



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado

VOLUMEN XV | NÚMERO 3 | PUBLICACIÓN CONTINUA 2021

TECNOCIENCIA CHIHUAHUA

Revista de ciencia y tecnología

Indizada en



latindex





Directorio Institucional

M.E. Luis Alberto Fierro Ramírez

Rector

M.A.V. Raúl Sánchez Trillo

Secretario General

M.E.A. Alfredo Ramón Urbina Valenzuela

Director de Investigación y Posgrado

M.A. Herik Germán Valles Baca

Director Académico

M.L. Ramón Gerónimo Olvera Néder

Director de Extensión y Difusión Cultural

M.C. Francisco Márquez Salcido

Director Administrativo

M.I. Ricardo Ramón Torres Knight

Director de Planeación y Desarrollo Institucional



TECNOCIENCIA CHIHUAHUA

Revista de ciencia y tecnología

Equipo Editorial

Editor responsable

Dr. Armando Quintero Ramos, Universidad Autónoma de Chihuahua, México. (SNI III)

Asistente editorial

M.E.S. Nancy Karina Venegas Hernández, Universidad Autónoma de Chihuahua, México.

Co-editores

Dr. Rubén Francisco González Laredo, Instituto Tecnológico de Durango, Durango, México. (SNI III)

Dr. Javier Tarango Ortiz, Universidad Autónoma de Chihuahua, México. (SNI II)

ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA

Dr. Benjamín Ramírez Wong

Dr. José Alberto Gallegos Infante

Dr. José Rafael Minjares-Fuentes

Dra. María Marcela Rodríguez

Dra. Valeria Soledad Eim Iznardo

Efrén Delgado, Ph.D.

Dra. Elizabeth Carvajal Millán

Dr. Fernando Martínez Bustos

Dr. León Raúl Hernández Ochoa

Dr. José de Jesús Zazueta Morales

Dr. Diego Bautista Genovese

Dra. Aracely Ochoa Martínez

Dra. Deborah Murowaniecki Otero

Dr. René Renato Balandrán Quintana

Nancy Flores Ph.D.

Universidad de Sonora

Instituto Tecnológico de Durango

Universidad Juárez del Estado de Durango

Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

Universidad de las Islas Baleares, Islas Baleares, España

New Mexico State University, Las Cruces, NM USA

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.

CINVESTAV, Unidad Querétaro

UACH

Universidad Autónoma de Sinaloa

Planta Piloto de Ingeniería Química-CONICET, Bahía Blanca Argentina

Instituto Tecnológico de Durango

Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahía, Brasil.

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo

New Mexico State University, Las Cruces, NM USA

AGRICULTURA Y AGROPECUARIA

Dr. Gerardo Méndez Zamora

Dr. Iván Adrián García Galicia

Dr. Guillermo Fuentes Dávila

Dr. Víctor Arturo González Hernández

Dra. Yolanda Salinas Moreno

Dr. Concepción Luján Álvarez

Dra. Daniela D. Herrera Balandrano

Universidad Autónoma de Nuevo León

UACH

INIFAP

Colegio de Posgraduados

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

UACH

Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, China

QUÍMICA Y BIOLOGÍA

Dr. Eleuterio Burgueño Tapia

Dra. Luz Estela González de Bashan

Dra. Blanca Gladiana Beltrán Piña

Nadezhda Traycheva Petkova, Ph.D.

Dr. Ricardo Vázquez Juárez

Dra. Carmen Oralia Meléndez Pizarro

Dr. Alejandro A. Camacho-Dávila

Dr. David Morales Morales

Prasenjit Ghosh, Ph.D.

Dr. René Rojas Guerrero

Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del IPN

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C.

UACH

Department of Organic Chemistry and Inorganic Chemistry, Bulgaria.

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C.

UACH

UACH

Universidad Nacional Autónoma de México

Indian Institute of Technology Bombay, India

Pontificia Universidad Católica de Chile

SALUD Y CULTURA FÍSICA

Dr. Julio Cesar Guedea Delgado

Dr. Julián Esparza Romero

Dra. Carolina Jiménez Lira

Dra. Irene Leal Solís

Dra. Jazmín Leticia Tobías Espinoza

Dr. Arnulfo Ramos Jiménez

Dra. Silvia Giono Cerezo

UACH

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C

UACH

UACH

UACH

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Instituto Politécnico Nacional

INGENIERÍA Y RECURSOS NATURALES

Dr. Francisco Paraguay Delgado

Dr. Vladimir Villarreal Contreras

Dr. Jesús Darío Landa Silva

Dr. Aldo Jonathan Muñoz Vázquez

Dr. Humberto González Rodríguez

Centro de Investigación en Materiales Avanzados

Universidad Tecnológica de Panamá

School of Computer Science, University of Nottingham, UK

Texas A&M University, College Station, USA

Universidad Autónoma de Nuevo León

Dra. Mélida Gutiérrez

Missouri State University, USA

Dr. Luis Fernando Gaxiola Orduño

UACH

Dr. Roberto Narro García

UACH

TECNOLOGÍA

M.C. Ricardo Talamás Abbud

UACH

TECNOCIENCIA CHIHUAHUA. (Vol. 15 Núm. 3 Septiembre-Diciembre, 2021) Es una publicación continua, editada por la Dirección de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Chihuahua. (C. Escorza núm. 900, Col. Centro, Chihuahua, Chihuahua, México. C.P. 31000, <https://vocero.uach.mx/index.php/tecnociencia>, tecnociencia.chihuahua@uach.mx) Editor responsable: Armando Quintero Ramos. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2018-070312595700-203, ISSN 1870-6606, ISSN-e: En trámite otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Dirección de Investigación y Posgrado.

Fecha de la última modificación: diciembre de 2021. Teléfono: (614) 4 39 18 22. Ext. 2222



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

CONTENIDO

Definición de la revista	6
<u>Ingeniería y Tecnología</u>	
Un acercamiento a los fundamentos y aplicaciones de la nanotecnología	e 861
An approach to the fundamentals and applications of nanotechnology	
René Renato Baladrán-Quintana, Ana María Mendoza-Wilson	
Productividad y función de producción de ingeniería para la producción de Glucosiltransferasa por fermentación	e 844
Productivity and Engineering Production Function for Production of Glucosyltransferase by Fermentation	
Marco Antonio Paredes-Lizárraga	
<u>Biología</u>	
El género Fouquieria: una revisión de aspectos etnobotánicos, fitoquímica y actividad biológica	e 840
The genus Fouquieria: description and review of ethnobotanical, phytochemical, and biotechnological aspects	
Lenin O. Nevárez-Prado, Beatriz A. Rocha-Gutiérrez, David Néder-Suárez, María Teresa Córdova-Lozoya, Guillermo Ayala-Soto, Mayra Isabel Salazar-Balderrama, Teresita de Jesús Ruiz-Anchondo, León Raúl Hernández-Ochoa	

Alimentos

Almidón de camote: Modificaciones enzimáticas, físicas y químicas e 854

Sweet potato starch: Enzymatic, physical and chemical modifications: A review

Luz Araceli Ochoa-Martínez, Héctor Alejandro Luna-Solís, Gabriela Bermúdez-Quiñones

Agropecuaria

Producción de leche de cabra en México y uso de aceites esenciales de plantas aromáticas en su producción e 839

Goat Milk Production in Mexico and Use of Essential Oils of Aromatic Plants on Production

Jocelyn Cyan López-Puga, Alondra Valadez-Pineda , Jorge R. Kawas , Sugely Ramona Sinagawa-García, Gustavo Sobrevilla-Hernández, Sara Paola Hernández-Martínez, Daniela Saraí Rico-Costilla , Gerardo Méndez-Zamora

Química y Recursos Naturales

Compuestos organometálicos y de coordinación: Más que sólo una buena relación de metales de transición y moléculas orgánicas e 855

Organometallic and coordination compounds: More than just a happy relationship between transition metals and organic molecules

Rebeca Nayely Osorio-Yáñez, David Morales-Morales

DEFINICIÓN DE LA REVISTA

TECNOCENCIA CHIHUAHUA, es una revista multidisciplinaria, de publicación continua, que publica artículos y notas científicas, así como artículos de revisión *por invitación* originales e inéditos, en español e inglés, en formato electrónico de acceso abierto.

El objetivo de TECNOCENCIA CHIHUAHUA es divulgar los resultados y avances de investigación originales e inéditas en las áreas temáticas de Alimentos, Biológica, Salud, Agropecuaria, Cultura Física, Ingeniería y Tecnología, Química y Recursos Naturales, dirigidos a investigadores, académicos, estudiantes y público con interés científico.

El contenido científico y calidad de los artículos son evaluados a través de un proceso de arbitraje de forma anónima en la modalidad de doble ciego por al menos dos árbitros especializados en la materia.

La revista TECNOCENCIA CHIHUAHUA es editada y financiada por la Dirección de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Chihuahua, México. La revista está adherida a la Declaración de San Francisco a través de DORA (Declaration on Research Assessment) se encuentra indexada en índices y portales especializados como Latindex, Periódica. La revista cuenta con el DOI (Digital Object Identifier) a través de la organización internacional Crossref.

Artículo de Divulgación

Un acercamiento a los fundamentos y aplicaciones de la nanotecnología

An approach to the fundamentals and applications of nanotechnology

René Renato Balandrán Quintana^{1*}, Ana María Mendoza Wilson¹

¹Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal. Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas No. 46. Col. La Victoria, C.P. 83304, Hermosillo, Son., México

*Correspondencia: rbalandran@ciad.mx (René Renato Balandrán Quintana)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v15i3.861>

Recibido: 02 de octubre de 2021; Aceptado: 12 de octubre de 2021

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Resumen

La nanotecnología consiste en la comprensión, manipulación y aprovechamiento de las propiedades que tienen los materiales en la nanoescala, es decir, en dimensiones que se encuentran en el rango de 1 a 100 nm, para desarrollar productos con utilidad práctica. En la década de 1990 inició la revolución nanotecnológica gracias a una mejor comprensión de las propiedades de la materia en la nanoescala. Estas propiedades novedosas se derivan de una gran área superficial e incluyen una mayor reactividad química, depresión de las temperaturas de fusión, alta resistencia mecánica, elevada conductividad eléctrica, efectos ópticos inusuales, entre otras. La nanotecnología permite el desarrollo de materiales innovadores con aplicaciones en todas las ramas de la industria. Destacan las industrias biomédica, farmacéutica, electrónica, química, alimentaria, agrícola, de la construcción, textil, cosmética, de deportes y manufacturera. A pesar de estar presente en artículos de uso cotidiano, la sociedad tiene percepciones erróneas sobre la nanotecnología, principalmente debido a la desinformación. La presente comunicación tiene como objetivo informar objetivamente sobre el concepto de nanotecnología a través de presentar, de una manera sencilla, los fundamentos de esta disciplina y ofrecer ejemplos de aplicaciones reales.

Palabras clave: nanociencias, nanomateriales, bionanotecnología, divulgación tecnológica, nanopartículas.

Abstract

Nanotechnology consists of the understanding, manipulation and use of the properties that materials have at the nanoscale, whose dimensions are in the range of 1 to 100 nm, for the development of devices with practical utility. In the 1990s, the nanotechnology revolution began thanks to a better understanding of the properties of matter at the nanoscale. These novel

properties are derived from a large surface area and include greater chemical reactivity, depression of melting temperatures, high mechanical strength, high electrical conductivity, unusual optical effects, among others. Nanotechnology allows the development of innovative materials with applications in practically all branches of industry. The biomedical, pharmaceutical, electronic, chemical, food, agricultural, construction, textile, cosmetic, sports and manufacturing industries stand out. Despite being present in articles of daily use, society has erroneous perceptions about nanotechnology, mainly due to misinformation. The objective of this communication is to objectively inform about the concept of nanotechnology by presenting, in a simple way, the fundamentals of this discipline and offering examples of real applications.

Keywords: nanosciences, nanomaterials, bionanotechnology, technology dissemination, nanoparticles.

