuyonas y timol (Karpiński, 2020).

Especies englobadas en la familia Zingiberaceae han sido estudiadas por su utilidad como agente repelente de insectos, actividad antimicrobiana y antifúngica. Entre las especies representativas de esta familia se encuentran *Curcuma longa* L. y *Zingiber officinale* Roscoe, registradas como agentes potenciales de actividad antimicrobiana. Con respecto, a *Renealmia alpinia*, se ha reportado la presencia mayoritaria de los compuestos de β -cariofileno, β -pineno, alo-aromadendreno, γ -cadineno y valenceno en rizomas, tallos, raíces y hojas. Sin embargo, la aplicación de esta especie como agente antimicrobiano y la composición química de su fruto han sido poco investigadas (De Souza *et al.*, 2023; García *et al.*, 2025).

2.5 Valorización de subproductos agroindustriales

La industria alimentaria genera grandes cantidades de residuos, que conducen a problemas ambientales y económicos que, a su vez, promueven otros más severos como la inseguridad alimentaria. La mayoría de los residuos provienen de alimentos de origen animal y vegetal, subproductos generados durante la producción y después de su procesamiento, así como también aquellos obtenidos por mal manejo en pre o postcosecha, transporte y almacenamiento,

mercadeo y comercialización (Preciado-Saldaña *et al.*, 2022; Granados, 2020).

El manejo inadecuado de estos residuos incide directamente sobre el equilibrio ambiental. Uno de los principales problemas es la emisión de gases contaminantes originados por la descomposición natural de estos alimentos, ya que suelen ser quemados o arrojados en botaderos a cielo abierto o en terrenos baldíos, provocando contaminación del suelo, agua y otros espacios naturales (Aguiar *et al.*, 2022; Ordaz *et al.*, 2022). La reducción de estos residuos implica la capacitación en buenas prácticas de producción, manejo y manufactura de cada uno de los participantes de los múltiples procesos que conforman la cadena de valor de los alimentos. Sin embargo, la industria alimentaria, desde el sistema económico que abarca la producción hasta el consumo, aún muestra resistencia en la implementación de estas prácticas (Kharola *et al.*, 2022; Donner *et al.*, 2022).

En este contexto, el aprovechamiento de los subproductos ha sido abordado desde un enfoque tecnológico, principalmente en países desarrollados y algunos países de Latinoamérica, incluyendo a México. Estas acciones incluyen su transformación en bioenergía, fertilizantes, biomateriales y/o nuevos ingredientes para el desarrollo de alimentos funcionales o nutraceuticos, con el objetivo de generar nuevas materias primas con mayor valor agregado (Duque-Acevedo *et al.*, 2020). La transformación de estas materias primas sometidas a procesos tecnológicos permite obtener nuevos productos alimenticios. En los últimos años, se ha señalado que los subproductos representan una importante fuente de compuestos bioactivos como compuestos fenólicos, alcaloides, flavonoides, carotenoides, glucósidos, taninos, saponinas, terpenoides y vitaminas con efectos positivos en la salud, los cuales pueden ser utilizados en el desarrollo de nuevos productos alimenticios o aditivos naturales (Lazcano *et al.*, 2023; Areti *et al.*, 2024). Por ejemplo, algunos subproductos se destacan por su potencial para mejorar el

valor nutricional, el sabor y la funcionalidad de los alimentos, como la cáscara y semilla de mango, el orujo de uva, manzana o algunos subproductos de cáscaras de papa, cascarilla de café y granos quebrados de frijoles u otras legumbres que son añadidos en diferentes productos de panificación, botanas o en formulaciones nutraceuticas (Bento *et al.*, 2021; Manisha *et al.*, 2022). También, se han estudiado las cáscaras de plátano por sus propiedades antioxidantes y como aditivo funcional en productos como los nuggets de pollo de engorde (Díaz y Castro, 2021). Carvajal-Larenas *et al.* (2021) desarrollaron biopolímeros a base de subproductos del mango, capaces de prolongar la vida útil de los alimentos, debido a los compuestos bioactivos presentes en la cáscara del fruto, los cuales protegen a un producto de daños fisicoquímicos y contaminación microbiana, sin afectar su calidad y propiedades organolépticas.

De manera similar, las cáscaras de cítricos se han caracterizado por su alto contenido de aceites esenciales y pectina, con aplicaciones en las industrias culinaria, farmacéutica y cosmética. Las semillas de uva de la vinificación se utilizan para extraer aceites ricos en antioxidantes y polifenoles, útiles en suplementos dietéticos y cuidados de la piel (Areti *et al.*, 2024). Otros subproductos como los residuos del pepino han sido utilizados para la obtención de bioproteínas, antioxidantes y la fabricación de bionanocompuestos, mientras que los residuos de papaya se utilizan para la obtención de ácidos grasos, flavonoides, compuestos fenólicos, enzimas y proteínas que representan una alternativa en la industria alimentaria y farmacéutica (Vázquez-Mata *et al.*, 2022). Por otra parte, los residuos del café han sido aplicados en diferentes matrices alimentarias, en particular la cáscara del café especie arábica utilizada en trabajos previos, como ingredientes en yogurts, evaluando las características sensoriales y propiedades beneficiosas para la salud (Salomé-Martínez y Jaramillo-Gamboa, 2023). En conjunto, la aplicación de este tipo de subproductos, principalmente desechos vegetales como cáscaras, tallos, semillas, salvado y pulpa, representa oportunidades de

innovación, en cuanto a la generación de nuevos productos con mejores características nutricionales y sensoriales, incluyendo mayores contenidos de proteínas, fibra y minerales, y cualidades deseables como propiedades antioxidantes, antimicrobianas y antihipertensivas. Estas aplicaciones se consideran una ventaja prometedora, con un impacto positivo tanto en la salud de consumidor y en el medio ambiente, al reducir y mejorar la recuperación de estos subproductos (Pérez-Marroquín *et al.*, 2023; Pop *et al.*, 2021).

2.6 Literatura citada

- Aguilar, S., Estrella, M. E., & Cabadiana, H. U. (2022). Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. *AXIOMA*, 1(27), 5-11. <https://doi.org/10.26621/ra.v1i27.803>
- Aguilar, S. D. (2019). Renealmia alpinia: un pariente neotropical del jengibre, la cúrcuma y el cardamomo. *Revista de Biología Tropical*, (4). <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/38697>
- Al-Shabib, N. A., Khan, J. M., Khan, M. S., Ali, M. S., Al-Senaidy, A. M., Alsenaidy, M. A., Husain, F. M., & Al-Lohedan, H. A. (2017). Synthetic food additive dye “Tartrazine” triggers amorphous aggregation in cationic myoglobin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 98, 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.097>
- Areti, H. A., Muleta, M. D., Abo, L. D., Hamda, A. S., Adugna, A. A., Edae, I. T., Daba, B. J., & Gudeta, R. L. (2024). Innovative uses of agricultural by-products in the food and beverage sector: A review. *Food Chemistry Advances*, 5, 100838. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100838>
- Carvajal-Larenas, L. F., Sánchez, M. A., Criollo, C. G., Garcés, L. C., Martínez, O. N., Terán, M. P., Reyes, J. C., & Andrade, C. J. (2021). Biopolímeros de cáscaras de mango y su importancia en la soberanía alimentaria. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 13(1), 7. <https://doi.org/10.18272/aci.v13i1.1775>
- Cevallos, J. L. C., Alcívar, M. A. N., Mendoza, V. S., & Mendoza, C. A. M. (2023). Eficacia en la extracción de aceite a partir de especies vegetales. *Revista Colón Ciencias Tecnología y Negocios*, 10(2), 1–16. <https://doi.org/10.48204/j.colonciencias.v10n2.a4137>
- Charry, S. P. A., Cano, B. J. L., Ríos, V. E., Gutiérrez, C. J. A., Martínez, E. J. C., Sánchez, G. D., Pichardo, M. J. L., & Villa, Z. C. C. (2024). Potencial antifúngico de la nanoemulsión del aceite esencial de *Renealmia thyrsoides* contra *Candida albicans*. *SSRN*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4938466>
- Wani, A. R., Yadav, K., Khursheed, A., & Rather, M. A. (2021). Pre-gelatinized flours of black and carioca bean by-products: Development of gluten-free

- instant pasta and baked snacks. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 25, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100383>
- De Souza, E. C. A., Flach, A., & da Costa, L. A. M. A. (2023). Chemical composition and antioxidant activity of the essential oil of *Renealmia alpinia* (Rottb.) Maas. *Natural Product Research*, 37(23), 4042-4048. <https://doi.org/10.1080/14786419.2022.2164578>
- Díaz, M. E., & Castro, M. R. (2021). Edible Films and coatings as food-quality preservers: An Overview. *Foods*, 10(2), 249. <https://doi.org/10.3390/foods10020249>
- Donner, M., Erraach, Y., López, G. F., Martin, J., Yatribi, T., Radić, I., & Hadad, G. F. E. (2022). Circular bioeconomy for olive oil waste and by-product valorisation: Actors' strategies and conditions in the Mediterranean area. *Journal of Environmental Management*, 321, 115836. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115836>
- Duque-Acevedo, M., Belmonte, U. L. J., Cortés, G. F. J., & Camacho, F. F. (2020). Agricultural waste: Review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. *Global Ecology and Conservation*, 22, e00902. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00902>
- Ebrahimzadeh, S., Biswas, D., Roy, S., & McClements, D. J. (2023). Incorporation of essential oils in edible seaweed-based films: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 135, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.015>
- Edo, G. I., Igbuku, U. A., Makia, R. S., Isoje, E. F., Gaaz, T. S., Yousif, E., Jikah, A. N., Zainulabdeen, K., Akpogheli, P. O., Opiti, R. A., Essaghah, A. E. A., Ahmed, D. S., & Umar, H. (2025). Phytochemical profile, therapeutic potentials, nutritional composition, and food applications of ginger: A comprehensive review. *Discover Food*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00280-2>
- Fernández, M. C., William, P., Pereañez, J. A., & R, Diego. (2010). Antiophidian properties evaluation of ethanol extract and fractions obtained from *Renealmia alpinia* (Rottb.) Mass (Zingiberaceae) cultivated in vitro. *Vitae*, 17, 75–82. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.4979>
- Galván, G. R., Martínez, L. Z., Corvalán, P. U., Fernández, A. C., & Díaz, P. P. (2020). Plantas comestibles del solar Maya Ch'ol Chiapas. En Universidad Autónoma de Chiapas eBooks. <https://doi.org/10.31644/de2025b2>
- Gevú, K. V., Lima, H. R. P., Alexandrino, C. R., & Da Cunha, M. (2024). Anatomical and histochemical characterization of vegetative organs of Brazilian species of *Renealmia* (Zingiberaceae). *Rodriguésia*, 75. <https://doi.org/10.1590/2175-7860202475041>
- Gómez-Betancur, I., & Benjumea, D. (2014). Traditional use of the genus *Renealmia* and *Renealmia alpinia* (Rottb.) Maas (Zingiberaceae): A review in the treatment of snakebites. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 7, S574–S582. [https://doi.org/10.1016/s1995-7645\(14\)60292-3](https://doi.org/10.1016/s1995-7645(14)60292-3)
- González-Moreno, B. J., Piña, B. A. M., Pérez, L. L. A., Galindo, R. S. A., & Álvarez-Román, R. (2022). Aceites esenciales de origen natural: Características químicas, técnicas de extracción y potencial aplicación

- biológica. *Biología y Sociedad*, 5(10), 20–30.
<https://doi.org/10.29105/bys5.10-71>
- Granados, S. F. (2020). Pasando de pérdidas a soluciones en América Latina y el Caribe. <https://parlatino.org/wp-content/uploads/2017/09/perdida-soluciones.pdf>
- Hernández-García, N. R., Mendoza-López, M. R., Camacho-Martínez, F. J., Pérez-Landero, S., & Almonte-Becerril, M. (2025). Potencial Antimicótico y Composición de Aceites Esenciales de la Planta Xkijit (*Renealmia alpinia*). *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(1), 2589-2612. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16030
- International Organization for Standardization. (2013). ISO 9235:2013. Aromatic natural raw materials – Vocabulary (Término 2.11). ISO.
- Jiménez-González, O., Luna-Guevara, J. J., Ramírez-Rodríguez, M. M., Luna, V. D., & Luna, G. M. L. (2021). Microencapsulation of *Renealmia alpinia* (Rottb.) Maas pulp pigment and antioxidant compounds by spray-drying and its incorporation in yogurt. *Journal Food Science And Technology*, 59, 1162-1172. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05121-5>
- Manisha, J., Himashree, P., Sengar, A. S., & Sunil, C. (2022). Valorization of food industry by-product (Pineapple Pomace): A study to evaluate its effect on physicochemical and textural properties of developed cookies. *Measurement: Food*, 6, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.meafao.2022.100031>
- Karpiński, T. M. (2020). Essential Oils of Lamiaceae Family Plants as Antifungals. *Biomolecules*, 10(1), 103. <https://doi.org/10.3390/biom10010103>
- Kharola, S., Ram, M., Kumar, MS, Goyal, N., Nautiyal, OP., Pant, D. & Kazancoglu, Y. (2022). Exploring the green waste management problem in food supply chains: A circular economy context. *Journal of Cleaner Production*, 351, 131355. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131355>
- Lascrain-Rangel, M., Avendaño, R. S., Tan, R., Caballero, J., Cortés, Z. L., Linares, M. E., López, B. C., Y De Ávila, A. (2022). Plantas americanas utilizadas como condimento en la cocina mexicana. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 93, e933949. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2022.93.3949>
- Lazcano-Hernández, C., Hernández-Hernández, A., García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Contreras-López, E., & Pérez-Flores, J. (2023). Extracción de compuestos bioactivos a partir de los subproductos de la tuna (*Opuntia ficus-indica* spp.): Tendencias y aplicaciones recientes en alimentos. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1), 785–794. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.101>
- Luna-Guevara, M. L., Ochoa-Velasco, C. E., Hernández-Carranza, P., Contreras-Cortes, L. E. U., & Luna-Guevara, J. J. (2018). Composition, physico-chemical properties and antioxidant capacity of *Renealmia alpinia* (Rottb.) Maas fruit. *Revista Facultad de Ciencias Agrarias*, 50, 377-385.
- Maas, P. J. M. (1977). *Renealmia* (Zingiberaceae - Zingiberoideae) Costoideae (Additions) (Zingiberaceae). *Flora Neotropica*, 18, 1–218. <http://www.jstor.org/stable/4393712>

- Maiti, T. K., Parvate, S., Dixit, P., Singh, J., Reddy, V. J., Bhuvanesh, E., & Chattopadhyay, S. (2023). Liposome for encapsulation of essential oil and fatty acids. *Liposomal Encapsulation in Food Science and Technology*, 113-124. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823935-3.00003-5>
- Manzoor, A., Yousuf, B., Pandith, J. A., & Ahmad, S. (2023). Plant-derived active substances incorporated as antioxidant, antibacterial or antifungal components in coatings/films for food packaging applications. *Food Bioscience*, 53, 102717. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102717>
- Negrelle, R. R. B. (2015). *Renealmia* L.f.: aspectos botânicos, ecológicos, farmacológicos e agrônômicos. *Revista Brasileira De Plantas Medicinais*, 17(2), 274–290. https://doi.org/10.1590/1983-084X/13_049
- Noriega, P., Coba, P. Naikiai, J., Abad, J. & Martínez A.M. (2011). Extracción, pruebas de estabilidad y análisis químico preliminar de la fracción del colorante obtenida a partir del exocarpo del fruto de *Renealmia alpinia*. *La Granja*. 13(1): 13-20.
- Ordaz, S. B., Abadía-García, L., Femat-Díaz, A., & Mendoza-Sánchez, M. (2022). Aprendiendo a revalorizar los subproductos y su aplicación en productos cárnicos. *EPISTEMUS*, 16(33), 55–62. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.227>
- Palacios, C. M., López, B. S., & Medina, A. (2020). Composición química y actividad biológica de los aceites esenciales de Lamiaceas, Asteraceas, Vervenceas: una revisión. *infoanalítica*, 48-69. <https://doi.org/10.26807/ia.vi.177>
- Pérez-Marroquín, X. A., Estrada-Fernández, A. G., García-Ceja, A., Aguirre-Álvarez, G., & León-López, A. (2023). Agro-Food Waste as an Ingredient in Functional Beverage Processing: Sources, Functionality, Market and Regulation. *Foods*, 12(8), 1583. <https://doi.org/10.3390/foods12081583>
- Pop, C., Suharoschi, R., & Pop, O. L. (2021). Dietary Fiber and Prebiotic Compounds in Fruits and Vegetables Food Waste. *Sustainability*, 13(13), 7219. <https://doi.org/10.3390/su13137219>
- Preciado-Saldaña, A.M., Ruiz-Canizales, J., Villegas-Ochoa, M.A., Domínguez-Avila, J.A., & González-Aguilar, G.A. (2022). Aprovechamiento de subproductos de la industria agroalimentaria. un acercamiento a la economía circular. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 23 (2), 92-99.
- Abd-Rashed, A., Rath, D., Ahmad Nasir, N. A., & Abd Rahman, A. Z. (2021). Antifungal Properties of Essential Oils and Their Compounds for Application in Skin Fungal Infections: Conventional and Nonconventional Approaches. *Molecules*, 26(4), 1093. <https://doi.org/10.3390/molecules26041093>
- Rashidinejad, A., & Jafari, S. M. (2020). Nanoencapsulation of bioactive food ingredients. *Manual de Nanotecnología Alimentaria*, 279-344. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815866-1.00008-X>
- Requejo, A. (2020). Aceites esenciales en sinergia. Exlibric, Antequera, Málaga.

