



FRONTERA

Biotechnológica



Revista Digital del IPN, CIBA Tlaxcala - No. 24 enero - abril 2023

ANTOCIANINAS Y LA MAGIA DEL
COLOR: FUENTES, BENEFICIOS
Y APLICACIONES

PROPIEDADES

HIPOCOLESTEROLEMIANTES DEL
ACEITE ESENCIAL DE CANELA Y
EL CINEMALDEHÍDO

UNA REVISIÓN DE LA
GENERACIÓN DE BIOETANOL
CON PASTOS C4

ACEITES ESENCIALES ¿UNA
ALTERNATIVA PARA EL
CONTROL DEL ESCARABAJA
DESCORTEZADOR?

FRUTOS Y VEGETALES
CON COMPUESTOS
ANTICANCERÍGENOS

PRODUCCIÓN DE ÁCIDOS
GRASOS VOLÁTILES MEDIANTE
LA DIGESTIÓN ANAEROBIA: UNA
REVISIÓN

Directorio Institucional

IPN

ARTURO REYES SANDOVAL
DIRECTOR GENERAL

CARLOS RUIZ CÁRDENAS
SECRETARIO GENERAL

MAURICIO IGOR JASSO ZARANDA
SECRETARIO ACADÉMICO

LAURA ARREOLA MENDOZA
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

RICARDO MONTERRUBIO LÓPEZ
SECRETARIO DE INNOVACIÓN E INTEGRACIÓN SOCIAL

ANA LILIA CORIA PÁEZ
SECRETARÍA DE SERVICIOS EDUCATIVOS

JAVIER TAPIA SANTOYO
SECRETARIO DE ADMINISTRACIÓN

JOSÉ ALEJANDRO CAMACHO SÁNCHEZ
SECRETARIO EJECUTIVO DEL PATRONATO DE OBRAS E
INSTALACIONES

MARÍA DE LOS ÁNGELES JASSO CISNEROS
ABOGADA GENERAL

MODESTO CÁRDENAS GARCÍA
PRESIDENTE DEL DECANATO

CIBA IPN

DIANA VERÓNICA CORTÉS ESPINOSA
DIRECTORA DEL CIBA-IPN, TLAXCALA

MARÍA DEL CARMEN CRUZ LÓPEZ
SUBDIRECTORA ACADÉMICA DEL CIBA-IPN, TLAXCALA

ERIK OCARANZA SÁNCHEZ
SUBDIRECTOR DE VINCULACIÓN DEL CIBA-IPN, TLAXCALA

VÍCTOR ERIC LÓPEZ Y LÓPEZ
EDITOR EN JEFE

GONZALO PÉREZ ARAIZA
SOPORTE TÉCNICO

PEDRO RAMÍREZ CALVA
DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN FRONTERA BIOTECNOLÓGICA

ISMAEL SÁNCHEZ GONZÁLEZ
DESARROLLO WEB

LILIA ESPINDOLA RIVERA
COORDINADORA ADMINISTRATIVA

CINTILLO LEGAL

FRONTERA BIOTECNOLÓGICA, año 11, número 24, enero - abril 2023, es una publicación cuatrimestral editada por el Instituto Politécnico Nacional a través del Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac - Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700, México. Tels.: 01-248-48707-65 y 66 Conmutador IPN: 57296000, Ext. 87816. <http://www.revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx/>, Editor responsable: Dr. Víctor Eric López y López. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título No. 04-2015-120313501700-203, ISSN: 2448-8461, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Dr. Víctor Eric López y López., Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac - Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700, fecha de última modificación, 27 de marzo de 2023.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Politécnico Nacional.

CONTENIDO

MENSAJE EDITORIAL	3
ANTOCIANINAS Y LA MAGIA DEL COLOR: FUENTES, BENEFICIOS Y APLICACIONES	4
FRUTOS Y VEGETALES CON COMPUESTOS ANTICANCERÍGENOS	9
PROPIEDADES HIPOCOLESTEROLEMIANTES DEL ACEITE ESENCIAL DE CANELA Y EL CINEMALDEHÍDO	15
PRODUCCIÓN DE ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES MEDIANTE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA: UNA REVISIÓN	21
UNA REVISIÓN DE LA GENERACIÓN DE BIOETANOL CON PASTOS C4	27
ACEITES ESENCIALES ¿UNA ALTERNATIVA PARA EL CONTROL DEL ESCARABAJA DESCORTEZADOR?	32

MENSAJE EDITORIAL

Abril 2023

Mensaje Editorial

Estimados lectores, en este número 24 de nuestra revista Frontera Biotecnológica tendrán la oportunidad de leer sobre los beneficios de los colores en alimentos conocidas como antocianinas y sus beneficios asociados a la salud. También encontrarán un trabajo interesante acerca de compuestos anticancerígenos en frutos y vegetales, así como algunos ejemplos de los beneficios en pacientes con algunos tipos de cáncer. En el mismo orden de compuestos de origen natural, conoceremos la función del aceite de canela y su componente principal, el cinemaldehído, en la disminución de colesterol. Por otro lado, también encontrarán información de cómo producir ácidos grasos volátiles por medio de la digestión anaerobia a partir de residuos y que tienen aplicaciones en farmacia, alimentos, química y energía.

También tenemos información importante en aplicaciones de energía, ¿sabía que podemos producir bioetanol que es utilizado para los automóviles a partir de pastos? Sí de pastos, y leeremos como es que por medio de biotecnología se puede lograr. Una investigación que nos llena de esperanza, es el control de plagas en particular la de los insectos descortezadores que pueden disminuir bosques enteros, pero a partir de compuestos naturales como aceites esenciales podemos controlarla. Sin embargo, hay que entender que estos insectos se encuentran en su nicho ecológico y no debemos usar sustancias nocivas que afecten irreversiblemente a otras especies de animales.

En estos días en los cuales la vida ha regresado a su cotidianidad después de la crisis derivada de la pandemia causada por el virus SARS-CoV-2, nos damos cuenta que a partir de marzo 2020 fuimos capaces de ser más empáticos y solidarios tanto con nuestros semejantes así como con nuestro entorno, lo cual ha demostrado tener un impacto valioso en nosotros y en nuestro medio ambiente. Ojalá este cambio perdurara siempre... No está por demás hacer un llamado a ser más humanos y siendo humanos poner...

“La Técnica al Servicio de la Patria”

Dr. Víctor Eric López y López

Editor en Jefe



ANTOCIANINAS Y LA MAGIA DEL COLOR: FUENTES, BENEFICIOS Y APLICACIONES

Génesis Montserrat Reyes-Landa, Sulem Yali Granados-Balbuena, María Guadalupe García-Meza, Lilia Tapia-López, Erik Ocaranza-Sánchez*
Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada del Instituto Politécnico Nacional (CIBA-IPN), Tlaxcala, 90700, México.

* E mail: erikocaranza@hotmail.com

RESUMEN

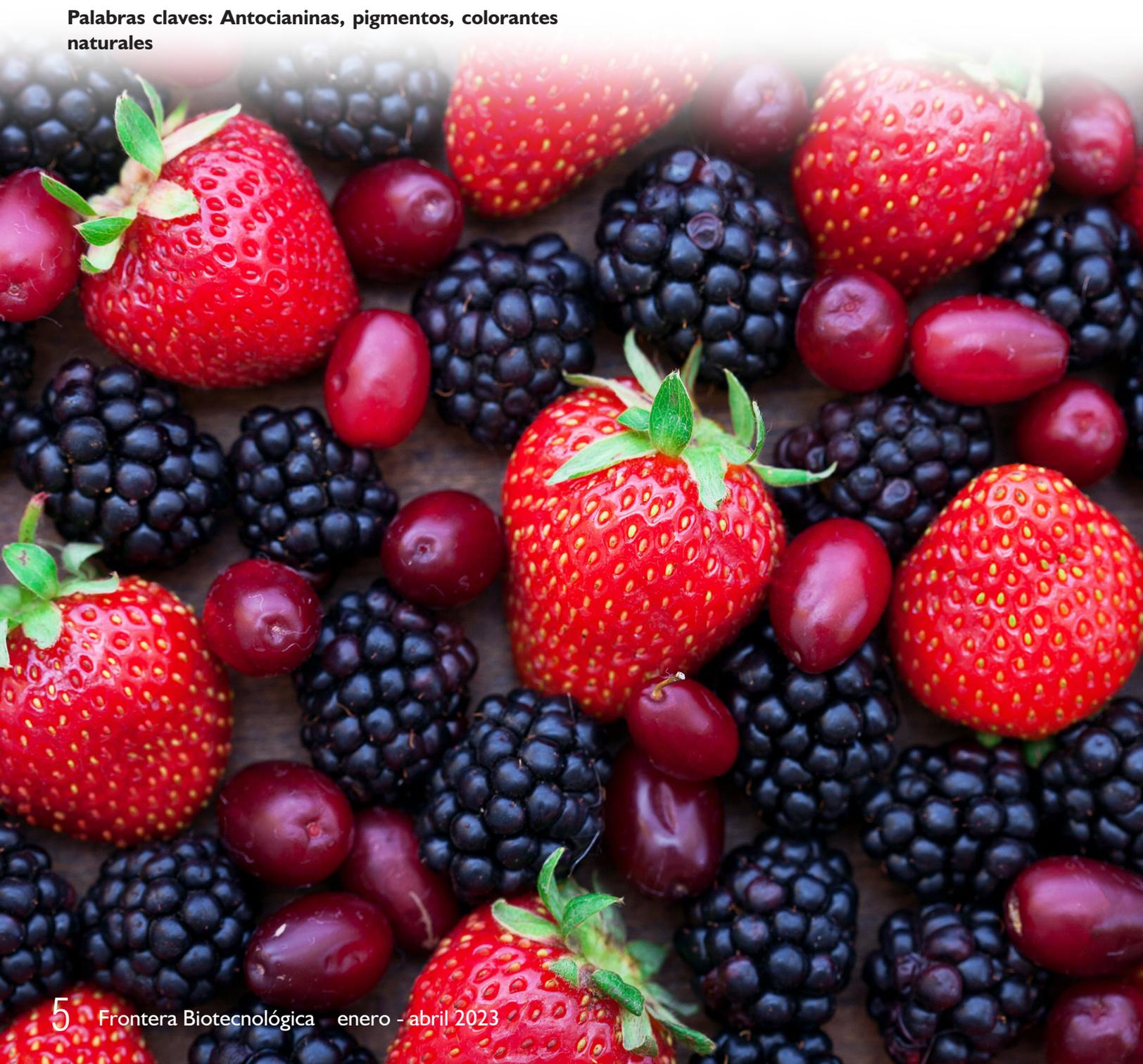
Las antocianinas son una de las principales familias de pigmentos naturales del reino vegetal, encargadas de aportar variedad de colores como el naranja, rojo, azul y morado, a diferentes fuentes naturales desde frutas, verduras, flores, hasta cereales (Castañeda-Ovando et al., 2009a). Además del color, a estos compuestos se les han atribuido diferentes beneficios a la salud, por lo que, los convierte en posibles candidatos para sustituir a los colorantes sintéticos rojo y azul en algunos sectores de la industria de alimentos. En la presente revisión se describen aspectos generales de las antocianinas, fuentes, beneficios a la salud y aplicaciones en alimentos.

Palabras claves: Antocianinas, pigmentos, colorantes naturales

ABSTRACT

Anthocyanins are one of the main families of natural pigments of the plant kingdom, responsible for providing a variety of colors such as orange, red, blue and purple, to different natural sources from fruits, vegetables, flowers, to cereals (Castañeda-Ovando et al., 2009). In addition to color, these compounds have been attributed different health benefits, making them potential candidates to replace synthetic red and blue dyes in some sectors of the food industry. This review describes general aspects of anthocyanins, their sources, health benefits and applications in food.

Key words: Anthocyanins, pigments, natural dyes

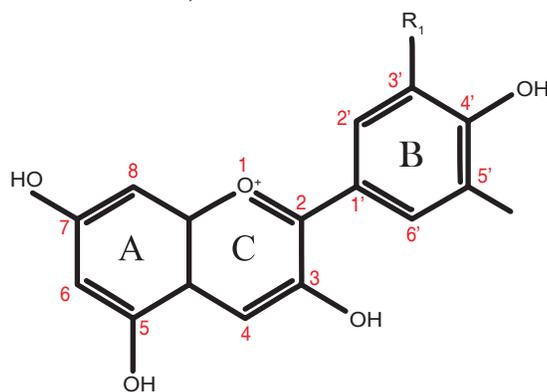


I. INTRODUCCIÓN

Las antocianinas son pigmentos naturales que pueden ser encontradas en frutos, tallos y raíces de plantas. Diversos estudios comentan que la presencia de antocianinas en estas fuentes naturales cumple ciertas funciones tales como; atracción de polinizadores para la posterior dispersión de semillas, la protección de la planta contra los efectos de la radiación ultravioleta y contra la contaminación viral y microbiana (Garz, 2008).

Químicamente las antocianinas pertenecen a la familia de los flavonoides y están conformadas por una estructura base llamada antocianidina (aglicona) que, cuando se glucosila (unión con azúcares) da origen a la antocianina. Existen numerosas moléculas de antocianinas, sin embargo, por su abundancia en la naturaleza, se consideran seis antocianidinas principales conocidas como; delfinidina (Dp), petunidina (Pt), malvidina (Mv) cianidina (Cy), peonidina (Pn) y pelargonidina (Pg). Estos compuestos difieren en el grado de metilación, número y posición de los grupos hidroxilo (-OH) (Figura 1), debido a esto absorben luz a diferente longitud de onda, por lo tanto, presentan diferente color (Wrolstad y Giusti, 2001).

Se estima que existen alrededor de 700 tipos antocianinas presentes en la naturaleza, esto como consecuencia de la combinación y unión de azúcares a la antocianidina, así como también, por la presencia de compuestos alifáticos o ácidos aromáticos unidos a los restos de azúcar (Castañeda-Ovando et al., 2009).



Antocianinas	R1	R2	Espectro Visible λ_{\max} (nm)
PelargonidinaH		H	494 (Naranja)
CianidinaO	HH		506 (Naranja - Rojo)
Delfinidina	OH	OH	508 (Azul - Rojo)
Peonidina	OCH ₃	H	506 (Naranja - Rojo)
Petunidina	OCH ₃	OH	508 (Azul - Rojo)
Malvinidina	OCH ₃	OCH ₃	510 (Azul - Rojo)

1- Oxígeno, 3- Hidroxilo (Carbono de unión de residuos de carbohidratos), 5- Hidroxilo (Carbono de unión de residuos de carbohidratos), 7- Hidroxilo, 3'- Radical 1, 4- Hidroxilo, 5'- Radical 2.

Figura 1. Estructura base de las principales antocianidinas. Adaptado de (Castañeda-Ovando et al., 2009a)

En la actualidad, debido a las tendencias en el mercado como consecuencia de la sensibilización de los consumidores sobre ingredientes naturales, se tiene como objetivo la aplicación de antocianinas como sustituto potencial de colorantes

sintéticos en la industria de alimentos, farmacéuticos y cosméticos. Sin embargo, su aplicación industrial se ve ampliamente afectada debido a la baja estabilidad del color que presentan durante su procesamiento, almacenamiento y transporte. Esto es debido a que la estructura de la molécula de antocianina se ve modificada por diversos parámetros que delimitan sus niveles de estabilidad oxidativa como la temperatura, la incidencia de luz ultravioleta, el pH, la concentración de flavonoides, la presencia ácido ascórbico y de la interacción con la matriz alimentaria (Tan et al., 2021)

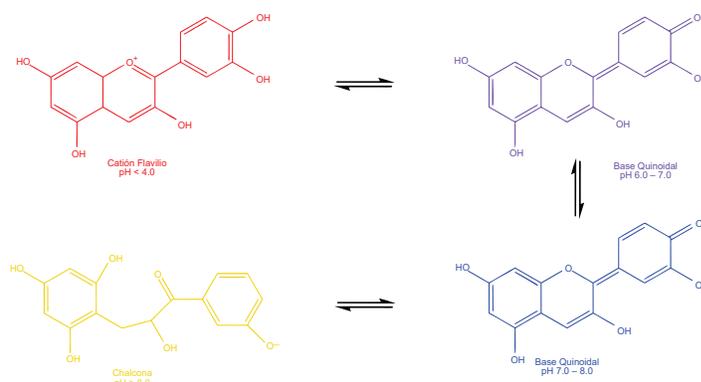


Figura 2. Mecanismo de apertura del anillo del catión flavilio. Adaptado de (Oliveira Filho et al., 2021).

2. PRINCIPALES FUENTES DE ANTOCIANINAS

Las antocianinas abundan en especies vegetales comestibles, se encuentran con mayor frecuencia en frutas y verduras, como arándanos, cerezas, moras, grosellas, fresas, uvas, ciruelas, manzana roja, col morada, berenjena, zanahoria morada, camote y algunas variedades de papa entre otras (Figura 3) (Zhang et al., 2019). Pero también se han encontrado en gramíneas como el maíz morado y en flores como la jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.), pelargonios (*Pelargonium grandiflorum*), espuelas de caballero (*Delphinium elatum*) y algunas variedades de rosas (Sotomayor, 2013).

Cada una de las fuentes mencionadas anteriormente tiene un perfil único de antocianinas el cual es caracterizado con base en su perfil de componentes mayoritarios, y que otorga a cada una de ellas una tonalidad diferente (Aguilera-Otíz et al., 2011). Por ejemplo, se ha reportado que la flor de jamaica posee un perfil de antocianinas definido por delfinidina-3-sambubiosido, delfinidina-3-glucósido, cianidina-3-glucósido y cianidina-3-sambubiosido. Siendo la antocianina más abundante la cianidina-3-glucósido (cy-3-gly) (Sáyago Ayerdi et al., 2016). Sin embargo el contenido de antocianinas y el costo de la fuente limitan su aplicación en la industria alimentaria. Por lo que en la actualidad existen investigaciones que buscan encontrar y proponer nuevas fuentes de antocianinas de bajo costo, que brinden alto rendimiento de extracción y marcada estabilidad oxidativa.



Figura 3. Fuentes de antocianinas

3. BENEFICIOS A LA SALUD

Además de sus atributos como pigmentos naturales, numerosos estudios han demostrado que la ingesta de alimentos ricos en antocianinas puede contribuir a la mejora de la salud debido a sus propiedades antiinflamatorias, nutricionales y actividad antioxidante. Por lo que se les han atribuido beneficios como una mejora de la agudeza visual y prevención de Enfermedades Crónicas No Transmisibles (ECNT) como el cáncer, diabetes e hipertensión, incluso se ha llegado a establecer que disminuyen la proliferación de células de cáncer de colon (Zhang et al., 2019). Estos beneficios atribuidos a las antocianinas se han vinculado a la gran capacidad antioxidante que presentan, atribuida al catión flavilio y a su capacidad de secuestrar radicales libres, retrasando la autooxidación, evitando la generación de ROS (Especies Reactivas del Oxígeno), RNS (Especies Reactivas de Nitrógeno) y otros desequilibrios redox homeostáticos que pueden dañar a las biomacromoléculas y modificar proteínas importantes, desencadenando la patogénesis de las ECNT (Borsoi et al., 2023).