Introducción

La nanotecnología está en nuestra vida diaria, pero pasa desapercibida. Esto se debe a múltiples factores. Por un lado, en nanotecnología se utilizan con frecuencia materiales que nos resultan familiares, porque se encuentran presentes en artículos de uso cotidiano. Por otra parte, desde hace unas décadas estamos tan acostumbrados al acelerado avance tecnológico que rara vez reflexionamos sobre los mecanismos que hacen posible este. Si a ello se suma una mala publicidad, los resultados pueden ser desastrosos en términos de la aceptación pública.

No ha faltado quien publicite la nanotecnología como la creación de nano robots que como plaga van a consumir la tierra, o que pueden ser introducidos en el cuerpo para llevar a cabo viajes fantásticos y apoderarse de la voluntad de los seres humanos, todo al puro estilo de las películas de ciencia ficción. La realidad es que esto último carece de fundamentos, pero provoca reacciones violentas por parte de grupos extremistas, como fue el caso de ataques con paquetes bomba enviados a científicos mexicanos expertos en nanotecnología (SciDevNet, 2011). Pero sin duda lo que más prevalece es la desinformación. En una encuesta reciente se demostró que la sociedad mexicana tiene ideas erróneas sobre la nanotecnología. Si bien la muestra de la población encuestada fue relativamente pequeña, los resultados hicieron patente la necesidad de brindar al público en general información objetiva sobre el tema (Camarillo-Abad *et al.*, 2019).

En el presente artículo se presentan, de una forma narrativa, los fundamentos de la nanotecnología y la línea del tiempo en cuanto a su desarrollo. Se explica por qué los materiales en la nanoescala tienen propiedades únicas y cómo se pueden aprovechar estas para encontrar soluciones innovadoras a problemas reales. También se dan ejemplos de diferentes tipos de nanomateriales y los métodos de producción.

La escala de tamaños

Para una mejor comprensión de la nanotecnología, primero es necesario ubicar la escala de tamaños. Para efectos prácticos, sólo nos referiremos a las porciones de la escala que permiten explicar a qué parte de esta corresponden los nanomateriales, lo que se señala en la Fig. 1. Se recomienda visitar el sitio de internet Nanowerk para observar un video en el que se muestran

imágenes reales que comprenden desde la escala astronómica hasta la de las partículas subatómicas (Nanowerk, 2021).

El prefijo *micro* significa una millonésima parte de algo, así que en unidades de longitud un micrometro o micra (μm) es la millonésima parte de un metro ($1\mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$). El prefijo *nano* indica una milmillonésima, por lo que, en unidades de longitud, un nanómetro (nm) es la milmillonésima parte de un metro ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$). Mediante un cálculo sencillo se encuentra que $1 \mu\text{m} = 1,000 \text{ nm}$. La escala micrométrica o microscópica es la que corresponde a tamaños entre 1 y 1,000 μm (0.001–1 mm), seguida por la macroescala ($>1 \text{ mm}$). En la escala subnanométrica están los tamaños inferiores a 1 nm, que corresponden al tamaño de moléculas, átomos y partículas subatómicas.

Lo anterior puede llevar a pensar, con toda lógica, que la escala nanométrica se encuentra dentro del rango de 1–1,000 nm. Sin embargo, por razones que se exponen más adelante, se determinó que la escala nanométrica, también llamada mesoescala o nanoescala, es aquella entre 1 y 100 nm. Los tamaños que se encuentran entre 100 y 1,000 nm, se dice que pertenecen a la escala submicrométrica o submicroscópica.

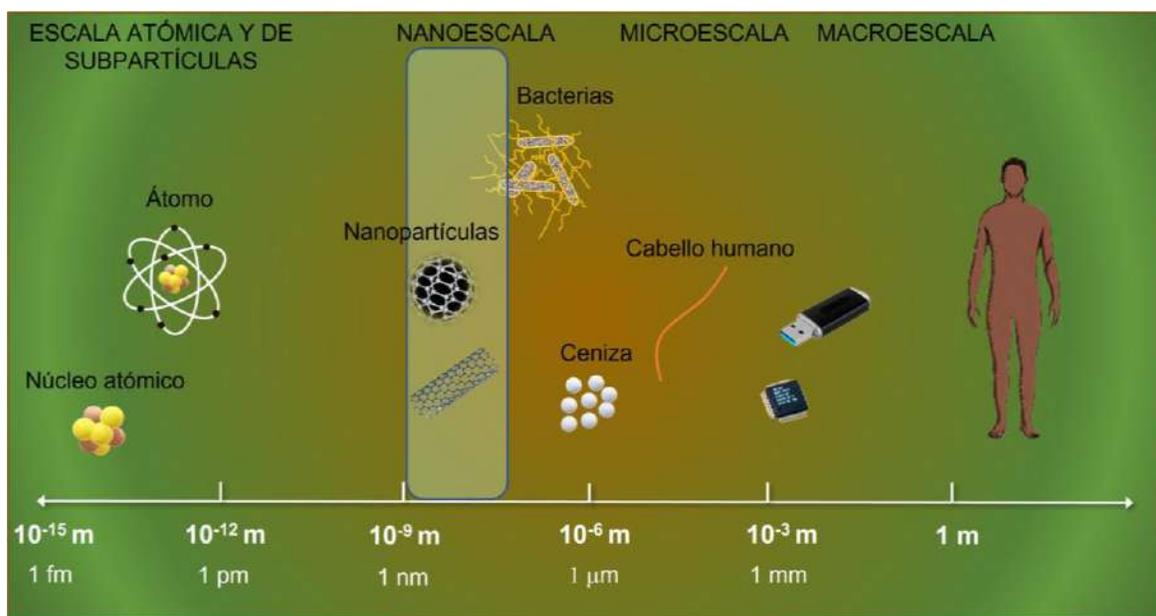


Figura 1. Esquema que ubica aproximadamente la escala nanométrica, para dar una idea de las dimensiones de los nanomateriales. Los objetos no están dibujados a escala, sólo es una representación para efectos comparativos.

Figure 1. Scheme that approximately locates the nanometric scale, to give an idea of the dimensions of nanomaterials. The objects are not drawn to scale; it is only a representation for comparison purposes.

En la microescala se encuentran cosas tan pequeñas como las partículas de polvo, los microorganismos y aun nuestras mismas células. Para observarlos es necesario un microscopio óptico, como del que se dispone en casi cualquier laboratorio. No obstante, para la observación en la escala nanométrica se requieren microscopios más potentes, como los de transmisión y de barrido de electrones. Algo tan delgado como un cabello humano, tiene un diámetro promedio de

80 μm , es decir 80,000 nm. Así, el tamaño de los objetos en la nanoescala es entre 8,000 y 80,000 veces más pequeño que el grueso de un cabello. Si una persona con una estatura de 1.70 m se encogiera hasta alcanzar el tamaño de 1 nm, el grosor de una hoja de papel ordinario (0.1 mm) representaría 170 km para esa persona. Estos ejemplos dan una idea clara de lo diminutas que son las dimensiones de los nanomateriales. Una vez ubicada la escala de tamaños, se puede comenzar a hablar de nanotecnología.

Definición de nanotecnología

La nanotecnología consiste, por una parte, en la fabricación de materiales cuyo tamaño es nanométrico, es decir, entre 1 y 100 nm, en al menos una de sus dimensiones. Aquí cabe hacer un paréntesis para mencionar que los nanomateriales se clasifican como cerodimensionales (0D), unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D), según el número de dimensiones que tienen en la nanoescala (Fig. 2).

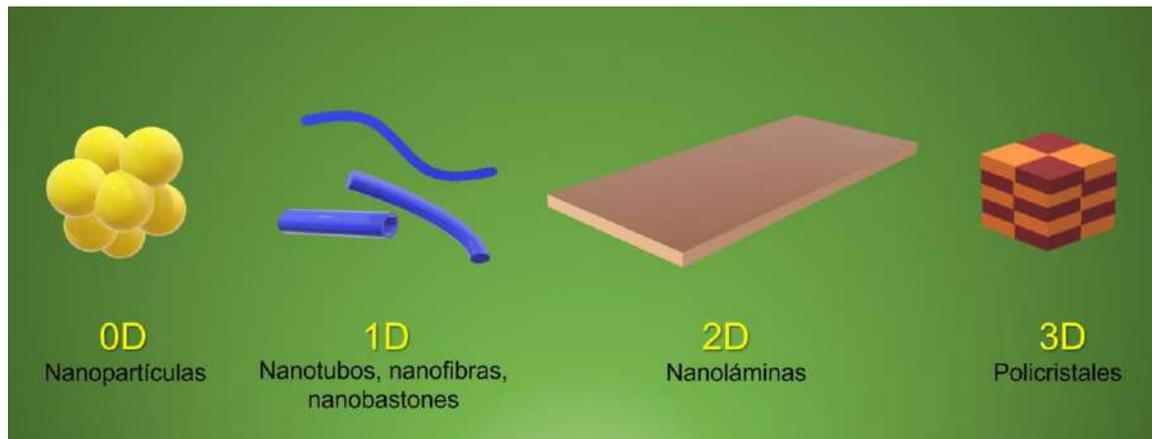


Figura 2. Clasificación de los nanomateriales de acuerdo con sus dimensiones y ejemplos genéricos de cada uno de ellos. El prefijo numérico indica el número de dimensiones que el material tiene en la macroescala, es decir >100 nm. Los nanomateriales 3D son conglomerados de nanopartículas que, en conjunto, son responsables por las propiedades únicas de ese material, generalmente son sólidos cristalinos.

Figure 2. Classification of nanomaterials according to their dimensions and generic examples of each of them. The numerical prefix indicates the number of dimensions that the material has on the macroscale, that is >100 nm. 3D nanomaterials are conglomerates of nanoparticles that, together, are responsible for the unique properties of that material, generally they are crystalline solids.

Un nanomaterial 0D es aquel en el que sus tres dimensiones están reducidas a la escala nanométrica, por ejemplo, una nanopartícula. En los 1D, solo dos de las dimensiones están en la nanoescala nanométrica, las nanofibras y los nanotubos son buenos ejemplos de ello ya que tienen un diámetro nanométrico y un largo superior a los 100 nm, el que incluso puede ser de varios μm . Los nanolaminados o nanopelículas son representativos de los nanomateriales 2D, donde sólo una dimensión (el grosor) es nanométrica, mientras que la longitud y anchura están en las escalas microscópica o macroscópica. Por último, los nanomateriales 3D están constituidos generalmente por cristales de tamaño nanométrico, los que se agrupan mediante interacciones físicas hasta formar estructuras macroscópicas.

En el rango de tamaños de 1–100 nm, los materiales presentan propiedades muy diferentes a las que tienen en las escalas macroscópicas, submicroscópica o subnanométrica, aunque hay excepciones. La otra parte de la nanotecnología es aprovechar esas propiedades únicas que surgen en la nanoescala, para construir, a partir de los nanomateriales, dispositivos y artículos novedosos con utilidad práctica, o bien introducir mejoras innovadoras en los ya existentes. Otro aspecto distintivo de la nanotecnología es que se realiza con fundamento científico, lo cual es imprescindible, pues estudiar y manipular los cambios que experimenta la materia al pasar de una escala de tamaño a otra requiere de conocimiento científico y, en algunos casos, alto grado de sofisticación (Borisenko and Ossicini, 2008). No obstante, es de destacar que el uso de algunos nanomateriales se remonta a épocas pasadas.

Uso de los nanomateriales en la antigüedad y en la Edad Media

Aunque el conocimiento científico de las propiedades de los nanomateriales ha tenido su mayor avance en el Siglo XX, en la antigüedad y la Edad Media estos ya se utilizaban, quizá inadvertidamente. Entre los ejemplos más utilizados sobre el uso de nanomateriales en la antigüedad están las espadas de Damasco y la copa de Licurgo. Las espadas de acero de Damasco eran famosas por su fortaleza mecánica y filo “eterno”.

En la época actual se descubrió, mediante microscopía electrónica de alta resolución, la presencia de nanotubos de carbono en una espada auténtica de Damasco del Siglo XVII (Reibold *et al.*, 2006). Los nanotubos de carbono son partículas nanométricas provistas de una alta resistencia mecánica, que seguramente se formaban durante el forjado del acero al alto carbono que se utilizaba para fabricar las espadas de Damasco, lo cual explica las características tan particulares de estas.