- Salomé-Martínez, S., & Jaramillo-Gamboa, R. A. (2023). Análisis de aceptabilidad y percepción del consumidor de aplicaciones alimentarias de subproductos de café. *Informador Técnico*, 87(1), 40–52. <https://doi.org/10.23850/22565035.5192>
- Subramanya, S., Sumanth, K., Gupta, P. K., Chayapathy, V., Keshamma, E., & Murugan, K. (2022). Formulation of green nanoemulsions for controlling agriculture insects. *Bio-Based Nanoemulsions for Agri-Food Applications*, 165-176. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89846-1.00002-4>
- Vázquez-Mata, N., Acosta-Camacho, P., Camacho-Parra, E., Rocha-Mendoza, D., & García, C. I. (2022). Aprovechamiento de Subproductos y Residuos Generados en la Central de Abastos de la Ciudad de México. (2022). *Biotecnología Y Sustentabilidad*, 7(1), 119-140. <https://doi.org/10.57737/biotecnologiaysust.v7i1.1638>
- Villamizar-Véliz, M., & Aular, Y. (2022). Métodos de extracción del aceite esencial de *lippia alba*. *Revista Ingeniería UC*, 29(1). <https://doi.org/10.54139/revinguc.v29i1.90>
- Wang, Q., & Salvi, D. (2023). Postharvest sanitation of produce with conventional and novel technologies. *The Produce Contamination Problem (Third Edition)*, 299-333. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819524-6.00007-0>
- Wani, A. R., Yadav, K., Khursheed, A., & Rather, M. A. (2021). An updated and comprehensive review of the antiviral potential of essential oils and their chemical constituents with special focus on their mechanism of action against various influenza and coronaviruses. *Microbial Pathogenesis*, 152, 104620. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104620>

3. PERFIL QUÍMICO Y POTENCIAL ANTIFÚNGICO DEL ACEITE ESENCIAL DE LA CÁSCARA DE *Renealmia alpinia*

Resumen

Los aceites esenciales (AE) son mezclas complejas de compuestos volátiles, principalmente monoterpenos, sesquiterpenos y derivados del fenilpropano. Algunos son reconocidos por sus propiedades insecticidas, antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas y antifúngicas. Los AE encontrados en semillas, pulpa y hojas de *R. alpinia* contienen principalmente pineno, linalol, heptanal, cimeno, entre otros. Sin embargo, no se han hecho estudios sobre la extracción y caracterización del AE contenido en la cáscara. El objetivo de este trabajo fue explorar el perfil de compuestos volátiles, la actividad antioxidante y el potencial antifúngico del AE de la cáscara de *R. alpinia*, para encontrar alternativas de uso como aditivo agroalimentario. El AE se aisló por hidrodestilación y se analizó por GC-MS. La actividad antioxidante se evaluó por los ensayos de eliminación de radicales libres DPPH· y ABTS·+; además, se hicieron pruebas de antagonismo, *in vitro*, por la técnica de difusión en placa del aceite esencial, contra cepas de *Alternaria* spp. y *Curvularia* spp., aisladas de frutos contaminados. Según los resultados, la cáscara fresca de *R. alpinia* contiene 1 % de AE (v/p). El análisis GC-MS del AE reveló la presencia de 24 compuestos con un predominio de monoterpenos (53.74 %), donde el bornano es el componente en mayor porcentaje (32.22 %), seguido de α -pineno (10.15 %). El AE exhibió una alta actividad antioxidante con un valor de inhibición de 91.2 y 23.0% para los radicales DPPH y ABTS, respectivamente. El AE mostró un porcentaje máximo de inhibición de 77.43 % y 63.29 % contra *Curvularia* spp. y *Alternaria* spp., respectivamente. El aceite esencial de la cáscara de *Renealmia alpinia* puede ser una alternativa prometedora para la protección de alimentos frente a contaminaciones fúngicas.

Palabras clave: *Renealmia alpinia*, Zingiberaceae, actividad antifúngica, antioxidante.

Tesis de Maestría en Ciencias. Posgrado en Ciencias y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Sayuri Hernández Vargas.

Director de tesis: Diana Guerra Ramírez, Dra.

Codirector: Diana Becerra Morales, Dra.

CHEMICAL PROFILE AND ANTIFUNGAL POTENTIAL OF THE ESSENTIAL OIL OF THE PEEL OF *Renealmia alpinia*

Abstract

Essential oils (EO) are complex mixtures of volatile compounds, mainly monoterpenes, sesquiterpenes, and phenylpropane derivatives. Some are recognized for their insecticidal, antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial, and antifungal properties. The EOs found in the seeds, pulp, and leaves of *R. alpinia* contain mainly pinene, linalool, heptanal, cymene, among others. However, no studies have been done on the extraction and characterization of the EO contained in the shell. This study aimed to explore the volatile compound profile, antioxidant activity, and antifungal potential of the EO of the *R. alpinia* peel, to find alternatives for use as an agri-food additive. The EO was isolated by hydrodistillation and analyzed by GC-MS. Antioxidant activity was evaluated by DPPH $\cdot$ and ABTS $\cdot^+$; in addition, in vitro antagonism tests were carried out by the essential oil plate diffusion technique, against strains of *Alternaria* spp. and *Curvularia* spp., isolated from contaminated fruits. According to the results, fresh *R. alpinia* peel contains 1% EO (v/w). The GC-MS analysis of the EO revealed the presence of 24 compounds with a predominance of monoterpenes (53.74 %), where bornane is the component with the highest percentage (32.22 %), followed by α -pinene (10.15 %). The EO exhibited high antioxidant activity with an inhibition value of 91.2 % and 23.0% for DPPH and ABTS radicals, respectively. The AE showed a maximum inhibition percentage of 77.43 % and 63.29 % against *Curvularia* spp. and *Alternaria* spp., respectively. The essential oil of the peel of *Renealmia alpinia* may be a promising alternative for the protection of food against fungal contamination.

Keywords: *Renealmia alpinia*, Zingiberaceae, antifungal activity, antioxidant activity, essential oil.

Master of Science Thesis,
Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Sayuri Hernández Vargas.
Thesis advisor: Diana Guerra Ramírez, Dra.
Co-director: Diana Becerra Morales, Dra.

3.1 Introducción

Las especies *Zingiber officinale*, *Alpinia galanga* (Linn.), *Curcuma longa* y *Renealmia alpinia* pertenecen a la familia *Zingiberaceae* y son reconocidas por sus propiedades antibacterianas, antivirales, antifúngicas, insecticidas y antiinflamatorias (Destryana *et al.*, 2024). Tongchure y Chanprapai (2022), demostraron que estas especies poseen actividad antifúngica contra dermatofitos, hongos filamentosos y hongos levaduriformes, efecto atribuido a su alta concentración en terpenos y terpenoides, cumarinas y fenilpropanoides.

Renealmia alpinia es una planta con múltiples aplicaciones culinarias y etnomedicinales. Se ha demostrado que tiene propiedades antioxidantes y antiinflamatorias asociadas a su composición química con un alto contenido de carotenoides, monoterpenos, diterpenos y sesquiterpenos (Luna-Guevara *et al.*, 2018). De Souza *et al.* (2023) y Hernández-García *et al.* (2025) reportaron la composición química del aceite esencial de rizomas, tallos, raíces y hojas de *R. alpinia*, con una presencia mayoritaria de β -cariofileno, β -pineno, α -aromadendreno, γ -cadineno y valenceno. En el aceite esencial de la semilla se han identificado como componentes mayoritarios como β -pineno, limoneno y β -felandreno (Negrelle, 2015). Por otra parte, se han investigado los efectos analgésicos y la actividad antimicótica sobre cultivos de *Candida albicans* del aceite esencial y extractos metanólicos obtenidos de la hoja, tallo y raíz de esta especie (Gómez-Betancur *et al.*, 2015; Hernández-García *et al.*, 2025).

La composición química, la actividad antioxidante y el potencial antifúngico del aceite esencial de la cáscara del fruto de *R. alpinia* aún no han sido investigados, por lo que limita su aprovechamiento como una fuente importante de compuestos bioactivos. El objetivo de este estudio fue evaluar

el potencial de la cáscara de *R. alpinia* como aditivo natural de uso alimenticio, mediante la determinación de sus propiedades antioxidantes y antifúngicas.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1. Material vegetal y extracción del aceite esencial

Los frutos de *R. alpinia* fueron colectados en la comunidad de Santiago Ecatlán, Jonotla, Puebla, México, ubicados en las coordenadas N20°03'07.6", 97°33'23.4"W. Se seleccionaron aquellos frutos que no presentaran daños físicos y con un estado de madurez similar. Posteriormente, la cáscara se separó manualmente de la pulpa.

El aceite esencial se extrajo de cáscaras frescas mediante hidrodestilación en un equipo Clevenger, siguiendo la metodología descrita por Villaverde (2018). Se mezclaron 100 g de cáscara de *R. alpinia*, previamente triturada, con 300 mL de agua destilada. La destilación se realizó durante 3 h a 100 °C. Una vez recuperado el aceite esencial, se almacenó a 4 °C en tubos Eppendorf protegidos de la luz.

3.2.2. Capacidad antioxidante

Se determinó la eliminación de radicales libres del aceite esencial mediante el ensayo de DPPH (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) con modificaciones siguiendo la metodología descrita por Brand-Williams *et al.* (1995) adaptada a microplacas por Hernández-Rodríguez *et al.* (2016). Para su determinación se preparó una dilución stock de DPPH a una concentración de 0.5 mM en metanol al 80 %. La muestra fue diluida con isopropanol al 80 % en una relación 1:1 (v/v). A partir de esta dilución, se tomó una alícuota de 100 µL y se mezcló con 25 µL de la dilución de DPPH. Como blanco se utilizaron 125 µL de la disolución de DPPH. Las absorbancias se midieron a 515 nm. El porcentaje de eliminación de radicales por DPPH• se calculó de acuerdo con

la ecuación descrita por Mensor *et al.* (2001), expresando los resultados en porcentaje de capacidad antioxidante (AA %).

$$AA (\%) = (Ab - As) / Ab \times 100$$

Donde Ab es la absorbancia del blanco y As es la del radical DPPH + extracto vegetal después de 30 minutos de reacción con el DPPH.

La actividad captadora del radical libre ABTS·+ se determinó mediante el método descrito por Re-R *et al.* (1999) con algunas modificaciones. El radical se formó por medio de la reacción de 7.4 mM de ABTS con 2.6 mM de persulfato de potasio en 10 mL de metanol puro, e incubado durante 16 h en oscuridad, a temperatura ambiente. La muestra fue diluida con isopropanol al 80 % en una relación 1:10 (v/v). A partir de esta dilución, se tomó una alícuota de 20 µL y se mezcló con 180 µL de ABTS·+. Como blanco se utilizaron 200 µL de la dilución de ABTS·+. Posteriormente, se midió la absorbancia de la muestra a 734 nm. Los resultados se reportaron como el porcentaje de inhibición del radical libre ABTS·+, de acuerdo con la siguiente fórmula descrita por Sánchez-Chino *et al.* (2019):

$$\% \text{ de inhibición} = [(Ab - Am) / Ab] \times 100$$

Donde Ab es la absorbancia de la solución del blanco y Am es la absorbancia del radical ABTS·+ y la muestra. Los resultados se expresaron como porcentaje de inhibición del radical libre ABTS·+.

3.2.3. Análisis GC/MS (cromatografía de gases-espectrometría de masas con trampa de iones)

El perfil de compuestos volátiles del aceite esencial se analizó mediante cromatografía de gases CG (7890 A, Agilent Technologies, Palo Alto, CA, EE.

UU.) acoplado a un detector de masas y trampa de iones MS (Agilent 240). La temperatura del inyector se mantuvo a 250°C, con un modo de inyección split/splitless (1:20), se utilizó una columna VF-5 MS (30 m x 250 µm x 0.25 µm) con gas acarreador de helio y flujo de 0.5 mL/min y una presión de 0.5 atm. El horno trabajó con una rampa de calentamiento de 45° durante 2 min, después a 230°C a una velocidad de 10°C/min a un flujo de 0.5 mL/min. Los espectros de masas se registraron en un rango de 41-500 m/z a una velocidad de 1,0 scan/s, usando un voltaje de ionización de 70 eV.

Los espectros experimentales de los componentes del aceite esencial fueron comparados con los patrones de fragmentación de los espectros de la librería del National Institute of Standard and Technology (NIST) del equipo versión 2.0. Se compararon los índices de retención lineal para una columna VF-5 o similares reportados en la librería NIST weBook, relativos a los estándares de n-alcenos (C8-C20). El porcentaje relativo de cada compuesto se determinó a partir del área bajo la curva del pico cromatográfico.

3.2.4. Ensayo antifúngico

Las cepas de *Alternaria* sp. y *Curvularia* sp. se aislaron de frutos contaminados con síntomas de pudrición y antracnosis. Se cortaron pequeñas secciones de tejidos de cáscara (0.5 cm), las cuales fueron lavadas y desinfectadas con hipoclorito de sodio al 1 % durante 2 min. Los tejidos se sembraron en agar papa dextrosa (PDA, BD Bioxon, México) y se incubaron durante 15 días a 25 °C. Los aislamientos puros se obtuvieron mediante la técnica punta de hifa y se almacenaron a 4 °C. La identificación de los hongos se determinó a nivel de género mediante microscopía óptica.