Específicamente la actividad anticancerígena de las antocianinas se ha atribuido a su capacidad para inducir apoptosis y suprimir la angiogénesis (Alappat y Alappat, 2020) en líneas celulares de cáncer de mama, de próstata, de hígado, de sangre, de cuello uterino, de pulmón, colorrectal e intestinal (Konczak y Zhang, 2004).

Por otra parte, algunos estudios (Taverniti et al., 2014; Gonzalez De Mejia et al., 2019) han demostrado la actividad antiinflamatoria de las antocianinas en células humanas intestinales y en trastornos asociados a colitis, reflujo laringofaríngeo y respuesta inflamatoria posprandial. Así mismo, se ha atribuido a las antocianinas la reducción de riesgo de desarrollo de enfermedades cardiovasculares derivado de la modificación oxidativa de lipoproteínas de baja densidad (oxLDL) (Li et al., 2017). Todas estas investigaciones han incrementado de manera revolucionaria el interés por el estudio y aplicación de las antocianinas en los sectores académico e industrial.

4. APLICACIONES DE LAS

ANTOCIANINAS EN ALIMENTOS

El aumento en la demanda industrial de colorantes naturales a partir de antocianinas con mayor estabilidad oxidativa ha generado un gran interés en la investigación para la estabilización oxidativa de compuestos antociánicos para el desarrollo de nuevos pigmentos naturales capaces de sustituir a los colorantes sintéticos que dominan el mercado actual. La aplicación de las antocianinas en los sistemas alimenticios es preferentemente usada en alimentos de acidez intermedia con la finalidad de asegurar una predominancia del catión flavilio (Figura 4). (Aguilera-Ortiz et al., 2011).

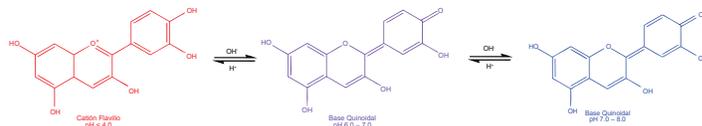


Figura 4. Efecto del pH en la estructura de la antocianina. Adaptado de (Oliveira Filho et al., 2021)

Hoy en día las antocianinas se aplican como colorantes naturales en diversos productos alimenticios como lácteos, confitería y bebidas, además de su comercialización en alimentos funcionales o suplementos alimenticios (Figura 5). Dentro de las aplicaciones podemos encontrar colorantes alimentarios obtenidos de cianidina 3-diglicósido-5-glucósido altamente conjugado con azúcares (glucosa y xilosa) y grupos acilo (cafeoiló, p -cumaroiló, feruloiló, p -hidroxibenzoiló, sinapoiló y oxaloiló) de la col lombarda utilizados en refrescos, dulces y gomitas bajas en calorías (Patras, 2019), así como antocianinas aciladas con la enzima Fermase CALB™ 10000 de pétalos de rosas recolectadas de desechos florales utilizadas como colorante en cupcakes (Marathe et al., 2021), entre otros más.



Figura 5. Aplicaciones en alimentos

5. CONCLUSIÓN

Las antocianinas son pigmentos naturales de gran interés ya que integran su capacidad colorante con la antioxidante brindando una alternativa funcional a la industria alimentaria. Sus beneficios potenciales aunados a las recién identificadas características negativas de los colorantes sintéticos han generado una demanda creciente para su aplicación en alimentos procesados. Sin embargo, la necesidad de mayor estabilidad del color y su adecuada aplicación en ciertas matrices alimentarias, representan un desafío tecnológico, por lo que las investigaciones científicas en este campo continúan en desarrollo.

REFERENCIAS

- Aguilera-Otíz, M., Reza-Vargas, M. del C., Chew-Madinaveita, R. G., & Meza-Velázquez, J. A. (2011). PROPIEDADES FUNCIONALES DE LAS ANTOCIANINAS. *BIOtecnia*, 13(2).
- Alappat, B., & Alappat, J. (2020). Anthocyanin pigments: Beyond aesthetics. En *Molecules* (Vol. 25, Número 23).
- Borsoi, F. T., Neri-Numa, I. A., de Oliveira, W. Q., de Araújo, F. F., & Pastore, G. M. (2023). Dietary polyphenols and their relationship to the modulation of non-communicable chronic diseases and epigenetic mechanisms: A mini-review. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 6, 100155.
- Castañeda-Ovando, A., Pacheco-Hernández, M. de L., Páez-Hernández, M. E., Rodríguez, J. A., & Galán-Vidal, C. A. (2009a). Chemical studies of anthocyanins: A review. En *Food Chemistry* (Vol. 113, Número 4).
- Castañeda-Ovando, A., Pacheco-Hernández, Ma. de L., Páez-Hernández, Ma. E., Rodríguez, J. A., & Galán-Vidal, C. A. (2009b). Chemical studies of anthocyanins: A review. *Food Chemistry*, 113(4), 859–871.
- Garz, G. A. (2008). Las antocianinas como colorantes naturales y compuestos bioactivos: Revisión. *Acta Biol. Colomb.*, 13(3).
- Konczak, I., & Zhang, W. (2004). Anthocyanins - More than nature's colours. En *Journal of Biomedicine and Biotechnology* (Vol. 2004, Número 5).
- Li, D., Wang, P., Luo, Y., Zhao, M., & Chen, F. (2017). Health benefits of anthocyanins and molecular mechanisms: Update from recent decade. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(8).
- Marathe, S. J., Shah, N. N., Bajaj, S. R., & Singhal, R. S. (2021). Esterification of anthocyanins isolated from floral waste: Characterization of the esters and their application in various food systems. *Food Bioscience*, 40, 100852.
- Oliveira Filho, J. G. de, Braga, A. R. C., Oliveira, B. R. de, Gomes, F. P., Moreira, V. L., Pereira, V. A. C., & Egea, M. B. (2021). The potential of anthocyanins in smart, active, and bioactive eco-friendly polymer-based films: A review. En *Food Research International* (Vol. 142).
- Patras, A. (2019). Stability and colour evaluation of red cabbage waste hydroethanolic extract in presence of different food additives or ingredients. *Food Chemistry*, 275, 539–548.
- Sáyago Ayerdi, S., Duarte, Z., Zamora, V., & Montalvo, E. (2016). Caracterización nutricional de 20 variedades mejoradas de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L) cultivadas en México. *Revista Fitotecnia México*, 39(3), 199–206.
- Sotomayor, R. (2013). Extracción y cuantificación de antocianinas a partir de los granos de *Zea mays* L. (maíz morado). *Ciencia y Desarrollo*, 16(1).
- Tan, C., Dadmohammadi, Y., Lee, M. C., & Abbaspourrad, A. (2021). Combination of copigmentation and encapsulation strategies for the synergistic stabilization of anthocyanins. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4).
- Taverniti, V., Fracassetti, D., del Bo', C., Lanti, C., Minuzzo, M., Klimis-Zacas, D., Riso, P., & Guglielmetti, S. (2014). Immunomodulatory Effect of a Wild Blueberry Anthocyanin-Rich Extract in Human Caco-2 Intestinal Cells. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(33), 8346–8351.
- Wrolstad, R. E., & Giusti, M. (2001). Characterization and Measurement of Anthocyanins by UV-Visible Spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*.
- Zhang, J., Celli, G. B., & Brooks, M. S. (2019a). Chapter 1. Natural Sources of Anthocyanins. En *Anthocyanins from Natural Sources: Exploiting Targeted Delivery for Improved Health* (pp. 1–33). Royal Society of Chemistry.
- Zhang, J., Celli, G. B., & Brooks, M. S. (2019b). Chapter 1. Natural Sources of Anthocyanins (pp. 1–33).

FRUTOS Y VEGETALES CON COMPUESTOS ANTICANCERÍGENOS

Yesica García Ordaz*, María del Carmen Cruz López

Centro de Investigación de Biotecnología Aplicada-Instituto Politécnico Nacional, Carretera Estatal Sta. Inés Tecuexcomac- Tepetitla km 1.5, Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, México. C.P. 90700

*ygarciao2102@alumno.ipn.mx

RESUMEN

En el siglo XXI el ritmo de vida acelerado ha propiciado incremento en el consumo de alimentos procesados dejando a un lado la preparación y consumo de productos naturales que contribuyen al mantenimiento de la salud, disminuyendo el riesgo de desarrollar enfermedades. De acuerdo a estadísticas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2020), las principales causas de muerte en México son: diabetes mellitus, tumores malignos, enfermedades del corazón, eventos cerebrovasculares, enfermedades del hígado, enfermedades pulmonares y en los últimos 2 años COVID. Algunas de estas enfermedades se relacionan con una alimentación inadecuada, por lo que es importante incluir en la dieta un número mayor de productos en su forma natural como son las frutas y verduras. Manzanas, zanahorias, fresa, calabaza entre otros contienen sustancias como fenoles, cumarinas o carotenoides que se sabe ayudan a prevenir enfermedades y particularmente resulta de interés que pueden ayudar en la prevención de algunos tipos de cáncer. En el presente artículo se mencionan algunos ejemplos de frutas y vegetales que han mostrado tener un efecto benéfico en algunos tipos de cáncer como colorrectal, prostático, tiroideo, mama, entre otros.

ABSTRACT

In the 21st century, the increase in processed foods has been seen, leaving aside the preparation and consumption of organic or natural products that can contribute to the maintenance of human health. In Mexico, the number of incidences of cancer is increasing exponentially, within Breast, prostate, cervical and colorectal cancer are among the first places in both men and women of all ages, considering from 0 to 59 years. Cancer is divided into different stages depending on the site of the body where it has developed, diet can influence before and after any disease occurs, particularly fruits and vegetables such as apples, carrots, strawberries, pumpkin among others that can contain preventive or anticancer phytochemicals such as phenols, coumarins or carotenoids, etc. In this article, mention will be made of the division of these phytochemicals and some of the work carried out on breast, colorectal, prostate, thyroid cancer and others.

Palabras Clave: tumores malignos, Cáncer, fitonutrientes, fitocompuestos, metabolitos secundarios, nutrientes esenciales.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a las múltiples tareas diarias y al ritmo de vida ajetreado de las familias mexicanas como realizar un recorrido de varias horas para llegar a la oficina o centros de trabajo, cubrir una jornada laboral, quehaceres domésticos,

atender a hijos y padres, entre otros, ocasionan que el tiempo para consumir alimentos se vea limitado y se favorezca el consumo de alimentos altamente procesados de rápida adquisición. También el costo es un factor que influye sobre una alimentación adecuada. Un consumo bajo de alimentos naturales coadyuva al incremento de enfermedades, la ONU al igual que algunos autores académicos vinculan que los factores nutricionales contribuyen entre 20-60% al desarrollo de algún tipo de cáncer en todo el mundo.

Desde temprana edad escolar se da a conocer que existen alimentos que contienen proteínas, grasas, azúcares, vitaminas en cantidades diferentes y que es necesario consumirlos para nuestro desarrollo. Pero algo no muy conocido es que además de estos nutrientes esenciales, las frutas, vegetales, legumbres, que podemos consumir a diario, contienen sustancias en cantidades más pequeñas que tienen efecto sobre nuestro organismo, poseen cierto valor nutricional y pueden ofrecer protección contra enfermedades como las mencionadas anteriormente. Estas sustancias reciben algunos nombres particulares como metabolitos secundarios, fitocompuestos (enfaticando su origen vegetal); algunas otras ocasiones se resalta el efecto que pueden tener, por ejemplo: antioxidantes. Como se les denomine quizá no sea muy fácil de aprender, lo que debemos de tener en cuenta es su efecto sobre la salud.

¿Qué son los fitocompuestos? En un sentido amplio son todos aquellos compuestos presentes en los vegetales, pero se usa más frecuentemente para referirse a compuestos como carotenoides, esteroides, fenoles, taninos o flavonoides que se encuentran en cantidades pequeñas y variables y son responsables de color, sabor amargo o astringente de algunas frutas y vegetales.

2. FITOCOMPUESTOS

2.1 ¿Porque son importantes los fitocompuestos?

Aunque la mayoría de los fitocompuestos estrictamente no funcionan como medicamentos para tratar enfermedades, existe evidencia que sugiere que la ingesta de estos ocasiona resultados positivos en la salud y menor riesgo a contraer enfermedades crónicas (Nahar et al., 2021).

2.2 La importancia de fitocompuestos contra el Cáncer.

El cáncer, es una de las principales causas de muerte en el mundo, y la tercera causa de muerte en México. En 2020, según el INEGI, en México se reportaron 195 499 nuevos casos de diagnóstico, esto es evidencia de la problemática y dado que hay un factor de riesgo por la alimentación, tener información sobre alimentos que pueden ayudar a prevenir o incluso coadyuvar a las terapias resulta conveniente.

A continuación se describen brevemente ejemplos de frutas y vegetales sobre los que se han realizado estudios y se ha confirmado efecto sobre algunos tipos de cáncer. (Nahar Lutfun y Xiao, 2021)

Las **Antocianinas** otorgan un pigmento rojo, azul o púrpura a frutos y vegetales que brinda protección en enfermedades cardiovasculares (Khoo et al., 2017), reducen colesterol (Chen et al., 2015a), estudios en antocianinas de arroz negro demuestran que suprimen la metástasis de las células de cáncer de mama (Chen et al., 2015b; Hui et al., 2010).

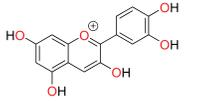
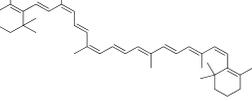
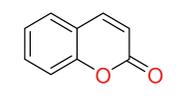
Por Johnson, (2002) se describe que los **Carotenoides** pueden brindar beneficios para reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares, oculares, modulan el sistema inmune, contribuyen con el desarrollo embrionario adecuado, se involucran en la diferenciación celular, se absorben en los huesos, son antioxidantes, ayudan a mantener la piel saludable (Krinsky y Johnson, 2005), reducen el riesgo de cáncer de próstata (Giovannucci et al., 1995) y han presentado efectos en carcinoma cutáneo de células escamosas (Kim et al., 2019).

Las Cumarinas por otra parte se describe como un medicamento que previene y trata los coágulos de la sangre y ciertas afecciones cardíacas por el Instituto Nacional del Cáncer, ayuda a protegernos contra los radicales libres, es decir funcionan como antioxidantes. (Prince et al., 2009).

Las ciruelas, hierbas y especias como la canela juegan un papel importante ya que tienen efectos protectores contra el cáncer. (Bahrin et al., 2022) y (Kaefer y Milner, 2008).

Ejemplos fuente del fitonutriente, y representación de la estructura química 2D obtenida de PubChem, 2023.

Tabla 1. Fuente y estructura base de Antocianinas, Carotenoides, Cumarinas.

Antocianinas	Carotenoides	Cumarinas
		
		

Efectos biológicos de ácido elágico, algunas investigaciones en el extracto de semilla de uva reportan que induce la muerte apoptótica de células de carcinoma de próstata humano a través de la activación de caspasas (Agarwal et al., 2002), además el extracto de piel de uva moscatel puede fungir como antagonista en células de cáncer de próstata y mama. (Burton et al., 2015)

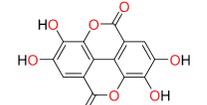
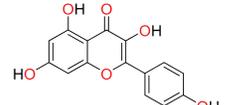
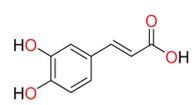
Los Flavonoides son potentes antioxidantes, poseen propiedades hepatoprotectoras, antienviejecimiento,

antiinflamatorias, antimicrobianas, antitrombóticas, antivirales y anticancerígenas (Yao et al., 2004). Por ejemplo:

- El Té verde se ha estudiado en la reparación del ADN en el cáncer de piel. (Katiyar et al., 2007).
- La cebolla se ha probado en Cáncer de pulmón (Stirling y Zalberg, 2019), donde se ha encontrado efectos inhibidores de telomerasa. (Xu y Sung, 2015).
- Fisetina un flavonoide dietético podría ser un nuevo inhibidor dual de las vías de señalización molecular que desencadenan apoptosis para el tratamiento del cáncer de próstata (Adhami et al., 2012), también se han realizado estudios de absorción humana y excreción de flavonoides después del consumo de brócoli. (Nielsen et al., 1997).

Compuestos fenólicos o polifenoles naturales, estos compuestos desarrollan un papel protector de daño oxidativo contra enfermedades como coronarias, accidente cerebrovascular y Cáncer (Robbins, 2003) son agentes anticancerígenos para el cáncer de piel (Sajadimajd et al., 2020), por ejemplo, resveratrol ha mostrado actividad contra el cáncer de tiroides. (Sharifi-Rad et al., 2020) o el extracto fitoquímico de arándano que inhibe el crecimiento celular gástrico y los xenoinjertos de tumores humanos en ratones. (Liu et al., 2009)

Tabla 2. Fuente y estructura base del Ácido elágico, flavonoides y compuestos fenólicos

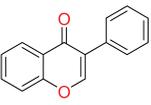
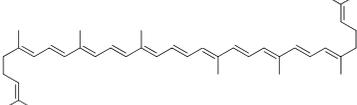
Ácido elágico	Flavonoides	Compuestos fenólicos
		
		

Los Fitoestrógenos usualmente usados como terapia hormonal. Tienen propiedades antioxidantes, conservan la elasticidad de mucosas y piel, modulan el perfil lipídico en mujeres, incluso se ha observado menor incidencia de Cáncer de seno en poblaciones con alta ingesta de fitoestrógenos en su dieta. (Díaz Yamal y Munévar Vega, 2009). Se han realizado estudios en hombres con cáncer de próstata, que consumen granos de trigo y centeno (Zamaratskaia et al., 2020).