Por otra parte, la copa de Licurgo (Fig. 3), fabricada por los romanos en el Siglo V, D.C., está hecha de una matriz de vidrio en la que se encontraron, dispersas, nanopartículas de oro, plata y cobre con tamaños de entre 50 y 100 nm. Esto resulta en que la copa presente diferentes coloraciones, dependiendo de la dirección de la luz incidente (Loos, 2015). Hoy también se sabe que los efectos vistosos en los vitrales de las catedrales medievales son debidos a que contienen mezclas de nanopartículas de oro y plata (Loos, 2015). Más adelante, en el presente artículo, se revisan los fundamentos científicos que explican las propiedades ópticas de algunas nanopartículas metálicas.

El conocimiento científico en aquellas épocas no permitiría encontrar explicación para esos fenómenos, eran construcciones basadas en conocimiento empírico, producto de la habilidad artesanal, no puede decirse que ya existía la nanotecnología, al menos no formalmente. De igual manera, es necesario hacer notar que en la Naturaleza siempre han existido estructuras funcionales formadas por bloques de tamaño nanométrico, como el DNA, los virus, los complejos enzimáticos incrustados en las membranas celulares, por mencionar solo algunos. A esto último tampoco se le puede llamar nanotecnología porque en la construcción de tales estructuras no está involucrada la mano del hombre.



Figura 3. Copa de Licurgo, fabricada por los romanos en el Siglo V. Está hecha de una matriz de vidrio que contiene una mezcla de nanopartículas de oro, plata y cobre. La coloración es diferente dependiendo de si la fuente de luz se encuentra en el interior de la copa o incide desde el exterior.

Figure 3. Lycurgus Cup, made by the Romans in the 5th century. It is made of a glass matrix that contains a mixture of gold, silver and copper nanoparticles. The coloration is different depending on whether the light source is inside the glass or is incident from the outside.

Créditos a las imágenes (Image credits): (A) *DeBrit_Mus_13sept10_brooches_etc_044.jpg:Johnbodderivativevwork:Johnbod(talk)-Brit_Mus_13sept10_brooches_etc_044.jpg,CCBY-SA3.0,*

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11549754>; (B) De Desconocido - Marie-Lan Nguyen (2011), CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15475096>

Periodo de gestación de la nanotecnología

Las nanociencias y la nanotecnología tuvieron un avance relativamente lento al principio, como lo constata la línea del tiempo (Fig. 4). La idea visionaria de manipular la materia átomo por átomo para construir dispositivos útiles de tamaño nanométrico se atribuye a Richard Feynman, ganador del premio Nobel de Física, aunque no precisamente por ser el pionero intelectual de la nanotecnología, como muchos lo reconocen hoy.

En 1959, Feynman dictó una conferencia ante la Sociedad Americana de Física en la que visualizó objetivamente la posibilidad, en un futuro no muy lejano, de fabricar bloques moleculares a partir de átomos. A su vez, esos bloques podrían utilizarse para construir estructuras de mayor tamaño, y así sucesivamente, hasta finalmente llegar a dispositivos con alguna función preconcebida (Feynman, 1961). Es decir, síntesis química mediante manipulación mecánica. Aunque la idea parecía muy atractiva, en ese entonces y en los siguientes veintitantos años no existía posibilidad alguna de la manipulación átomo por átomo.

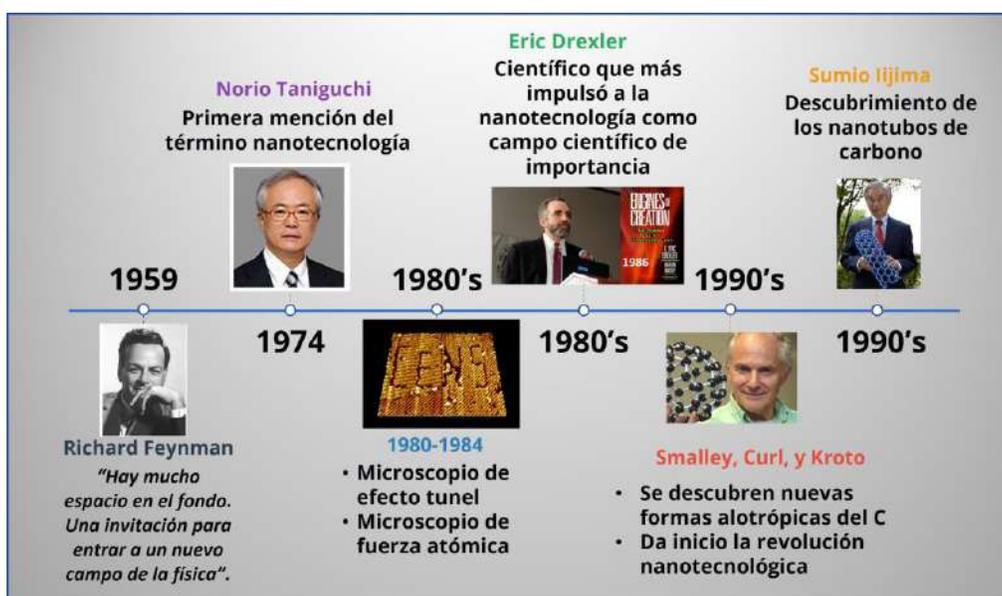


Figura 4. Línea del tiempo del avance de la nanotecnología, desde 1959 hasta la década de 1990. El suceso más importante durante este periodo fue la invención de los microscopios de efecto túnel y de fuerza atómica.
Figure 4. Timeline of the advancement of nanotechnology, from 1959 to the 1990s. The most important event during this period was the invention of tunneling and atomic force microscopes.

En 1974, el investigador Norio Taniguchi definió la nanotecnología como “el proceso de separación, consolidación y deformación de materiales por átomo o molécula” (Bayda *et al.*, 2019). Según la historia, esta fue la primera vez que se utilizó la palabra *nanotecnología*. Sin embargo, fue unos años más tarde, en la década de los 80s, cuando se cristalizó la idea de la manipulación átomo por átomo, una vez que se inventaron los microscopios de efecto túnel (Binnig *et al.*, 1982) y de fuerza atómica (Binnig *et al.*, 1986).

Utilizando conceptos teóricos cuya explicación está fuera del objetivo de este artículo, y haciendo uso de los avances en computación logrados hasta entonces, fue posible construir “puntas” con unos cuantos átomos de un cierto material. El acercamiento de esas puntas a la superficie de otro material permite “arrancar” átomos superficiales y posteriormente posicionarlos en otro lugar.

Así se obtuvieron imágenes muy llamativas a manera de demostración, como la que se muestra en la Fig. 4. Aunque este fue un hecho extraordinario, era y es absurdo construir dispositivos átomo por átomo, pues sería un proceso extremadamente lento. Los microscopios de efecto túnel y de fuerza atómica se utilizan para observar indirectamente átomos y moléculas, así como para caracterizar las propiedades físicas de los nanomateriales, sin embargo, su invención fue el punto de partida que originó una avalancha de investigaciones. El científico Eric Drexler, a través de la publicación de libros como *Engines of creation. The coming era of nanotechnology*, desempeñó un papel importante en cuanto a popularizar los potenciales de la nanotecnología molecular. Puede decirse que en la década de los 80s se estableció formalmente el concepto de nanotecnología, pero lo que sucedió unos cuantos años más adelante fue el detonante de una revolución.

Revolución nanotecnológica en la década de los 90s

En 1985 se descubrieron unas estructuras esféricas constituidas enteramente por átomos de carbono (ACS, 2010), a las que se les llamó Buckminsterfullerenos, en alusión a las estructuras arquitectónicas que distinguen al arquitecto Sir Buckminster Fuller. Estas esferas, también llamadas simplemente fulerenos, tienen 60 átomos de carbono. Se asemejan a un balón de fútbol soccer, consistente en 20 hexágonos y 12 pentágonos, donde cada uno de los vértices está ocupado por un átomo de carbono, como se muestra en la Fig. 5A.

Esta forma del carbono es diferente a las del diamante y el grafito y tiene propiedades inusuales, entre las que sobresale una elevada conductividad eléctrica. Posteriormente fue posible dividir el grafito en sus monocapas, cada una de las cuales se conoce como grafeno (Fig. 5B). El grafeno es otra forma de carbono de la familia de los fulerenos, que también posee propiedades únicas, como una elevada conductividad eléctrica, transparencia, flexibilidad y alta resistencia mecánica (Inagaki *et al.*, 2014).

En 1991 se descubrieron los nanotubos de carbono (Fig. 5C), los cuales se asemejan a láminas enrolladas de grafeno y que comparten algunas propiedades de este, como una elevada conductividad eléctrica y gran resistencia mecánica. Los nanotubos de carbono son partículas de 1–3 nm de diámetro interno, 2–100 nm de diámetro externo y 0.2 a varios μm de longitud (He *et al.*, 2013).

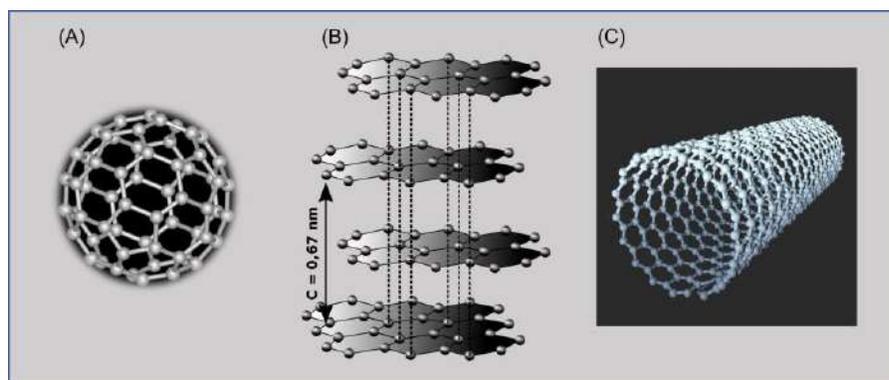


Figura 5. Representaciones de: (A) Estructura de los fulerenos; (B) estructura del grafito, constituido por monocapas de grafeno; (C) estructura de los nanotubos de carbono, los cuales consisten en láminas de grafeno “enrolladas”.

Figure 5. Representations of: (A) Structure of fullerenes; (B) structure of graphite, made up of graphene monolayers; (C) Structure of carbon nanotubes, which consist of “rolled” sheets of graphene.

Créditos a las imágenes (Image credits): (A) <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>; (B) *Capas grafito.svg* Anton (rp) 2004 <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>; (C) *Encyclopædia Britannica* <https://www.britannica.com/science/carbon-nanotube#/media/1/956965/217195>

Aunque ya hacía años que se estudiaban los fenómenos superficiales y las propiedades de las nanopartículas, tal vez el descubrimiento de los fulerenos y posteriormente de los nanotubos de carbono fueron sucesos relevantes para que la nanotecnología se consolidara como disciplina. A esto último lo apoya la gran cantidad de publicaciones científicas que aparecieron a partir de 1990,

en cuyos títulos, resumen o palabras clave aparecen las palabras *nanotecnología* o *nanopartículas* (Fig. 6).

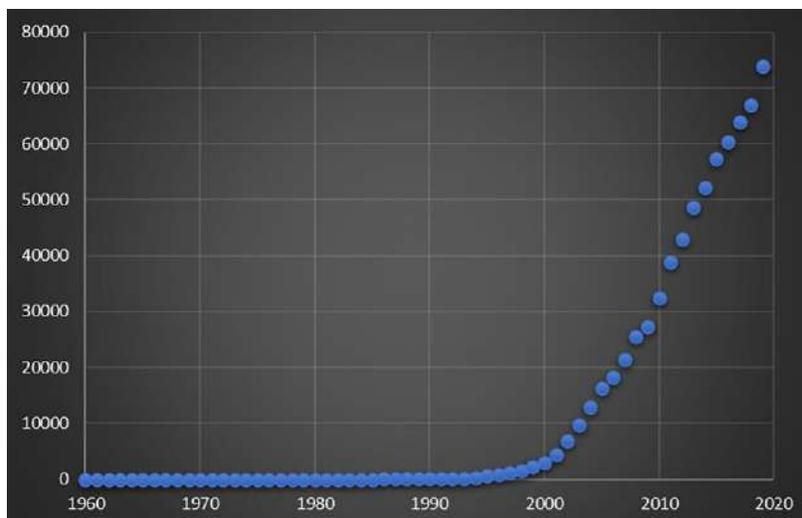


Figura 6. Número de publicaciones científicas en las que aparecen las palabras *nanotecnología* o *nanopartículas*, entre 1960 y 2020. Fuente: SCOPUS, consultado el 29 de septiembre de 2021.