La actividad antifúngica del aceite esencial de la cáscara de *R. alpinia* se evaluó mediante la técnica de fase de contacto (Owen *et al.*, 2018). Se depositaron 50 µL del aceite esencial en la superficie de la caja de petri.

Posteriormente, se colocó en el centro de la placa un disco de PDA de 5 mm de diámetro con crecimiento activo del hongo y se incubó a 25 ± 2 °C. El diámetro micelial se registró cada 24 h durante 7 días, utilizando un calibrador digital (Truper, modelo 14388, México). Se utilizó como control la cepa fúngica sin aplicación de aceite esencial. El porcentaje de inhibición del crecimiento micelial (MGI %) se calculó utilizando la fórmula descrita por Amini *et al.* (2012):

$$\text{MGI (\%)} = [(D_c - D_t) / D_c] \times 100$$

donde, MGI = inhibición del crecimiento micelial (%), D_c = crecimiento fúngico del patógeno en el control, y D_t = crecimiento fúngico del patógeno en el tratamiento.

3.2.5. Análisis estadístico

Los ensayos efectuados se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95%. Para establecer comparaciones de medias se utilizó la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Cada ensayo se efectuó por triplicado y los datos se expresaron como media $\pm$ desviación estándar. El análisis estadístico se llevó a cabo con el software Minitab (v.22.2.2.0).

3.3. Resultados y discusión

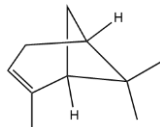
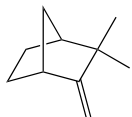
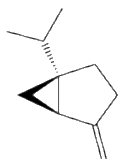
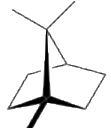
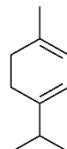
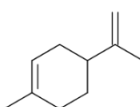
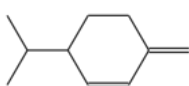
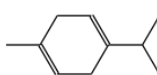
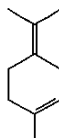
3.3.1. Composición química

La composición química del aceite esencial de la cáscara de *R. alpinia* se resume en los Cuadros 1A, 1B y 1C. Se identificaron 24 compuestos. El análisis reveló el predominio de monoterpenos (53.74 %), seguido de los sesquiterpenos (7.07 %). Entre los compuestos identificados se encontraron el bornano (32.22%) y el α -pineno (10.15 %) como componentes mayoritarios;

cabe mencionar que el bornano no había sido reportado en ninguna especie del género *Renealmia*, ni en la familia Zingiberaceae. Otros compuestos en menores porcentajes fueron el α -terpineol (3.43 %), valenceno (2.51 %), isolongifolol (1.52 %), mirtenol (1.07 %), terpinoleno (1.03 %) y limoneno (1.77 %). Zhang *et al.*, (2020), reportaron que los aceites esenciales extraídos de especies de la familia Zingiberaceae suelen ser ricos en α -terpineol, 1,8-cineol, (E)-cinamato de metilo, terpinen-4-ol, alcanfor, α -pineno y β -pineno, γ -terpineno y valenceno.

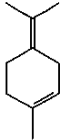
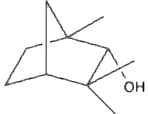
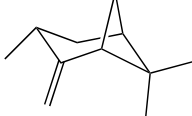
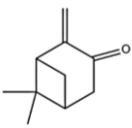
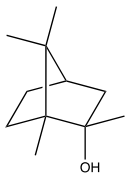
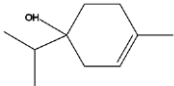
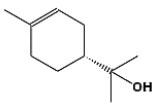
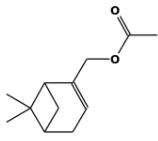
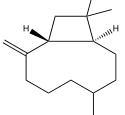
En comparación con otros estudios sobre aceites esenciales extraídos de diferentes partes de la planta de *R. alpinia*, se puede observar una diversidad en la composición química y los compuestos mayoritarios reportados. Hernández-García *et al.* (2025) caracterizaron el perfil fitoquímico del AE extraído de la hoja, raíz y tallo de *R. alpinia*, identificando 26 metabolitos secundarios. El β -pineno fue más abundante en la raíz (59.24 %) mientras que el α -pineno tuvo una mayor presencia en la hoja (19.98 %). Lognay *et al.* (1991, citado por Negrelle, 2015) reportaron que el aceite esencial de la semilla de *R. alpinia* contiene β -pineno (22.3 %), limoneno (18.4 %) y β -felandreno (38.0 %). Maia *et al.* (2007), identificaron 28 compuestos en el aceite esencial del fruto, donde el β -felandreno (60.4 %) y el β -pineno (19.8 %) fueron los compuestos mayoritarios. Esto nos indica que la composición química del AE, además de la especie, depende de diferentes factores como la parte de la planta utilizada para la extracción, el método de extracción, las condiciones ambientales, la época de cosecha y la región geográfica (Zinoviadou *et al.*, 2021).

Cuadro 1A. Composición química del aceite esencial de la cáscara de *Renealmia alpinia* (Rottb.) Mass. Parte I (Compuestos del 1 al 9).

No.	Compuestos	Estructura química	RT (min)	IRL	% de Área
1.	α -pineno		6.364	943	10.15
2.	Canfeno		6.644	960	0.34
3.	Sabineno		6.974	981	0.42
4.	Bornano		7.139	994	32.22
5.	α -terpineno		7.641	1025	0.22
6.	Limoneno		7.846	1038	1.77
7.	β -felandreno		7.895	1041	0.30
8.	γ -terpineno		8.281	1066	0.46
9.	Terpinoleno		8.727	1094	1.03

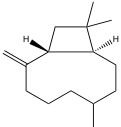
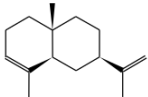
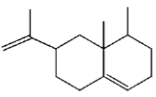
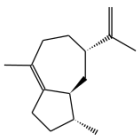
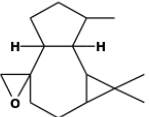
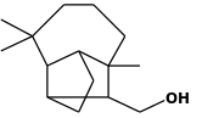
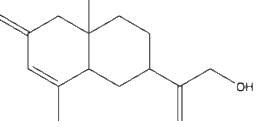
RT = tiempo de retención, IRL = índice de retención lineal.

Cuadro 1B. Compuestos identificados en el aceite esencial de la cáscara de *Renealmia alpinia* (Rottb.) Mass. Parte II (Compuestos del 9 al 18).

No.	Compuestos	Estructura química	RT (min)	IRL	% de Área
9.	Terpinoleno		8.727	1094	1.03
10.	β -fenchol		9.305	1132	0.25
11.	Trans-pinocarveol		9.678	1157	0.40
12.	Pinocarvona		10.001	1178	0.41
13.	Borneol		10.147	1188	0.26
14.	Terpinen-4-ol		10.232	1194	0.96
15.	α -terpineol		10.442	1208	3.43
16.	Mirtenol		10.496	1212	1.07
17.	Acetato de mirtenilo		12.335	1341	0.05
18.	Cariofileno		13.686	1444	0.80

RT = tiempo de retención, IRL = índice de retención lineal.

Cuadro 1C. Compuestos presentes en el aceite esencial de la cáscara de *Renealmia alpinia* (Rottb.) Mass. Parte III (Compuestos del 18 al 24).

No.	Compuestos	Estructura química	RT (min)	IRL	% de Área
18.	Cariofileno		13.686	1444	0.80
19.	4,11-selinadieno		14.322	1494	0.38
20.	Valenceno		14.589	1515	2.51
21.	δ -guaieno		14.657	1521	0.75
22.	Oxido de aromadendreno (2)		16.416	1670	0.80
23.	Isolongifolol		16.939	1716	1.52
24.	6-(3-hidroxiprop-1-en-2-il)-4, 8a-dimetil-4a,5,6,7,8, 8a-hexahidronaftalen-2(1H)-ona		18.306	1888	0.44

RT = tiempo de retención, IRL = índice de retención lineal.

3.3.2. Capacidad antioxidante

El AE de la cáscara de *R. alpinia* inhibió el 91.23 % y 22.79 % de radicales libres del DPPH y ABTS, respectivamente; esto puede atribuirse a los terpenos presentes en el AE (Al-jaafreh, 2024; Arango *et al.*, 2012). El porcentaje de inhibición de radicales libres en el ensayo DPPH fue superior (91.23 %) a lo reportado para el AE de jengibre (*Zingiber officinale* Roscoe), cuya capacidad de eliminación de radicales fue de 74.19 % (Thao *et al.*, 2023). Por otra parte, el porcentaje de inhibición frente al radical catiónico ABTS•+ sugiere que en el AE están presentes componentes donadores de hidrógeno o de electrones capaces de estabilizar al radical catiónico ABTS•+ (Munteanu y Apetrei, 2021).

La interacción sinérgica entre monoterpenos puede potenciar esta actividad, como se ha reportado en aceites esenciales de diversas plantas medicinales (Mat-Saad *et al.*, 2021). Estos compuestos, junto con otros metabolitos, pueden contribuir a la inhibición de la peroxidación lipídica y la autooxidación en los alimentos (Carocho *et al.*, 2018).

3.3.3. Actividad antifúngica

El aceite esencial de la cáscara de *R. alpinia*, bajo condiciones *in vitro*, mostró una máxima inhibición al cuarto día de crecimiento para *Alternaria* spp. y *Curvularia* spp. En la Figura 1, se observa el crecimiento micelial de *Alternaria* y *Curvularia* spp. con la aplicación de AE de *R. alpinia* durante 7 días. El porcentaje de inhibición en *Curvularia* spp. fue significativamente mayor (77.43 %) que el de *Alternaria* spp. (63.29 %) (Figura 2), lo que indica una mayor sensibilidad de *Curvularia* spp. a los compuestos bioactivos presentes en el aceite esencial. Sin embargo, el porcentaje de inhibición disminuyó al séptimo día a un 50.07 % en *Alternaria* spp. y 61.61% en *Curvularia* spp. La disminución en el porcentaje de inhibición puede atribuirse a la volatilización

del AE o degradación de algunos metabolitos secundarios responsables de la actividad antifúngica de *R. alpinia* (Mutlu-Ingok *et al.*, 2022).

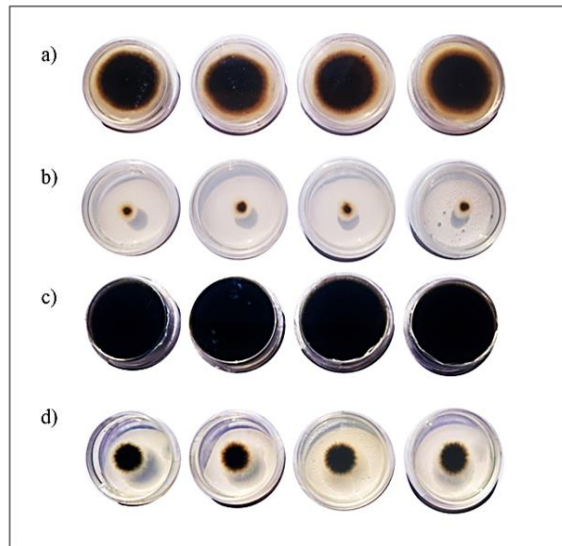


Figura 1. Inhibición del crecimiento micelial (mm) de *Alternaria* y *Curvularia* spp. con y sin AE a los 7 días de inoculación en condiciones *in vitro*: a) *Curvularia* spp. sin AE, b) *Curvularia* spp. con AE, c) *Alternaria* spp. sin AE, d) *Alternaria* spp. con AE.

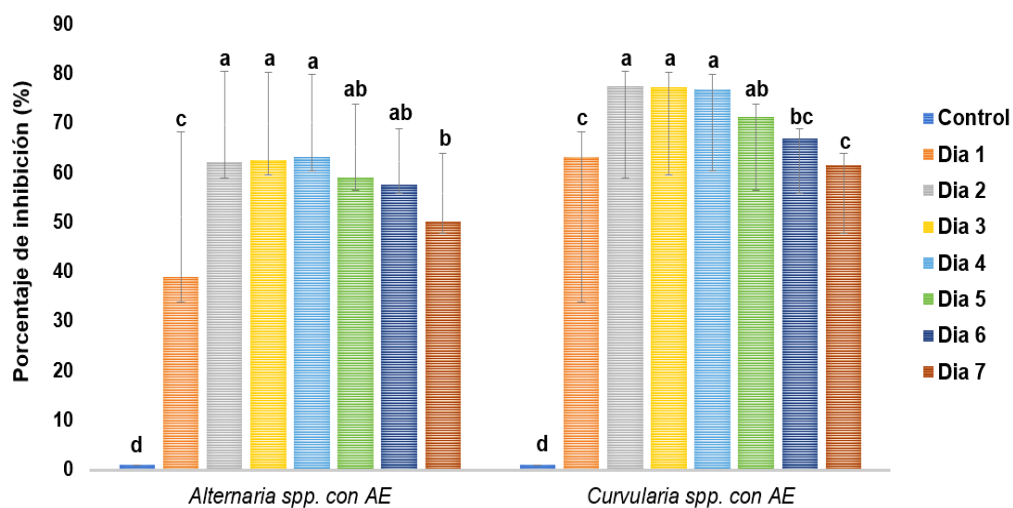


Figura 2. Efecto del aceite esencial de *Renealmia alpinia* (Rottb.) Mass sobre el porcentaje de inhibición frente a *Curvularia* spp. y *Alternaria* spp. durante los 7 días en condiciones *in vitro*.

Alternaria spp. es uno de los principales géneros responsables del deterioro de productos frescos en la etapa de poscosecha y en la producción de micotoxinas en cereales, frutas y verduras, incluyendo a otros géneros como *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium* (Alegbeleye *et al.*, 2022; Domingos *et al.*, 2023). Por otra parte, *Curvularia* spp. es conocida por su capacidad para infectar diversos cultivos económicamente importantes que comúnmente se encuentran en el suelo, en restos vegetales y en diversas plantas hospederas, donde actúan como patógenos o saprófitos (Manzar *et al.*, 2021; Mehta *et al.*, 2022).

En diversos estudios, se ha demostrado que el uso de aceites esenciales es una alternativa para el control de hongos fitopatógenos como *Alternaria* spp. y *Curvularia* spp. Arya *et al.* (2023), reportaron la inhibición sobre el crecimiento micelial de *Curvularia lunata*, a una concentración de 500 $\mu\text{L/mL}$ de aceite esencial de *Hedychium coronarium*, con un 84.81 % de inhibición de crecimiento. Mientras que, Palwasha *et al.* (2022) evaluaron la actividad antifúngica de diferentes aceites esenciales (AE) contra *Curvularia spicifera*, observando que los AE extraídos de *Cymbopogon citratus* y *Ocimum tenuiflorum* en concentraciones de 40 a 60 $\mu\text{L/mL}$, inhiben eficazmente el crecimiento micelial de *C. spicifera*, con un porcentaje de 97.6 y 78 %, respectivamente, después de siete días de incubación. En cuanto a *Alternaria* spp., Francio *et al.* (2023) demostraron que los aceites esenciales de *Salvia microphylla* y *Tetradenia riparia* inhibieron el crecimiento de *Alternaria alternata* a concentraciones de 3.10 y 6.05 $\mu\text{L/mL}$, con un 93.9 % de inhibición. Hendges *et al.* (2021) demostraron que el efecto antifúngico del aceite esencial del árbol del té (*Melaleuca alternifolia*) contra *A. solani* inhibe su crecimiento micelial en un 55.89 % en concentraciones de 2500 $\mu\text{L/L}$. Por otra parte, Samandari-Najafabadi *et al.* (2024) reportaron los efectos inhibitorios de los aceites esenciales (AE) extraídos de cultivares de *Citrus sinensis* sobre cepas patógenas de *Alternaria* spp., mostrando que a una concentración de 1000 $\mu\text{g mL}^{-1}$ inhibe desde 22 hasta 100 % del crecimiento de *A. dumosa*, *A. atra* y *A. alternata*.