Finalmente, esteroides y terpenoides: los fitoesteroides son estructuralmente similares al colesterol, por tanto, puede competir con este y al consumirlo esto ayuda a reducir los niveles de colesterol en la sangre, además poseen propiedades antiinflamatorias, antiartrosis, brindan protección contra enfermedades cardiovasculares, y anticancerígenas contra cáncer de mama (He et al., 2012), colon, próstata (Rabi y Gupta, 2008), recto y estómago. (Suryamani et al., 2022; Dierge et al., 2020; Aggarwal y Shishodia, 2006; Qamar y

Shaikh, 2018). Los terpenoides se derivan de los esteroides poseen muchas subdivisiones, dentro de sus usos en la industria farmacéutica forman parte importante como aromatizantes, confitería y perfumería, aumento del apetito, son antiinflamatorios, bactericidas, tiene propiedades antidiarreicas, antidiabéticas, anticancerígenas y se usan en tratamientos contra trastornos metabólicos. (Nahar et al.,

Tabla 3. Fuente y estructura base de fitoestrógenos, esteroides y terpenoides.

Fitoestrógenos	Esteroides y terpenoides
	
	

2021; Thangaiyan Rabi, 2008).

2.3 ¿CÓMO ACTÚAN LOS FITOCOMPUESTOS?

Al consumir los vegetales, los fitocompuestos presentes producen diversas respuestas en las células humanas, con apoyo del microbiota intestinal se transforman en compuestos menos complejos para poder absorberlos en el intestino, después pasan a la circulación donde se crea una mayor biodisponibilidad y como pueden llegar a sitios donde

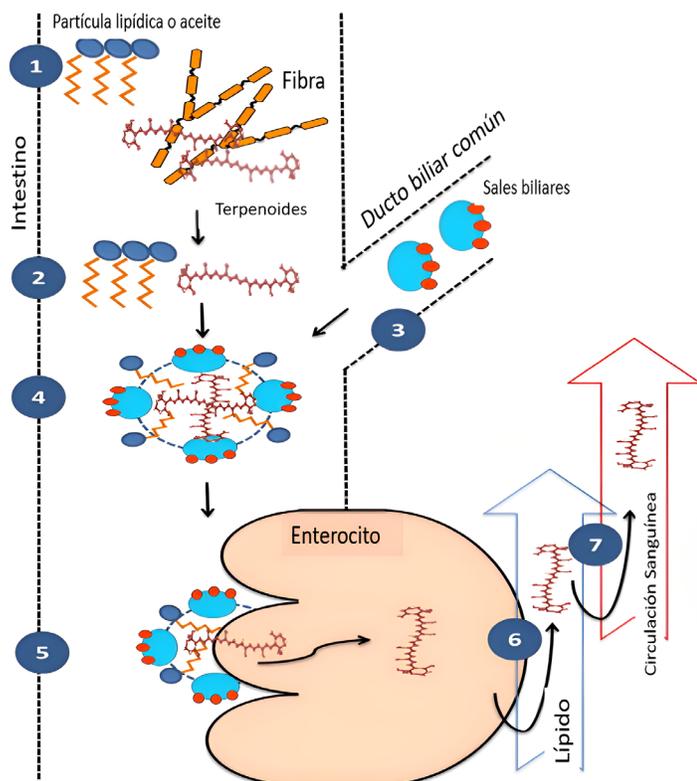


Figura 1. Imagen representativa de absorción de fitonutrientes tomada y traducida al español de (Singh et al., 2020). Baja biodisponibilidad mayor o menor se refiere a la absorción, y a la concentración en nuestra sangre.

provocan el efecto benéfico. Aún falta por investigar más sobre cómo se logra la disminución de colesterol o glucosa por el consumo de ciertos alimentos, pero se propone que estos son absorbidos y pueden llegar a las diferentes células y ocasionar los efectos descritos. En la figura 1 se muestra una propuesta de absorción de los fitocompuestos.

3. Conclusión.

La función de los alimentos no es solo proveernos de energía, minerales, vitaminas etc., si no que adicionalmente nos ayudan a mantener nuestro sistema inmune y en algunos casos suprimir crecimiento en células malas, ya que intervienen en el ciclo celular y senescencia, entre otros procesos metabólicos. Por otra parte, los estudios epidemiológicos y científicos son útiles para evaluar los posibles efectos protectores y la prevención de enfermedades. Existen datos que indican que un 59% de que las personas que consumen mayor cantidad de frutas y verduras en la dieta tienen un menor riesgo de ciertos tipos de cáncer en estómago o pulmón (Nahar L, Xiao J Y Sarker SD, 2021). Un esquema simple como el mostrado en la figura 2, puede ser de utilidad para fomentar el consumo de vegetales si se relaciona con su efecto biológico, adicionalmente menciona otros ejemplos de fitocompuestos.

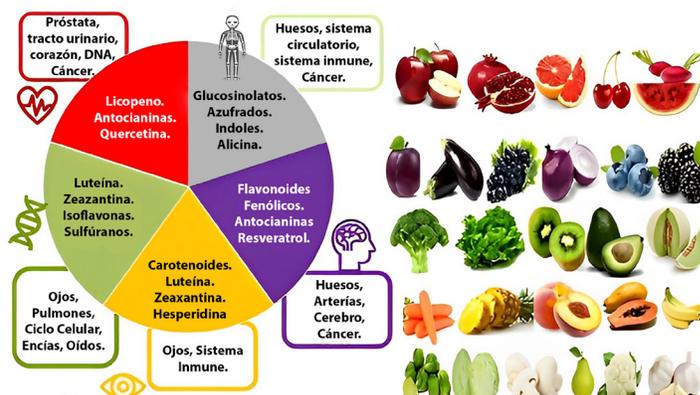


Figura 2. Propuesta para relacionar el efecto y beneficio biológico con el color del alimento.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, al Instituto Politécnico Nacional, y CONACYT.

Referencias

- Adhami VM, Syed DN, Khan N, Mukhtar H (2012) Dietary flavonoid fisetin: A novel dual inhibitor of PI3K/ Akt and mTOR for prostate cancer management. In *Biochemical Pharmacology*, Vol.84, 1277–1281 pp.
- Agarwal C, Singh RP, Agarwal R (2002) Grape seed extract induces apoptotic death of human prostate carcinoma DU145 cells via caspases activation accompanied by dissipation of mitochondrial membrane potential and cytochrome c release. *Carcinogenesis*, 1869–1876.

- Aggarwal BB, Shishodia S (2006) Molecular targets of dietary agents for prevention and therapy of cancer. *Biochemical Pharmacology* 1397–1421.
- Bahrin AA, Moshawih S, Dhaliwl JS, Kanakal MM, Khan A, Lee KS, Goh BH, Goh HP, Kifli N, Ming LC (2022). Cancer protective effects of plums: A systematic review. *Biomedicine & Pharmacotherapy*.
- Burton LJ, Smith BA, Smith BN, Loyd Q, Nagappan P, McKeithen D, Wilder CL, Platt MO, Hudson T, Odero-Marah VA (2015) Muscadine grape skin extract can antagonize Snail-cathepsin L-mediated invasion, migration and osteoclastogenesis in prostate and breast cancer cells. *Carcinogenesis* 1019–1027.
- Chen XY, Zhou J, Luo LP, Han B, Li F, Chen JY, Zhu YF, Chen W, Yu XP (2015a) Black Rice Anthocyanins Suppress Metastasis of Breast Cancer Cells by Targeting RAS/RAF/MAPK Pathway. *BioMed Research International*, 414250.
- Díaz Yamal I, Munévar L (2009) Fitoestrogenos: revision de tema. *Revista Colombiana de Obstetricia y Ginecología*, 60, 274.
- Dierge E, Larondelle Y, Feron O (2020) Cancer diets for cancer patients: Lessons from mouse studies and new insights from the study of fatty acid metabolism in tumors. *Biochimie*, 178, 56–68.
- Giovannucci E, Ascherio A, Rimm EB, Stampfer MJ, Colditz GA, Willett WC (1995) Intake of Carotenoids and Retino in Relation to Risk of Prostate Cancer. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, 1767–1776.
- He X, Wang Y, Hu H, Zhang Z (2012) In Vitro and in Vivo Antimammary Tumor Activities and Mechanisms of the Apple Total Triterpenoids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 9430–9436.
- Hui C, Bin Y, Xiaoping Y, Long Y, Chunye C, Mantian M, Wenhua L (2010) Anticancer Activities of an Anthocyanin-Rich Extract From Black Rice Against Breast Cancer Cells In Vitro and In Vivo. *Nutrition and Cancer*, 1128–1136pp.
- Kaefer CM, Milner JA (2008) The role of herbs and spices in cancer prevention. In *Journal of Nutritional Biochemistry*, 347–361.
- Katiyar S, Elmets CA, Katiyar SK (2007) Green tea and skin cancer: photoimmunology, angiogenesis and DNA repair. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 287–296pp.
- Khoo HE, Azlan A, Tang ST, Lim SM (2017) Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food & Nutrition Research*, 61(1), 1361779.
- Kim J, Park MK, Li WQ, Qureshi AA, Cho E (2019) Association of Vitamin A Intake With Cutaneous Squamous Cell Carcinoma Risk in the United States. *JAMA Dermatology*, 1260–1268pp.
- Krinsky NI, Johnson EJ (2005) Carotenoid actions and their relation to health and disease. In *Molecular Aspects of Medicine* 459–516pp.
- Liu M, Lin LQ, Song BB, Wang LF, Zhang CP, Zhao JL, Liu JR (2009) Cranberry Phytochemical Extract Inhibits SGC-7901 Cell Growth and Human Tumor Xenografts in Balb/c nu/nu Mice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 762–768pp.
- Nahar L, Xiao J, Sarker SD (2021) Introduction of Phytonutrients. In Xiao Jianbo, SD, Sarker A, *Handbook of Dietary Phytochemicals*, 1–17pp. Springer Singapore.
- Nielsen SE, Kall M, Justesen U, Schou A, Dragsted LO (1997) Human absorption and excretion of flavonoids after broccoli consumption. *Cancer Letters*, 114(1), 173–174.
- Prince M, Li Y, Childers A, Itoh K, Yamamoto M, Kleiner HE (2009) Comparison of citrus coumarins on carcinogen-detoxifying enzymes in Nrf2 knockout mice. *Toxicology Letters*, 185(3), 180–186.
- Qamar S, Shaikh A (2018) Therapeutic potentials and compositional changes of valuable compounds from banana-A review. *Trends in Food Science & Technology*, 79, 1–9.
- Rabi T, Gupta S (2008) Dietary terpenoids and prostate cancer chemoprevention. *Frontiers in Bioscience : A Journal and Virtual Library*, 13, 3457–3469.
- Robbins RJ (2003) Phenolic Acids in Foods: An Overview of Analytical Methodology. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(10), 2866–2887.
- Sajadimajd S, Bahramsoltani R, Iranpanah A, Kumar Patra J, Das G, Gouda S, Rahimi R, Rezaei-miri E, Cao H, Giampieri F, Battino M, Tundis R, Campos MG, Farzaei MH, Xiao J (2020) Advances on Natural Polyphenols as Anticancer Agents for Skin Cancer. *Pharmacological Research*, 151, 104584.
- Sharifi-Rad J, Rajabi S, Martorell M, López MD, Toro MT, Barollo S, Armanini D, Fokou PVT, Zagotto G, Ribaud G, Pezzani R (2020) Plant natural products with anti-thyroid cancer activity. *Fitoterapia*, 146, 104640.
- Singh B, Mal G, Sharma D, Sharma R, Antony CP, Kalra RS (2020) Gastrointestinal biotransformation of phytochemicals: Towards futuristic dietary therapeutics and functional foods. *Trends in Food Science & Technology*, 106, 64–77.
- Singh B, Mal G, Sharma D, Sharma R, Antony CP, Kalra RS (2020) Gastrointestinal biotransformation of phytochemicals: Towards futuristic dietary therapeutics and functional foods. *Trends in Food Science & Technology*, 106, 64–77.
- Stirling R, Zalcborg J. (2019). Peeling the Onion of Health Care Disparity in Lung Cancer. *Journal of Thoracic Oncology*, 14(8), e167–e168.

Suryamani, Sindhu R, Singh I (2022) Chapter 10 - Phytosterols: physiological functions and therapeutic applications. In C. B. B. Cazarin, J. L. Bicas, G. M. Pastore, & M. R. Marostica Junior (Eds.), *Bioactive Food Components Activity in Mechanistic Approach* 223–238pp. Academic Press.

Thangaiyan SG (2008) Dietary terpenoids and prostate cancer chemoprevention. *FBL*, 13(9), 3457–3469.

Xu B, Sung C (2015) Telomerase inhibitory effects and anti-proliferative properties of onion and other natural spices against cancer cells. *Food Bioscience*, 10, 80–85.

Yao Lh, Jiang Ym, Shij, Tomás-Barberán Fa, Datta N, Singanusong R, Chen SS (2004). Flavonoids in Food and Their Health Benefits. *Plant Foods for Human Nutrition*, 59(3), 113–122.

Zamaratskaia G, Mhd Omar NA, Brunius C, Hallmans G, Johansson JE, Andersson, SO, Larsson A, Åman P, Landberg R (2020). Consumption of whole grain/bran rye instead of refined wheat decrease concentrations of TNF-R2, e-selectin, and endostatin in an exploratory study in men with prostate cancer. *Clinical Nutrition*, 39(1), 159–165.





PROPIEDADES HIPOCOLESTEROLEMIANTES DEL ACEITE ESENCIAL DE CANELA Y EL CINEMALDEHÍDO

Ivo Heyerdahl-Viau*, Francisco López-Naranjo, Rebeca Córdova-Moreno, Emmanuel Alejandro Ocampo-Alcántara

Departamento de Sistemas Biológicos, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, Calz. del Hueso 1100, Coapa, Villa Quietud, Coyoacán, 04960 Ciudad de México, CDMX
Correo electrónico del autor por correspondencia: ivoheyerdahl@gmail.com

RESUMEN

Actualmente, la hipercolesterolemia tiene gran incidencia y es un problema de salud pública a nivel mundial. Aunque existe farmacoterapia para tratarla, muchos de estos medicamentos presentan diversos efectos adversos importantes, por lo cual es necesario investigar nuevas alternativas. El aceite esencial de canela y su componente principal, el cinamaldehído, han presentado buena actividad hipocolesterolemia en modelos animales de manera dosis y tiempo dependiente. Asimismo, esta actividad hipocolesterolemia se puede aprovechar en ganadería para mejorar la calidad de los productos alimentarios de origen animal. El siguiente paso en esta prometedora línea de investigación sería evaluar la toxicidad de estos compuestos y obtener evidencia a nivel clínico.

Palabras clave: canela, aceite esencial, colesterol

ABSTRACT

Currently, hypercholesterolemia has a high incidence and is a public health problem worldwide. Although there is pharmacotherapy to treat it, many of these drugs have several important adverse effects, so it is necessary to investigate new alternatives. Cinnamon essential oil and its main component, cinnamaldehyde, have shown good cholesterol-lowering activity in animal models in a dose- and time-dependent manner. Likewise, this hypocholesterolemic activity can be used in livestock farming to improve the quality of food products of animal origin. The next step in this promising line of research would be to evaluate the toxicity of these compounds and obtain clinical evidence.

Key words: cinnamon, essential oil, cholesterol

1. INTRODUCCIÓN

Los lípidos son un grupo de biomoléculas esenciales para los seres vivos, pues cumplen diferentes funciones, desde estructurales hasta hormonales (Chakraborty et al. 2020). Sin embargo, el consumo excesivo de alimentos que contienen alta cantidad de lípidos es perjudicial para la salud, ya que pueden acumularse en los vasos sanguíneos. Por ejemplo, en México, las enfermedades no transmisibles son el principal problema de salud pública, y a diferencia de otros países, se ha observado un aumento en la incidencia de dislipidemia, probablemente debido al estilo de vida sedentario y a los malos hábitos alimenticios de su población (Rivas et al. 2018). Esta situación es preocupante, pues se observa una alta prevalencia de sobrepeso y obesidad aún en población infantil mexicana debido a la alta disponibilidad de alimentos y bebidas procesadas que contienen un alto contenido de carbohidratos y grasas (Shamah et al. 2018).

Un tipo de lípido que se ve afectado por la mala dieta es el colesterol, el cual está asociado a enfermedades cardiacas

potencialmente mortales si se encuentra en niveles altos (Schoeneck y Iggman 2021). Hoy en día se cuenta con terapia farmacológica con fines hipocolesterolemiantes. Por ejemplo, las estatinas son un grupo de medicamentos bastante eficaces en reducir los niveles de colesterol de baja densidad. Sin embargo, estos medicamentos también suelen presentar diversos problemas, tales como interacciones medicamentosas, hepatotoxicidad, trastornos del sistema nervioso central y, especialmente rabiomólisis (Illnait 2009). Debido a ello, es necesario buscar nuevas alternativas farmacoterapéuticas ante la hipercolesterolemia.

En México se siguen utilizando diversas plantas medicinales para tratar diversos padecimientos, y se estima que esta tendencia se mantenga por mucho tiempo, ya que estas plantas son ampliamente aceptadas por la población y se consiguen fácilmente en mercados (García et al. 2001). Asimismo, se estima que en este país se consume más de la mitad de la producción mundial de canela (Moreno et al., 2010), y ya anteriormente se ha demostrado en modelos animales que el aceite esencial de este vegetal ejerce efecto hipocolesterolemia, y dado que el cinamaldehído es su principal componente, es a este al que se le atribuye dicha actividad terapéutica (Ping et al. 2010), por lo cual es un buen candidato a seguir estudiando para aumentar las opciones de farmacoterapia hipocolesterolemia.

En el presente artículo de revisión, se describen algunos estudios que han demostrado la actividad hipocolesterolemia del aceite esencial de canela y su componente mayoritario, el cinamaldehído.

2. COLESTEROL E HIPERCOLESTEROLEMIA

Dentro de los lípidos importantes para los seres vivos, se encuentra el colesterol (Figura 1), que es un tipo de esteroles que se encuentra principalmente en la membrana celular, donde ayuda a regular su rigidez o fluidez, participa en procesos de señalización y en el transporte de sustancias y en su distribución subcelular, se une a proteínas transmembranales para mantener o alterar su conformación, entre otras funciones. Además, la oxidación del colesterol da lugar a la pregnenolona, que es el precursor común de todas las hormonas esteroideas (Luo et al. 2019).

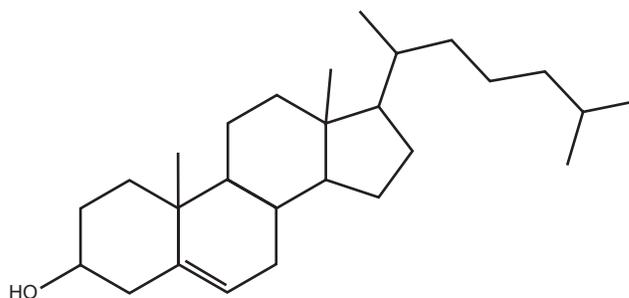


Figura 1. Estructura química del colesterol.