Figure 6. Number of scientific publications in which the words *nanotechnology* or *nanoparticles* appear, between 1960 and 2020. Source: SCOPUS, consulted on September 29, 2021.

Importancia del tamaño nanométrico en la nanotecnología

Las propiedades físicas y químicas de la materia en la nanoescala son muy diferentes a las de la macroescala y las escalas atómica o subatómica. Las propiedades en la macroescala se predicen mediante las leyes de la Física clásica, mientras que las de átomos y partículas subatómicas mediante las de la Física cuántica, pero muchas de las propiedades en la nanoescala no se pueden explicar en su totalidad mediante ninguna de esas leyes, por lo que se recurre a modelos teóricos que corresponden tanto a unas como a otras.

El carácter innovador de la nanotecnología radica fundamentalmente en el conocimiento, manipulación y aprovechamiento de propiedades de la materia que surgen en el rango de 1 a 100 nm, las cuales eran desconocidas hasta hace poco. Esto es lo que determina si un nanomaterial es innovador y útil para que se le considere como artefacto nanotecnológico. Podrá haber nanomateriales para los cuales no se han encontrado propiedades nuevas utilizables, por lo que, mientras no se descubran, su sola producción no es del ámbito de la nanotecnología.

El estudio de los fenómenos que ocurren en la nanoescala es materia de las nanociencias. Con mucha frecuencia las nanociencias y la nanotecnología trabajan al unísono, pero hay una clara distinción entre ambas. Entonces, el tamaño definitivamente importa, pero en nanotecnología no lo es todo. Otras interrogantes de interés son cuáles son las propiedades únicas en la nanoescala, por qué surgen tan drásticamente y, sobre todo, cómo se aprovechan de tal suerte que son causa de toda una revolución.

Propiedades en la nanoescala que se derivan de un gran aumento en el área superficial

Cuando un material se somete a un proceso de reducción de tamaño, por ejemplo, hasta transformarlo en un polvo consistente en partículas de unos cuantos μm de diámetro, el área superficial total aumenta considerablemente. Al nivel de la nanoescala, el aumento en el área superficial es impresionante. Por ejemplo, si un cubo de cualquier sustancia sólida, con lados de 1 cm y área superficial de 6 cm^2 (0.06 m^2), se divide en cubitos de 10 nm de lado, el área superficial total aumenta 10,000 veces, es decir pasa a ser de 600 m^2 , equivalente a una extensión de $30 \times 20\text{ m}$.

Para entender el efecto del área superficial sobre las propiedades de la materia hay que recordar que las propiedades físicas y químicas de un material sólido en la macroescala, mejor conocido como material voluminoso o *bulk*, son resultado de las interacciones existentes entre los trillones de átomos que conforman a dicho material, aún en masas tan pequeñas como las del orden de miligramos. No obstante, hay una diferencia importante entre los átomos de la superficie del material con respecto a los del interior: los primeros tienen un menor número de interacciones con otros átomos, lo que los hace estar menos fuertemente sujetos (Fig. 7).

El menor grado de conectividad entre los átomos superficiales les ofrece la posibilidad de interactuar con átomos o moléculas en la interfase, al tiempo que les da una mayor libertad de movimiento y mayor propensión a “escapar” de la superficie. En otras palabras, los átomos de la superficie son más reactivos y requieren de la aplicación de menos energía para su movilización. Sin embargo, la cantidad de átomos en la monocapa superficial es infinitamente menor a la cantidad de átomos presentes en todo el *bulk*, por lo que propiedades como la reactividad y los puntos de fusión y ebullición de ese material las determinan las interacciones entre los átomos del *bulk* (Kuncser and Miu, 2014).

Ahora consideremos el caso de una nanopartícula metálica. Una nanopartícula es un conglomerado de unos cuantos átomos, que pueden ser cientos o miles, lo cual depende del tipo de átomo y del tamaño de la nanopartícula; extremadamente pocos si se consideran los trillones que hay en el material *bulk*. En un conglomerado de tan pocos átomos, estos se disponen de tal forma que la mayoría quedan expuestos en la superficie, con menor conectividad entre ellos en comparación a los del *bulk*. Es decir, una nanopartícula está literalmente formada por átomos superficiales (Fig. 7), por lo que estos determinan las propiedades de esa nanopartícula; propiedades que, como ya se mencionó en el párrafo anterior, son diferentes a las del *bulk*. Así, las nanopartículas de oro, por ejemplo, tienen una mayor reactividad y un menor punto de fusión que el oro en *bulk*. Estas son solo dos de tales propiedades, que, aunque simples en apariencia, permiten el desarrollo de dispositivos y materiales innovadores de uso cotidiano.

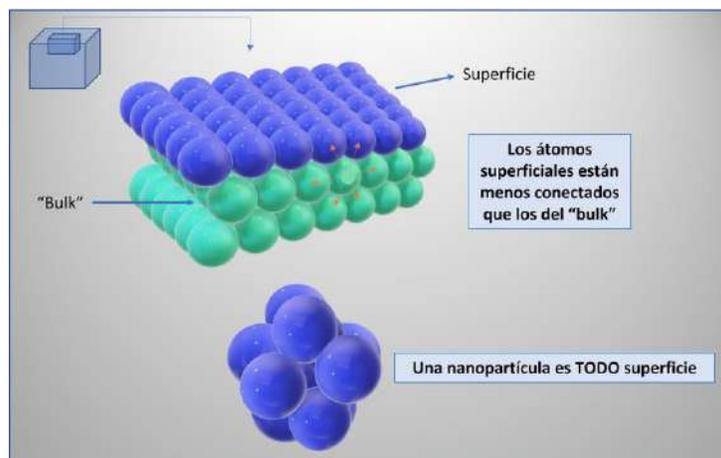


Figura 7. Las propiedades físicas y químicas de la materia son el promedio de los trillones de átomos y moléculas que la componen. Los átomos o moléculas superficiales se comportan diferente a los del *bulk*, por estar menos conectados entre sí. Una nanopartícula está compuesta de pocos átomos, la gran mayoría de los cuales se disponen en la superficie. Por lo tanto, las nanopartículas tienen propiedades superficiales, como una mayor reactividad y menor punto de fusión.

Figure 7. The physical and chemical properties of matter are the average of the trillions of atoms and molecules that compose it. Surface atoms or molecules behave differently from bulk, as they are less connected to each other. A nanoparticle is made up of few atoms, the vast majority of which are arranged on the surface. Therefore, nanoparticles have surface properties, such as higher reactivity and lower melting point.

Una mayor reactividad tiene aplicaciones muy importantes en catálisis (Ishida *et al.*, 2020). Por ejemplo, en los catalizadores que convierten monóxido de carbono (CO) a dióxido de carbono (CO₂), la reacción se lleva a cabo en un soporte sobre el que se encuentra el metal que cataliza la conversión; la eficiencia catalítica depende en gran medida del área superficial. Bajo este razonamiento, si el soporte se "cubre" con nanopartículas de catalizador, la eficiencia catalítica aumenta cientos de veces no solo por una mayor área superficial sino también porque las nanopartículas son más reactivas.

Por otro lado, la depresión del punto de fusión permite que algunas nanopartículas se utilicen como agentes de relleno en procesos que requieren de temperaturas altas, como el sinterizado de cerámicas o la soldadura de microcircuitos eléctricos. Las cerámicas se fabrican a partir de sólidos secos o lodos hechos de materiales pulverizados, los que se moldean, se secan y se sinterizan a altas temperaturas. El objetivo del sinterizado es hacer un material denso, homogéneo y resistente. Sin embargo, es inevitable la presencia de huecos microscópicos que quitan resistencia mecánica, pues sirven como puntos de partida para la propagación de grietas. Aprovechando la gran área superficial y los bajos puntos de fusión de nanopartículas, se puede sinterizar "en frío" (<200 °C) para no solo obtener cerámicas densas sino también hacer más sostenible el proceso (Guo *et al.*, 2016). En el campo de la electrónica la miniaturización es ya una necesidad y las nanopartículas metálicas encuentran aplicación en la micro o nanosoldadura. Las soldaduras utilizadas en electrónica deben ser libres de plomo, pero sin este elemento la temperatura de fusión de la soldadura se eleva en más de 35 °C, lo cual puede resultar perjudicial para los componentes electrónicos. Una solución es llevar al nivel de nanopartículas la soldadura, para así disminuir su temperatura de fusión (Gao and Gu, 2016).

Propiedades ópticas de las nanopartículas y aplicaciones diferentes a las ornamentales

Las propiedades ópticas de las nanopartículas metálicas son aún más interesantes. En un metal conductor en *bulk*, los electrones fluyen libremente por todo el material al aplicarse un campo electromagnético, como la luz; de hecho, sobre la superficie hay una nube de electrones. Pero en una nanopartícula el tamaño es tan reducido, que ocurre un fenómeno conocido como confinamiento cuántico, equivalente a que los electrones quedan “enjaulados”.

Cuando nanopartículas metálicas, como las de oro o plata, se encuentran dispersas en un líquido, o en un sólido transparente o translúcido como el vidrio, y son expuestas a la luz, el campo electromagnético obliga a los electrones de cada nanopartícula a moverse de un lado a otro dentro de esta, en todas las direcciones.

Este movimiento, al ser oscilatorio, genera una onda de una frecuencia característica que depende del tipo, tamaño y forma de las nanopartículas. Esta frecuencia puede ser detectada como un pico de absorbancia en un espectrofotómetro. La señal se amplifica debido a la gran cantidad de nanopartículas que hay en la dispersión y se manifiesta visualmente en la coloración de esta. Este efecto, que se conoce como resonancia plasmónica superficial o plasmón superficial, es indicativo de la formación de nanopartículas durante el proceso de síntesis y se presenta solo en un rango estrecho de tamaños (2–100 nm). Es decir, no es detectable cuando en la dispersión solo hay átomos metálicos o conglomerados muy pequeños, ni cuando las nanopartículas exceden de un tamaño mayor a 100 nm (Selvemani, 2019).

La absorbancia característica de las nanopartículas de plata es de 420 nm y 550 nm para las de oro. El fenómeno del plasmón superficial explica la variedad de colores en las vidrieras de las catedrales medievales y en la copa de Licurgo, las cuales contienen mezclas de nanopartículas metálicas de diferente tipo y tamaño. Sin embargo, la investigación científica ofrece usos mucho más sofisticados para las nanopartículas metálicas.

Otro tipo de nanopartículas que tienen propiedades ópticas únicas son los puntos cuánticos, también llamados QDots. A diferencia de las nanopartículas de oro y plata, hechas de metales conductores, los QDots se producen a partir de semiconductores, como el selenuro de cadmio. Debido al pequeño tamaño de los QDots (2–6 nm), los electrones están confinados cuánticamente. La naturaleza semiconductor hace que los electrones, en respuesta a la radiación electromagnética, vayan de un estado de mínima energía hasta otro mayor, donde podrían actuar como conductores. Sin embargo, al estar confinados no tienen la posibilidad de fluir como lo harían en el material *bulk*, por lo que regresan a su nivel basal de energía. En ese regreso emiten energía en forma de luz, es decir, son fluorescentes. Una característica muy interesante de los QDots es que el color de la fluorescencia depende del tamaño de la nanopartícula, de tal forma que manipulando el tamaño de esta se logra un espectro de colores de alta pureza, desde el rojo al azul (Cotta, 2020).