Los resultados obtenidos en este estudio son comparables a lo reportado para el aceite esencial de *Maleluca alternifolia*, que inhibió un 55.89 % el crecimiento de *Alternaria* spp. y *Ocimum tenuiflorum* y el 78 % contra *Curvularia* spp., lo que sugiere una alternativa prometedora para el control de hongos que afectan a los alimentos. Basak y Guha (2018) sugieren que la actividad antimicrobiana de los aceites esenciales es resultado del efecto sinérgico o acumulativo entre componentes principales. Debido a su naturaleza lipofílica, pueden penetrar e interferir fácilmente con las enzimas y proteínas asociadas a la membrana celular, causando alteraciones y pérdidas de constituyentes celulares importantes, que son responsables de la inhibición del crecimiento fúngico (Chaudhari *et al.*, 2019).

3.4. Conclusiones

La composición química del aceite esencial de la cáscara de *R. alpinia* mostró una diversidad de metabolitos secundarios, entre los que destacan los monoterpenos bornano y α -pineno. Además, el AE de la cáscara mostró una elevada capacidad antioxidante y una notable actividad antifúngica contra *Alternaria* spp. y *Curvularia* spp. Con base en los resultados, se evidencia el potencial del AE de la cáscara de *R. alpinia* como una alternativa para la prevención de contaminaciones fúngicas y el deterioro oxidativo de los alimentos.

3.5. Literatura citada

- Alegbeleye, O., Odeyemi, O. A., Strateva, M., & Stratev, D. (2022). Microbial spoilage of vegetables, fruits and cereals. *Applied Food Research*, 2(1), 100122. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100122>
- Al-jaafreh, A.M. (2024). Evaluation of Antioxidant Activities of Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) Essential Oil and Different Types of Solvent Extractions. *Biomed Pharmacol J*, 17(1). <https://dx.doi.org/10.13005/bpj/2860>

- Amini, M., Safaie, N., Salmani, M. J., & Shams-Bakhsh, M. (2012). Antifungal activity of three medicinal plant essential oils against some phytopathogenic fungi. *Trakia J Sci*, 10(1), 1-8.
- Arango, B. O., Pantoja, D. D., Santacruz, C.H., L., & Hurtado, B., A.M. (2012). Actividad antioxidante del aceite esencial de orégano (*lippia origanoides* hbk) del alto patia. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10 (2), 79-86.
- Arya, S., Mahawer, S. K., Karakoti, H., Kumar, R., Prakash, O., Kumar, S., Latwal, M., Panday, G., Srivastava, R. M., & Rawat, D. S. (2023). Study of the Variability of the Chemical Profile, and Biological Activity Approaches of *Hedychium coronarium* J. Koenig Essential Oil from Different Habitats of Uttarakhand, India. *Journal of Food Quality*, 2023(1), 7335134. <https://doi.org/10.1155/2023/7335134>
- Basak, S., Guha, P. (2018). A review on antifungal activity and mode of action of essential oils and their delivery as nano-sized oil droplets in food system. *J Food Sci Technol* 55, 4701–4710. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3394-5>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Carocho, M., Morales, P., & Ferreira, I. C. F. R. (2018). Antioxidants: Reviewing the chemistry, food applications, legislation and role as preservatives. *Trends in Food Science & Technology*, 71, 107–120. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2017.11.008>
- Chaudhari, A.K., Dwivedy, A.K., Singh, V.K., Das, S., Singh, A., & Dubey, N.K. (2019). Essential oils and their bioactive compounds as green preservatives against fungal and mycotoxin contamination of food commodities with special reference to their nanoencapsulation. *Environ Sci Pollut Res*, 26, 25414–25431. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05932-2>
- De Souza, E. C. A., Flach, A., & da Costa, L. A. M. A. (2023). Chemical composition and antioxidant activity of the essential oil of *Renealmia alpinia* (Rottb.) Maas. *Natural Product Research*, 37(23), 4042-4048. <https://doi.org/10.1080/14786419.2022.2164578>
- Destryana, R. A., Estiasih, T., Sukardi, & Pranowo, D. (2024). Zingiberaceae rhizome essential oil: A Review of chemical composition, biological activity, and application in food industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1299(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1299/1/012010>
- Domingos, M. M., Valiati, B. S., Uliana, D. S., Lopes Leal, R. M., Guimarães, A. P., Lepaus, B. M., Geringer, S. J., & Brilhante de São José, J. F. (2023). Essential Oils against Fruit Spoilage Fungi. *Plant Essential Oils: From Traditional to Modern-Day Application*, 105–124. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4370-8_5

- Francio, I. E., Paulus, D., Lermen-Munhoz, C., & Luckmann-Balbinotti de França, D. (2025). Chemical composition of five essential oils and their antioxidant and in vitro and in vivo antifungal activities against *Alternaria alternata* in tomato crop. *Natural Product Research*, 39(4), 645–653. <https://doi.org/10.1080/14786419.2023.2285879>
- Hernández-García, N. R., Mendoza López, M. R., Camacho Martínez, F. J., Pérez Landero, S., & Almonte-Becerril, M. (2025). Potencial Antimicótico y Composición de Aceites Esenciales de la Planta Xkijit (*Renealmia alpinia*). *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(1), 2589–2612. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16030
- Gómez-Betancur, I., Cortés, N., Benjumea, D., Osorio, E., León, F., & Cutler, S. J. (2015). Antinociceptive activity of extracts and secondary metabolites from wild growing and micropropagated plants of *Renealmia alpinia*. *Journal of Ethnopharmacology*, 165, 191–197. <https://doi.org/10.1016/J.JEP.2015.02.012>
- Hendges, C., Stangarlin, J. R., Zamban, V. C., Mascaro, M. de H. N., & Carmelo, D. B. (2021). Antifungal activity and control of the early blight in tomato through tea tree essential oil. *Crop Protection*, 148, 105728. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2021.105728>
- Hernández-Rodríguez, G., Espinosa, S. T., Hernández, E. G., Villa, G. M., Reyes, T. B., & Guerra, R. D. (2016). Influencia de soluciones polares en la extracción de compuestos fenólicos de frutos de capulín (*Prunus serotina*). *Revista de la Sociedad Química Mexicana* 60: 73-78.
- Lognay, G., Marlier, M., Severin, M., Haubruge, E., Gibon, V., & Trevejo, E. (1991). On the characterization of some terpenes from *Renealmia alpinia* Rott. (Maas) oleoresin. *Flavour and fragrance journal*, 6, 87–91.
- Luna-Guevara, M. L., Ochoa-Velasco, C. E., Hernández-Carranza, P., Contreras-Cortes, L. E. U., & Luna-Guevara, J. J. (2018). Composition, physico-chemical properties and antioxidant capacity of *Renealmia alpinia* (Rottb.) Maas fruit. *Revista Facultad de Ciencias Agrarias*. 50, 377-385.
- Maia, J. G. S., Andrade, E. H. A., Carreira, L. M. M., & da Silva, M. H. L. (2007). Essential Oil Composition of *Renealmia alpinia* (Rottb.) Maas. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 10(1), 10–14. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2007.10643512>
- Manzar, N., Kashyap, A. S., Sharma, P. K., & Saxena, A. K. (2021). First Report of Leaf Spot of Maize Caused by *Curvularia geniculata* in India. *Plant Disease*, 105 (12), 225. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-21-0637-PDN>
- Mat Saad, H., Syed Abdul Rahman, S. N., Navanesan, S., Tan, C. H., Manickam, S., Abd Malek, S. N., & Sim, K. S. (2021). Evaluation of antioxidant activity and phytochemical composition of *Baeckea frutescens* and *Leptospermum javanicum* essential oils. *South African Journal of Botany*, 141, 474–479. <https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2021.06.005>
- Mehta, T., Meena, M., & Nagda, A. (2022). Bioactive compounds of *Curvularia* species as a source of various biological activities and biotechnological applications. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1069095. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2022.1069095/FULL>

- Mensor, L. L., Menezes, F. S., Leitão, G. G., Reyes, A. S., dos Santos, T. C., Fit, C. S., & Leitão, S. G. (2001). Screening of Brazilian plant extracts for antioxidant activity by the use of DPPH free radical method. *Phytotherapy research: PTR*, 15(2), 127–130. <https://doi.org/10.1002/PTR.687>
- Munteanu, I. G., & Apetrei, C. (2021a). Analytical Methods Used in Determining Antioxidant Activity: A Review. *International Journal of Molecular Sciences* 2021, Vol. 22, Page 3380, 22(7), 3380. <https://doi.org/10.3390/IJMS22073380>
- Mutlu-Ingok, A., Devecioglu, D., Dikmetas, D. N., & Karbancioglu-Guler, F. (2022). Advances in biological activities of essential oils. *Studies in Natural Products Chemistry*, 74, 331–366. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91099-6.00010-4>
- Negrelle, R. R. B. (2015). *Renealmia* L.f.: aspectos botânicos, ecológicos, farmacológicos e agrônômicos. *Revista Brasileira de Plantas Medicinais*, 17(2), 274–290. https://doi.org/10.1590/1983-084X/13_049
- Owen, L., White, A. W., & Laird, K. (2019). Characterisation and screening of antimicrobial essential oil components against clinically important antibiotic-resistant bacteria using thin layer chromatography-direct bioautography hyphenated with GC-MS, LC-MS and NMR. *Phytochemical Analysis*, 30(2), 121–131. <https://doi.org/10.1002/PCA.2797>
- Palwasha, Din, S. ud, & Fahim, M. (2022). Eco-friendly strategies for the management of *Curvularia spicifera* through phytobiocides and biological antagonists. *European Journal of Plant Pathology*, 164(4), 551–565. <https://doi.org/10.1007/S10658-022-02580-0/FIGURES/8>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9–10), 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Samandari-Najafabadi, N., Taheri, P., & Tarighi, S. (2024). Antifungal and antivirulence effects of *Citrus sinensis* essential oil on *Alternaria* pathogens in orange. *Journal of Plant Pathology*, 106(3), 1153–1171. <https://doi.org/10.1007/S42161-024-01638-8/TABLES/4>
- Sánchez-Chino, X. M., Jiménez-Martínez, C., Ramírez-Arriaga, E., Martínez-Herrera, J., Corzo-Ríos, L. J., & García, L. M. G. (2019). Actividad antioxidante y quelante de metales de las mieles de *Melipona beecheii* y *Frieseomelitta nigra* originarias de Tabasco, México. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 22, 1–7. <https://doi.org/10.22201/FESZ.23958723E.2019.0.186>
- Thao, C. B., Tran, T. T., Tran, T. K. N., & Mai, H. C. (2023). Extraction and Volatile Compounds in Ginger Essential Oil (*Zingiber officinale* Roscoe) at Laboratory Scale. *Asian Journal of Chemistry*, 35(12), 3066–3070. <https://doi.org/10.14233/AJCHEM.2023.30280>
- Tongchure, S., & Chanprapai, P. (2022). Antifungal Properties of Essential Oils Derived from Three Plants of Zingiberaceae Family against *Phytophthora parasitica* Dastur. *Chemistry Proceedings 2022*, Vol. 10, Page 29, 10(1), 29. <https://doi.org/10.3390/IOCAG2022-12324>

- Villaverde, I. C. (2018). Optimización de la extracción de aceites esenciales por destilación en corriente de vapor. [Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:171973963>
- Zhang, L., Liang, X., Ou, Z., Ye, M., Shi, Y., Chen, Y., Zhao, J., Zheng, D., & Xiang, H. (2020). Screening of chemical composition, anti-arthritis, antitumor and antioxidant capacities of essential oils from four Zingiberaceae herbs. *Industrial Crops and Products*, 149, 112342. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2020.112342>
- Zinoviadou, K. G., Kastanas, P., Gougouli, M., & Biliaderis, C. G. (2022). Innovative bio-based materials for packaging sustainability. *Innovation Strategies in the Food Industry: Tools for Implementation, Second Edition*, 173–192. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85203-6.00002-5>

4. EFECTO DE LA CÁSCARA DE *Renealmia alpinia* EN LA CALIDAD DE UN PAN DE CAJA

Resumen

En México, el pan se considera un alimento básico en la dieta de la población, aunque aporta nutrientes como vitaminas, minerales y fibra; contiene pocos compuestos bioactivos. Por lo tanto, el enriquecimiento con ingredientes no convencionales puede mejorar su valor nutricional y funcional. La cáscara de *R. alpinia*, desechada después de utilizar los arilos del fruto, es un subproducto rico en fibra y compuestos bioactivos como las antocianinas. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la adición de la harina de cáscara de *R. alpinia* (HRA) durante la elaboración de un pan de caja. Se evaluaron los parámetros de calidad del pan y se analizaron sus propiedades nutricionales y antioxidantes. Los panes con la adición de 1, 2.5 y 5 % de harina de *R. alpinia* (HRA) mostraron un aumento en el contenido de minerales, entre 3.95 y 4.62 % y contenido de fibra (2.44 y 2.50 %). La formulación del pan de caja con 2.5 % de HRA mantuvo una buena calidad panadera y mejoró las propiedades antioxidantes y la vida útil del producto. Estos resultados evidencian que la HRA puede emplearse como aditivo natural en productos de panificación como el pan de caja, sin afectar negativamente los parámetros de calidad, además de aportar compuestos bioactivos útiles para mejorar las propiedades funcionales y alargar la vida de anaquel.

Palabras clave: harina de cáscara, *Renealmia alpinia*, calidad panadera, actividad antioxidante, calidad microbiológica.

Tesis de Maestría en Ciencias. Posgrado en Ciencias y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Sayuri Hernández Vargas.

Director de tesis: Diana Guerra Ramírez, Dra.

Codirector: Diana Becerra Morales, Dra.

EFFECT OF THE PEEL OF *Renealmia alpinia* IN THE QUALITY OF A SANDWICH BREAD

Abstract

In Mexico, bread is considered a staple food in the diet of the population. Although it provides nutrients such as vitamins, minerals, and fiber, it contains few bioactive compounds; therefore, enrichment with unconventional ingredients can improve its nutritional and functional value. The peel of *R. alpinia*, discarded after using the arils of the fruit, is a by-product rich in fiber and bioactive compounds such as anthocyanins. The objective of this study was to evaluate the effect of the addition of *R. alpinia* peel flour (HRA) during the preparation of a sandwich bread. The quality parameters of the bread were evaluated, and its nutritional and antioxidant properties were analyzed. Breads with the addition of 1, 2.5 and 5 % of *R. alpinia* flour (HRA) showed an increase in mineral content between 3.95 and 4.62 % and fiber content (2.44 and 2.50 %). The formulation of the sandwich bread with 2.5% HRA maintained good bakery quality and improved the antioxidant properties and shelf life of the product. These results indicate that HRA can be used as a natural additive in bakery products such as sandwich bread, without negatively affecting quality parameters. Moreover, it provides valuable bioactive compounds that can enhance functional properties and extend the shelf life of the product.

Keywords: shell meal, *Renealmia alpinia*, bakery quality, antioxidant activity, microbiological quality.