El hígado es el sitio principal de biosíntesis de colesterol. A partir de ahí, se transporta a la sangre junto a proteínas, formando complejos lipoprotéicos que pueden ser de baja densidad (LDL) o de alta densidad (HDL). El LDL contiene más lípido que proteína, y puede acumularse y adherirse a las paredes arteriales, formando una capa que obstruye el flujo sanguíneo (Villarreal et al. 2018). Por otro lado, el excedente de colesterol se une a la apolipoproteína A-I, generando HDL (Luo et al. 2019), el cual está compuesto por una porción alta de proteína y una porción menor de lípido y es muy afín a las moléculas de colesterol, por lo que puede unirseles fácilmente y transportarlas al hígado para su eliminación, evitando que se acumulen en la sangre (Villarreal et al. 2018). De hecho, se ha observado que altos niveles de LDL (hipercolesterolemia) están directamente relacionados a mortalidad debida a enfermedad cardiaca, mientras que el HDL está inversamente relacionado a ello (Jung et al. 2022). Por esta razón, se dice que el LDL es el “colesterol malo”, y el HDL el “colesterol bueno”. Cabe mencionar que la población hispana tiende a tener menor concentración de HDL comparado con otros grupos étnicos (Rivas et al. 2018).

3. Aceites Esenciales

Los aceites esenciales son productos naturales de composición compleja que contienen compuestos volátiles y aromáticos (Aziz et al. 2018). Son sustancias líquidas, lípidas, liposolubles y menos densas que el agua. Se pueden encontrar en cualquier parte de la planta (Bakkali et al. 2008). Muchos aceites esenciales ejercen actividades biológicas; de hecho, su función en la naturaleza es proteger al vegetal contra estrés biótico (Bakkali et al. 2008). Los principales compuestos presentes en los aceites esenciales son terpenos, y, en menor medida los fenilpropanoides, que se caracterizan por contener un anillo bencénico y algún otro grupo funcional, como aldehído. Un ejemplo de ellos es el cinamaldehído, presente en el aceite esencial de canela (Bakkali et al. 2008).

4. La Canela

La canela es una especia muy común que se obtiene a partir de la corteza interna de árboles del género *Cinnamomum*, de los cuales existen aproximadamente 250 especies, siendo los más comunes *Cinnamomum verum* (Doyle y Stephens 2019). Se trata de un árbol pequeño de 10-15 metros con hojas perennes que pertenece a la familia de las Lauráceas. Posee flores verdosas dispuestas en panículas. También posee un fruto; una baya de 1 cm de una sola semilla (Jakhetia et al. 2010). En idioma español, la palabra “canela” proviene del francés “*canne*”, que se pronuncia “*cannelle*”, y que significa “caño” o “tubo”. Este fue el término adoptado en español porque la canela se obtiene en forma de característicos tubos de color café (Moreno et al. 2010) (Figura 2).



Figura 2. Tubos de canela.

5. CINEMALDEHÍDO: EL PRINCIPAL COMPUESTO DEL ACEITE ESENCIAL DE CANELA

La canela contiene procianidinas, catequinas y eugenol, entre otros compuestos minoritarios (Rao y Gan 2014). Sin embargo, el principal componente del aceite es el cinamaldehído (C_9H_8O ; P.M. 136.2 g/mol) (Figura 3), que se encuentra entre un 85.3-90.5%, principalmente como trans-cinamaldehído (Doyle y Stephens 2019). Este compuesto fue aislado a partir de la canela por primera vez en 1834 por Jean-Baptiste Dumas y Eugène Melchior Péligot. Posteriormente, en 1854 fue sintetizado por el químico italiano Luigi Chiozza (Hajinejad et al. 2020). Se trata de un líquido amarillo y aceitoso que le da aroma y sabor a la canela y es fácil de obtener a partir de su aceite esencial (National Center for Biotechnology Information 2022). Asimismo, también se ha demostrado que tiene diversas actividades terapéuticas, muchas de ellas relacionadas al tratamiento de enfermedades metabólicas (Babu et al. 2007).

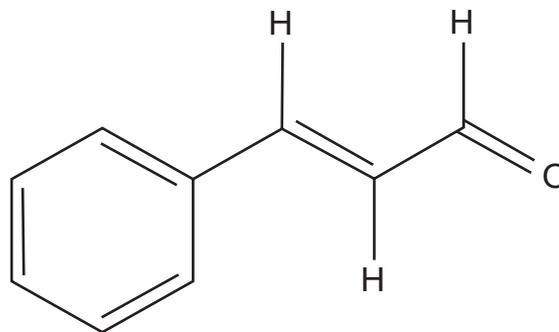


Figura 3. Estructura química del cinamaldehído

6. ACTIVIDAD HIPOCOLESTEROLEMIANTE DEL ACEITE ESENCIAL DE CANELA Y EL CINAMALDEHÍDO DEMOSTRADA EN MODELOS ANIMALES

En un estudio, se observó que ratas diabéticas que recibieron una dieta suplementada con 5% de aceite esencial de canela (*Cinnamomum zeylanicum*) durante 7 semanas vieron reducidos significativamente ($p < 0.001$) sus niveles de colesterol total, LDL y triglicéridos, en un 34.26%, 38.6% y 48.3%, mientras que sus niveles de HDL aumentaron significativamente en un 18.9% ($p < 0.01$) comparados con el grupo control de ratas diabéticas que no recibieron esta suplementación. Esta misma dieta aplicada a ratas no diabéticas también disminuyó significativamente ($p < 0.05$) los niveles de triglicéridos en un 38.8% comparado con el grupo control. Sin embargo, este tratamiento no fue comparado con alguna farmacoterapia ya aprobada. El componente mayoritario del aceite era el cinamaldehído (62.7%). (Zari y Al-Logman 2009).

En otro estudio, a partir de canela adquirida en la compañía farmacéutica Tongrentang, se obtuvo aceite esencial mediante hidrodestilación y se administró a través de una sonda gástrica a ratones KK-Ay en un modelo animal de diabetes tipo 2 durante 35 días. Dosis de 50 y 100 mg/Kg redujeron significativamente los niveles de colesterol total en un 14.06% ($p < 0.05$) y 23.7% ($p < 0.001$) la dosis de 50 mg/Kg aumentó los niveles de HDL en un 29.4% ($p < 0.01$). Ambas dosis redujeron los niveles de triglicéridos en un 15.53% ($p < 0.05$) y 18.4% ($p < 0.01$) El principal compuesto del aceite esencial era el cinamaldehído (78.513%) y otros 19 compuestos minoritarios (Ping et al. 2010).

Aunque en dicho estudio las dosis de 25 mg/Kg no ejercieron efecto en el tiempo que duró el experimento (Ping et al. 2010), en otro estudio se administró cinamaldehído comercial a dosis y duración menores (20 mg·Kg⁻¹·día⁻¹, por vía oral durante 4 semanas) a ratones C57BLKS db/db (ratones diabéticos). Como resultado, se observó un aumento significativamente los niveles de HDL comparado con el grupo control de ratones diabéticos sin tratamiento (Li et al. 2012), lo cual demuestra que el compuesto responsable de la actividad biológica del aceite esencial de canela es el cinamaldehído.

Además, parece ser que la efectividad de este compuesto puro depende también de la duración del tratamiento, ya que, aunque en el estudio anteriormente mencionado no se observó una reducción significativa en los niveles de

colesterol total y triglicéridos (Li et al. 2012), en otro estudio sí se observó que la misma dosis de cinamaldehído (20 mg/Kg) administrado a ratones diabéticos por la misma vía de administración (vía oral) durante un par de semanas más (45 días), no sólo aumentó significativamente ($p < 0.05$) los niveles de colesterol HDL en un 41.04% con respecto al grupo de ratones diabéticos sin tratamiento de manera comparable con el fármaco de referencia glibenclamida, sino que también redujo significativamente ($p < 0.05$) los niveles de colesterol total en suero y triglicéridos en un 53.99% y 53.95%, aunque ya no de manera comparable con el fármaco de referencia. En este estudio, el cinamaldehído fue obtenido a partir de *C. zeylanicum* mediante hidrodestilación y una posterior purificación por cromatografía en columna (rendimiento de 0.15%) (Babu et al. 2007).

Lo que es más, en otro estudio se observó que una dosis mayor (40 mg/Kg de cinamaldehído comercial administrados durante 4 semanas a través de sonda gástrica a ratones que consumieron una dieta alta en fructosa) no sólo aumentó significativamente ($p < 0.05$) los niveles de HDL en un 54.9% y redujo los de colesterol total y triglicéridos en un 38.9% y 50.7%, sino que también redujo los niveles de LDL en un 55%, comparado con el grupo que recibió metformina y el grupo control de ratones no diabéticos, obteniendo incluso mejores resultados que el fármaco de referencia en los niveles de colesterol total y LDL (Rashwan et al. 2019). En otros estudios se observaron resultados similares al administrarse menores dosis por mayor tiempo; 20 mg/Kg de cinamaldehído durante 8 (Li et al., 2019) y 10 semanas (Ismail et al. 2022) por vía oral a ratones que habían consumido una dieta alta en grasas, lo que una vez más demuestra la importancia de la duración del tratamiento. Sin embargo, en ninguno de estos dos estudios se realizó una comparación con algún fármaco de referencia.

7. APROVECHAMIENTO DE LA ACTIVIDAD HIPOCOLESTEROLEMIANTE DEL ACEITE ESENCIAL DE CANELA EN GANADERÍA Y PRODUCCIÓN ANIMAL

El aceite esencial de canela tiene gran potencial para ser empleado como producto farmacoterapéutico, pero también tiene potencial para ser aprovechado en la ganadería y producción animal. Por ejemplo, en un estudio se observó que una suplementación diaria de seis semanas con aceite esencial de canela (especie vegetal y componentes no especificados) concentraciones de 100 y 200 ppm a pollos de engorde redujo de significativamente los niveles de colesterol

en el suero de los pollos de manera dosis dependiente (Al-Kassie 2009). En otro estudio, se observó que una dieta suplementada con aceite esencial de canela (*C. zeylanicum*) a 500 y 1000 ppm implementada a pollitos Ross-308 redujo significativamente los niveles de colesterol en suero y en la carne de pechuga y muslo a ambas concentraciones de aceite. Asimismo, disminuyó los niveles de ácidos grasos saturados y aumentó los de ácidos grasos poliinsaturados y omega 6 en plasma y carne de muslo (Ciftci et al. 2010). Estos resultados sugieren que la suplementación de pollos con aceite esencial de canela puede mejorar la calidad de los productos comestibles que se obtienen a partir de ellos.

8. CONCLUSIÓN

El aceite esencial de canela y su componente principal, el cinamaldehído, han demostrado ejercer una buena actividad hipocolesterolemizante en ensayos preclínicos, por lo que se trata de productos prometedores para ser empleados como una nueva alternativa farmacoterapéutica para tratar esta afección. Asimismo, el aceite esencial de canela presenta un potencial uso en ganadería para mejorar los productos alimentarios de origen animal. Los siguientes pasos para seguir en esta prometedora línea de investigación serían evaluar la toxicidad de estos productos y una posterior investigación a nivel clínico.

9. REFERENCIAS

- Al-Kassie GAM (2009) Influence of two plant extracts derived from thyme and cinnamon on broiler performance. *Pakistan Veterinary Journal* 29 (4):169–173.
- Aziz ZAA, Ahmad A, Setapar SHM, Karakucuk A, Azim MM, Lokhat D, Rafatullah M, Ganash M, Kamal MA, Ashraf GM (2018) Essential Oils: Extraction Techniques, Pharmaceutical And Therapeutic Potential - A Review. *Current Drug Metabolism* 19(13):1100–1110.
- Babu PS, Prabuseenivasan S, Ignacimuthu S (2007) Cinnamaldehyde-A potential antidiabetic agent. *Phytomedicine* 14(1):15–22.
- Bakkali F, Averbeck S, Averbeck D, Idaomar, M (2008) Biological effects of essential oils - A review. In *Food and Chemical Toxicology* 46(2):446–475.
- Chakraborty S, Doktorova M, Molugu TR, Heberle FA, Scott HL, Dzikovski B, Nagao M, Stingaciu LR, Standaert RF, Barrera FN, Katsaras J, Khelashvili G, Brown MF, Ashkar R (2020). How cholesterol stiffens unsaturated lipid membranes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(36):21896–21905.
- Ciftci M, Simsek UG, Yuce A, Yilmaz O, Dalkilic, B (2010) Effects of dietary antibiotic and cinnamon oil supplementation on antioxidant enzyme activities, cholesterol levels and fatty acid compositions of serum and meat in broiler chickens. *Acta Veterinaria Brno* 79(1):33–40.
- Doyle AA, Stephens JC (2019) A review of cinnamaldehyde and its derivatives as antibacterial agents. *Fitoterapia* 139:104405.
- García JS, Verde MJ, Heredia NL (2001) Traditional uses and scientific knowledge of medicinal plants from Mexico and Central America. *Journal of Herbs, Spices and Medicinal Plants* 8(2–3):37–89.
- Hajinejad M, Ghaddaripouri M, Dabzadeh M, Forouzanfar F, Sahab S (2020) Natural Cinnamaldehyde and Its Derivatives Ameliorate Neuroinflammatory Pathways in Neurodegenerative Diseases. *BioMed Research International* 2020:1–9.
- Illnait J (2009) Estatinas, uso racional en el tratamiento de la dislipoproteinemia Statins related to a rational use in treatment of dyslipoproteinemia. *Revista Cubana de Medicina General Integral* 25(2).
- Ismail BS, Mahmoud B, Abdel ES, Soliman HA, Ali TM, Elesawy BH, Zaky MY (2022) Cinnamaldehyde Mitigates Atherosclerosis Induced by High-Fat Diet via Modulation of Hyperlipidemia, Oxidative Stress, and Inflammation. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* 2022.
- Jakheta V, Patel R, Khatri P, Pahuja N, Garg S, Pandey A, Sharma S (2010) Cinnamon: a pharmacological review. *Journal of advanced scientific research* 1(02):19–23.
- Jung E, Kong SY, Ro YS, Ryu HH, Shin SD (2022) Serum Cholesterol Levels and Risk of Cardiovascular Death: A Systematic Review and a Dose-Response Meta-Analysis of Prospective Cohort Studies. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(14):8272.
- Li J, Liu T, Wang L, Guo X, Xu T, Wu L, Qin L, Sun W (2012) Antihyperglycemic and antihyperlipidemic action of cinnamaldehyde in C57blks/j Db/db mice. *Journal of Traditional Chinese Medicine* 32(3):446–452.
- Li W, Zhi W, Zhao J, Li W, Zang L, Liu F, Niu X (2019) Cinnamaldehyde attenuates atherosclerosis via targeting the IκB/NF-κB signaling pathway in high fat diet-induced ApoE^{-/-} mice. *Food & Function* 10(7):4001–4009.
- Luo J, Yang H, Song BL (2019) Mechanisms and regulation of cholesterol homeostasis. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 21(4):225–245.
- Moreno A, Flores J, Cuéltar M, Fernandez M, Hernández N, Guzmán P (2010) La introducción de canela en esquemas de diversificación productiva. Universidad Veracruzana. Veracruz. 12 pp.
- National Center for Biotechnology Information. (2022). PubChem Compound Summary for CID 637511, Cinnamaldehyde.
- Ping H, Zhang G, Ren G (2010) Antidiabetic effects of cinnamon oil in diabetic KK-Ay mice. *Food and Chemical Toxicology* 48(8–9):2344–2349.

Rao PV, Gan SH (2014) Cinnamon: A multifaceted medicinal plant. Evidence-based Complementary and Alternative Medicine 2014.

Rashwan AS, El-Beltagy MA, Saleh SY, Ibrahim IA (2019) Potential role of cinnamaldehyde and costunolide to counteract metabolic syndrome induced by excessive fructose consumption. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences 8(1):1–8.

Rivas B, Almeda P, Tussié MT, Aguilar CA (2018) Dyslipidemia in Mexico, a Call for Action. Rev Invest Clin 70:211–217.

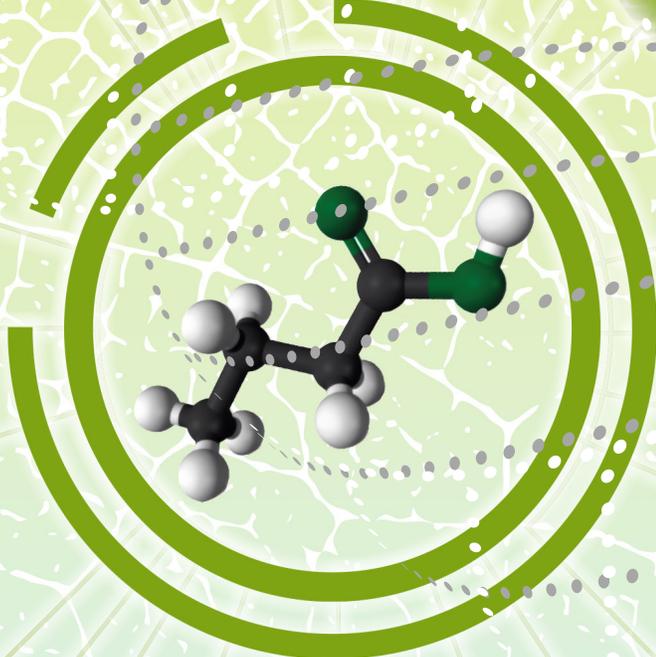
Schoeneck M, Iggman D (2021) The effects of foods on LDL cholesterol levels: A systematic review of the accumulated evidence from systematic reviews and meta-analyses of randomized controlled trials. Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases 31(5):1325–1338.

Shamah TT, Cuevas L, Gaona EB, Gómez LM., Morales M del C, Hernández M, Rivera JÁ (2018) Overweight and obesity in children and adolescents, 2016 Halfway National Health and Nutrition Survey update. Salud Publica de Mexico 60(3):244–253.

Villarreal MB, Rivera CTG, Hernández SLC, González MAN, Guerra CAA, González JG B (2018) El colesterol ¿Es bueno o malo? Biología y Sociedad 1(2):74–83.

Zari TA, Al-Logman (2009). Long-term effects of Cinnamomum zeylanicum Blume oil on some physiological parameters in streptozotocin-diabetic and non-diabetic rats. Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas 8(4):266-274.