Hoy día, tanto el fenómeno del plasmón superficial de las nanopartículas metálicas, como el de fluorescencia de los QDots tienen un gran potencial en el diagnóstico temprano y efectivo de enfermedades (Katas *et al.*, 2018; Badilli *et al.*, 2020). Las nanopartículas en su forma prístina no son muy útiles para estos propósitos; de hecho, su potencial citotoxicidad es una limitante para su uso clínico. Sin embargo, hay maneras de funcionalizarlas o cubrirlas con ciertas moléculas, de tal forma que no solo se vuelvan biocompatibles, sino que tengan la capacidad de reconocer células específicas, como las cancerosas, incluso en las etapas más tempranas del desarrollo de la

enfermedad. En casos como ese es necesario complementar los estudios con técnicas de imagenología para detectar el lugar exacto en donde se encuentran las nanopartículas y, por tanto, las células enfermas. Actualmente se realiza un gran esfuerzo de investigación para que las nanopartículas sean utilizadas no únicamente en el diagnóstico clínico sino también para el transporte de agentes terapéuticos hasta tejidos o células específicas, para evitar así efectos secundarios (Sanità *et al.*, 2020).

Mientras tanto, las nanopartículas metálicas se usan en la industria biomédica como herramientas de diagnóstico rápido *in vitro*. Para esto se saca ventaja de las propiedades ópticas de las nanopartículas para generar señales detectables a la vista, como indicadores de positivo o negativo. Un buen ejemplo es la prueba rápida de embarazo, que se realiza humedeciendo con orina una tira, la cual se encuentra dentro de un dispositivo que es diseñado para tal fin. Sobre la tira están dispersas nanopartículas muy pequeñas de oro, funcionalizadas con anticuerpos de la hormona del embarazo. Al impregnar el dispositivo con orina, si la hormona del embarazo se encuentra presente se fija a las nanopartículas debido a su especificidad por el anticuerpo.

El efecto global es que las nanopartículas pequeñas se aglomeran y forman otras de mayor tamaño, para dar lugar al plasmón superficial. El efecto se nota visualmente: la aparición de una banda roja indica positivo, mientras que en ausencia de la hormona del embarazo se produce una coloración verdosa, señal de negativo (Dykman and Khlebtsov, 2011). Hay que mencionar que los inmunoensayos ya existían desde antes de la nanotecnología, de hecho, el oro coloidal se utilizaba para algunas aplicaciones, incluyendo la prueba de embarazo, pero hoy día los métodos se han optimizado mediante el uso de nanopartículas y anticuerpos monoclonales.

Las nanopartículas metálicas también ejercen acción bactericida. Desde hace mucho tiempo la plata coloidal se utiliza como antiséptico. No obstante, el efecto bactericida de las nanopartículas es mayor debido a una mayor reactividad (Zhang *et al.*, 2016). Esta propiedad ha dado la pauta para el uso de las nanopartículas de plata en artículos de uso cotidiano y en situaciones donde se requiere de un ambiente aséptico, por ejemplo calcetas deportivas, equipos de purificación de aire, recubrimientos para paredes y pisos de hospitales, etc.

Producción de nanopartículas

Podría pensarse que la obtención y manipulación de nanopartículas requiere de métodos de reducción de tamaño y de equipo altamente especializado, lo cual es parcialmente cierto. Aunque muchas nanopartículas se pueden producir utilizando el equipamiento de un laboratorio de química convencional, la caracterización de forma, tamaño, área superficial y otra serie de propiedades sí requiere de equipos más especializados, como el microscopio electrónico, al menos. La sofisticación depende en gran medida de las aplicaciones que se pretendan. Por otro lado, en un gran número de casos no es necesario reducir de tamaño, pues es posible fabricar nanopartículas mediante métodos llamados “bottom-up”, es decir, mediante el ensamblado espontáneo de átomos y moléculas, lo cual se puede lograr por métodos fisicoquímicos. Algunos ejemplos de esto se describen a continuación, a grandes rasgos.

Para producir nanopartículas de plata, simplemente se mezclan proporciones adecuadas de dos soluciones, una conteniendo los átomos de plata, como el nitrato de plata, y otra con un agente reductor, como el citrato de sodio. El citrato neutraliza las cargas positivas de los átomos de plata,

lo que propicia que estos se aglomeren mediante atracciones de Van der Waals para formar pequeños racimos. En la medida que transcurre la reacción, estos aglomerados crecen hasta formar nanopartículas de tamaño homogéneo.

El tamaño deseado de las nanopartículas se logra deteniendo la aglomeración mediante la adición de algún compuesto químico que estabilice el sistema e impida la interacción de unas nanopartículas con otras; en ocasiones el mismo agente reductor, como el citrato, actúa como estabilizador. Finalmente, las nanopartículas se recuperan por filtración y se secan, quedando listas para su funcionalización, dependiendo de la aplicación deseada (Zhang *et al.*, 2016). En este proceso la reacción se inicia a alta temperatura, pero esta se omite utilizando agentes reductores fuertes, como el borohidruro de sodio. Este último reactivo es muy corrosivo y hace riesgosa su manipulación, por lo que actualmente existe la tendencia de encontrar agentes reductores fuertes, de origen natural, que hagan más sustentables los procesos de síntesis de nanopartículas de plata y oro.

Los nanotubos de carbono, por otro lado, se fabrican sometiendo a altas temperaturas algún material carbonáceo, el cual puede ser sólido, como el grafito, o líquido, como algún solvente orgánico. El proceso se realiza dentro de un horno diseñado especialmente, donde los materiales se vaporizan debido a la alta temperatura y los átomos de carbono se alinean e interaccionan unos con otros, de tal forma que se producen las estructuras típicas de los nanotubos. Estos se depositan sobre las superficies del interior del horno, de donde hay que recuperarlos mediante raspado una vez terminado el proceso. Si sobre una de las superficies internas del horno se dispersan intencionalmente nanopartículas de un metal catalizador, se forman nanotubos de carbono de una sola capa, cuyo diámetro dependerá del tamaño de las nanopartículas metálicas. Si no se adiciona el catalizador, se obtienen mayormente nanotubos de carbono multicapa, de diámetro variable (Eatemadi *et al.*, 2014).

La fabricación de nanopartículas de origen biológico, como las derivadas de proteínas, es también un proceso “bottom-up”, espontáneo y relativamente fácil de realizarse ya que no requiere de equipos super especializados, además de que ocurre a temperaturas cercanas a la del ambiente. Una estrategia es la hidrólisis enzimática para liberar péptidos específicos, los cuales actúan como bloques moleculares que posteriormente se ensamblan espontáneamente para formar nanopartículas proteicas.

La forma y tamaño de las nanopartículas depende de la proteína y enzima utilizadas. Como las proteínas tienen una gran diversidad estructural, se puede lograr una infinidad de formas, como nanoesferas, nanotubos y nanovesículas, así como aprovechar los grupos funcionales presentes en las mismas para aplicaciones muy específicas.

La compleja estructura química de las proteínas puede también ocasionar un ensamble descontrolado, que resulta finalmente en precipitación. Esto se puede evitar mediante la adición de grupos funcionales que estabilicen a las nanopartículas ya formadas. Debido a su biocompatibilidad y tamaño, así como a las propiedades funcionales de emulsificación y formación de geles, las nanopartículas proteicas tienen un gran potencial en las industrias alimentaria y farmacéutica como transportadores de fármacos y compuestos bioactivos (Bourbon *et al.*, 2019). Hay una clase de proteínas, las albúminas, que tienen una afinidad natural por las células cancerosas. Esta propiedad las hace candidatas para la preparación de nanopartículas cargadas con

fármacos, para dirigir estos directamente a las células tumorales y así evitar los efectos secundarios de los tratamientos convencionales (Hong *et al.*, 2020).

Propiedades de la nanoescala para la manufactura de productos novedosos

Para aplicaciones relacionadas con propiedades mecánicas u otras, se preparan nanocompuestos. Un nanocompuesto es un material sólido que consiste en varias fases, al menos una de las cuales tiene una, dos o tres dimensiones de tamaño nanométrico. La fase o fases nanométricas pueden ser nanopartículas, nanofibras o nanoarcillas y se dispersan dentro de una matriz metálica, cerámica o polimérica (Omanović-Miklićanin *et al.*, 2020).

Un nanocompuesto de matriz metálica consiste en una fase metálica (o de aleaciones), como aluminio, hierro, magnesio, estaño y plomo, la cual se refuerza con un material nanométrico para darle mejores propiedades de ductilidad, tenacidad, así como de resistencia mecánica y a las altas temperaturas. Los nanocompuestos metálicos tienen aplicaciones en las industrias aeroespacial y automotriz.

Por otro lado, las cerámicas convencionales tienen el problema de fragilidad y propensión a la fractura, debido a la propagación de grietas. Los nanocompuestos de matriz cerámica resuelven en gran medida este problema porque la matriz se refuerza con una nanofase metálica dúctil, que le otorga una mayor durabilidad y resistencia mecánica. Los nanocompuestos cerámicos encuentran aplicaciones en amplios sectores de la industria, desde la aeroespacial y automotriz, hasta la militar y biomédica. Respecto a esta última, las biocerámicas representan un gran potencial para desarrollar una nueva generación de implantes y prótesis, ya que no solo se pueden mejorar las propiedades mecánicas, sino que el efecto se puede combinar con propiedades bioactivas para reducir el riesgo de rechazo y/o aumentar la proliferación de células regeneradoras de hueso.

Los nanocompuestos de matriz polimérica consisten en una fase polimérica en la que se dispersa algún relleno o *filler*. Los *fillers*, más correctamente llamados *nanofillers*, para este caso, pueden ser nanotubos de carbono, nanopartículas metálicas, nanoarcillas y muchos otros. A nivel molecular se dan interacciones entre el polímero y el *nanofiller*, lo que resulta en un cambio en las propiedades del material, entre las que se incluye una alta estabilidad térmica, así como mejores propiedades mecánicas y de permeabilidad a gases (Omanović-Miklićanin *et al.*, 2020).

La industria electrónica es uno de los mejores testigos de lo que se puede lograr mediante la nanotecnología. El desarrollo de pantallas de última generación utiliza tecnología con base en QDots, ya que estos proporcionan colores de alta pureza, con lo que se obtiene una resolución excelente. Igualmente, la alta conductividad eléctrica de los nanotubos de carbono y el grafeno, además de otras propiedades de este último, como la transparencia y ductilidad, los hace excelentes para aplicaciones en electrónica. No está muy lejos el día en que se comercialicen computadoras y pantallas “enrollables”.

Los nanotubos de carbono también se utilizan en nanocompuestos para fabricar artículos deportivos y automotrices, más resistentes y ligeros que los convencionales. En el envasado de alimentos, las cubiertas que están en contacto con estos pueden contener nanomateriales que les otorgan propiedades innovadoras, como actividad antimicrobiana y antioxidante, indicación de la presencia de microorganismos patógenos, permeabilidad controlada a los gases y al agua, registro

del historial de temperaturas, etc. Incluso es posible elaborar envases multifuncionales e inteligentes, es decir que contengan más de un componente nanotecnológico y que cada uno de ellos lleve a cabo acciones específicas en respuesta a cambios en el ambiente circundante (He *et al.*, 2020).

Las telas para la fabricación de prendas de vestir repelentes al agua y la suciedad se tejen con hilos previamente impregnados con nanopartículas de sílice, para darles la propiedad de hidrofobicidad (Wei *et al.*, 2020). Algunas preparaciones farmacéuticas y cosméticas se hacen en forma de nanoemulsiones, donde los compuestos sensibles se encapsulan dentro de las gotas nanométricas de la emulsión. Esto último tiene la ventaja de proteger a los compuestos bioactivos mediante su encapsulación, además de hacer sensorialmente atractivos a los productos.

La imitación de la Naturaleza como herramienta poderosa para la innovación

Algunos de los desarrollos nanotecnológicos están inspirados en nanoestructuras naturales. Tomemos como ejemplos el *efecto loto* y el *efecto geco*. La planta de loto es conocida por crecer en zonas pantanosas y sin embargo siempre permanecer limpia. Un análisis microscópico de la superficie de las hojas de loto revela la presencia de cristales de cera de dimensiones nanométricas. La cera en las hojas de las plantas es normal, es un material de naturaleza lipídica que proporciona características hidrofóbicas a la superficie, es decir, repele el agua. No obstante, el tamaño nanométrico de las estructuras cerosas en las hojas de loto es lo que explica por qué estas se autolimpian constantemente.