4.1. Introducción

El aprovechamiento de subproductos agroindustriales, especialmente cáscaras ricas en fibra dietética, antioxidantes, vitaminas y ácidos grasos esenciales, representa una alternativa para mejorar el valor nutricional y funcional de los alimentos, así como su vida de anaquel (Skwarek y Karwowska, 2023). Por ejemplo, las cáscaras de cítricos con un alto contenido de aceites esenciales y pectina se han utilizado en la industria culinaria, farmacéutica y cosmética (Areti *et al.*, 2024); mientras que la cáscara de plátano se utiliza como aditivo funcional en productos cárnicos (Díaz y Castro, 2021); y la cáscara de mango se ha empleado para la formación de biopolímeros, que permitan prolongar la vida útil de los alimentos, sin afectar su calidad y propiedades organolépticas (Carvajal-Lareñas *et al.*, 2021).

Renealmia alpinia, es una planta silvestre de la familia Zingiberaceae que se caracteriza por sus propiedades antifúngicas, antiinflamatorias y antioxidantes estudiadas en la pulpa, la semilla y la cáscara (Gómez-Betancur y Benjumea, 2014; Luna-Guevara *et al.*, 2018). Hernández-García *et al.* (2025) demostraron que los aceites esenciales extraídos de la hoja, tallo y raíz de *R. alpinia* inhibieron el crecimiento de *C. albicans*, destacando el mayor porcentaje de inhibición del AE extraído de la raíz.

En estudios previos se ha reportado que la cáscara de *R. alpinia* es una fuente importante de compuestos fenólicos, principalmente antocianinas con capacidad antioxidante (Jiménez-González *et al.*, 2021). Arroy *et al.* (2017) indicaron que la cáscara de *R. alpinia* tiene un notable potencial como ingrediente alimentario con propiedades nutraceuticas. Jiménez-González *et al.* (2018) microencapsularon los pigmentos obtenidos de la cáscara del fruto y los incorporaron como un aditivo alimentario, con la finalidad de mejorar

el contenido nutricional, los atributos de color y las propiedades antioxidantes de los alimentos.

Dado que no se han reportado estudios sobre el empleo de la cáscara de *R. alpinia* como fuente de fibra y compuestos bioactivos en alimentos panificables, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de la adición de harina de cáscara de *Renealmia alpinia*, sobre la calidad panadera, propiedades nutricionales y vida de anaquel del pan de caja.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Material vegetal y obtención de harina a partir de cáscara de *R. alpinia*

Los frutos de *R. alpinia* fueron colectados en la comunidad de Santiago Ecatlán, Jonotla, Puebla, México, ubicados en las coordenadas N20°03'07.6", 97°33'23.4"W. Se seleccionaron frutos sin daños físicos y con un estado de madurez similar. La cáscara se separó manualmente de la pulpa. Se desinfectó con hipoclorito de sodio al 0.1 % durante 5 min y se dejó secar en un deshidratador de convección forzada (Sedona SD-P9000-F, Tribest, Anaheim, Estados Unidos) a 45 °C durante 48 h. Para la obtención de la harina de cáscaras de *R. alpinia* (HRA), las cáscaras se molieron en un molino semiindustrial tipo martillo con ciclón LABORATORY MILL 3100 (Falling number AB, Suecia) con una malla de 0.5 mm. La harina refinada de trigo (HRT) se obtuvo del grano de la Variedad Valles F2015 mediante un molino Bhuler (Brabender OHG, Alemania) mediante el método 26-31 de la AACC (2005). Con las harinas se prepararon tres formulaciones: 1) 1 % HRA/99 % HRT, 2) 2.5 % HRA/97.5 % HRT y 3) 5 % HRA/95 % HRT. Incluyendo un testigo con 100 % de harina refinada de trigo (HT0).

4.2.2. Evaluación de la calidad panadera

El pan de caja se elaboró en el Laboratorio de Calidad de Trigo del Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX-INIFAP), mediante el método de

masa directa (método 10-09, AACC, 2005) en una hogaza de pan de 100 g. A 100 g de las formulaciones de harina de trigo y harina de cáscara de *R. alpina* se agregaron 4 g de leche en polvo, 3 g de grasa vegetal, 25 mL de una solución de levadura (12 %), 25 mL de una solución de sacarosa-cloruro de sodio (20 % y 4 %, respectivamente). Se mezclaron todos los ingredientes, se moldeó la masa en forma cilíndrica y se colocó dentro de un molde. La masa se fermentó a 30 °C con una humedad relativa de 95 a 100 %. Finalmente, se horneó a 220 °C durante 25 min. Los panes se pesaron en una balanza digital Scout Pro (Ohaus, EE. UU.) y la calidad panadera se estimó como volumen de pan (cm³) por desplazamiento de semillas de colza (*Brassica campestris* L.) en un volutómetro (método 10-05.01, AACC, 2005). Se calculó el volumen específico, expresando los resultados en cm³ g⁻¹.

4.2.3. Análisis de color y perfil de textura (TPA) de los panes de caja adicionados con cáscaras de *R. alpina*.

El análisis colorimétrico de la miga del pan se determinó mediante los parámetros de color basados en el sistema internacional CIE L*, a* y b*. Donde el valor del color expresado como luminosidad (L*) se enuncia en una escala de 0 (oscuridad) a 100 (luminosidad), eje rojo-verde con color rojo (+a*) y verde (-a*), y eje azul-amarillo con azul (+b*) y amarillo (-b*).

Las propiedades texturales de la miga del pan se determinaron empleando un CT3 Texture Analyzer (Brookfield, EE. UU.). Para el análisis, se prepararon tajadas de 4 cm de alto y 3.1 cm de diámetro. Se aplicaron dos ciclos de compresión del 60 % a una velocidad de 1.0 m/s con un tiempo de compresión de 5 s, y una celda de carga de 25 kg (TA-BT-KI, texturePro CT V1.4 Build 17). Los parámetros evaluados fueron dureza, elasticidad, cohesividad, masticabilidad y resiliencia, utilizando el software del texturómetro.

4.2.4. Composición proximal y mineral

La composición proximal se determinó por triplicado siguiendo las metodologías de la AOAC (2005): contenido de humedad (924.09), proteína (960.59), fibra cruda (962.09), cenizas (923.03) y extracto etéreo (920.85).

El contenido mineral se analizó según la metodología descrita por Iordache *et al.* (2022). La muestra, previamente liofilizada y molida (0.2 g), se mezcló con patrones internos (Sc, In, Ir, Bi) y ácido nítrico ultrapuro, se dejó reaccionar durante 12 h. Posteriormente, se llevó a cabo una digestión ácida en caliente con HNO₃ y HCl, y finalmente se aforó a 50 mL con HNO₃ al 2 %. El análisis ICP-MS (iCAP™ RQ) se llevó a cabo en modo KED con una calibración multi elemental externa, usando patrones certificados para 63 elementos a una concentración de 100 ± 0.06 mg mL⁻¹ (High Purity Standards, USA). Se utilizó una curva de calibración con 10 puntos a una concentración de 0.1 a 150 ng mL⁻¹. Como patrones internos en las muestras, se utilizaron Iridio e Indio, obtenidos en una concentración estándar certificada de 1000 ± 0.03 mg mL⁻¹ (High Purity Standards, USA). Los datos fueron procesados con el Software Thermo Scientific™ Qtegra™.

4.2.5. Evaluación de las propiedades antioxidantes

Las propiedades antioxidantes se determinaron en extractos del pan de caja obtenidos con una mezcla de metanol/agua al 80% en una proporción 1:10 (p/v) según el método descrito por Hernández-Rodríguez *et al.* (2016). A partir de estos extractos se determinó el contenido fenólico total, flavonoides y capacidad antioxidante. Cada muestra se procesó por triplicado.

El contenido fenólico total se determinó siguiendo el método de Folin-Ciocalteu (Singleton y Rossi, 1965) adaptado a microplacas por Hernández-Rodríguez *et al.* (2016). Se preparó una curva de calibración estándar de ácido gálico en un rango lineal de 2.5 a 29 µg mL⁻¹. Las absorbancias se midieron a 760 nm en un lector de microplacas (Synergy 2 microplate reader, Biotek International,

software Gen 5). Los resultados se expresaron en miligramos equivalentes de ácido gálico (EAG) por gramo de muestra en base seca ($\text{mg EAG g}^{-1} \text{ bs}$).

El contenido de flavonoides totales se determinó siguiendo la metodología descrita por Kubola y Siriamonrpun (2011), adaptada a microplacas por Hernández-Rodríguez *et al.* (2016). Se preparó una curva de calibración utilizando catequina con un rango de concentraciones de 0.7 a 34.5 $\mu\text{g CE mL}^{-1}$. Las absorbancias se midieron a 510 nm. Los resultados se expresaron en miligramos (mg) equivalentes de catequina (EC) por gramo de muestra en base seca ($\text{mg EC g}^{-1} \text{ bs}$).

El contenido total de antocianinas monoméricas se determinó mediante el método diferencial de pH descrito por Lee *et al.*, (2005), adaptado a microplacas por Hernández-Rodríguez *et al.* (2016). Los resultados se reportaron en miligramos equivalentes de cianidina 3-glucósido por gramo de muestra en base seca ($\text{mg EC3G/g muestra bs}$).

El ensayo ABTS se llevó a cabo siguiendo la metodología de Re-R *et al.* (1999) adaptada a microplacas por Hernández-Rodríguez *et al.* (2016). Se utilizó una curva de calibración de Trolox en un rango lineal de 3.8 a 46 μM . Las absorbancias se midieron a 734 nm. Los resultados se expresaron en miligramos de muestra equivalentes a Trolox por gramo de muestra en base seca ($\text{mg ET g}^{-1} \text{ bs}$).

El ensayo FRAP se aplicó según la metodología de Benzie y Strain (1996), adaptada a microplacas por Hernández-Rodríguez *et al.* (2016). Se preparó una curva de calibración de Trolox en un rango lineal de 3.8 a 46 μM . Las absorbancias se midieron a 595 nm. Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de Trolox por gramo de muestra en base seca ($\text{mg ET g}^{-1} \text{ bs}$).

4.2.6. Análisis microbiológico del pan de caja adicionado con cáscaras de *R. alpina*

Se hizo un recuento de colonias de mohos y levaduras, coliformes totales y mesófilos aerobios, de acuerdo con las normas oficiales mexicanas NOM-111-SSA1-1994, NOM-113-SSA1-1994 y NOM-092-SSA1-1994, respectivamente. Las muestras de pan fueron rebanadas y almacenadas a temperatura ambiente (25 °C) durante 17 días, evaluando la carga microbiológica a los días 1, 10 y 18. Para el recuento de mohos y levaduras, se inoculó 1 mL en diluciones seriadas y se incubaron en posición invertida a 25 °C $\pm$ 1 °C durante 5 días. Para el conteo, se consideraron únicamente aquellas que presentaran un rango de 10 a 150 colonias de hongos y/o levaduras. En el caso de los coliformes totales, las placas se incubaron a 35 °C durante 24 h $\pm$ 2 h, y se contabilizaron las que contenían un rango de 15 a 150 colonias. Finalmente, para el recuento de mesófilos aerobios, las placas se incubaron a 35 °C $\pm$ 2 °C durante 48 h. Después de la incubación, se contabilizaron aquellas que tenían un rango de 25 a 250 colonias. Los resultados se expresaron como el número de unidades formadoras de colonias por gramo (UFCg⁻¹), indicando el tiempo de incubación.

4.2.7. Ensayo de toxicidad

La toxicidad en el pan se evaluó en extractos acuosos a concentraciones de 100, 75, 50 y 25 mgmL⁻¹, siguiendo la metodología descrita por Meyer *et al.* (1982) y Michael *et al.* (1956) adaptada a microplaca de 24 pozos. Se depositaron 10 nauplios en cada pozo de la microplaca junto con las soluciones de extracto correspondientes (100, 75, 50 y 25 mg mL⁻¹), ajustando el volumen final a 2.5 mL con solución salina a una concentración de 28 g L⁻¹. La microplaca se incubó en una agotadora orbital (Prendo INO-650 M) a 28 °C bajo condiciones de iluminación y aireación constante durante 24 h. El ensayo se realizó por triplicado. Se registró el porcentaje de mortalidad de los nauplios con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Mortalidad} = \frac{\text{Núm. de nauplios muertos}}{\text{Total de nauplios inicial}} \times 100$$

A partir de los resultados obtenidos, se estimó la concentración letal media (CL₅₀) empleando la función Probit con el software estadístico Minitab (v.22.2.2.0), y se clasificó el grado de toxicidad de la muestra.

4.3. Análisis estadístico

Los resultados se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor con un nivel de confianza del 95%. Se utilizó la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para establecer comparaciones de medias entre las formulaciones. Los datos se expresaron como media $\pm$ desviación estándar. Todos los resultados estadísticos se realizaron con el software estadístico Minitab (v.22.2.2.0).

4.4. Resultados y discusión

4.4.1. Calidad panadera de pan de caja adicionado con harina de cáscara de *R. alpinia*

El peso de los panes elaborados con diferentes porcentajes de harina de cáscara de *R. alpinia*, no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) comparados con el testigo. El pan elaborado con 100% de harina de trigo refinada tuvo el mayor volumen ($6.65 \pm 0.11 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$) en comparación con las tres formulaciones. En el Cuadro 3, se puede observar que a mayor proporción de harina de cáscara de *R. alpinia*, disminuyó el volumen específico. La disminución gradual del volumen específico del pan adicionado con HRA, puede atribuirse a la menor disponibilidad de gluten en la masa. El incremento en la proporción de harina de cascara de *R. alpinia* reduce la extensibilidad y aumenta la resistencia de la masa, lo que ocasiona una disminución de sus propiedades viscoelásticas, como el debilitamiento de su estructura, interrupción de la red de gluten y la capacidad de retención de gases durante la fermentación (Yaver y Bilgiçli, 2021; Zahorec *et al.*, 2024). Ni *et al.* (2020)

observaron que la adición de cáscara de frijol redujo significativamente el volumen específico del pan, con niveles de reemplazo superiores al 21 %. Por otra parte, Chulibert *et al.* (2024), reportaron un comportamiento similar con la adición de polvo de cáscara de mango.

Cuadro 2. Características de la calidad panadera, color y propiedades texturales del pan de caja adicionado con harina de cáscara de *R. alpinia*.

Parámetros	HT0	HRA1 (1 %)	HRA2 (2.5 %)	HRA3 (5 %)
Peso (g) ^a	172.8 ± 2.89 a	173.3 ± 2.25 a	176.4 ± 0.50 a	176.0 ± 4.18 a
VE (cm ³ g ⁻¹) ^a	6.65 ± 0.11 a	5.81 ± 0.17 b	4.55 ± 0.50 c	2.68 ± 0.10 d
L ^{*a}	83.56 ± 0.47 a	63.01 ± 1.74 b	45.01 ± 4.29 c	27.25 ± 0.24 d
a ^{*a}	-0.06 ± 0.06 d	2.95 ± 0.03 c	3.95 ± 0.83 b	9.79 ± 0.49 a
b ^{*a}	13.84 ± 0.29 a	4.69 ± 0.30 b	-2.56 ± 0.57 c	-1.76 ± 0.41 c
Dureza (N) ^a	2.99 ± 0.04 c	3.77 ± 0.73 c	14.29 ± 6.12 b	31.62 ± 1.62 a
Cohesividad ^a	4.58 ± 1.52 ab	5.94 ± 0.61 a	3.52 ± 1.83 b	3.99 ± 0.25 ab
Resiliencia ^a	0.24 ± 0.05 a	0.29 ± 0.00 a	0.203 ± 0.07 a	0.207 ± 0.03 a
Masticabilidad (mJ) ^a	14.50 ± 4.86 c	14.67 ± 2.15 c	31.07 ± 3.21 b	76.53 ± 3.50 a
Elasticidad (mm) ^a	9.97 ± 0.01 a	9.97 ± 0.01 a	9.97 ± 0.02 a	9.93 ± 0.00 b

^a Valores medios determinados por triplicado ± desviación estándar. VE = volumen específico. Los valores con diferente letra en una fila son estadísticamente diferentes (LSD, $p < 0.05$). Luminosidad (L^{*}) en una escala de 0 (oscuridad) a 100 (luminosidad), eje rojo-verde con color rojo (+a^{*}) y verde (-a^{*}) y eje amarillo-azul con valor de amarillo (+b^{*}) y azul (-b^{*}). HT0 = harina refinada de trigo; HRA1, HRA2 y HRA3 = formulaciones con harina de cáscara de *R. alpinia*.