PRODUCCIÓN DE ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES MEDIANTE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA: UNA REVISIÓN

Andres Castro Sierra*, María Myrna Solís Oba, Ana Rosa Sánchez Camarillo, Angélica Romero Rodríguez,
Juan Luis Soto García,
Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA-IPN)1, *andres.castro.sierra21@gmail.com

RESUMEN

Los ácidos grasos volátiles (AGV) tienen aplicaciones industriales en los sectores farmacéutico, alimentario, químico y energético; éstos son producidos principalmente a partir de fuentes petroquímicas, las cuales tienen efectos negativos en la salud y el ambiente. Por otro lado, en la actualidad, existe una generación desmesurada de residuos que podrían ser utilizados como sustrato para su biosíntesis. Bajo esta premisa, el presente es una revisión bibliográfica para analizar las ventajas del uso de la digestión anaerobia como una alternativa renovable y sostenible para producir AGV; así como la revisión del efecto de los parámetros de operación (pH, temperatura, tiempo de retención hidráulica y el tipo de sustrato) que influyen en su producción.

Palabras claves: biotecnología ambiental, bioenergía, revalorización de los residuos.

ABSTRACT

Volatile fatty acids (VFA) have industrial applications in the pharmaceutical, food, chemical and energy sectors; These are produced mainly from petrochemical sources, which have negative effects on health and the environment. On the other hand, at present, there is an excessive generation of waste that could be used as a substrate for its biosynthesis. Under this premise, this is a literature review to analyze the advantages of using anaerobic digestion as a renewable and sustainable alternative to produce VFA; as well as the review of the effect of the operating parameters (pH, temperature, hydraulic retention time and the type of substrate) that influence its production.

Keywords: environmental biotechnology, bioenergy, revaluation of waste.

1. INTRODUCCIÓN

La generación desmesurada de residuos y su bajo aprovechamiento, en conjunto con la crisis energética actual, plantea escenarios complicados de sobrellevar en los ejes sociales, políticos, económicos y ambientales (Bigarelli et al., 2019). Esta situación impone grandes exigencias al desarrollo de tecnologías verdes que aprovechen los residuos para la generación de productos de interés comercial y energético, como son los ácidos grasos volátiles (AGV); éstos pueden ser utilizados en diversas industrias, por ejemplo para la síntesis de vinagres, aromatizantes, conservadores, plaguicidas, plásticos, pinturas, lubricantes, cosméticos, biodiésel y electricidad, entre otros (Atasoy et al., 2018).

Tradicionalmente, los AGV son producidos a partir de fuentes petroquímicas, las cuales tienen efectos negativos en la salud y el ambiente, debido a que generan gases de efecto invernadero mismo que coadyuvan al calentamiento

global. Con base en ello, en los últimos años, se ha planteado el uso de la digestión anaerobia como una ruta alternativa y renovable para la obtención de AGV a partir de residuos (Pena, 2021). El presente trabajo pretende hacer una revisión de las metodologías y resultados obtenidos en trabajos previos y analizar las ventajas y pertinencia de la obtención de AGV a través de la digestión anaeróbica (DA).

2 DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia (DA) se basa en la acción secuencial de ciertos microorganismos [Figura 1] que en ausencia de oxígeno son capaces de biodegradar diversos sustratos orgánicos para producir biogás, el cual si contiene al menos un 45 % de metano se puede emplear como combustible para generar electricidad o calor, y un subproducto denominado digestato, que es una mezcla de materia orgánica parcialmente degradada, biomasa microbiana y componentes inorgánicos al que se le atribuyen propiedades fertilizantes (Anukam et al., 2019). El biogás producido por medio de la DA ha sido ampliamente documentado, debido a que es una fuente de energía renovable, no obstante, el digestato no lo ha sido tanto, a pesar de que durante el proceso de la DA se producen metabolitos de interés comercial, como son los AGV (Atasoy et al., 2018).

Para la producción de metano, se ha reportado que se favorece con relaciones de C/N de 20/1 a 30/1 (Castro et al., 2020); debido a que si hay mayor presencia de nitrógeno puede producirse altas cantidades de amoníaco lo cual puede inhibir el proceso (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2005), el rango óptimo de pH para la máxima obtención de metano es entre 6.5 y 7.5; además, a pH neutro, se pueden obtener los AGV (>99%) en su forma ionizada, es decir, no tóxica (Iglesias-Iglesias, 2021); finalmente, la temperatura influye dependiendo de los microorganismos.

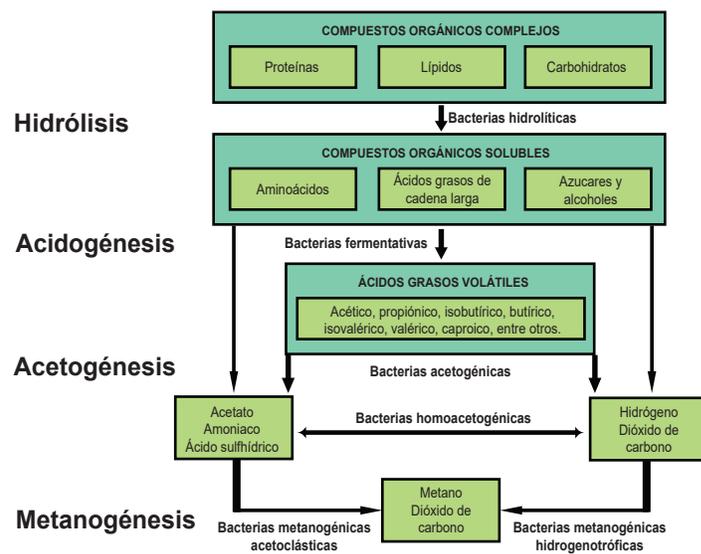


Figura 1. Etapas de la digestión anaerobia (Elaboración propia).

La DA consta de cuatro etapas, en la primera etapa las bacterias hidrolíticas disocian a las macromoléculas orgánicas (carbohidratos, lípidos y proteínas) en sus oligómeros y monómeros (azúcares, ácidos grasos y aminoácidos), esta situación permite que, durante la segunda etapa, las membranas celulares de los microorganismos acidogénicos puedan asimilarlos para producir AGV (ácidos: acético, propiónico, isobutírico, butírico, isovalérico, valérico y caproico), dióxido de carbono, hidrógeno, etanol y lactato (Meegoda et al., 2018; Parra-Ortiz et al., 2019). En la tercer etapa, las bacterias acetogénicas generan acetato y, en menor medida, hidrógeno; finalmente, durante la última etapa, los microorganismos metanogénicos consumen los compuestos resultantes de la fase anterior para producir metano (Bajpai, 2017).

3 ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES

Los AGV son ácidos carboxílicos alifáticos de cadena corta (de 2 a 6 átomos de carbono), que se forman como intermediarios durante el proceso de digestión anaerobia (DA) durante la etapa acidogénica (Triviño et al., 2021). Los AGV son: los ácidos acéticos, propiónico, isobutírico, butírico, isovalérico, valérico y caproico. Su producción se puede promover acortando el tiempo de reacción para evitar la producción de metano, aumentando el pH a 8.0 o por debajo de 6.0 para inhibir el crecimiento de metanógenos en la producción de metano (Atasoy et al., 2018).

Los AGV tienen aplicaciones industriales en los sectores farmacéutico, alimentario, químico y energético, así como también, en el tratamiento de aguas residuales (Triviño et al., 2021). Las especies que más utilizan en el proceso de producción AGV de base biológica son *Propionibacterium freudenreichii*, *Propionibacterium acidipropionici*, *Propionibacterium thoenii*, *Propionibacterium shermanii*, y *Propionibacterium jensenii* (Atasoy et al., 2018). Los factores que intervienen en la producción de los AGV se describen a continuación.

3.1 EFECTO DEL PH

Los microorganismos que producen AGV pueden trabajar en un intervalo de pH amplio, esto dependiendo del tipo de residuo utilizado como sustrato en el proceso, no obstante, a pH muy ácido o muy alcalino se inhibe su crecimiento y capacidad fermentativa (Gameiro et al., 2016). Adicional a lo anterior, durante la DA el pH sufre una desestabilización que puede afectar el proceso, debido a la producción y acumulación de ácidos, por lo que como principio básico se recomienda el ajuste del

pH a un intervalo óptimo de entre 6 y 8, con NaOH, si así lo requiriera (Poveda Londoño, 2021).

De acuerdo con estudios realizados por Jiang et al. (2013) a un pH de entre 5.25 y 11 se puede obtener una producción significativa de AGV a partir de residuos alimentarios, aguas residuales y lodos residuales. Aunque la composición de los AGV producidos depende principalmente de la composición de los sustratos, cualquier cambio en los valores de pH también puede controlar el tipo y concentración de AGV producidos a partir de la fermentación acidogénica (Khan et al., 2016). De manera particular, estudios que emplearon diversos residuos orgánicos indican que se puede obtener mayor producción de ácido propiónico a pH 4, mientras que a pH 6 existe más presencia de ácido acético y butírico, aunque fue a pH 6 que hubo un aumento del 7.5% de AGV respecto al pH 4 (Lee et al., 2014; Wang et al., 2014).

3.2 EFECTO DE LA TEMPERATURA

La temperatura es otro factor para la producción de AGV considerar debido a que está fuertemente ligada al crecimiento microbiano y por ende a la biosíntesis de metabolitos, una temperatura cercana a 37 °C es óptima para organismos mesófilos, los más usados. Sin embargo, en condiciones termofílicas se puede producir hasta diez veces más AGV que bajo condiciones mesófilas (Triviño et al., 2021). De igual manera, la temperatura también interviene en el tipo de AGV que se podría obtener, al aumentar la temperatura el porcentaje de ácido butírico es mayor mientras que la cantidad de ácidos acético y valérico disminuyen (Stein et al., 2017).

3.3 EFECTO DEL SUSTRATO Y TIEMPO DE RETENCIÓN

La biosíntesis de AGV a partir de residuos orgánicos ofrece una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento de residuos, la producción de AGV y su composición depende de varios factores, otro de los más importantes es el sustrato. Debido a las múltiples aplicaciones industriales y energéticas que pueden tener los AGV se debe considerar que el sustrato a elegir sea asequible, biodegradable, así como también, rico en carbono (Gameiro et al., 2016).

Por consiguiente, los estiércoles y los residuos orgánicos provenientes del desperdicio alimentario pueden considerarse como materia prima potencial

para la fermentación, aunado a que aproximadamente un tercio de los alimentos producidos a nivel mundial se desperdicia (Dahiya et al., 2015). Algunos otros sustratos también han sido probados, entre los que destacan: las aguas residuales y lodos provenientes de diferentes tipos de industrias como la de alimentos, mataderos, papel, entre otras, las cuales, cumplen con las características básicas para llevar a cabo la digestión, es decir, que cuentan con una cantidad adecuada de materia orgánica y nutrientes (Poveda Londoño, 2021).

Con base en lo reportado por Wu et al. (2016), en términos generales los tiempos de retención menores de 8 días son favorables para bacterias acidógenas y mayor a 8 días es favorable para las metanogénicas. Aunque esto depende principalmente de la tasa de hidrólisis del sustrato, de acuerdo con Atasoy et al. (2018) la concentración más alta de AGV se logra después de 15 días. Contrariamente, Khan et al. (2016) postulan que el tiempo de retención solo es beneficioso para la producción de AGV hasta cierto valor, la prolongación de esta solo será responsable de la acumulación de AGV.

4 EXTRACCIÓN DE ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES OBTENIDOS POR MEDIO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La producción de AGV por medio de la DA se divide en dos partes: la fermentación y extracción. No tiene sentido producir por medio de la fermentación AGV si no se pueden extraer. Pese a ello, la recuperación de AGV es la parte más desafiante, más aún si se tiene planeado recuperarlos por separado (Zacharof y Lovitt, 2013). Esto se debe a que los AGV biosintetizados permanecen disueltos en el digestato, a diferencia del biogás o el hidrógeno que se pueden recolectar del espacio de cabeza del biorreactor. La extracción de AGV se puede llevar a cabo utilizando métodos químicos o basados en membranas (Khan et al., 2016); a continuación, se mencionan algunos ejemplos:

La extracción por filtración se basa en un transporte de masa de una mezcla líquida o gaseosa a través de barreras porosas, también conocidas como membranas. No obstante, debido a la dimensión de los poros, en algunos casos, no es suficiente la fuerza de la gravedad para vencer la resistencia hidráulica de la barrera, por lo que se emplean distintas presiones que favorecen el proceso. De acuerdo con un estudio realizado por Londoño (2021) este es el método más utilizado para la extracción de AGV debido a su costo y eficiencia, aunque recomienda previo a ello la centrifugación del digestato.

Otra opción es por electrodiálisis, este es un procedimiento

que utiliza membranas selectivas de iones para aislar iones cargados en una solución, cuando se crea una diferencia de voltaje entre dos electrodos (Scoma et al., 2016).

Otras técnicas de extracción son la microfiltración y la ultrafiltración, estos sistemas garantizan una alta densidad celular en los biorreactores. Sin embargo, estos métodos de recuperación por membrana requieren estrategias para reducir el ensuciamiento inminente causado por los materiales suspendidos en el medio de fermentación, para garantizar una operación prolongada (Longo et al., 2015).

En otros estudios González et al. (2005) probaron diferentes metodologías para la recuperación de los AGV. Las técnicas analizadas por ellos fueron: liofilización, extracción con solventes y "headspace" o espacio de cabeza. Para la liofilización y extracción con solvente se tomó 1 mL de muestra, la liofilización la realizaron a una temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a presión de 0.003 mbar, por 24 horas. Los AGV fueron extraídos con metanol, posteriormente centrifugados y analizados por cromatografía de gases. Por su parte, la extracción con solventes se llevó a cabo con dicloro metano, n-heptano, diétil éter y diisopropil éter. Para ello, se tomó 1 mL de muestra, luego se congeló a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se analizó la fase orgánica por cromatografía de gases bajo las siguientes condiciones: temperatura del horno, $140\text{ }^{\circ}\text{C}$; temperatura del inyector, $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura del detector, $270\text{ }^{\circ}\text{C}$; presión de entrada en la columna, 1.5 psi; flujo volumétrico del gas portador (Helio), 5 mL/min y razón de dilución, 50. Finalmente, la headspace se ejecutó añadiendo 0.5 mL H_2SO_4 a la muestra de 5 mL a la que inmediatamente se analizó su fase gaseosa.

Finalmente, para llevar a cabo la cuantificación de los AGV, el método más empleado es la cromatografía de gases, esta es una técnica analítica que se emplea para determinar la composición de una mezcla de diferentes productos químicos, además el cromatógrafo de gases utiliza diversos gases en su operación. Este consta de un equipo detector de ionización de llama y una columna capilar. Las variables de esta técnica son el gas acarreador, las temperaturas de las columnas, del puerto de inyección y el detector (Lim et al., 2008). Estas variables presentan diferencias por lo que es recomendable comparar varios autores para determinar los estándares a seguir.

5 CONCLUSIONES

Actualmente existe una alta disponibilidad de residuos orgánicos que pueden ser empleados para la biosíntesis de metabolitos, como los AGV. No obstante, para eficientizar estos procesos biológicos, como la digestión anaerobia, se deben optimizar varios factores operativos, incluidos la selección del sustrato, la temperatura, el pH y el tiempo de retención hidráulico. Lo anterior permitirá en algún futuro cercano escalar esta tecnología y con ello remplazar la

obtención AGV por vías petroquímicas. Aunque para ello, será necesario realizar más investigaciones al respecto.

5 CONCLUSIONES

Actualmente existe una alta disponibilidad de residuos orgánicos que pueden ser empleados para la biosíntesis de metabolitos, como los AGV. No obstante, para eficientizar estos procesos biológicos, como la digestión anaerobia, se deben optimizar varios factores operativos, incluidos la selección del sustrato, la temperatura, el pH y el tiempo de retención hidráulico. Lo anterior permitirá en algún futuro cercano escalar esta tecnología y con ello remplazar la obtención AGV por vías petroquímicas. Aunque para ello, será necesario realizar más investigaciones al respecto.

6 BIBLIOGRAFÍA

Anukam, A., Mohammadi, A., Naqvi, M., & Granström, K. (2019). A Review of the Chemistry of Anaerobic Digestion: Methods of Accelerating and Optimizing Process Efficiency. *Processes*, 7(8), Art. 8.

Atasoy, M., Owusu-Agyeman, I., Plaza, E., & Cetecioglu, Z. (2018). Bio-based volatile fatty acid production and recovery from waste streams: Current status and future challenges. *Bioresource Technology*, 268, 773–786.

Bajpai, P. (2017). Basics of Anaerobic Digestion Process. En *Anaerobic Technology in Pulp and Paper Industry* (pp. 7–12). Springer.

Bigarelli Ferreira, M., Vetroni Barros, M., Ramos Huarachi, D. A., & Moro Piekarski, C. (2019). *Biogás en la agroindustria y sus oportunidades para la Economía Circular*.

Dahiya, S., Sarkar, O., Swamy, Y. V., & Venkata Mohan, S. (2015). Acidogenic fermentation of food waste for volatile fatty acid production with co-generation of biohydrogen. *Bioresource Technology*, 182, 103–113.

Gameiro, T., Lopes, M., Marinho, R., Vergine, P., Nadais, H., & Capela, I. (2016). Hydrolytic-Acidogenic Fermentation of Organic Solid Waste for Volatile Fatty Acids Production at Different Solids Concentrations and Alkalinity Addition. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(10), 391.

González E, G., Roeckel vonB, M., Sanhueza M, V., Vargas A., D., & Aspé L., E. (2005). Medición de ácidos grasos volátiles mediante la degradación anaerobia de un vertido salino. *Journal of chemical technology and biotechnology*, 6(1), 1–5.

Jiang, J., Zhang, Y., Li, K., Wang, Q., Gong, C., & Li, M. (2013). Volatile fatty acids production from food waste: Effects of pH, temperature, and organic loading rate. *Bioresource Technology*, 143, 525–530.

Khan, M. A., Ngo, H. H., Guo, W. S., Liu, Y., Nghiem, L. D.,

Hai, F. I., Deng, L. J., Wang, J., & Wu, Y. (2016). Optimization of process parameters for production of volatile fatty acid, biohydrogen and methane from anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 219, 738–748.

Lee, W. S., Chua, A. S. M., Yeoh, H. K., & Nghoh, G. C. (2014). A review of the production and applications of waste-derived volatile fatty acids. *Chemical Engineering Journal*, 235, 83–99.

Lim, S.-J., Kim, B. J., Jeong, C.-M., Choi, J., Ahn, Y. H., & Chang, H. N. (2008). Anaerobic organic acid production of food waste in once-a-day feeding and drawing-off bioreactor. *Bioresource Technology*, 99(16), 7866–7874.

Longo, S., Katsou, E., Malamis, S., Frison, N., Renzi, D., & Fatone, F. (2015). Recovery of volatile fatty acids from fermentation of sewage sludge in municipal wastewater treatment plants. *Bioresource Technology*, 175, 436–444.

Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 34(1), 35–48.

Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(10), Art. 10.