El área de contacto entre las gotas de agua (condensadas del ambiente) y los nanocristales de cera de la superficie, es extremadamente pequeña. A esto se le conoce como superhidrofobicidad y ocasiona que las gotas rueden espontáneamente a la menor inclinación, arrastrando consigo cualquier resto de suciedad. Al fenómeno en conjunto se le llama *efecto loto* y su imitación se aprovecha para la manufactura de pintura para superficies autolavables, así como para la fabricación de telas repelentes al agua y la suciedad (Wei *et al.*, 2020).

Existe otro fenómeno conocido como *efecto geco*, que explica la capacidad de los gecos y de muchos insectos y artrópodos de caminar sobre cualquier superficie plana o inclinada, incluso sobre vidrio. La razón es que las patas de los gecos están cubiertas de fibras nanométricas en forma de espátula, cada una de las cuales tiene ancho y largo de 200 nm y 20 nm de grosor. Cada espátula, al estar en contacto con una superficie, experimenta atracción hacia esta por medio de fuerzas de Van der Waals, las cuales son un tipo de interacción electrostática. Estas interacciones son de las más débiles conocidas, pero el conjunto de millones de espátulas (entre 50 y 500 millones en cada almohadilla de cada dedo) hace crecer la fuerza de atracción a tal grado que se soporta el peso del geco y este se mantiene firme sobre cualquier superficie (Greiner, 2010).

El estudio del *efecto geco* fue la inspiración para desarrollar nanopartículas que se utilizan como aditivos para concreto, con la finalidad de promover una mayor adhesión entre partículas, lo que resulta en una mayor resistencia mecánica debido a la baja probabilidad de fisuras o grietas. Estudiar el *efecto geco* también ha permitido una mejor comprensión de los fenómenos superficiales, por lo que hoy existe el potencial de desarrollar productos de interés en biomedicina, por ejemplo adhesivos fibrilares que replacen la sutura y las grapas quirúrgicas.

Conclusiones y perspectivas

El presente artículo aborda, de forma general, diferentes aspectos relacionados con las propiedades, producción y aplicaciones de nanomateriales. La discusión dista mucho de ser exhaustiva, ya que cada sección merece una revisión completa. Igualmente, se dan algunos ejemplos que, a juicio de los autores, pueden ayudar a introducirse en el tema, pero existe una enorme cantidad de otras propiedades y aplicaciones. No se trataron cuestiones de seguridad, por ser de demasiada amplitud, sin embargo, se puede comentar que los organismos reguladores de diferentes regiones del mundo están trabajando arduamente en este sentido.

Muchos de los nanomateriales son inocuos, ya sea por su origen biológico o porque ya están clasificados como seguros. Aquellos para los que existen dudas razonables, se está llevando a cabo la investigación pertinente para garantizar su seguridad antes de lanzarlos al mercado. Aquí cabe aclarar que algunas de las aplicaciones son potenciales, aún se encuentran en la etapa de experimentación, sobre todo las que involucran el introducir nanomateriales en el cuerpo humano.

La nanotecnología es una disciplina emergente que está revolucionando todas las áreas de la industria. En estos tiempos en que la sostenibilidad es un requerimiento urgente, la nanotecnología puede ser una alternativa en la resolución de problemas ambientales, de seguridad alimentaria y de salud. Los detractores de la nanotecnología o los medios de comunicación poco serios pueden influir negativamente en la aceptación de los productos nanotecnológicos e incluso causar pánico, por lo que existe el reto de proporcionar información objetiva. También se reconoce que, aunque una variedad de los nanomateriales es inocua debido a su origen biológico, hace falta investigación para responder a diversas interrogantes en lo que concierne a la seguridad. Por último, la Naturaleza es ejemplo de nanoestructuras funcionales perfectas, de manera que imitarla seguramente resultará en mayores innovaciones y en un planeta sostenible.

Agradecimiento

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) por el financiamiento del proyecto A1-S-40197 de la Convocatoria de Ciencia Básica 2017-2018.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Referencias

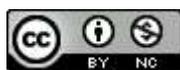
- ACS (2010). Recuperado de American Chemical Society National Historic Chemical Landmarks. Discovery of Fullerenes. (Acceso el 28 de septiembre 2021). <https://bit.ly/3s9YtLz>
- Allan, J., Belz, S., Hoeveler, A., Hugas, M., Okuda, H., Patri, A., Rauscher, H., Silva, P., Slikker, W., Sokull-Kluettgen, B., Tong, W., & Anklam, E. (2021). Regulatory landscape of nanotechnology and nanoplastics from a global perspective. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 122, 104885. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2021.104885>.

- Badilli, U., Mollarasouli, F., Bakirhan, N.K., Ozkan, Y., Ozkan, S.A. (2020). Role of quantum dots in pharmaceutical and biomedical analysis, and its application in drug delivery. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 131, 116013. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116013>.
- Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., & Rizzolio, F. (2019). The history of nanoscience and nanotechnology: From chemical-physical applications to nanomedicine. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 25(1), 112. <https://doi.org/10.3390/molecules25010112>
- Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, Ch., & Weibel, E. (1982). Surface studies by scanning tunneling microscopy. *Physical Review Letters*, 49(1), 57–61. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.57>
- Binnig, G., Quate, C.F., & Gerber, C. (1986). Atomic force microscope. *Physical Review Letters*, 56(9), 930-933. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>
- Borisenko, V. E., & Ossicini, S. (2008), What is What in the Nanoworld. A Handbook on Nanoscience and Nanotechnology. Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527623334>
- Bourbon, A. I., Pereira, R. N., Pastrana, L. M., Vicente, A. A., & Cerqueira, M. A. (2019). Protein-based nanostructures for food applications. *Gels (Basel, Switzerland)*, 5(1), 9. <https://doi.org/10.3390/gels5010009>
- Camarillo-Abad, E., Blome-Fernández, R., Castellanos-Andrade, P. I., & Campos Delgado, J. (2019). Mitos y realidades de la nanotecnología en México. *Mundo Nano*, 12(22), 1e-16e. <http://dx.doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.65023>
- Cotta, M. A. (2020). Quantum dots and their applications: What lies ahead? *ACS Applied Nano Materials*, (6), 4920-4924. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c01386>
- Dhapte, V., & Pokharkar, V. (2019). Nanosystems for Drug Delivery: Design, Engineering, and Applications. In *Micro and Nano Technologies, Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles* (pp. 321-345). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102579-6.00013-7>
- Dykman, L. A., & Khlebtsov, N. G. (2011). Gold nanoparticles in biology and medicine: Recent advances and prospects. *Acta Naturae*, 3(2), 34–55. <https://bit.ly/3OUDyWH>
- Eatemadi, A., Daraee, H., Karimkhanloo, H., Kouhi, M., Zarghami, N., Akbarzadeh, A., Abasi, M., Hanifehpour, Y., & Joo, S. W. (2014). Carbon nanotubes: Properties, synthesis, purification, and medical applications. *Nanoscale Research Letters*, 9(1), 393. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-393>
- He, H., Pham-Huy, L. A., Dramou, P., Xiao, D., Zuo, P., & Pham-Huy, C. (2013). Carbon nanotubes: Applications in pharmacy and medicine", *BioMed Research International*, 2013, Article ID 578290. <https://doi.org/10.1155/2013/578290>
- Feynman, R. P. (1961). There's Plenty of Room at the Bottom. In *Miniaturization* (pp. 282–296). Reinhold.
- Gao, F., & Gu, Z. (2016). Melting Temperature of Metallic Nanoparticles. In *Handbook of Nanoparticles*, (pp. 661–689). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15338-4_6
- Greiner, C. (2010). Gecko-Inspired Nanomaterials. In *Nanomaterials for the Life Sciences Vol.7: Biomimetic and Bioinspired Nanomaterials*. (pp. 1–39), Wiley–VCH. <https://bit.ly/3FfYmDQ>
- Guo, H., Baker, A., Guo, J., & Randall, C.A. (2016). Protocol for ultralow-temperature ceramic sintering: An integration of nanotechnology and the cold sintering process. *ACS Nano*, 10 (11), 10606–10614. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.6b03800>
- He, X., Deng, H., Hwang, H. (2019). The current application of nanotechnology in food and agriculture. *Journal of Food and Drug Analysis*, 27, 1 – 21. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.12.002>

- Hong, S., Choi, D. W., Kim, H. N., Park, C. G., Lee, W., & Park, H. H. (2020). Protein-based nanoparticles as drug delivery systems. *Pharmaceutics*, 12(7), 604. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12070604>
- Inagaki, M., Kang, F., Toyoda, M., Konno, H. (2014). Graphene: Synthesis and Preparation, In *Advanced Materials Science and Engineering of Carbon*, (pp. 41-65), Butterworth-Heinemann, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407789-8.00003-X>
- Katas, H., Moden, N.Z., Lim, C.S., Celesistinus, T., Chan, J.Y., Ganasan, P., Suleman, S., & Abdalla, I. (2018). Biosynthesis and potential applications of silver and gold nanoparticles and their chitosan-based nanocomposites in nanomedicine. *Journal of Nanotechnology*, 2018, Article ID 4290705. <https://doi.org/10.1155/2018/4290705>
- Kuncser, V., & Miu, L. (2014). *Size Effects in Nanostructures, Basics and Applications*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44479-5>
- Loos, M. (2015). *Nanoscience and Nanotechnology*. In *Carbon Nanotube Reinforced Composites* (pp. 1–36). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3195-4.00001-1>
- Nanowerk (2021). https://www.nanowerk.com/metric_prefixes_table.php
- Omanović-Miklićanin, E., Badnjević, A., Kazlagic, A., & Hajlovac, M. (2020). Nanocomposites: A brief review. *Health and Technology*, (10), 51–59. <https://doi.org/10.1007/s12553-019-00380-x>
- Reibold, M., Paufler, P., Levin, A., Kochmann, W., Pätzke, N., & Meyer, D. C. (2006). Carbon nanotubes in an ancient Damascus sabre. *Nature*, 444, 286. <https://doi.org/10.1038/444286a>
- Sanità, G., Carrese, B., & Lamberti, A. (2020). Nanoparticle surface functionalization: How to improve biocompatibility and cellular internalization. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 7, Article 587012. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2020.587012>
- SciDevNet Noticias (2011) <https://bit.ly/3w43B5h>
- Selvamani, V. (2019). *Stability Studies on Nanomaterials Used in Drugs*. In *Micro and Nano Technologies, Characterization and Biology of Nanomaterials for Drug Delivery*. (pp. 425–444). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814031-4.00015-5>
- Wei, D. W., Wei, H., Gauthier, A. C., Song, J., Jin, I., & Xiao, H. (2020). Superhydrophobic modification of cellulose and cotton textiles: Methodologies and applications. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.03.001>
- Zhang, X. F., Liu, Z. G., Shen, W., & Gurunathan, S. (2016). Silver nanoparticles: Synthesis, characterization, properties, applications, and therapeutic approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(9), 1534. <https://doi.org/10.3390/ijms17091534>
- Zhang Chengke, Wu Licun, de Perrot Marc, Zhao Xiaogang. (2021). Carbon nanotubes: A summary of beneficial and dangerous aspects of an increasingly popular group of nanomaterials. *Frontiers in Oncology*, 11, 2908. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.693814>

2021 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Artículo de Investigación

Productividad y función de producción de ingeniería para la producción de Glucosiltransferasa por fermentación

Productivity and Engineering Production Function for Production of Glucosyltransferase by Fermentation

Marco Antonio Paredes-Lizárraga¹ *

¹ Tecnológico Nacional de México / I. T. Los Mochis. Juan de Dios Bátiz y 20 de Noviembre. Los Mochis, Sinaloa, México.