En la Figura 3, se muestran los parámetros de color L^{*}, a^{*} y b^{*} de las diferentes formulaciones, las cuales muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) respecto al testigo, que presentó una mayor luminosidad (L^{*}) (83.56 ± 0.47), acorde con un color más claro y típico de un pan blanco elaborado con harina refinada. El valor del componente a^{*} aumentó significativamente con la adición de HRA, mostrando una tendencia hacia tonalidad púrpura. El componente b^{*} fue mayor en el testigo (HT0) y significativamente diferente ($p < 0.05$) (13.84 ± 0.29) con las formulaciones HRA1, HRA2 y HRA3, virando hacia una tonalidad amarilla; mientras que los panes adicionados con harina de *R. alpinia* mostraron una desviación hacia color violeta.

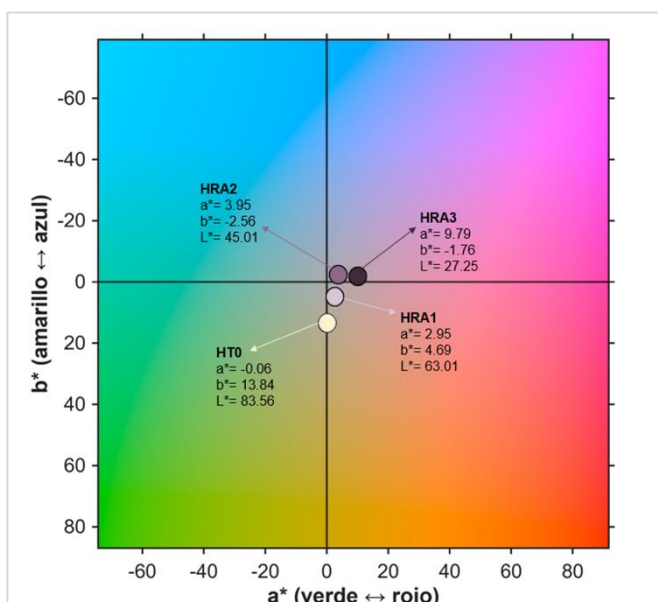


Figura 3. Representación gráfica de los parámetros de color L^* , a^* y b^* en los panes elaborados con diferentes formulaciones de harina de cáscara de *R. alpinia*. Luminosidad (L^*) en una escala de 0 (oscuridad) a 100 (luminosidad), eje rojo-verde con color rojo (+ a^*) y verde (- a^*) y eje amarillo-azul valor con amarillo (+ b^*) y azul (- b^*). Testigo (HT0, 100 % de harina de trigo refinada), HRA = harina de cáscara de *R. alpinia*; HRA1 (1 % de HRA), HRA2 (2.5 % de HRA) y HRA3 (5 % de HRA).

La adición de harina de cáscara de *R. alpinia* con diferentes porcentajes de HRA influye significativamente en el color de la miga del pan de caja, como se muestra en la Figura 4. Thuy *et al.* (2023), estudiaron el efecto de la adición de camote morado con diferentes porcentajes en un pan de molde. Los autores reportaron que la adición de camote morado afectó significativamente los parámetros de color (L^* a^* b^*), observando una coloración púrpura en el pan que se acrecentó gradualmente con la incorporación del camote morado. Tamaroh y Sudrajat (2021) indicaron que la adición de harina de ñame morado causó cambios en los parámetros de color, especialmente en la luminosidad, dando como resultado una coloración más oscura con tonalidades moradas en el pan.



Figura 4. Efecto de la harina de cáscara de *R. alpinia* en la elaboración de un pan de caja con diferentes porcentajes. Testigo (HT0, 100 % de harina de trigo refinada), HRA = harina de cáscara de *R. alpinia*; HRA1 (1 % de HRA), HRA2 (2.5 % de HRA) y HRA3 (5 % de HRA).

El análisis del perfil de textura del pan adicionado con harina de cáscara de *R. alpinia* mostró diferencias significativas en la dureza y masticabilidad. Como se muestra en el Cuadro 2, se registró un aumento notable de dureza y masticabilidad en la miga del pan conforme aumentó el porcentaje de harina de *R. alpinia* (HRA1, HRA2 y HRA3). Sin embargo, la formulación HRA1 (3.77 ± 0.73 N y 14.67 ± 2.15 mJ) no presentó diferencia significativa en relación con el testigo (HT0). Una mayor dureza en la miga de pan indica que se requerirá una mayor energía durante su masticación, dada la interacción entre el gluten y la harina de cáscara de *R. alpinia* (Nasir *et al.*, 2020). Djordjević *et al.* (2021), señalaron que la dureza del pan, considerada como un efecto negativo, se debe a la restricción del agua disponible en el sistema de la masa, que impide su desarrollo y se manifiesta como una correlación negativa entre mayor dureza, estructura más densa y bajo volumen del pan.

El parámetro de cohesividad de los panes con diferentes porcentajes de harina de cáscara de *R. alpinia*, mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) según Seis-Subaşı y Ercan (2024), una alta cohesividad es deseable en un pan, ya que permite conservar su estructura, en lugar de desmoronarse durante su masticación, mientras que una cohesividad baja, como se observó en la formulación con mayor porcentaje de HRA, ocasionó que haya una mayor susceptibilidad del pan a desmoronarse o fracturarse fácilmente. En cuanto a la elasticidad, la formulación HRA3 tuvo una elasticidad inferior de 9.93 ± 0.00 mm, en comparación con el resto de los tratamientos, indicando una menor capacidad de recuperación tras su deformación. Este comportamiento puede atribuirse a una ralentización en la hidratación de la masa, lo que limita el desarrollo óptimo de la red del gluten (Sun *et al.*, 2023).

4.4.2. Análisis proximal y mineral del pan de caja adicionado con harina de cáscara de *R. alpinia*

Antes de adicionar la HRA al pan, se determinó su composición proximal (Cuadro 3). Se observa que la cáscara tiene un alto contenido de fibra cruda y cenizas (22.97 % y 23.25 %, respectivamente). Estos resultados contrastan con lo descrito previamente por Luna-Guevara *et al.* (2018), quienes reportaron 0.10 % de cenizas en la cáscara de *R. alpinia* proveniente de la localidad de Cuetzalan del Progreso, Puebla, México. La presencia de fibra cruda y cenizas en la cáscara de *R. alpinia* es comparable con otros subproductos derivados de cáscaras que han sido empleados para mejorar el aporte nutricional y las características tecnofuncionales en productos de panificación. Por ejemplo, la cáscara de mango contiene entre 19.2 y 23.8 % de fibra cruda, con un contenido de cenizas entre 5.5 y 7.4 %. De manera similar, la cáscara de pitahaya contiene 21.34 % en fibra cruda y 16.74 % en cenizas, mientras que la cáscara de plátano, otro subproducto utilizado, reporta valores de fibra cruda que oscilan entre 11.20 y 14.38 % con un porcentaje entre 11.86 % y 25.19 % de cenizas (Pacheco-Jiménez *et al.*, 2024; Cacatian *et al.*, 2022; Segura-Badilla *et al.*, 2022).

Cuadro 3. Composición proximal y mineral de la cáscara de *R. alpinia* (Rottb.) Mass.

Composición	Cáscara de <i>R. alpinia</i>
Materia seca ^b	42.71 ± 3.21
Ceniza ^b	23.25 ± 0.69
EE ^b	4.66 ± 0.16
Proteína ^b	9.25 ± 0.02
Fibra ^b	22.97 ± 0.14
Macroelementos (mgkg⁻¹) ^b	
Fósforo (P)	2250.40 ± 169.7
Potasio (K)	16861.84 ± 1621
Calcio (Ca)	168.88 ± 15.98
Magnesio (Mg)	1899.56 ± 45.4
Sodio (Na)	1405.79 ± 9.52
Hierro (Fe)	323.20 ± 152.2
Cobre (Cu)	2.58 ± 0.60
Zinc (Zn)	163.26 ± 112.8
Manganeso (Mn)	311.64 ± 4.13
Elementos traza (μgkg⁻¹) ^b	
Cromo (Cr)	4875.00 ± 415
Níquel (Ni)	6440.38 ± 283
Mercurio (Hg)	15.51 ± 2.44
Elementos tóxicos (μgkg⁻¹) ^b	
Arsénico (As)	98.14 ± 70.1
Cadmio (Cd)	262.80 ± 111.2
Plomo (Pb206)	875.64 ± 17.6
Plomo (Pb207)	762.80 ± 171.8
Plomo (Pb208)	714.30 ± 166.0

^b Valores medios determinados por triplicado ± desviación estándar. EE = extracto etéreo. Los valores con diferente letra en una fila son estadísticamente diferentes (LSD, p < 0.05). HT0 = harina refinada de trigo; HRA1, HRA2 y HRA3 = formulaciones con harina de cáscara de *R. alpinia*.

Por otra parte, en el Cuadro 3 se muestran los resultados del análisis mineral de *R. alpinia*. La cáscara exhibió concentraciones altas de potasio (K), fósforo (P), magnesio (Mg) y sodio (Na). Entre los elementos trazas y tóxicos, se detectaron concentraciones altas de cromo (Cr), níquel (Ni) y plomo (Pb) en sus distintas formas isotópicas (Pb 206, Pb 207 y Pb 208). Con el fin de asegurar que el consumo de la cáscara de *R. alpinia* adicionada al pan de caja,

no constituyera un riesgo, debido a las concentraciones elevadas de elementos trazas (Cr, Ni y Hg) y tóxicos (As, Cd y Pb), se calculó el índice de riesgo a la salud (HRI). Los cálculos demostraron que los elementos Cr, Ni, Hg, Pb, Cd, As, Zn y Cu no representan un riesgo para la salud humana en relación con la concentración reportada en el análisis mineral de la cáscara de *R. alpinia*, mostrando valores de HRI <1 (ver Apéndice 1).

El análisis proximal del pan adicionado con HRA en diferentes porcentajes y el testigo se muestran en el Cuadro 4. Los resultados muestran que no hay diferencias significativas. A pesar de que se observa una tendencia conforme aumenta la adición de la harina de *R. alpinia*, estadísticamente los valores se comportan de manera similar en todas las formulaciones. Por otra parte, el contenido de proteína en los panes adicionados con HRA fue superior (13.85 y 14.64 %) al contenido protéico reportado en panes elaborados con harinas integrales (12.61 %) y refinadas (10.01 %) (Muñoz *et al.*, 2021). Los resultados obtenidos en esta investigación evidenciaron que la adición de harina de cáscara de *R. alpinia* no ocasionó cambios significativos en la composición proximal del pan de caja, a pesar de que se observa un ligero aumento en el contenido de cenizas y extracto etéreo.

Cuadro 4. Composición proximal del pan de caja adicionado con diferentes porcentajes de harina de cáscara de *Renealmia alpinia*.

Composición	HT0	HRA1 (1 %)	HRA2 (2.5 %)	HRA3 (5 %)
Materia seca ^c	41.36 ± 1.22 b	45.23 ± 2.45 a	42.70 ± 1.04 ab	34.40 ± 0.60 c
Ceniza ^c	3.80 ± 0.01 b	3.95 ± 0.12 b	4.30 ± 0.11 ab	4.62 ± 0.05 a
EE ^c	4.36 ± 0.78 b	5.84 ± 0.28 ab	6.32 ± 0.02 a	7.18 ± 1.04 a
Proteína ^c	14.31 ± 0.42 ab	13.85 ± 0.05 b	14.37 ± 0.29 ab	14.64 ± 0.10 a
Fibra ^c	2.32 ± 0.29 a	2.41 ± 0.10 a	2.62 ± 0.23 a	2.68 ± 0.13 a

^cValores medios determinados por triplicado ± desviación estándar. EE = extracto etéreo. Los valores con diferente letra en una fila son estadísticamente diferentes (LSD, $p < 0.05$). HT0 = harina refinada de trigo; HRA1, HRA2 y HRA3 = formulaciones con harina de cáscara de *R. alpinia*.

4.4.3. Análisis de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante

En el Cuadro 5, se muestran los resultados de las propiedades antioxidantes de HRA y de los panes elaborados con diferentes proporciones de ésta. El contenido de fenoles totales en la HRA fue superior ($31.52 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1} \text{ bs}$) a lo reportado por Jiménez-González *et al.* (2018), quien reportó contenido fenólico de $2218.19 \text{ mg EAG}/100 \text{ g}$ de ms. Mientras que el contenido de antocianinas fue inferior al valor señalado por el mismo autor ($1916.63 \text{ mg de Cyd-3-glu}/100 \text{ g}$ de ms). Por otra parte, los valores obtenidos de fenoles y antocianinas totales en la cáscara de *R. alpinia* son similares a los reportados para otras cáscaras utilizadas en panificación por su alta composición en compuestos bioactivos, por ejemplo, las cáscaras de mango, maracuyá, naranja y plátano mostraron valores para fenoles totales de 3.857, 56.3, 391 a 689 y 50 a 304 $\text{mg ET}/100 \text{ g}$ bs, respectivamente (Pacheco-Jiménez *et al.*, 2022; Pacheco-Jiménez *et al.*, 2024 y Hasan *et al.*, 2024). La concentración de antocianinas totales fue superior ($0.813 \text{ mg EC3G} \cdot \text{g}^{-1} \text{ bs}$) a lo reportado para ciruelas ($23.4 \text{ mg}/100 \text{ g}$ bs) (Lakshmikanthan *et al.*, 2024) y legumbres como la papa con pulpa roja y morada ($5.80\text{-}31.98 \text{ mg}/100 \text{ g}$) (Barragán-Condori *et al.*, 2024).

La adición de harina de cáscara de *R. alpinia* en el pan de caja mostró que a mayor porcentaje de HRA adicionado, mayor contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante (Cuadro 5). La formulación HRA3 tuvo un contenido fenólico 18.28 % mayor respecto al testigo, además la capacidad antioxidante determinada por los ensayos ABTS y FRAP fueron mayores en 2.6 y 4.8 %, respectivamente, con respecto al testigo. Estos resultados indican que la adición de cáscara de *R. alpinia* mejoró significativamente la capacidad antioxidante del pan de caja. Murariu *et al.* (2025), reportaron que la adición de arándanos silvestres en porcentajes de 10 % y 20 % en un pan francés incrementó el contenido de compuestos bioactivos como vitamina C, polifenoles totales, flavonoides, antocianinas y actividad antioxidante. Öncel y Özer (2025) destacaron que la adición de harina de lentejas en un 30% a un

pan sin gluten, aumentó el contenido de compuestos fenólicos totales, alcanzando valores entre 0.33 mg EAG/100 g y 0.75 mg EAG/100 g. Wang *et al.* (2024) evaluaron el efecto de las antocianinas endógenas del maíz morado sobre las propiedades fisicoquímicas y la capacidad antioxidante del pan, destacando que el maíz morado es una fuente rica en sustancias bioactivas como las antocianinas.