Parra-Ortiz, D. L., Botero-Londoño, M. A., & Botero-Londoño, J. M. (2019). Biomasa residual pecuaria: Revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *Revista UIS Ingenierías*, 18(1), Art. 1.

Pena Lema, J. (2021). Estudio bibliográfico sobre la codigestión de lodo de depuradora con residuos orgánicos para la producción de ácidos grasos volátiles. *Universidade da Coruña*.

Poveda Londoño, G. (2021). Revisión sistemática de metodologías de extracción, cuantificación y parámetros operativos en la digestión anaerobia para la obtención de ácidos grasos en la fase acidogénica a partir de residuos orgánicos y/o lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Universidad Católica de Manizales*.

Scoma, A., Varela-Corredor, F., Bertin, L., Gostoli, C., & Bandini, S. (2016). Recovery of VFAs from anaerobic digestion of dephenolized Olive Mill Wastewaters by Electrodialysis. *Separation and Purification Technology*, 159, 81–91.

Stein, U. H., Wimmer, B., Ortner, M., Fuchs, W., & Bochmann, G. (2017). Maximizing the production of butyric acid from food waste as a precursor for ABE-fermentation. *Science of The Total Environment*, 598, 993–1000.

Triviño Pineda, J. S. T., Yolanda Reyes, C., & Sánchez Ramírez, J. E. S. (2021). Subproductos generados en el tratamiento y valorización de residuos sólidos urbanos dentro del concepto de biorrefinería: Una revisión sistemática. *Ingeniería y Región*, 25, 60–74.

Wang, K., Yin, J., Shen, D., & Li, N. (2014). Anaerobic digestion of food waste for volatile fatty acids (VFAs) production with different types of inoculum: Effect of pH. *Bioresource Technology*, 161, 395–401.

Wu, Q.-L., Guo, W.-Q., Zheng, H.-S., Luo, H.-C., Feng, X.-C., Yin, R.-L., & Ren, N.-Q. (2016). Enhancement of volatile fatty acid production by co-fermentation of food waste and excess sludge without pH control: The mechanism and microbial community analyses. *Bioresource Technology*, 216, 653–660.

Zacharof, M.-P., & Lovitt, R. W. (2013). Complex Effluent Streams as a Potential Source of Volatile Fatty Acids. *Waste and Biomass Valorization*, 4(3), 557–581.





UNA REVISIÓN DE LA GENERACIÓN DE BIOETANOL CON PASTOS C₄

José Agustín Pacheco-Ortiz*, Andrés Castro-Sierra, Ana Rosa Sánchez-Camarillo, María Myrna Solís-Oba
Instituto Politécnico Nacional, CIBA Tlaxcala. Ex-Hacienda San Juan Molino, Carretera Estatal
Tecuexcomac-Tepetitla Km. 1.5, C.P. 90700. Tlaxcala, México.

*Autor para correspondencia: jpachecoo1902@alumno.ipn.mx

RESUMEN

El desarrollo de la biotecnología en la producción de biocombustibles ha empleado distintas materias primas, éstas se han clasificado en generaciones, destacando los de primera generación, donde se utilizaron los granos de maíz, de sorgo, el almidón de trigo, la caña de azúcar; de los cuales se alcanzan rendimientos promedio de 4,500 litros de bioetanol por hectárea. Dado que estos cultivos son empleados para la alimentación, se ha buscado otro tipo de materia prima, surgiendo la segunda generación, consistente en el uso de los residuos agroindustriales y plantas lignocelulósicas, como son las usadas para forrajes. Como ejemplo de ellas, en el presente trabajo se hace una revisión del uso de los pastos C4, los cuales se nombran así debido a que, gracias a su mecanismo fotosintético, pueden desarrollarse en climas cálidos y con poca humedad reduciendo la fotorrespiración en el proceso de fijación de CO₂. Algunos ejemplos de estos pastos o gramíneas son el pasto varilla y pasto de Napier, los cuales producen 4,200 litros de bioetanol por hectárea. Estas plantas se caracterizan por alta producción de biomasa en tallos y hojas, lo que repercute en varios factores bióticos y abióticos como, por ejemplo, el crecimiento de las plantas, los componentes de la pared celular celulosa, hemicelulosa, lignina. También en el presente trabajo se hace una revisión de las técnicas para la extracción de azúcares más simples para el proceso de fermentación para la producción de bioetanol.

Palabras clave: Biocombustible, bioetanol, materia prima, pasto.

ABSTRACT

The development of biotechnology in the production of biofuels has used different raw materials, these have been classified into generations, highlighting the first generation, where grains of corn, sorghum, wheat starch, sugar cane were used; of which average yields of 4,500 liters of bioethanol per hectare are achieved. Since these crops are used for food, another type of raw material has been sought, emerging the second generation, consisting of the use of agro-industrial residues and lignocellulosic plants, such as those used for fodder. As an example of them, this paper reviews the use of C4 grasses, which are so named because their photosynthetic mechanism, they can develop in warm climates with low humidity, reducing photorespiration in the process CO₂ fixation. Some examples of these grasses are switchgrass and Napier grass, which produce 4,200 liters of bioethanol per hectare. These plants are characterized by high biomass production in stems and leaves, which affects several biotic and abiotic factors such as plant growth, cell wall components cellulose, hemicellulose, lignin. Also, in the present work a review of the techniques for the extraction of simpler sugars for the fermentation process for the

production of bioethanol is made.

Keywords: Biofuel, bioethanol, feedstocks, grass.

I. INTRODUCCIÓN

Las plantas son consideradas como el recurso natural renovable más abundante del planeta, esto se debe a los hábitos de crecimiento y a los componentes estructurales de las plantas, donde tan solo el 2% es utilizado por el hombre (Pauly y Keegstra 2008). Distintas especies vegetales han sido empleadas para la producción de bioetanol, por la alta cantidad de biomasa que estas generan (Byrt *et al.*, 2011). Sin embargo, las primeras plantas que se han empleado para la producción de bioetanol han sido de uso alimenticio, como el maíz, la caña de azúcar, el trigo, etcétera que contienen azúcares disponibles, fácilmente fermentables, por ejemplo, la glucosa, fructosa entre otras (Heaton *et al.*, 2008; Byrt *et al.*, 2011), el uso de estas plantas para la producción de bioetanol se clasificó como de primera generación (Cortés-Sánchez *et al.*, 2019). Estas plantas al ser de consumo para el hombre no son una alternativa viable para la obtención de biocombustibles, por lo que se buscaron otras alternativas al uso de plantas comestibles, tal es el caso de los residuos agroindustriales, así como plantas lignocelulósicas. Algunas de estas plantas son pastos que son clasificados como gramíneas, un tipo de dichos pastos es el C4 que, debido a su gran crecimiento y la capacidad de generar grandes cantidades de biomasa se han posicionado como objeto de estudio para la obtención de bioetanol (Li *et al.*, 2015; Rueda *et al.*, 2016; Cortés-Sánchez *et al.*, 2019).

Las gramíneas C4 como la caña de azúcar, el maíz, el bambú, el pasto elefante, presentan rigidez estructural de la pared celular, debido a que ésta se encuentra compuesta por celulosa, hemicelulosa, lignina y calosa, características que le permiten presentar un crecimiento erecto. Es por lo que estas gramíneas poseen también rendimientos promedio por arriba de 80 toneladas por hectárea por lo que ha sido posible emplearlas como alimento, construcción y producción de bioetanol (Somerville *et al.*, 2010).

Uno de los principales problemas a enfrentar es la fuente de azúcares disponibles para la producción de bioetanol. Estos azúcares pueden ser extraídos de la celulosa y la hemicelulosa que forman parte de la estructura de la pared celular de las plantas, pero el proceso de extracción es complejo. La producción de etanol, también se ve afectada por la formación de compuestos inhibidores como el furfural, el hidroximetilfurfural (HMF) y el ácido acético provenientes de los pretratamientos de los residuos y del material lignocelulósico y limita la capacidad de las levaduras en este caso de *Saccharomyces cerevisiae* de producir alcohol (Byrt *et al.*, 2011).

2. GENERACIONES EN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

La biomasa es considerada como una de las fuentes más importantes para la producción de bioetanol, los desarrollos se han dividido en cuatro generaciones, a su vez divididas según la materia prima de donde se obtienen los azúcares fermentables; por ejemplo, de la celulosa se obtiene la glucosa y de la hemicelulosa se obtienen la manosa, pentosa, galactosa, dichos azúcares (FAO, 2002) posteriormente durante la fermentación son transformadas en alcohol.

Para la producción de bioetanol se clasifican en:

Primera generación: Proviene del procesamiento de la biomasa de vegetales de uso alimentario; también pueden provenir de fuentes ricas en carbohidratos como son la sacarosa o el almidón (Cortés-Sánchez et al., 2019; Salinas y Gasca 2009), se han reportado principalmente en países como Estados Unidos y Brasil mayormente el uso de cultivos como la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y el maíz (*Zea mays*) y en Europa la remolacha azucarera (Heaton et al., 2008; Byrt et al., 2011).

Estudios reportan que se obtienen de 1,100 a 4,200 L ha⁻¹ de etanol a partir de la azúcar producida del cultivo de maíz (Balat y Balat 2009; Lee y Bressan 2006); de 1,000 a 1,700 L ha⁻¹ de etanol de un cultivo de trigo (Balat y Balat 2009); de 3,000-5,000 L ha⁻¹ de etanol a partir de cultivo de sorgo o caña de azúcar; esta última es la que mayor producción de bioetanol genera (Almodares y Hadi 2009).

Segunda generación: A diferencia de los biocombustibles de primera generación, la biomasa es obtenida de residuos agrícolas, cultivos leñosos y materiales que ya cumplieron con un propósito alimentario (Byrt et al., 2011). Se han empleado recursos maderables como el álamo, las cortezas de pino e inclusive algunos cultivos de pastos, principalmente de tipo C4 como el pasto varilla, pasto de Napier, pasto elefante, e inclusive rastrojos como el de maíz, arroz, trigo por mencionar algunos (Bouton 2007; Schmer et al., 2008; Li et al., 2015; Rueda et al., 2016).

Tercera generación: Se han empleado algas para la producción de biocombustibles. La biomasa de las algas se ha empleado como fuente para la producción de bioetanol, por medio de la fermentación alcohólica, y biodiesel, por la cantidad de ácidos grasos insaturados, monoinsaturados, polinsaturados y saturados que se contienen en estos organismos (Machado 2010; Maciel 2009; Sivaramkrishnan y Incharoensakdi 2018).

Cuarta generación: Involucra al uso de microorganismos modificados genéticamente para la producción de grandes cantidades biomasa, la cual es empleada en el proceso para la obtención de bioetanol utilizando como materia prima los sustratos de las dos primeras generaciones (Fernández et

al., 2012; Huang et al., 2016; Maciel 2009).

3. FACTORES QUE LIMITAN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

Para cada una de las diferentes generaciones en la producción de bioetanol, ha representado un reto el poder obtener alcohol. Algunas de las limitaciones que se encuentran se describen a continuación.

Uno de los problemas que tiene la primera generación es emplear como materia prima cultivos que son empleados para consumo humano, por lo que esto puede provocar el incremento en los precios de los productos derivados de estos cultivos, por ejemplo, las tortillas, azúcar, harina que provienen de los cultivos del maíz, la caña de azúcar y el trigo (Cortés-Sánchez et al., 2019; Salinas y Gasca 2009).

Los combustibles de segunda generación surgieron con la finalidad de evitar el uso de plantas de consumo humano, es decir, empleando plantas y residuos orgánicos no comestibles para generar biocombustible. Sin embargo, uno de los principales problemas al que se enfrenta al emplear estos consumibles es la degradación de los compuestos lignocelulósicos, los cuales son polisacáridos complejos y requieren de un pretratamiento antes del proceso de fermentación para que los microorganismos puedan asimilar los azúcares disponibles en este tipo de residuos.

De manera general, para obtener azúcares a partir de la pared celular de las plantas, se emplean procesos mecánicos, térmicos, fisicoquímicos, químicos y biológicos (Cortés-Sánchez et al., 2019). Entre los pretratamientos se encuentran los físicos que son tratamientos de molienda y/o de ultrasonido; los tratamientos químicos se llevan a cabo mediante la hidrólisis ya sea ácida o alcalina, los enzimáticos que involucran el uso de enzimas para romper las estructuras celulares, también se encuentran los fisicoquímicos como la explosión de vapor, vapor de agua, explosión de CO₂ y finalmente los biológicos en los que participan microorganismos principalmente hongos. El tipo de pretratamiento a emplear depende fundamentalmente de la materia prima a ocupar, ya sean maderas duras o blandas e inclusive el tipo de residuo si hablamos de bagazo o rastrojo, para que se puedan efectuar el rompimiento de las estructuras lignocelulósicas (Cortés-Sánchez et al., 2019; Machado 2010; Salinas y Gasca 2009). Una vez obtenidos esos azúcares, éstos pueden ser empleados como sustrato, para comenzar el proceso de fermentación por microorganismos como levaduras, que aprovechan los azúcares para transformarlos en bioetanol (Chuck-Hernández et al., 2011; Cortés-Sánchez et al., 2019).

En el caso de los biocombustibles de cuarta generación aún se encuentran en vías de desarrollo y llegan a ser costosos por el empleo de organismos modificados como

son bacterias, hongos y algas que mediante la inserción de algunos genes hacen a los microorganismos secretar enzimas que dividen a las moléculas complejas en más simples. Algunos ejemplos de estas enzimas son celulasas, las cuales hidrolizan la celulosa o las enzimas lacasas que pueden hidrolizar la lignina (Fernández et al., 2012; Maciel 2009). Adicionalmente enfrentan las restricciones mundiales por el uso de organismos genéticamente modificados.

4. GRAMÍNEAS EMPLEADAS PARA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

Gran parte de la tierra está cubierta por plantas, donde los pastos representan más del 40%, por lo que los pastos son una alternativa para ser empleados para la obtención de bioetanol. Se han estudiado a las gramíneas por diversas razones, entre ellas, por su capacidad de adaptación a distintos tipos de climas tanto templados como cálidos, además de su alta producción de biomasa de hasta 50 a 100 toneladas por hectárea y por su bajo costo de producción, aproximadamente 5,040 pesos mexicanos por hectárea; por lo que se han considerado como una de las fuentes principales para la extracción de etanol usando cultivos no usados para consumo humano.

Las gramíneas o pastos se han empleado como fuentes para la producción de bioetanol por la cantidad de biomasa que estas generan. Los pastos se clasifican en pastos templados con una ruta fotosintética C3, las cuales tienen la característica de producir una baja cantidad de biomasa y alto contenido de proteína y alta digestibilidad, siendo considerados muy nutritivos por lo que son empleados como forraje. Por otro lado, los pastos tropicales C4 tienen una mayor cantidad de biomasa, pero un menor contenido nutrimental, por lo que han sido empleados para la generación de bioetanol con especies de alto porte como pasto varilla, pasto de Napier, pasto elefante (Bouton 2007; Schmer et al., 2008; Li et al., 2015; Rueda et al., 2016).

En pastos C4, Li et al., (2015) y Rueda et al., (2016) señalan que los pastos perennes cultivados durante diferentes temporadas muestran rendimientos diferenciales dependiendo de la época del año. Li et al., (2015) evaluaron 5 cultivares de pasto elefante para la conversión enzimática de celulosa con Cellic CTec2, la cual fue mayor en agosto y septiembre tuvieron una conversión de celulosa de 70-90% y en los tratamientos a las plantas cultivadas en octubre de 50 hasta 70%. Para la producción de alcohol a partir de los cultivos de gramíneas se han aplicado varios pretratamientos incluyendo métodos de hidrólisis enzimática (Bouton 2007; Schmer et al., 2008; Scholl et al., 2015; Nagula & Pandit, 2016). Por otra parte, Rueda et al., (2016) menciona que las distintas variedades de *Cenchrus purpureus*, mostraron un mayor rendimiento de materia seca de 38 toneladas por hectárea en el segundo año, en el año uno fue de 21 ton

ha-1 y en el año tres de 32 ton ha-1; además, las variedades African Cane, King Grass, Vruckwona registraron mayor contenido de fibra. African Cane y Vruckwona presentaron una mayor cantidad de celulosa. African Cane, King Grass un mayor contenido de hemicelulosa.

Algunos autores como Scholl et al., (2015) para recuperación de los componentes de la pared celular (lignina, celulosa y hemicelulosa) en pasto elefante emplearon explosión de vapor a 190°C por 8 y 6 minutos, registraron cambios en la estructura lignocelulósica y posteriormente utilizaron enzimas lacas y celulasas. Nagula & Pandit (2016) emplearon el método de pretratamiento con lacasa y ultrasonido para la deslignificación del pasto Napier, comparado con el pretratamiento de solo lacasa, el resultado fue un 25% mejor con el tratamiento combinado ultrasonido-lacasa a una frecuencia de 24 kHz, 100 W deslignificando un 75% reduciendo el tiempo de 16 a 6 horas aplicando solo lacasa. Otro estudio muestra que la acción combinada de enzimas mixtas de tipo oxidasas e hidrolasas permitieron reducir el tiempo de degradación de la materia prima lignocelulósica en el pasto Kans (Rajak & Banerjee 2020).

5. CONCLUSIONES

Se han empleado distintas materias primas para la producción de biocombustibles, entre ellas los pastos C4, pero es menester utilizar distintos métodos para la obtención de azúcares fermentables para producción de bioetanol; como son los pretratamientos fisicoquímicos, físicos, químicos y enzimáticos y a su vez, estos se pueden combinar para optimizar la obtención de azúcares de la biomasa y la evaluación de la viabilidad de la producción de bioetanol. Por ende, se debe seguir estudiando cada una de las distintas tecnologías para mejorar la obtención de fuentes de energía sustentable. La combinación de estas técnicas podría dar pauta a incrementar los rendimientos, se ha reportado hasta un 25% más con tratamientos combinados, por ejemplo, de ultrasonido y lacasa de los materiales lignocelulósicos en la producción de bioetanol.

6. REFERENCIAS

- Almodares A, Hadi MR (2009) Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. *Afr J Agric. Res* 4: 772– 780.
- Balat M, Balat H (2009) Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Appl Energ* 86: 2273– 2282.
- Byrt CS, Grof CP, Furbank RT (2011) C4 plants as biofuel feedstocks: optimising biomass production and feedstock quality from a lignocellulosic perspective. *J Integr Plant Biol* 53:120-35.
- Chuck-Hernández C, Pérez-Carrillo E, Heredia-Olea E, Serna-Saldívar, SO (2011) Sorgo como un cultivo

multifacético para la producción de bioetanol en México: Tecnologías, avances y áreas de oportunidad. *Revista mexicana de ingeniería química* 10: 529-549.