*Correspondencia: marco.pl@mochis.tecnm.mx (Marco Antonio Paredes-Lizárraga)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v15i3.844>

Recibido: 30 de agosto de 2021; Aceptado: 30 de noviembre de 2021

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Resumen

Se presenta un modelo de función de producción de ingeniería para modelar la producción de glucosiltransferasa por fermentación, con el objetivo de determinar la máxima producción, máxima productividad y elasticidad unitaria. A los datos del primer DOE publicados por Kawaguti *et al.* (2005) se les aplicó el método de regresión estadística restringida (con $R^2 = 0.981$, $P \leq 0.001$) y optimización restringida en el software Excel® Solver®. Para fermentar, se utilizó melaza de caña (X_1 gL⁻¹), licor de maíz (X_2 gL⁻¹) y levadura (X_3 gL⁻¹) *Erwinia Sp.* en cantidades identificadas por el vector de insumos $X = (X_1, X_2, X_3)$. Para cada combinación óptima seleccionada, los pronósticos para producción de glucosiltransferasa, costo por experimento y productividad son: producción óptima en (129.39, 72.897, 16.77) con 5.78 UmL⁻¹, \$0.74 y 7.75 UmL⁻¹\$⁻¹ respectivamente; para productividad máxima en (118.39, 42, 14, 4) con 4.56, \$0.31 y 14.48; para productividad óptima (elasticidad unitaria y rendimientos constantes) en (102.44, 36.48, 3.46) con 4.01, \$0.27 y 14.73. Los rendimientos de escala y elasticidad inducen a explorar el vector (102.56, 36.52, 3.47) como centro del próximo diseño experimental secuencial, tal que en este diseño se logre una mejor aproximación a los rendimientos constantes y una productividad óptima global.

Palabras clave: función de producción, regresión restringida paso a paso, Excel® Solver®, elasticidad de la producción, productividad

Abstract

An engineering production function model is presented to model the production of glycosyltransferase by fermentation, to determine the maximum production, maximum productivity and unit elasticity. To the data of the first DOE published by Kawaguti et al. (2005), the restricted statistical regression method (with $R^2 = 0.981$, $P = 001$) and restricted optimization were applied in the Excel® Solver® software. To ferment, cane molasses ($X_1 \text{ gL}^{-1}$), corn liquor ($X_2 \text{ gL}^{-1}$) and yeast ($X_3 \text{ gL}^{-1}$) *Erwinia Sp.* were used. In quantities identified by the input vector $X = (X_1, X_2, X_3)$. For each selected optimal combination, the forecasts for glycosyltransferase production, cost per experiment and productivity are: optimal production at (129.39, 72.897, 16.77) with 5.78 UmL^{-1} , \$0.74 and 7.75 $\text{UmL}^{-1}\text{\$}^{-1}$ respectively; for maximum productivity in (118.39, 42,14, 4) with 4.56, \$0.31 and 14.48; for optimal productivity (unit elasticity and constant returns) at (102.44, 36.48, 3.46) with 4.01, \$0.27 and 14.73 respectively. The returns to scale and elasticity lead us to explore the vector (102.56, 36.52, 3.47) as the center of the next sequential experimental design, such that this design achieves a better approximation to constant yields and global optimal productivity.

Keywords: production function, stepwise restricted nonlinear regression, Excel® Solver®, production elasticity, productivity.

1.Introducción

La importancia de la función de producción (FDP) radica en la determinación de las combinaciones óptimas de insumos que hacen más eficiente (en términos económicos, técnicos y de escala) la obtención de la producción en las empresas. En términos económicos, los economistas buscan la obtención del menor costo de producción; en términos técnicos, los ingenieros buscan la máxima producción del proceso y en términos de escala, los planificadores buscan el tamaño de empresa que logra los rendimientos constantes de escala. La primera (FDP) de uso común es la Cobb-Douglas (CD) publicada en 1928. Humphrey (1997) reporta que Lord Kelvin publicó una función de producción de ingeniería (FDPI) en 1882 e indica también que las funciones de producción algebraica son anteriores a Cobb-Douglas, ya que al menos 18 economistas de siete países en un lapso de 160 años presentaron o describieron tales funciones antes de Cobb-Douglas. Desde esta perspectiva, la función CD y sus sucesores más recientes representan la culminación de una larga tradición en lugar del comienzo de una nueva.

Chenery (1949) reporta que la FDPI describe cada entrada en términos de una o más de sus propiedades, que pueden variar independientemente dentro de cierto límite, usando relaciones de ingeniería descritas por fórmulas basadas en las leyes de la física y química, relacionadas con la naturaleza de la sustancia química o transformaciones físicas que están involucradas en el proceso productivo y que el caso más simple para la construcción de una función de producción sería una en la que la mano de obra puede tratarse como un factor conjunto con algún otro insumo, en el que la ciencia de la ingeniería está bien desarrollada y en el que las características técnicas de uno o unos pocos procesos principales son un factor determinante en la estructura de costos de la planta o empresa. Las industrias que parecen acercarse más a este ideal son las de procesos químicos, el refinamiento de materias primas y otras con técnicas estandarizadas y automatizada.

Las FDPI en el acervo científico son escasas debido a las relaciones cuantitativas de ingeniería y economía que deben involucrar para maximizar los beneficios de las empresas, analizando

simultáneamente cantidades de producción y costos de producción. En una investigación documental Wibe (1983) lleva a cabo una revisión de información publicada relacionada con funciones de producción de ingeniería donde la mayor parte de los trabajos reportan propiedades de sustitución, y en menor proporción se relacionan con propiedades de escala y otras se relacionan con progreso técnico. Reporta además que el aspecto más interesante de la FDPI es la medición ingenieril de la sustitución de insumos. Wibe (1983) descarta una larga cantidad de publicaciones relacionadas con la agricultura argumentando no creer que las elasticidades de sustitución entre vitaminas y proteínas en la crianza de pollos pueda ser de interés para los economistas.

La ONU (1978) declara que las FDPI son las más cercanas para determinar la sustitución de insumos, al ser derivadas directamente de las “leyes” que gobiernan los fenómenos físicos y naturales. Desafortunadamente las FDPI se han desarrollado solo para unos pocos procesos, el enfoque no es tan prometedor como se pensaba debido a las complicaciones matemáticas al pasar de las relaciones físicas a las relaciones económicas entre insumos y productos.

Marsden *et al.* (1974) demuestran que las funciones CD y elasticidad constante de sustitución (CES) corresponden a las propiedades físicas de reacciones químicas y biológicas generales. A partir de la estequiometría de reacciones químicas (Levenspiel, 1999; Davis & Davis, 2003; Fogler, 2016) se reporta que la tasa de cambio de una reacción química se corresponde con aproximación a la tasa de cambio (Ec. 1).

$$-r_A = kC_A^\alpha C_B^\beta \quad (\text{Ec. 1})$$

donde r_A es la tasa de cambio, k es constante de proporcionalidad, C_A y C_B son concentraciones de reactivos (insumos) A y B respectivamente, α y β son valores proporcionales a las cantidades de reactivos A y B respectivamente; con orden global de $n = \alpha + \beta$. La tasa se puede expresar utilizando cualquier medida equivalente de la concentración, como volumen, presión parcial o cantidad de sustancia. La función CD, por tanto, es una aproximación de FDPI para un proceso químico y biológico con función matemática monótonamente creciente. En el caso particular del proceso de fermentación, en el cual el microorganismo se estresa si tiene condiciones extremas para realizar su función biológica de conversión de reactivos en productos, la función matemática que describe al proceso es cóncava, inicia creciente y termina decreciente, evidenciando un máximo global.

Al modelo CD se le han hecho modificaciones para adaptarlo a situaciones específicas de la realidad; Lee *et al.* (2017) lo generalizan a seis variables para un proceso agrícola de producción de maíz, arroz y frijol y asumen que el modelo es una FDPI. Gechert *et al.* (2019) reportan que la elasticidad de sustitución entre capital y trabajo es un parámetro clave en economía porque mide lo fácil que es sustituir un factor de producción por otro, modificando la combinación de insumos. La elasticidad juega un papel fundamental en la teoría del crecimiento económico. A su vez, Barlow and Vodenska (2020) proponen un modelo CD dinámico de cascada para investigar el riesgo sistémico del sector industrial y estudiar el efecto de disrupción en la economía por pandemia COVID-19. Paredes-Lizárraga (2020) aplica el modelo CD a la producción de fenilalanina por fermentación utilizando regresión paso a paso con acotamiento de superficie de respuesta para mejorar R^2 .

En este trabajo se presenta una FDPI que satisfaga simultáneamente las condiciones de FDP del campo de la economía y un máximo global de productividad.

Para el proceso general de fermentación, se proponen en este artículo las Ecs. (2) descritas con las formas funcionales siguientes:

$$Y(X) = \begin{cases} A \Pi X_i^{a_i} [C_0 + \sum C_i \ln(d_i X_i)]^h & \text{(Ec. 2a)} \\ A \Pi X_i^{a_i} [C_0 + \sum C_i \ln(d_i - X_i)]^h & \text{(Ec. 2b)} \\ A \Pi X_i^{a_i} [\prod \ln(d_i X_i)]^h & \text{(Ec. 2c)} \\ A \Pi X_i^{a_i} [\prod \ln(d_i - X_i)]^h & \text{(Ec. 2d)} \end{cases}$$

donde A es un factor de productividad total de la función CD, a_i son las elasticidades de producción de la función CD en cada variable con $0 \leq a_i \leq 1$, las d_i son constantes positivas, las $(d_i X_i) > 1$ y $(d_i - X_i) > 1$ y las C_i son irrestrictas en signo y $h=0, 1$. Si $h=0$ las Ecs. (2) se corresponden con la función de producción de Cobb-Douglas.

En este trabajo se establece hipotéticamente que la aplicación del modelo de FDPI descrito en las Ecs. (2) permite estimar las combinaciones óptimas de insumos que maximizan la producción, la productividad, la elasticidad de la producción y la escala del experimento. Por tanto, el objetivo de este trabajo consiste en determinar:

1. La forma funcional de la Ec. (2) con la combinación de insumos que hace máxima la producción de glucosiltransferasa por fermentación, utilizando regresión paso a paso.
2. La combinación de insumos que hace máxima la productividad del proceso de glucosiltransferasa por fermentación, utilizando la FDPI estimada en el objetivo anterior.
3. El óptimo global de productividad por aplicación del análisis de rendimientos de escala y elasticidad de la producción.

2. Materiales y Métodos

Esta investigación es cuantitativa y aplicada, consistió en el remodelado de un diseño experimental (DE) para determinar la superficie de respuesta utilizando el método estadístico matemático; también es correlacional o comparativa porque se contrastó el resultado obtenido con los modelos de FDPI y de segundo orden; es explicativa porque se pronosticaron los resultados ante cambios en las cantidades de insumos, fundamentados en las tasas de cambio del modelo FDPI.

2.1 Materiales

Los datos para este trabajo se tomaron del estudio publicado por Kawaguti *et al.* (2005) quienes realizaron un diseño experimental de tres variables y superficie de respuesta en la producción de glucosiltransferasa por fermentación. En este estudio, a los datos originales se les aplicó regresión

estadística restringida en el software Excel® Solver® (2016) y programación en macros Excel® para obtener el modelo de predicción de la función de producción con la forma funcional de las Ecs. (2).

2.2 Procedimientos de tratamiento de datos y ajustes de modelos

Para el ajuste de la FDPI expresada en las Ecs. (2), a los datos del estudio publicado por Kawaguti *et al.* (2005) se les aplican los métodos de regresión estadística restringida, regresión paso a paso (stepwise) y optimización restringida con Excel® Solver®, como se describe en Paredes-Lizárraga (2020).

2.2.1. Determinación y selección del mejor modelo de regresión

En la Ec. (3) se describe el modelo de programación matemática para obtener los coeficientes del modelo seleccionado. A partir de los 17 datos originales del DOE se corre el modelo y se determinan los valores de R^2 y MSE resultantes; para mejorar el modelo se elimina uno y solo uno dato del DE, acotando la superficie de respuesta, y se determinan los nuevos valores de R^2 y MSE, el proceso termina al encontrar el mejor valor de MSE. Para fines explicativos, la deducción de modelos se ejemplifica con la variante de la Ec.(2d)

$$\min \sum \mu^2 = \sum \left\{ \left[A \Pi X_i^{a_i} \ln(d_i - X_i) \right] - Y \right\}^2 \quad (\text{Ec. 3})$$

Sujeto a $0 < a_i < 1$, $d_i - X_i > 1$, $A > 0$

Donde μ^2 son los errores cuadráticos de la estimación, aleatorios, independientes y normalmente distribuidos, resto de variables definidas previamente en Ecs. (2).