Cuadro 5. Fenoles totales, flavonoides, antocianinas, ABTS y FRAP en cáscara de *R. alpinia* y en el pan de caja elaborado con diferentes porcentajes de HRA.

	Cáscara de <i>R. alpinia</i>	HT0	HRA1 (1 %)	HRA2 (2.5 %)	HRA3 (5 %)
Fenoles totales (mg EAG · g ⁻¹ bs) ^d	31.52 ± 0.84	0.298 ± 0.00 c	0.383 ± 0.00 c	1.360 ± 0.16 b	1.630 ± 0.07 a
Flavonoides (mg CE · g ⁻¹ bs) ^d	1.247 ± 0.03	0.108 ± 0.00 d	0.213 ± 0.00 c	0.289 ± 0.02 b	0.533 ± 0.04 a
Antocianinas totales (mg EC3G · g ⁻¹ bs) ^d	0.813 ± 0.05	0.00 ± 0.00 d	0.146 ± 0.00 c	0.065 ± 0.00 b	0.047 ± 0.00 a
ABTS (mg ET · g ⁻¹ bs) ^d	54.88 ± 1.89	0.092 ± 0.05 d	0.352 ± 0.02 c	1.653 ± 0.10 b	3.879 ± 0.07 a
FRAP (mg ET · g ⁻¹ bs) ^d	47.71 ± 0.97	0.104 ± 0.01 c	0.233 ± 0.01 c	1.135 ± 0.04 b	2.134 ± 0.16 a

^dValores medios determinados por triplicado ± desviación estándar. Los valores con diferente letra en una fila son estadísticamente diferentes (LSD, p < 0.05). HT0 = harina refinada de trigo; HRA1, HRA2 y HRA3 = formulaciones con harina de cáscara de *R. alpinia*.

4.4.4. Ensayo de toxicidad

Debido a que la HRA se propone como aditivo natural para consumo humano, fue necesario evaluar su toxicidad, los resultados del ensayo de toxicidad evidenciaron que tanto la cáscara de *R. alpinia* como el pan de caja son relativamente inocuos (ver Cuadro 6). De acuerdo con la clasificación descrita por la Ciencia y tecnología para el Desarrollo (2014), la concentración letal media (CL₅₀) del pan adicionado con la cáscara de *R. alpinia* a 100,000 µg mL⁻¹ fue inferior a lo reportado por Juhari *et al.* (2021) para otras cáscaras de frutos, como la cáscara de granada con una CL₅₀ de 196,037 µg mL⁻¹, las cáscaras de cítricos (331,000 µg mL⁻¹) y la cáscara de plátano, que no

presentan toxicidad aparente. Estos resultados demuestran la inocuidad del pan elaborado con HRA y su uso como ingrediente en panificación.

Cuadro 6. Evaluación de toxicidad (CL₅₀) de la cáscara de *Renealmia alpinia* y del pan de caja elaborado con diferentes porcentajes de HRA sobre *Artemia salina* a diferentes concentraciones.

Muestra	Concentración (µg mL ⁻¹)	Mortalidad a las 24 h (%) ^d	CL ₅₀ (µg mL ⁻¹) ^d	Grado de Toxicidad
Cáscara <i>R. alpinia</i>	25,000	0 ± 0.00	81496.0 ± 29198.2 (µg mL ⁻¹)	Relativamente inocuo >1500
	50,000	18 ± 0.20		
	75,000	45 ± 0.65		
	100,000	70 ± 2.49		
Pan de caja adicionado con HRA	25,000	20 ± 4.08	54660.1 ± 16060.0 (µg mL ⁻¹)	Relativamente inocuo >1500
	50,000	55 ± 2.89		
	75,000	80 ± 3.74		
	100,000	95 ± 0.50		

^dValores medios determinados por triplicado ± desviación estándar. Concentración letal media = CL₅₀

4.4.5. Análisis microbiológico del pan de caja adicionado con cáscaras de *R. alpinia*

Los resultados del Cuadro 7, muestran que la adición de HRA influyó en el crecimiento microbiano durante el almacenamiento del pan de caja. El conteo de mohos y levaduras, mesófilos aerobios y coliformes totales para las formulaciones presentaron valores iniciales <1 UFC g⁻¹ en el día 1, lo cual confirma la eficacia de las condiciones de horneado para garantizar un producto microbiológicamente inocuo en su elaboración. A lo largo del periodo de almacenamiento, se observó un incremento progresivo en las unidades formadoras de colonias (UFC) para mohos y levaduras, siendo más evidente en la formulación testigo (HT0) y en HRA1 (1 %), que alcanzaron valores de 1.59 ± 0.51 log UFC g⁻¹ y 1.42 ± 0.02 log UFC g⁻¹ al día 10, respectivamente. En contraste, la formulación HRA (2.5 %) mostró un retraso significativo en el desarrollo de mohos y levaduras, alcanzando únicamente 0.70 ± 0.19 log UFC g⁻¹ al día 18. En la Figura 5, se muestran las alteraciones a lo largo del tiempo

del pan de caja atacado por moho. Estos resultados sugieren que la incorporación de 2.5 % de harina de cáscara de *R. alpinia* ejerce un efecto inhibitorio más pronunciado sobre hongos filamentosos y levaduras, posiblemente asociado a la presencia de compuestos fenólicos con actividad antimicrobiana. En cuanto a los mesófilos aerobios, el comportamiento fue similar. El testigo y la formulación HRA1 presentaron valores de 1.35 y 1.64 log UFCg⁻¹, respectivamente. En contraste, la HRA2 (2.5 %) y la HRA3 (5 %) registraron un crecimiento menor, donde la HRA3 mantuvo niveles <1 log UFC g⁻¹ hasta el día 18, lo que sugiere un efecto protector mayor asociado a la proporción de harina adicionada. El conteo de mesófilos aerobios en las formulaciones HRA1, HRA2 y HRA3 se mantuvo por debajo del límite permitido máximo según la norma oficial mexicana NOM-247-SSA1-2008 (<1000 UFCg⁻¹) para productos de panificación. Las formulaciones con harina de cáscara de *R. alpinia* y el testigo presentaron ausencia de crecimiento de coliformes totales durante su almacenamiento, lo que indica que el control y las muestras adicionadas con harina de *R. alpinia* no representaron riesgo de contaminación por este grupo de bacterias

Los resultados evidencian que la adición de harina de cáscara de *R. alpinia*, particularmente en proporciones de 2.5 % y 5 %, contribuye a prolongar la vida útil microbiológica del pan de caja. Esto podría estar relacionado con la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides, principalmente antocianinas, así como terpenoides con propiedades antimicrobianas y antioxidantes (Jiménez-González *et al.*, 2018; Arroy *et al.*, 2017). Este efecto coincide con lo reportado en panes enriquecidos con ingredientes ricos en antioxidantes, como maíces pigmentados o jamaica (Hernández-Aguilar *et al.*, 2022; González-Montiel *et al.*, 2019), en los cuales se ha observado una inhibición del crecimiento microbiano y, en consecuencia, una extensión de la vida útil del producto.

Cuadro 7. Recuento de mohos y levaduras, mesófilos aerobios y coliformes totales en los panes de caja adicionados con diferentes porcentajes de harina de cáscara de *R. alpinia*.

Formulaciones	Día 1 (log UFC g ⁻¹)	Día 10 (log UFC g ⁻¹)	Día 18 (log UFC g ⁻¹)
Mohos y levaduras^e			
HT0 (100 %harina de trigo)	<1 UFC g ⁻¹	1.59 ± 0.51 a	1.77 ± 0.04 a
HRA1 (1%)	<1 UFC g ⁻¹	1.42 ± 0.02 b	1.83 ± 0.09 a
HRA2 (2.5%)	<1 UFC g ⁻¹	0.00 ± 0.00 d	0.70 ± 0.19 b
HRA3 (5%)	<1 UFC g ⁻¹	0.39 ± 0.16 c	1.37 ± 0.04 a
Mesófilos aerobios^e			
HT0 (100 %harina de trigo)	<1 UFC g ⁻¹	<1 UFC g ⁻¹ b	1.35 ± 0.04 b
HRA1 (1%)	<1 UFC g ⁻¹	<1 UFC g ⁻¹ b	1.64 ± 0.21 a
HRA2 (2.5%)	<1 UFC g ⁻¹	<1 UFC g ⁻¹ b	0.54 ± 0.20 c
HRA3 (5%)	<1 UFC g ⁻¹	<1 UFC g ⁻¹ b	<1 UFC g ⁻¹ d
Coliformes totales^e			
HT0 (100 %harina de trigo)	<1 UFC g ⁻¹	<1 UFC g ⁻¹	<1 UFC g ⁻¹
HRA1 (1%)	<1 UFC g ⁻¹	<1 UFC g ⁻¹	<1 UFC g ⁻¹
HRA2 (2.5%)	<1 UFC g ⁻¹	<1 UFC g ⁻¹	<1 UFC g ⁻¹
HRA3 (5%)	<1 UFC g ⁻¹	<1 UFC g ⁻¹	<1 UFC g ⁻¹

^eValores medios determinados por triplicado ± desviación estándar. Los valores medios asociados con diferentes letras mayúsculas indican diferencias significativas entre formulaciones con diferentes porcentajes de harinas de cáscara de *R. alpinia* (ANOVA, prueba de LSD Fisher, p < 0.05). <1 UFC g⁻¹: ausencia de crecimiento detectable.

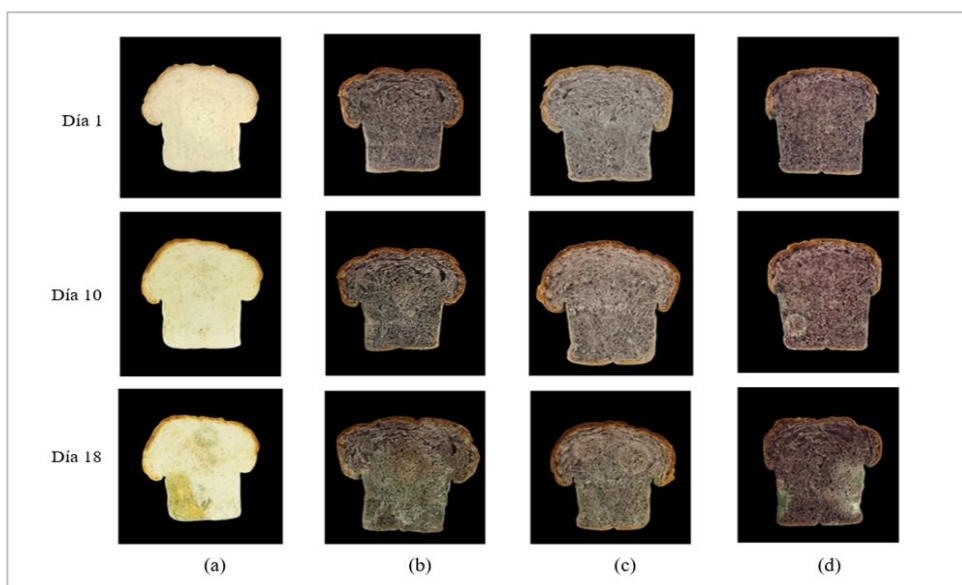


Figura 5. Alteraciones visuales de moho en los panes elaborados con diferentes formulaciones de harina de cáscara de *R. alpinia* durante su tiempo de almacenamiento. Se muestran las formulaciones: (a) HT0: 100 % de harina de trigo refinada, (b) HRA1: 1 % de harina de cáscara de *R. alpinia*, (c) HRA2: 2.5 % de harina de cáscara de *R. alpinia* y (d) HRA3: 5 % de harina de cáscara de *R. alpinia*.

4.5. Conclusiones

La incorporación de harina de cáscara de *Renealmia alpinia* en la elaboración del pan de caja mejoró significativamente las propiedades nutricionales, el potencial nutracéutico y protegió contra el ataque de microorganismos a este producto. El incremento en el nivel de adición de harina de cáscara de *R. alpinia*, se asoció con un mayor contenido de cenizas y compuestos fenólicos, entre los que se encuentran las antocianinas, lo que se reflejó en una mayor capacidad antioxidante. Sin embargo, la adición de 5% de harina de cáscara de *R. alpinia* afectó de manera negativa el volumen final y las propiedades texturales, principalmente dureza, masticabilidad y elasticidad del pan. En contraste, el pan formulado con 2.5 % de harina de cáscara de *R. alpinia* conservó una buena calidad panadera, características de textura aceptables y mejor valor nutricional. Asimismo, presentó una mayor capacidad antioxidante y menor crecimiento microbiano durante el almacenamiento, lo que evidencia un efecto positivo en la conservación y extensión en la vida de anaquel.

4.6. Literatura citada

- AACC. (2005). Approved Methods of the AACC. 9th (Ed.). American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN, USA.
- AOAC. (2005). Official methods of analysis of AOAC International. 18 ed. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD.
- Areti, H. A., Muleta, M. D., Abo, L. D., Hamda, A. S., Adugna, A. A., Edae, I. T., Daba, B. J., & Gudeta, R. L. (2024). Innovative uses of agricultural by-products in the food and beverage sector: A review. *Food Chemistry Advances*, 5, 100838. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHA.2024.100838>
- Arroy, J. D. V., Ruiz-Espinosa, H., Luna-Guevara, J. J., Luna-Guevara, M. L., Hernández-Carranza, P., Ávila-Sosa, R., & Ochoa-Velasco, C. E. (2017). Effect of solvents and extraction methods on total anthocyanins, phenolic compounds and antioxidant capacity of *Renealmia alpinia* (Rottb.) Maas peel. <https://cjfs.agriculturejournals.cz/doi/10.17221/316/2016-CJFS.html>, 35(5), 456–465. <https://doi.org/10.17221/316/2016-CJFS>
- Barragán-Condori, M., Casafranca-Vásquez, R., Márquez-Romero, F. R., Huamaní-Meléndez, V. J., Barragán-Condori, M., Casafranca-Vásquez, R., Márquez-Romero, F. R., & Huamaní-Meléndez, V. J. (2024). Anthocyanins and antioxidant capacity in varieties of pigmented potatoes *Solanum stenotomum* and *Solanum tuberosum* spp. andigena.