Cortés-Sánchez MD, Gata-Montero EM, Pipió-Ternero A, Rodríguez-Rivas Á, Sánchez-Santos JM (2019) Biocombustibles: tipos y estrategias de producción. *Maestría en Biotecnología ambiental, industrial y alimentaria. Universidad Pablo de Olavide MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide* No 35.

FAO, (2002) *Nutrición Humana en el Mundo en Desarrollo. Colección FAO: Alimentación y nutrición* N° 29. *Macronutrientes: carbohidratos, grasas y proteínas. Capítulo 9.*

Heaton EA, Flavell RB, Mascia PN, Thomas SR, Dohleman FG, Long, SP (2008) *Herbaceous energy crop development: recent progress and future prospects. Curr Opin Biotechnol* 19:202-9.

Lee TSG, Bressan EA, (2006) *The potential of ethanol production from sugarcane in Brazil. Sugar Tech.* 8(4), 195–198.

Li Y, Zhang Y, Zheng H, Jian D, Zhang H, Wu J, Huang H (2015) *Preliminary evaluation of five elephant grass cultivars harvested at different time for sugar production. Chinese Journal of Chemical Engineering* 23: 1188-1193.

Machado CM (2010) *Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe. Organización Latinoamericana de Energía Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura* 437:104.

Maciel CA (2009) *Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. Economía Informa UNAM* No 359.

Nagula KN, Pandit AB (2016). *Process intensification of delignification and enzymatic hydrolysis of delignified cellulosic biomass using various process intensification techniques including cavitation. Bioresource technology* 213: 162-168.

Pauly, M., Keegstra, K. (2008) *Cell-wall carbohydrates and their modification as a resource for biofuels. Plant J* 54:559-68.

Rajak RC, Banerjee R (2020) *An innovative approach of mixed enzymatic venture for 2G ethanol production from lignocellulosic feedstock. Energy Conversion and Management* 207:112504.

Rueda JA, Jimenez EO, Hernández-Garay A, Enríquez-Quiroz JF, Guerrero-Rodríguez JD, Quero-Carrillo AR 2016. *Growth, yield, fiber content and lodging resistance in eight varieties of Cenchrus purpureus (Schumach.) Morrone intended as energy crop. Biomass and Bioenergy* 88:59-65.

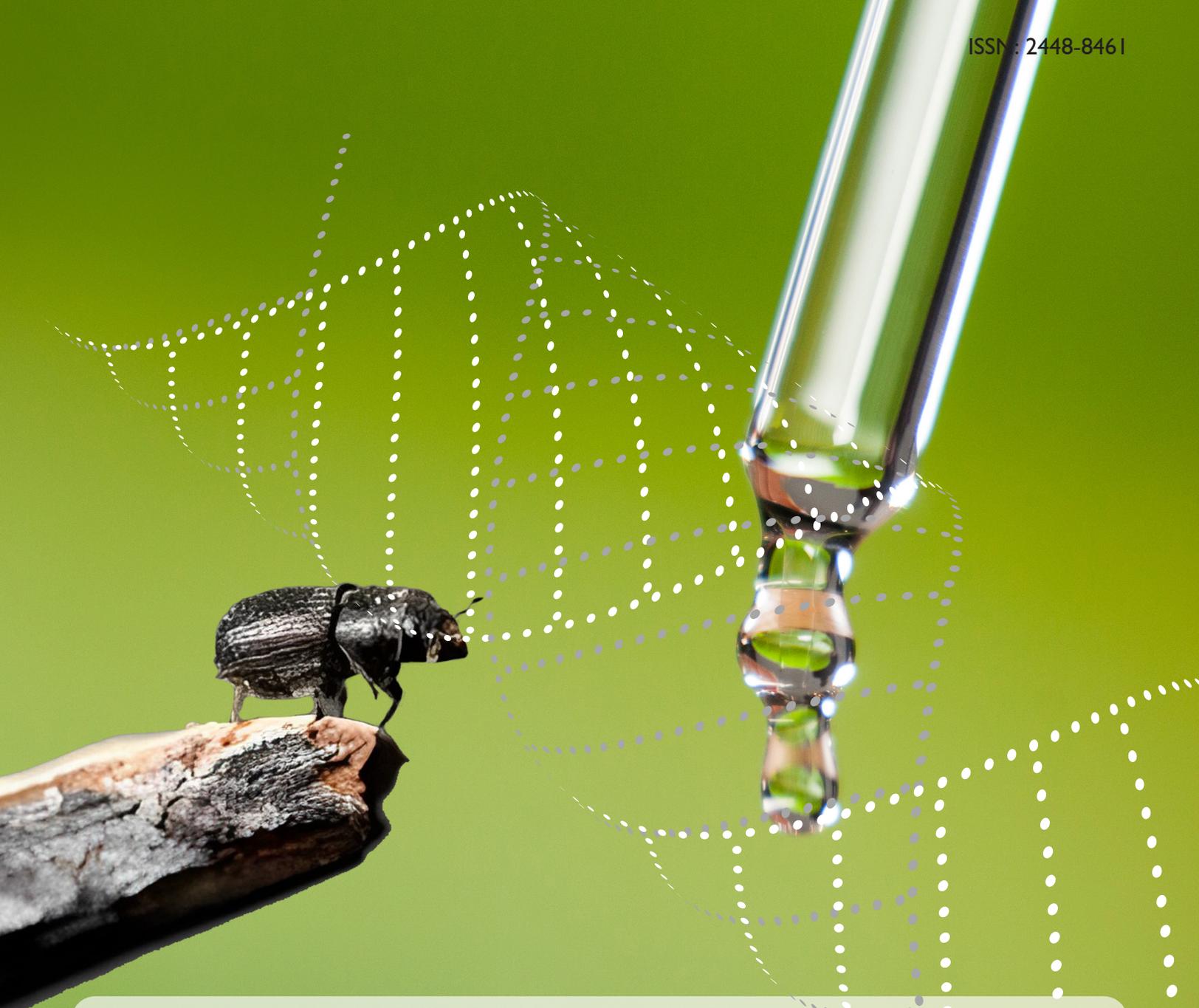
Salinas CE, Gasca QV (2009). *Los biocombustibles. El Cotidiano* 157:75-82.

Schmer MR, Vogel KP, Mitchell RB, Perrin RK (2008). *Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. Proc Natl Acad Sci USA* 15:464-469.

Scholl AL, Menegol D, Pitarelo AP, Fontana RC, Filho AZ, Ramos LP, Dillon AJP, Camassola M (2015). *Elephant grass (Pennisetum purpureum Schum.) pretreated via steam explosion as a carbon source for cellulases and xylanases in submerged cultivation. Industrial Crops and Products* 70: 280-291.

Sivaramakrishnan R, Incharoensakdi A 2018. *Utilization of microalgae feedstock for concomitant production of bioethanol and biodiesel. Fuel* 217: 458-466.





ACEITES ESENCIALES ¿UNA ALTERNATIVA PARA EL CONTROL DEL ESCARABAJO DESCORTEZADOR?

Luis Mario Ayala-Guerrero, Daniel Jafet Valle-Ortíz, Brandon Hernández-Gutiérrez, Dolores Guadalupe Aguilar-Muñoz, Fabiola Eloísa Jiménez-Montejo, María del Carmen Cruz-López, Aarón Mendieta-Moctezuma

Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Instituto Politécnico Nacional. Carretera Estatal Santa Inés Tecuexcomac-Tepetitla, Km 1.5, Tepetitla de Lardizábal, 90700, Tlaxcala, México.
Correo electrónico: luis.marioni.a@gmail.com, mendietam@ipn.mx

RESUMEN

Los insectos descortezadores son una plaga de importancia nacional en México, siendo el segundo agente de mayor disturbio en bosques de clima templado. Los principales brotes de descortezadores se han presentado en la Faja Volcánica Transmexicana, zona con una amplia diversidad de especies de *Pinus*, tales como *Pinus leiophylla*, *Pinus oo-carpa*, *Pinus montezumae* y *Pinus hartwegii*, las cuales son especies susceptibles al ataque de este insecto. El método más común para controlar los brotes de escarabajos descortezadores es mediante el uso de insecticidas sintéticos de amplio espectro llamados piretroides, los cuales pueden acumularse en el suelo y alcanzar los depósitos de agua a través de la escorrentía, afectando a otros organismos. La búsqueda de compuestos naturales para el control biológico de plagas se ha enfocado en explorar alternativas que representen un menor riesgo para los humanos y el ambiente. Los aceites esenciales (AE) cuentan con el potencial para controlar este tipo de plagas, ya que son sustancias de origen vegetal cuyas mezclas de metabolitos secundarios volátiles forman parte de la defensa química de las plantas al poseer actividad insecticida.

ABSTRACT

Barking insects are a pest of national importance in Mexico, being the second most disturbing agent in temperate climate forests. The main outbreaks of bark beetles have occurred in the Faja Volcánica Transmexicana, an area with a wide diversity of *Pinus* species, such as *Pinus leiophylla*, *Pinus oocarpa*, *Pinus montezumae* and *Pinus hartwegii*, which are species susceptible to attack by this insect. The most common method of controlling bark beetle outbreaks is through the use of broad-spectrum synthetic insecticides called pyrethroids, which can accumulate in the soil and reach water bodies through run-off, affecting other organisms. The search for natural compounds for the biological control of pests has focused on exploring alternatives that represent less risk to humans and the environment. Essential oils (EO) have the potential to control this type of pest, since they are substances of plant origin whose volatile secondary metabolite mixtures are part of the chemical defense of plants, as they have insecticidal activity.

Palabras clave: *Dendroctonus* sp., aceites esenciales, actividad biológica, inhibición de acetilcolinesterasa.

Keywords: *Dendroctonus* sp., essential oils, biological activity, acetylcholinesterase inhibition.

México, ya que se encuentran en el 75 % de la superficie del país y son un recurso forestal de gran valor ecológico y económico, debido a los servicios ambientales y productos que ofrecen, tales como madera, celulosa, resina, carbón vegetal, entre otros (López y Flores 2020). México es un centro secundario de diversificación del género *Pinus*, con 49 (40 %) de las aproximadamente 120 especies en el mundo (Gernandt y Pérez 2014). Las afectaciones a estos bosques pueden ser antropogénicas o naturales, estas últimas incluyen incendios, sequías, especies invasoras, plagas y enfermedades forestales (Dale et al. 2001). Los escarabajos descortezadores del género *Dendroctonus* juegan un papel fundamental en la estructura de los bosques de coníferas, ya que colonizan y matan árboles enfermos, dañados y debilitados, contribuyendo a la sucesión de la población, al ciclo de nutrientes y al adelgazamiento del dosel (Raffa et al. 2015). En México, el 40.5 % de los reportes de fitopatógenos en bosques de coníferas están relacionados con descortezadores del género *Dendroctonus*, los cuales afectaron 69,000 hectáreas (ha) entre 1990 y 2014 (Sosa Díaz et al. 2018). Para el año 2021 la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) reportó una superficie afectada de 52,164.37 ha, de las cuales 13,840.46 ha correspondieron a disturbios causados por insectos descortezadores (Tabla 1).

Tabla 1. Superficie afectada (ha) por descortezadores en 2021.

Estado	Superficie afectada (ha)	Volumen (m ³)	Porcentaje*
Oaxaca	1,968	286,276	14.22
Tlaxcala	1,591	85,420	11.49
Ciudad de México	86	3,549	0.62
Michoacán y Estado de México (RB Mariposa Monarca)	147	22,018	1.06

*Porcentaje de afectación con respecto al total afectado a nivel nacional por insectos descortezadores: 13,840.46 ha. Fuente: Coordinación General de Conservación y Restauración; Gerencia de Sanidad Forestal de la CONAFOR 2021.

La Norma Oficial Mexicana NOM-019-SEMARNAT-2017 establece los lineamientos técnicos para la prevención, combate y control de insectos descortezadores. En esta norma se contempla la aplicación de sustancias químicas insecticidas mediante aspersión o fumigación, sin embargo, el uso generalizado de insecticidas sintéticos ha generado serias preocupaciones respecto a la resistencia de los insectos, residuos generados y el impacto negativo al ambiente. Como consecuencia, el desarrollo de insecticidas naturales y no persistentes es prioritario. Los AE cuentan con propiedades ecotoxicológicas favorables, que incluyen baja toxicidad para los humanos, biodegradabilidad y menor impacto ambiental (Azeem et al. 2022). Por lo que este tipo de compuestos pueden ser efectivos en el control de plagas debido a sus propiedades fumigantes, repelentes y antialimentarias (Isman et al. 2019).

1. INTRODUCCIÓN

Las especies del género *Pinus* son uno de los componentes vegetales más importantes en los bosques templados de

II. ESCARABAJO DESCORTEZADOR

Los escarabajos descortezadores que integran los géneros *Dendroctonus*, *Ips*, *Pseudips*, *Orthotomicus*, *Pityophthorus*, *Pseudopityophthorus*, *Phloeosinus*, *Scolytus*, entre otros, son un grupo diverso de insectos con distribución a nivel mundial. La mayoría de las especies de escarabajos descortezadores atacan árboles debilitados por la edad, sequía, fuego, enfermedades o daño mecánico, por lo que generalmente el ciclo reproductivo de estos insectos se lleva a cabo en árboles muertos, desempeñando funciones primordiales en la dinámica de los bosques templados. Sin embargo, algunas especies pueden atacar en forma masiva árboles vivos y aparentemente sanos, lo cual provoca pérdidas económicas de gran magnitud para los productores. Los árboles objetivo pueden ser atacados en diferentes estructuras como la raíz o el tronco principal, pudiendo afectar hospederos en distintas etapas de desarrollo, tanto a renuevos como a árboles adultos (Figura 1).

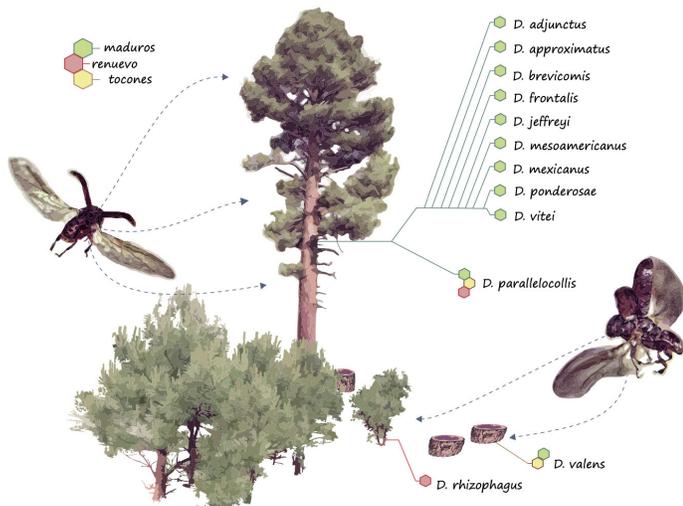


Figura 1. Preferencias de colonización de las especies de *Dendroctonus* que habitan México y Centroamérica. Árboles mayores a 3 metros de altura, renuevos y tocones (Armendáriz-Toledano et al., 2018).

Las especies del género *Dendroctonus*, son los agentes que causan el mayor daño a los bosques de coníferas de alto valor comercial como *Pinus* sp., *Abies* sp. y *Picea* sp. en el hemisferio norte. Estos daños se miden en términos económicos de acuerdo a la superficie afectada por los insectos, la tasa de mortalidad de los hospederos y el impacto económico en la población dependiente de los recursos forestales (Morris et al. 2017).

Los insectos descortezadores pasan la mayor parte de su vida dentro de su planta huésped o en sitios de hibernación. Su ciclo de vida se puede dividir en tres fases principales: la fase de dispersión, la fase de colonización y la fase de desarrollo. Durante la fase de dispersión, la nueva generación emerge del árbol atacado o del sitio de hibernación y vuela hacia un nuevo árbol. La fase de colonización incluye la selección del huésped y la perforación de la corteza. La colonización de árboles comienza cuando un escarabajo aterriza y penetra

la corteza de un árbol que aún no ha sido atacado. Estos escarabajos llamados pioneros deben evaluar la capacidad de defensa y la calidad nutrimental del árbol. Dentro de la corteza, los pioneros emiten feromonas que atraen a más insectos, este proceso es conocido como atracción secundaria. La fase de desarrollo ocurre dentro de la corteza e incluye el apareamiento, la construcción de galerías, la oviposición y el desarrollo de las crías. La capacidad de los escarabajos para matar árboles relativamente saludables radica principalmente en la efectividad de las feromonas de agregación que coordinan veloces ataques masivos en árboles hospederos, así como en la asociación de los insectos con organismos simbióticos que pueden ayudar a contrarrestar las defensas de los árboles y así aumentar el impacto de cada ataque (Raffa et al. 2015).

De las 14 especies del género *Dendroctonus* reportadas en México, *Dendroctonus adjunctus*, *Dendroctonus frontalis*, *Dendroctonus mesoamericanus*, *Dendroctonus mexicanus*, *Dendroctonus ponderosae*, *Dendroctonus pseudotsugae* y *Dendroctonus rhizophagus* se consideran las especies más importantes, al encontrarse catalogadas como especies agresivas que pueden tornarse en plagas (Figura 2). Cabe mencionar que *D. mexicanus* y *D. frontalis* pueden llegar a tener hasta 6 y 7 ciclos biológicos anuales respectivamente (Armendáriz et al. 2014).

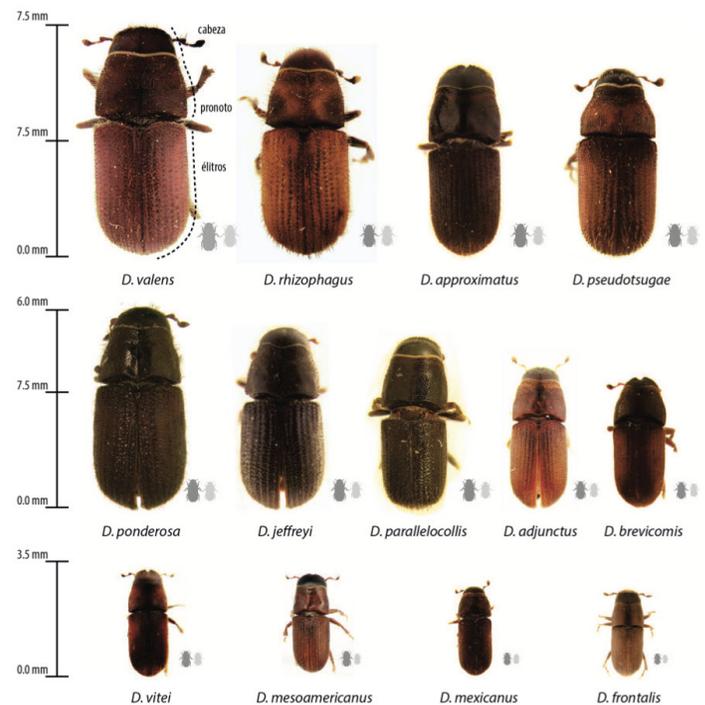


Figura 2. Vista dorsal de las 13 especies de *Dendroctonus* distribuidas en México y Centroamérica (Armendáriz-Toledano et al., 2018).