- Información tecnológica*, 35(6), 29–38. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642024000600029>
- Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of “Antioxidant Power”: The FRAP Assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70–76. <https://doi.org/10.1006/ABIO.1996.0292>
- Cacatian, S. B., & Guittap, L. J. V. (2022). Production, proximate analysis and functional properties of dragon fruit peel powder. *International Journal of Allied Medical Sciences and Clinical Research*, 10(1), 2247–2252
- González-Montiel, L., Altamirano-Fortoul, R.C. & Campos-Pastelin, J.M. (2019). Calidad microbiológica del pan de caja adicionadas con harinas no convencionales (jamaica y nopal). *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4. <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/8/104.pdf>
- Carvajal-Larenas, F. E., Sánchez-Montoya, A., Criollo-Criollo, G., Garcés-López, C., Martínez-Ochoa, N., Terán-Maldonado, P., Reyes-Jácome, C., & Andrade-Cruz, J. (2021). Biopolímeros de cáscaras de mango y su importancia en la soberanía alimentaria. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, ISSN-e 2528-7788, ISSN 1390-5384, Vol. 13, No. 1, 2021 (Ejemplar dedicado a: Volumen 13 Número 1), 13(1), 7. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8155278&info=resumen&idioma=SPA>
- CYTED: Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. (2014). Consultado en: <http://www.cyted.org>. Accedido 24 de enero de 2022.
- Chulibert, M. E., Roppolo, P., Buzzanca, C., Alfonzo, A., Viola, E., Sciruba, L., Tinebra, I., D’Amico, A., Farina, V., Piazzese, D., Di Stefano, V., Barbera, M., Gaglio, R., & Settanni, L. (2024). Exploring the Addition of Mango Peel in Functional Semolina Sourdough Bread Production for Sustainable Bio-Reuse. *Antioxidants* 2024, Vol. 13, Page 1278, 13(11), 1278. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX13111278>
- Díaz-Montes, E., & Castro-Muñoz, R. (2021). Edible Films and Coatings as Food-Quality Preservers: An Overview. *Foods* 2021, Vol. 10, Page 249, 10(2), 249. <https://doi.org/10.3390/FOODS10020249>
- Djordjević, M., Djordjević, M., Šoronja-Simović, D., Nikolić, I., & Šereš, Z. (2021). Delving into the Role of Dietary Fiber in Gluten-Free Bread Formulations: Integrating Fundamental Rheological, Technological, Sensory, and Nutritional Aspects. *Polysaccharides* 2022, Vol. 3, Pages 59–82, 3(1), 59–82. <https://doi.org/10.3390/POLYSACCHARIDES3010003>
- Gómez-Betancur, I., & Benjumea, D. (2014). Traditional use of the genus *Renealmia* and *Renealmia alpinia* (Rottb.) Maas (Zingiberaceae): A review in the treatment of snakebites. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 7, S574–S582. [https://doi.org/10.1016/s1995-7645\(14\)60292-3](https://doi.org/10.1016/s1995-7645(14)60292-3)
- Hasan, M. M., Islam, M. R., Haque, A. R., Kabir, M. R., Khushe, K. J., & Hasan, S. M. K. (2024). Trends and challenges of fruit by-products utilization:

- insights into safety, sensory, and benefits of the use for the development of innovative healthy food: a review. *Bioresources and Bioprocessing*, 11(1), 1–32. <https://doi.org/10.1186/S40643-023-00722-8/FIGURES/2>
- Hernández-Aguilar, C., Valderrama-Bravo, M. del C., Dominguez-Pacheco, A., Romero-Galindo, R., Igno-Rosario, O., Contreras-Gallegos, E., Tsonchev, R. I., & Cruz-Orea, A. (2022). Caracterización colorimétrica, textura y calidad sanitaria de panes adicionados con maíces criollos y Curcuma longa. *Superficies y Vacío*, 35, 220407–220407. https://doi.org/10.47566/2022_SYV35_1-220407
- Hernández-Rodríguez, G., Espinosa, S. T., Hernández, E. G., Villa, G. M., Reyes, T. B., & Guerra, R. D. (2016). Influencia de soluciones polares en la extracción de compuestos fenólicos de frutos de capulín (*Prunus serotina*). *Revista de la Sociedad Química Mexicana* 60: 73-78.
- Hernández-García, N. R., Mendoza-López, M. R., Camacho-Martínez, F. J., Pérez-Landero, S., & Almonte-Becerril, M. (2025). Potencial Antimicótico y Composición de Aceites Esenciales de la Planta Xkijit (*Renealmia alpinia*). *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(1), 2589-2612. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16030
- Iordache, A. M., Nechita, C., Voica, C., Roba, C., Botoran, O. R., & Ionete, R. E. (2022). Assessing the Health Risk and the Metal Content of Thirty-Four Plant Essential Oils Using the ICP-MS Technique. *Nutrients* 2022, Vol. 14, Page 2363, 14(12), 2363. <https://doi.org/10.3390/NU14122363>
- Jiménez-González, O., Luna-Guevara, J. J., Ramírez-Rodríguez, M. M., Luna-Vital, D., & Luna-Guevara, M. L. (2022). Microencapsulation of *Renealmia alpinia* (Rottb.) Maas pulp pigment and antioxidant compounds by spray-drying and its incorporation in yogurt. *Journal of food science and technology*, 59(3), 1162–1172. <https://doi.org/10.1007/S13197-021-05121-5>
- Jiménez-González, O., Ruiz-Espinosa, H., Luna-Guevara, J. J., Ochoa-Velasco, C. E., Luna Vital, D., & Luna-Guevara, M. L. (2018). A potential natural coloring agent with antioxidant properties: Microencapsulates of *Renealmia alpinia* (Rottb.) Maas fruit pericarp. *NFS Journal*, 13, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.NFS.2018.08.001>
- Juhari, N. K. K., Wahid, N. B. A., & Ramli, S. (2021). A review: Antimicrobial activity and toxicity analysis of the peel of banana, pomegranate, papaya, and citrus fruits (lemon and orange). *Malaysian Journal of Microbiology*, 17(4), 1–12. <https://doi.org/10.21161/MJM.201076>
- Kubola, J., & Siriamornpun, S. (2011). Phytochemicals and antioxidant activity of different fruit fractions (peel, pulp, aril and seed) of Thai gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng). *Food chemistry*, 127(3), 1138–1145. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2011.01.115>
- Lakshmikanthan, M., Muthu, S., Krishnan, K., Altemimi, A. B., Haider, N. N., Govindan, L., Selvakumari, J., Alkanan, Z. T., Cacciola, F., & Francis, Y. M. (2024). A comprehensive review on anthocyanin-rich foods: Insights into extraction, medicinal potential, and sustainable applications. *Journal*

- of Agriculture and Food Research, 17, 101245.
<https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2024.101245>
- Lee, J., Durst, R. W., Wrolstad, R. E., Collaborators:, Eisele, T., Giusti, M. M., Hach, J., Hofsommer, H., Koswig, S., Krueger, D. A., Kupina, S., Martin, S. K., Martinsen, B. K., Miller, T. C., Paquette, F., Ryabkova, A., Skrede, G., Trenn, U., & Wightman, J. D. (2005). Determination of Total Monomeric Anthocyanin Pigment Content of Fruit Juices, Beverages, Natural Colorants, and Wines by the pH Differential Method: Collaborative Study. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 88(5), 1269–1278.
<https://doi.org/10.1093/JAOAC/88.5.1269>
- Luna-Guevara, M. L., Ochoa-Velasco, C. E., Hernández-Carranza, P., Contreras-Cortes, L. E. U., & Luna-Guevara, J. J. (2018). Composition, physico-chemical properties and antioxidant capacity of *Renealmia alpinia* (Rottb.) Maas fruit. *Revista Facultad de Ciencias Agrarias*, 50, 377-385.
- Meyer, B. N., Ferrigni, N. R., Putnam, J. E., Jacobsen, L. B., Nichols, D. E., & McLaughlin, J. L. (1982). Brine shrimp: A convenient general bioassay for active plant constituents. *Planta Medica*, 45(1), 31–34.
<https://doi.org/10.1055/S-2007-971236/BIB>
- Michael, A. S., Thompson, C. G., & Abramovitz, M. (1956). *Artemia salina* as a Test Organism for Bioassay. *Science (New York, N.Y.)*, 123(3194), 464.
<https://doi.org/10.1126/SCIENCE.123.3194.464>
- Muñoz, J. J. C., Pinzón-Martínez, D. L., Jardón, J. C., Rajaram, S., Albarrán-Mucientes, M., & Rubio, A. R. I. (2021). Calidad panadera de harinas de trigo entero mediante pruebas convencionales y una prueba no convencional. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 120(1), 063–063.
<https://doi.org/10.24215/16699513E063>
- Murariu, O. C., Caruso, G., Frunză, G., Lipşa, F. D., Ulea, E., Tallarita, A. V., Calistru, A., & Jităreanu, G. (2025). Effect of Wheat Flour Integration with Blueberry Fruits on Rheological, Quality, Antioxidant, and Sensory Attributes of ‘French’ Bread. *Foods* 2025, Vol. 14, Page 1189, 14(7), 1189.
<https://doi.org/10.3390/FOODS14071189>
- Nasir, S., Allai, F. M., Gani, M., Ganaie, S., Gul, K., Jabeen, A., & Majeed, D. (2020). Physical, Textural, Rheological, and Sensory Characteristics of Amaranth-Based Wheat Flour Bread. *International Journal of Food Science*, 2020(1), 8874872. <https://doi.org/10.1155/2020/8874872>
- Ni, Q., Ranawana, V., Hayes, H. E., Hayward, N. J., Stead, D., & Raikos, V. (2020). Addition of Broad Bean Hull to Wheat Flour for the Development of High-Fiber Bread: Effects on Physical and Nutritional Properties. *Foods* 2020, Vol. 9, Page 1192, 9(9), 1192.
<https://doi.org/10.3390/FOODS9091192>
- NOM-092-SSA1-1994. (1994). Bienes y servicios. Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa. Norma Oficial Mexicana. Secretaría de Salud.
- NOM-111-SSA1-1994. (1994). Bienes y servicios. Método para la cuenta de mohos y levaduras en alimentos. Norma Oficial Mexicana. Secretaría de Salud.

- NOM-113-SSA1-1994. (1994). Bienes y servicios. Método para la cuenta de microorganismos coliformes totales en placa. Norma Oficial Mexicana. Secretaría de Salud.
- Öncel, B., & Özer, M. S. (2025). Elucidation of technological, functional, sensory properties and aroma profiles of gluten-free breads enriched with lentil flour. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 19(3), 1969–1980. <https://doi.org/10.1007/S11694-024-03088-3/TABLES/5>
- Pacheco-Jiménez, A. A., Heredia, J. B., Gutiérrez-Grijalva, E. P., Quintana-Obregón, E. A., & Muy-Rangel, M. D. (2022). Potencial industrial de la cáscara de mango (*Mangifera indica* L.) para la obtención de pectina en México. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25. <https://doi.org/10.22201/FESZ.23958723E.2022.419>
- Pacheco-Jiménez, A. A., Lizardi-Mendoza, J., Heredia, J. B., Gutiérrez-Grijalva, E. P., Quintana-Obregón, E. A., & Muy-Rangel, M. D. (2024). Physicochemical characterization of pectin and mango peel (*Mangifera indica* L.) from Mexican cultivars. *Heliyon*, 10(15), e35184. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35184>
- Segura-Badilla, O., Kammar-García, A., Mosso-Vázquez, J., Ávila-Sosa Sánchez, R., Ochoa-Velasco, C., Hernández-Carranza, P., & Navarro-Cruz, A. R. (2022). Potential use of banana peel (*Musa cavendish*) as ingredient for pasta and bakery products. *Heliyon*, 8(10), e11044. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11044>
- Seis Subaşı, A., & Ercan, R. (2024). Technological characteristics of whole wheat bread: effects of wheat varieties, sourdough treatments and sourdough levels. *European Food Research and Technology*, 250(10), 2593–2608. <https://doi.org/10.1007/S00217-024-04560-6/FIGURES/6>
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144–158. <https://doi.org/10.5344/AJEV.1965.16.3.144>
- Skwarek, P., & Karwowska, M. (2023). Fruit and vegetable processing by-products as functional meat product ingredients -a chance to improve the nutritional value. *LWT*, 189, 115442. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2023.115442>
- Sun, X., Wu, S., Koksel, F., Xie, M., & Fang, Y. (2023). Effects of ingredient and processing conditions on the rheological properties of whole wheat flour dough during breadmaking - A review. *Food Hydrocolloids*, 135, 108123. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2022.108123>
- Tamaroh, S., & Sudrajat, A. (2021). Antioxidative Characteristics and Sensory Acceptability of Bread Substituted with Purple Yam (*Dioscorea alata* L.). *International Journal of Food Science*, 2021(1), 5586316. <https://doi.org/10.1155/2021/5586316>
- Thuy, N. M., Tham, T. T. H., Giau, T. N., Tien, V. Q., Thanh, N. V., & Tai, N. V. (2023). Effect of steamed purple sweet potato addition on chemico-physical properties of sandwich bread. *Food Research*, 7(6), 111–117. [https://doi.org/10.26656/FR.2017.7\(6\).410](https://doi.org/10.26656/FR.2017.7(6).410)

- Wang, L., Yang, S., Yang, Y., Jiang, H., Huang, W., Bian, Y., & Li, B. (2024). Effects of endogenous anthocyanins from purple corn on the quality, physicochemical properties and antioxidant capacity of bread. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(6), 4678–4691. <https://doi.org/10.1007/S11694-024-02523-9/FIGURES/3>
- Yaver, E., & Bilgiçli, N. (2021). Ultrasound-treated lupin (*Lupinus albus* L.) flour: Protein- and fiber-rich ingredient to improve physical and textural quality of bread with a reduced glycemic index. *LWT*, 148, 111767. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111767>
- Zahorec, J., Šoronja-Simović, D., Petrović, J., Šereš, Z., Pavlić, B., Božović, D., Perović, L., Martić, N., Bulut, S., & Kocić-Tanackov, S. (2024). Development of Functional Bread: Exploring the Nutritional, Bioactive and Microbial Potential of Carob (*Ceratonia siliqua* L.) Pulp Powder. *Processes* 2024, Vol. 12, Page 2882, 12(12), 2882. <https://doi.org/10.3390/PR12122882>

5. CONCLUSIONES GENERALES

La cáscara de *R. alpinia* es una fuente importante de compuestos bioactivos con potencial de aplicación como aditivo funcional para el mejoramiento de alimentos. La composición química del aceite esencial extraído de la cáscara de *R. alpinia* mostró una diversidad de metabolitos secundarios, destacando los monoterpenos bornano y α -pineno. Además, el AE de la cáscara mostró una elevada capacidad antioxidante y una notable actividad antifúngica contra *Alternaria* spp. y *Curvularia* spp. Estos resultados evidencian el potencial del AE de la cáscara de *R. alpinia* como una alternativa para la prevención de contaminaciones fúngicas y el deterioro oxidativo de los alimentos. Asimismo, la incorporación de harina de cáscara de *R. alpinia* en la elaboración de un pan de caja mejoró significativamente las propiedades nutricionales y el potencial nutracéutico, además de proteger contra el ataque de microorganismos a este producto en comparación con el pan de caja elaborado con 100 % de harina de trigo refinada. El incremento en el nivel de adición de harina de cáscara de *R. alpinia* se asoció con un incremento en el contenido de cenizas y capacidad antioxidante. Sin embargo, la adición del 5 % de harina de cáscara de *R. alpinia* afectó de manera negativa el volumen final y las propiedades texturales del pan. El pan formulado con un 2.5 % de harina de cáscara de *R. alpinia* se consideró la mejor formulación, ya que conservó una buena calidad panadera, características de textura aceptables, mejor valor nutricional, mayor capacidad antioxidante y menor crecimiento microbiano durante el almacenamiento, lo que evidencia un efecto positivo en la conservación y extensión de la vida útil. En conjunto, ambos estudios confirman la viabilidad del aprovechamiento de la cáscara de *R. alpinia* como aditivo funcional y como agente de prevención de contaminaciones fúngicas en alimentos, contribuyendo al desarrollo de un producto más saludable y con valor agregado.

6. APÉNDICES

Cuadro A 1. Ingesta diaria de metales (DMI) e Índice de riesgo a la salud (HRI) en $\mu\text{g día}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de la cáscara de *Renealmia alpinia* (Rottb.) Mass

Elemento	DMI ($\mu\text{g día}^{-1} \text{ kg}^{-1}$) ^f	Índice de Riesgo a la Salud (HRI)
Cu	0.216	0.005
Zn	13.606	0.045
Pb 206	0.073	0.021
Pb 207	0.064	0.018
Pb 208	0.060	0.017
Cr	0.406	0.135
Cd	0.022	0.022
Ni	0.537	0.027
As	0.008	0.027
Hg	0.001	0.004

^f DMI = Ingesta diaria de metales.