III. EL CAMBIO CLIMÁTICO: UN ALIADO DEL ESCARABAJO

El clima en el mundo se ha modificado como resultado del aumento en la temperatura promedio global durante

los últimos 100 años. La excesiva acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera está provocando estos cambios. Evidencia de ello es el aumento de 0.87 °C en la temperatura, que se ha registrado en el periodo de 2006 a 2015. De continuar con esta tendencia, se podrían alcanzar los 1.5 °C para el año 2040 (Allen et al. 2018).

La magnitud, frecuencia e intensidad de los brotes de descortezadores puede darse por efectos directos o indirectos del clima. La variación en la temperatura se considera un factor importante en el aumento de la abundancia y en la dinámica poblacional de los descortezadores a lo largo del año (Hart et al. 2014). Con un incremento de 1.6 °C en la temperatura, los descortezadores podrían aumentar el número de generaciones por año, por lo que podrían ampliar su distribución y podrían ubicarse en mayores latitudes y altitudes (Pureswaran et al. 2018).

Cuando los árboles se encuentran sanos y vigorosos, sus mecanismos de defensa generalmente contribuyen a regular las poblaciones de escarabajos descortezadores, manteniendo los niveles bajos y endémicos. Sin embargo, los factores de perturbación bióticos y abióticos pueden estresar a los árboles y aumentar su susceptibilidad al ataque. Las perturbaciones que pueden inducir la susceptibilidad de los árboles y desencadenar brotes de escarabajos descortezadores incluyen sequías severas, daños por tormentas, inundaciones, rayos, defoliación y enfermedades (Raffa et al. 2015), lo cual puede permitir que menos escarabajos sean capaces de atacar, abrumar y matar a los potenciales huéspedes, favoreciendo indirectamente el éxito de la población (Ande-regg et al. 2015). La precipitación es un factor climático muy importante, ya que además de condicionar la susceptibilidad de los árboles para ser atacados, puede interrumpir el ciclo de vida y la supervivencia de los escarabajos descortezadores durante el proceso de dispersión (Raffa et al. 2015). Otro factor importante es el manejo del bosque, ya que las prácticas silvícolas inadecuadas o la falta de éstas en la regulación de la densidad y el área basal, incrementa la competencia por nutrientes y luz, provocando estrés en el arbolado y haciéndolo más susceptible al ataque de plagas (Axelson et al. 2018).

En México, Soto et al. (2019) determinaron que existe una relación entre las variables climáticas como la temperatura e índice de aridez asociados a la altitud, mismas que influyen en la abundancia de escarabajos descortezadores de *Dendroctonus frontalis* en los bosques de pino-encino en la Sierra de Zimapán en el estado de Hidalgo, México.

III. ACTIVIDAD BIOLÓGICA DE ACEITES ESENCIALES

Los métodos para controlar el escarabajo descortezador comprenden el control químico, biológico, físico o una

combinación de estos. En México es frecuente el uso de insecticidas sintéticos como los piretroides, los cuales se emplean para controlar dicha plaga, sin embargo, se ha demostrado que este tipo de insecticidas pueden bioacumularse en mamíferos marinos y humanos (Aznar-Aleman y Eljarrat 2020), esto a pesar de sus ventajas respecto al uso de otros insecticidas químicos como organofosforados. Los productos naturales se caracterizan por tener una gama de propiedades biológicas útiles contra las plagas de insectos. La búsqueda de compuestos de origen natural con potencial para controlar plagas continúa, en un intento por encontrar alternativas que representen menor riesgo para los humanos y el ambiente, en relación a los pesticidas convencionales existentes. Los AE son productos derivados de plantas aromáticas que contienen alrededor de 20 a 60 componentes en diferentes concentraciones. Sus constituyentes más comunes son los terpenos, compuestos aromáticos y alifáticos, especialmente alcoholes, ésteres, éteres, aldehídos, cetonas, lactonas, fenoles y fenoléteres (Bakkali et al. 2008). Los AE se encuentran bajo especial investigación por su amplio espectro de propiedades para el control de plagas, pues se ha demostrado que poseen actividad insecticida (Odeyemi et al. 2008). Las investigaciones se han enfocado en evaluar efecto insecticida de los AE sobre plagas de interés agroindustrial como *Sitophilus zeamais*, *Plodia interpunctella*, *Sitophilus oryzae* y *Tribolium castaneum*. Sin embargo, actualmente existe interés en evaluar la actividad insecticida de los terpenos contenidos en los AE respecto a los escarabajos descortezadores (Tabla 2). Gokturk et al. (2011) reportaron la eficacia de los AE de *Artemisa spicigera*, *Helichrysum plicatum*, *Mentha longifolia*, *Origanum acutidens*, *Rosmarinus officinalis* y *Salvia multicaulis* con hasta un 73.3 % de mortalidad en larvas de *Dendroctonus micans*.

Tabla 2. Efecto inhibitorio de terpenos respecto a acetilcolinesterasa en ensayos in vitro.

Compuesto	IC ₅₀ (µM)
β-Linalol	150.47 ± 0.001
1,8-Cineol	2.27 ± 0.13
Eugenol	40.32 ± 2.44
Alcanfor	21.43 ± 1.77

Los resultados se expresan como media ± error estándar, (n=3).
Fuente: Farag et al., 2016.

Por su parte, Mudrončková et al. (2018) reportaron el efecto de los AE de *Origanum vulgare*, *Thymus vulgaris* y *Pimpinella anisum* sobre *Ips typographus*, obteniendo niveles de mortalidad de 99, 98 y 78 % respectivamente. Es evidente que este tipo de compuestos de origen vegetal cuentan con potencial para el desarrollo de nuevos agentes para el control de insectos descortezadores. La formulación, evaluación y aplicación de AE como insecticida en los procesos de saneamiento forestal, puede representar una estrategia que permita reemplazar o reducir el uso de insecticidas sintéticos y sus consecuentes afectaciones al

ambiente (Figura 3). La actividad insecticida de los AE se lleva a cabo mediante una alteración al sistema colinérgico del insecto, a través de la inhibición de las enzimas acetilcolinesterasa (AChE) y butirilcolinesterasa (BChE) (López y Pascual-Villalobos 2010); aunque existen otros mecanismos de acción tales como efectos sobre el ácido gamma aminobutírico (GABA), sistemas mitocondriales, octopaminérgicos y al-teraciones hormonales (Rattan 2010).

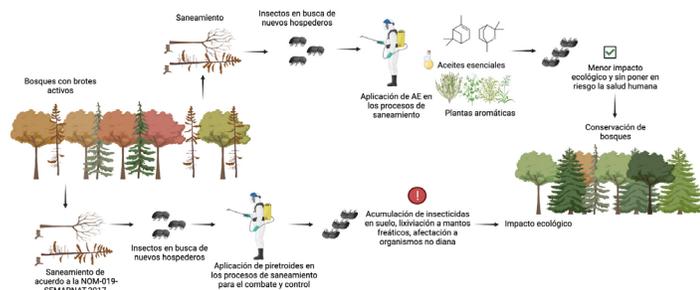


Figura 3. Propuesta de aplicación de aceites esenciales en el combate y control de *Dendroctonus* en el proceso de saneamiento.

IV. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Los insectos descortezadores son fundamentales en la estructura y dinámica de los bosques templados, sin embargo, la capacidad de algunas especies del género *Dendroctonus* para atacar de forma masiva árboles vivos y desarrollar brotes epidémicos, genera que estos insectos tengan una importancia económica y ecológica. Aunque el uso de insecticidas sintéticos para el combate de descortezadores se encuentra respaldado en la NOM-019-SEMARNAT-2017, es primordial desarrollar estrategias para el control de plagas basadas en el uso de derivados de plantas con un menor impacto al ambiente. En este sentido, **los AE pueden representar una opción como potencial agente insecticida frente a especies del género *Dendroctonus***. La aplicación de la fórmula a base del aceite esencial, podría realizarse durante el proceso de saneamiento de brotes activos de acuerdo a la normatividad, remplazando el uso de insecticidas sintéticos después del derribo y descortezado del árbol infestado. **Es importante impulsar investigación aplicada que permita materializar y llevar a campo estas alternativas para atender oportunamente esta problemática.**

V. REFERENCIAS

Allen R, Dube P, Solecki W, Aragón-Durand F, Cramer W, Humphreys S, Kainuma M, Kala J, Mahowald N, Mulugetta Y, Perez R, Wairiu M, Zickfeld K (2018) Framing and Context. In: IPCC (2018) Masson-Delmotte, V. et al (Eds) Global warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and

related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge: Cambridge University Press.

Anderegg L, Hicke A, Fisher A, Allen D, Aukema J, Bentz J (2015) Tree mortality from drought, insects and their interactions in a changing climate. *New Phytologist* 208: 674–683.

Armendáriz-Toledano F, Zúñiga G, García-Román J, Valerio-Mendoza O, García-Navarrete G (2018) Guía ilustrada para identificar a las especies del género *Dendroctonus* presentes en México y Centroamérica. Red Temática de Salud Forestal; Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología; Instituto Politécnico Nacional, México. 114 p.

Armendáriz-Toledano F, Niño A, Sullivan T, Macías S, Víctor J, Clarke R, Zúñiga G (2014) Two species within *Dendroctonus frontalis* (Coleoptera: Curculionidae): evidence from morphological, karyological, molecular, and crossing studies. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 107: 11–27.

Axelsson N, Hawkes C, Van Akker L, Alfaro I (2018) Stand dynamics and the mountain pine beetle - 30 years of forest change in Waterton Lakes National Park, Alberta, Canada. *Can. J. For. Res.* 48(10): 1159–1170.

Azeem M, Zaman T, Abbasi M, Abid M, Mozūratīs R, Alwahibi S, Elshikh S (2022) Pesticidal potential of some wild plant essential oils against grain pests *Tribolium castaneum* (Herbst, 1797) and *Aspergillus flavus* (Link, 1809). *Arab. J. Chem.* 15, 103482.

Aznar-Alemany Ò, Eljarrat E (2020) Bioavailability and bioaccumulation of pyrethroid insecticides in wildlife and humans. In: *The Handbook of Environmental Chemistry*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–21.

Bakkali F, Averbeck S, Averbeck D, Idaomar M (2008) Biological effects of essential oils. A review. *Food Chem. Toxicol.* 2008, 46: 446–475

Bentz B, Régnière J, Fettig J, Hansen M, Hayes L, Hicke A, Kelsey G, Negrón F, Seybold J (2010) Climate change and bark beetles of the western United States and Canada: direct and indirect effects. *BioScience*, 60(8): 602–613

Dale H, Joyce A, McNulty S, Neilson P, Ayres P, Flannigan D, Wotton M (2001) Climate change and forest disturbances: Climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides. *BioScience* 51(9): 723–734

Farag, M, Ezzat S, Salama, M, Tadros M, Serya R (2016) Anti-acetylcholinesterase activity of essential oils and their major constituents from four *Ocimum* species. *Z. Naturforsch., C, J. Biosci.* 71(11–12): 393–402.

Gernandt S, Pérez R (2014) Biodiversidad de pinophyta (coníferas) en México. Rev. Mex. Biodivers. 85: 126-133.

Gokturk T, Kordali S, Calmasur O, Tozlu G (2011) Insecticidal effects of essential plant oils against larvae of great spruce bark beetle, *Dendroctonus micans* (Kugelann) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). Fres Environ. Bull. pp. 2365-2370

Hart J, Veblen T, Eisenhart S, Jarvis D, Kulakowski D (2014) Drought induces spruce beetle (*Dendroctonus rufipennis*) outbreaks across northwestern Colorado. Ecology, 95: 930-939

Isman MB (2008) Perspective, botanical insecticides: for richer, for poorer Pest. Manage. Sci. 64: 8-11

López G, Flores A (2020) Importancia económica del pino (*Pinus* sp.) como recurso natural en México. Rev. Mex. Cienc. Forestales 11(60): 161-185.

Lopez D, Pascual-Villalobos J (2010) Mode of inhibition of acetylcholinesterase by mono-terpenoids and implications for pest control. Ind. Crops Prod. 31: 284-288

Morris L, Cottrell S, Fettig J, Hansen D, Sherriff L, Carter A, Clear L, Clement J, Deroose J, Hicke A, Higuera E, Mattor M, Seddon W, Seppä T, Stednick D, Seybold J (2017) Managing bark beetle impacts on ecosystems and society: Priority questions to motivate future research. J. Appl. Ecol. 54: 750-760.

Mudrončeková S, Ferenčík J, Gruřová D, Barta M (2019) Insecticidal and repellent effects of plant essential oils against *Ips typographus*. J. Pest. Sci. 92, 595-608.

Odeyemi O, Masika P, Afolayan J (2008) Insecticidal activities of essential oil from the leaves of *Mentha longifolia* L. Sub sp. capensis against *Sitophilus zeamais* (Motschulsky) (Coleoptera: Curculionidae). Afr. Entomo. 16(2): 220-225

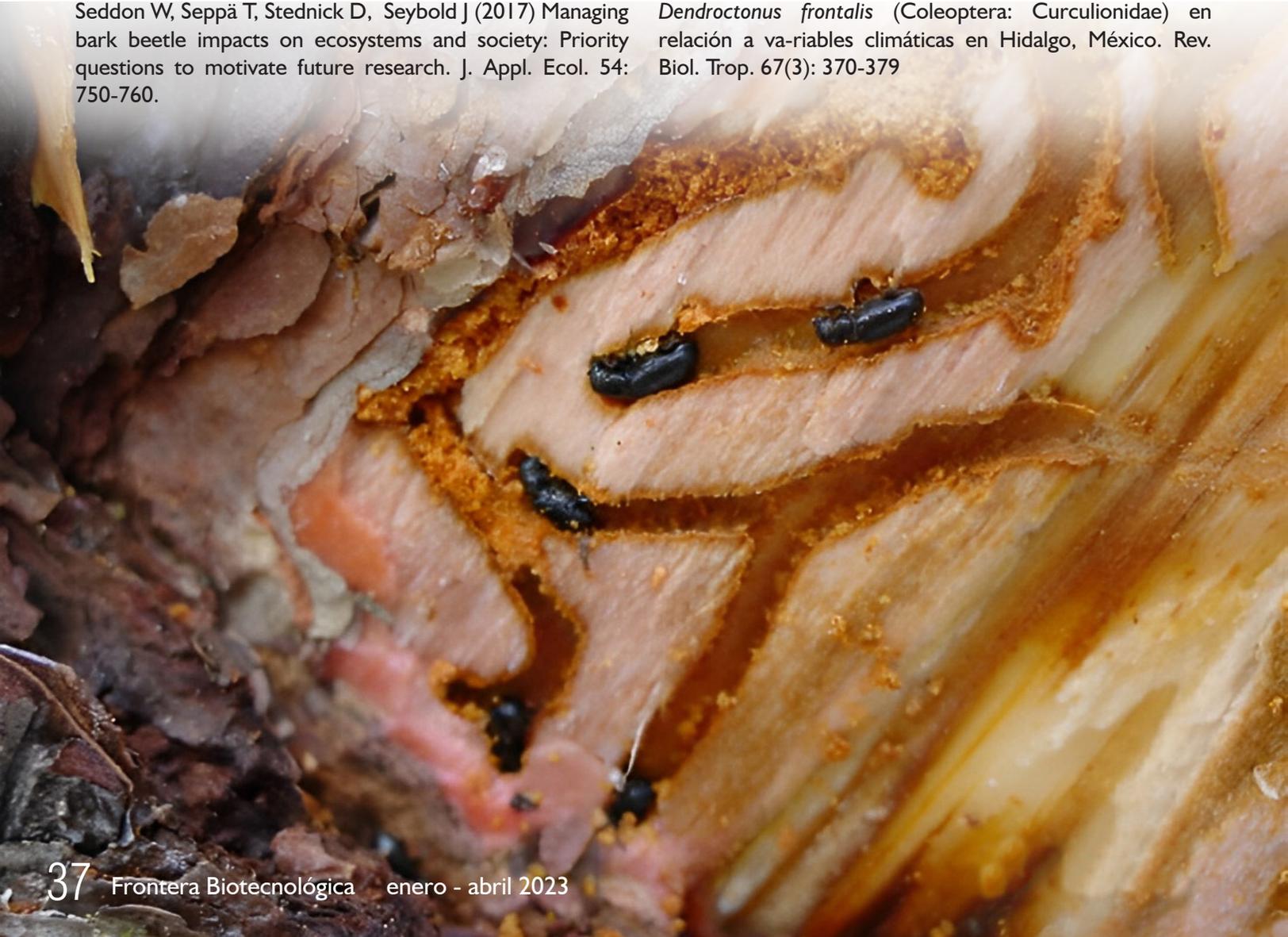
Pureswaran S, Roques A, Battisti A (2018) Forest insects and climate change. Curr. Forestry Rep. 4(2): 35-50

Raffa F, Gregoire C, Lindgren S (2015) Natural history and ecology of bark beetles. In: Vega FE, Hofstetter RW Bark Beetles Biology and Ecology of Native and Invasive Species. Elsevier/Academic Press; London, UK. pp. 1-40.

Rattan S (2010) Mechanism of action of insecticidal secondary metabolites of plant origin. Crop Protect., 29(9): 913-920

Sosa-Díaz L, Méndez G, García A, Cambrón H, Villareal A, Ruiz G (2018) Distribución potencial de barrenadores, defoliadores, descortezadores y muérdagos en bosques de coníferas de México. Rev. Mex. Cienc. Forestales 9: 187-208

Soto-Correa C, Avilés-Carrillo I, Giron-Gutiérrez D, Cambrón-Sandoval H (2019) Abundancia altitudinal de *Dendroctonus frontalis* (Coleoptera: Curculionidae) en relación a variables climáticas en Hidalgo, México. Rev. Biol. Trop. 67(3): 370-379



INVESTIGACIÓN +

POSGRADOS

- Maestría en Biotecnología Aplicada
- Maestría en Biotecnología Productiva
- Doctorado en Ciencias en Biotecnología
- Doctorado en Biotecnología Productiva



Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada

Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal

Tecunexcomac - Tepetitla K. 1.5, Tlaxcala, C.P. 90700, México

www.cibatlaxcala.ipn.mx