Los modelos de optimización, al estar sujetos a restricciones, se programan en Excel® Solver® y macros Solver® para así encontrar la combinación de coeficientes a_i que minimizan los errores cuadráticos.

2.2.2. Optimización física del modelo

En la Ec. (4), conocidos los coeficientes del modelo de FDPI, se presenta el modelo de optimización restringida (aplicando Solver®) para encontrar el vector de insumos $X = (X_1, X_2, X_3)$ que permite obtener la mayor producción teórica, con el modelo

$$\max Y = \left[A \Pi X_i^{a_i} \ln(d_i - X_i) \right] \quad (\text{Ec. 4})$$

Sujeto a $X_i \min \leq X_i \leq X_i \max$

Donde $X_i \min$ es el valor menor del insumo X_i en el DE; $X_i \max$ es el valor mayor del insumo X_i en el DE, resto de variables definidas previamente en Ecs. (2).

2.2.3 Optimización económica del modelo

En la Ec. (5), conocidos los coeficientes del modelo de FDPI, se presenta el modelo de optimización restringida (aplicando Solver®) para encontrar el vector de insumos $X = (X_1, X_2, X_3)$ que permite obtener la mayor productividad teórica, con el modelo

$$\max PT = \frac{[\text{APIX}_i^{\alpha_i} \ln(d_i - X_i)]}{\sum X_i P_i} \quad (\text{Ec. 5})$$

Sujeto a $X_i \min \leq X_i \leq X_i \max$

Donde PT es productividad, P_i es el precio unitario del insumo X_i , resto de variables definidas previamente en Ecs. (2).

2.2.4 Rendimientos de escala, elasticidad de la producción y productividad

Una propiedad importante de la FDP es el rendimiento de escala. El rendimiento de escala determina la proporción en que cambia la cantidad de producción cuando cambia en cierta proporción la cantidad de insumos, indicando relaciones de productividad. Los rendimientos constantes implican un costo marginal constante, mientras que los rendimientos decrecientes implican un costo marginal que aumenta con cada unidad producida. Como resultado, si los rendimientos a escala disminuyen de constante a decreciente, el costo marginal de la última unidad excedería el costo promedio de todas las unidades producidas, reduciendo el margen de beneficio y la productividad; aumentos en el costo marginal de producción obligan al establecimiento a cobrar un precio más alto. Las desviaciones de los rendimientos constantes a escala implican que el tamaño del establecimiento afecta su productividad (Ho *et al*; 2017). Una industria caracterizada por rendimientos crecientes, una empresa con una ventaja inicial puede aumentar su producción y disminuir sus costos promedio mucho más rápidamente que los competidores que recién comienzan la producción (Gilpin & Rusik, 2001). Por este motivo es importante determinar la combinación de insumos que maximiza el beneficio de la empresa, lo cual implica atender y entender las relaciones económicas de los rendimientos de escala en los procesos de producción.

La elasticidad de la producción relaciona la tasa de cambio de la producción con la tasa de cambio de los insumos, indicando relaciones de productividad. Para toda FDP la derivada es positiva y decreciente, lo cual implica que cuando X es pequeño, la tasa de cambio en Y es más grande que la tasa de cambio en X , logrando elasticidades, rendimientos crecientes y mejora de la productividad.

Teorema. Sea la función de producción $Y(X)$ transformada tal que al incrementar el vector de insumos en un escalar lambda (λ) mayor que uno se obtiene $Y(\lambda, X) = \text{RTS}(\lambda, X) Y(X)$ donde $\text{RTS}(\lambda, X)$ es la función de rendimientos de escala. La elasticidad de la producción está directamente asociada a los rendimientos de escala tal que rendimientos crecientes están asociados a elasticidades de producción y rendimientos decrecientes están asociados con inelasticidades de producción.

$$\varepsilon_x = \frac{\frac{\Delta Y}{Y}}{\frac{\Delta X}{X}} = \frac{\frac{Y(\lambda X) - Y(X)}{Y(X)}}{\frac{\lambda X - X}{X}} = \frac{[\text{RTS}]Y(X) - Y(X)}{\frac{\lambda X - X}{X}} = \frac{\text{RTS} - 1}{\lambda - 1} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde ε_x es la elasticidad de la producción por los insumos, $\Delta Y/Y$ es el cambio porcentual en la producción, $\Delta X/X$ es el cambio porcentual (en valor físico o económico) del vector de insumos.

La generalización de este teorema plantea la oportunidad de explorar la aplicación del análisis de elasticidad a otros modelos, como el de superficie de respuesta aplicada en DOE's.

3. Resultados y discusión

Para este artículo se utilizaron los datos del primer diseño experimental publicado por Kawaguti *et al.* (2005), en el cual utilizaron X_1 gL⁻¹ de melaza de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), X_2 gL⁻¹ de licor de maíz (*Zea mays*) fermentado y X_3 gL⁻¹ de levadura *Erwinia Sp.* para producir glucosiltransferasa por fermentación aplicando regresión polinomial de segundo orden a un diseño factorial central compuesto de 17 corridas con tres factores (k=3; corridas: 2^k +2k+k) con correlación global ($R^2=0.8$) y Cuadrado Medio del Error (CME=MSE=0.51). Identificando las cantidades de insumos aplicados en cada corrida utilizando una notación vectorial para el vector de insumos $X=(X_1, X_2, X_3)$, Kawaguti *et al.* (2005), en el tercer DOE secuencial, llegan a la combinación óptima (100, 60, 8) con la cual obtuvieron 6,65 U mL⁻¹ de glucosiltransferasa, valorado con el modelo de segundo orden. A los 17 tratamientos originales del primer diseño experimental, indicados en la tabla 1, se les aplicó regresión estadística paso a paso bajo los modelos descritos en las Ecs. (2) eliminando un dato a la vez para mejorar paso a paso el estadístico R^2 y MSE de cada modelo.

3.1 Determinación y selección del mejor modelo de regresión

En la tabla 2 se reportan los resultados de las regresiones estadísticas de las cuatro variantes de modelo. Cada regresión inicia con los 17 datos de la tabla 1 y termina cuando se alcanza el menor cuadrado del error (CME ó MSE). El modelo de la Ec. (2a) es óptimo con 11 de los 17 datos de la tabla 1; el modelo de la Ec. (2b) es óptimo con 12 de los 17 datos de la tabla 1; el modelo de la Ec. (2c) es óptimo con 9 de los 17 datos de la tabla 1 y el modelo de la Ec. (2d) es óptimo con 8 de los 17 datos de la tabla 1.

Comparando los resultados de la tabla 2 se puede observar que las cuatro variantes de FDPI propuestas tienen mejores indicadores de R^2 y MSE que el modelo polinomial de segundo orden utilizado por Kawaguti *et al.* (2005).

De las cuatro variantes de FDPI, el mejor modelo de regresión es el descrito en la Ec. (2d) e indicado en la tabla 2 con $MSE = 0.046$, con el cual se trabajó el proceso de optimización y todos los apartados siguientes. Este mejor modelo se corresponde con la Ec. (3).

Los datos seleccionados para la regresión y los resultados de pronóstico con el modelo de la Ec. (2d) se muestran en la Tabla 3. En la columna 6 se indican los valores pronosticados de glucosiltransferasa. El modelo correlaciona con $R^2 = 0.981$ y valor $P \leq 0.001$. Los coeficientes se indican en la tabla 4.

Tabla 1. Matriz experimental del primer diseño central compuesto utilizado por Kawaguti *et al.*
Table 1. Experimental matrix of the First composite central design data used by Kawaguti *et al.*

No. Exp.	Melaza (gL ⁻¹) (X ₁)	Licor (gL ⁻¹) (X ₂)	Levadura (gL ⁻¹) (X ₃)	Glucosil Transferasa (U mL ⁻¹)
1	70.24	42.14	7.23	3.5
2	129.76	42.14	7.23	4.46
3	70.24	77.86	7.23	3.67
4	129.76	77.86	7.23	5.28
5	70.24	42.14	16.77	3.49
6	129.76	42.14	16.77	5.32
7	70.24	77.86	16.77	3.78
8	129.76	77.86	16.77	0.53
9	50	60	12	3.27
10	150	60	12	1.43
11	100	30	12	4.92
12	100	90	12	3.19
13	100	60	4	5.73
14	100	60	20	5.731
15	100	60	12	4.97
16	100	60	12	5.1
17	100	60	12	5.4

Referencia: (Kawaguti *et al.*,2005) con permiso del Autor.

Source: (Kawaguti *et al.*,2005) with Author permission

Tabla 2. Modelos bajo estudio y comparación por MSE

Table 2. Models under study and MSE comparison

Modelo (Ec)	R ²	N	SST	SSE	GL	MSE
$A \prod X_i^{a_i} [C_0 + \sum C_i \ln(d_i X_i)]$	0.978	11	7.915	0.169	2	0.085
$A \prod X_i^{a_i} [C_0 + \sum C_i \ln(d_i - X_i)]$	0.935	12	10.31	0.663	3	0.221
$A \prod X_i^{a_i} [\prod \ln(d_i X_i)]$	0.927	9	6.396	0.463	3	0.154
$A \prod X_i^{a_i} [\prod \ln(d_i - X_i)]$	0.981	8	4.99	0.092	2	0.046

Comparación de modelos. El modelo polinomial de segundo orden para tres factores requiere de 9 estimadores estadísticos para variables más el término constante y requiere de al menos 10 datos independientes para el proceso de regresión, mientras que el modelo de FPDI de la Ec. (2d) requiere de 6 estimadores estadísticos para variables más el término constante y requiere de al menos 7 datos independientes por lo cual ofrece la ventaja de elegir en la regresión a los datos con menores

Tabla 3. Datos seleccionados para la regresión y pronóstico estimado. Y^*

Table 3. Selected data for regression and estimated forecast. Y^*

No. Exper.	Melaza (gL ⁻¹) (X ₁)	Licor (gL ⁻¹) (X ₂)	Levadura (gL ⁻¹) (X ₃)	Glucosil Transferasa (U mL ⁻¹)	Valor Estimado (Y*)(U mL ⁻¹)
1	70.24	42.14	7.23	3.5	3.354
3	70.24	77.86	7.23	3.67	3.673
4	129.76	77.86	7.23	5.28	5.369
5	70.24	42.14	16.77	3.49	3.6
6	129.76	42.14	16.77	5.32	5.263
7	70.24	77.86	16.77	3.78	3.942
15	100	60	12	4.97	4.952
16	100	60	12	5.1	4.952

Referencia: Cálculos del Autor. $R^2=0.981$ con valor $p \leq 0.001$

Source: Author's calculations. $R^2=0.981$ with p value ≤ 0.001

valores de cuadrados medios del error (acotando la superficie de respuesta del DE) para mejorar la correlación global del modelo (R^2). En términos estadísticos, el modelo FDPI aquí expuesto es mejor que el modelo polinomial porque tiene mejor valor de R^2 (0.981 contra 0.8) y mejor valor de MSE (0.046 contra 0.51).

3.2 Optimización física del modelo

Una vez conocidos los parámetros de la FDPI, se procede a optimizar los resultados del proceso de producción de glucosiltransferasa, aplicando el modelo de la Ec. (4) y respetando el rango de variación permitido a cada variable independiente X_i , como se indican en los renglones 2 y 3 de la tabla 5, a fin de no extrapolar resultados y mantener el proceso dentro de las fronteras del experimento. En la tabla 5 se muestran los resultados comparativos de los procesos de optimización física y económica, obtenidos por Solver©.

Tabla 4. Coeficientes de regresión ajustados para el modelo de la Ec. (2d).

Table 4. Adjusted regression's coefficients for Ec. (2d) model.

Coeficiente	Valor ajustado	Coeficiente	Valor ajustado
A	0.00008		
a_1	0.999	d_1	167.2679
a_2	0.38879	d_2	121.2
a_3	0.09197	d_3	268.62262

Solver realiza búsquedas metódicas de valores ideales para cada X_i tal que se obtiene el mayor valor de la variable dependiente. En la tabla 5 se reportan los resultados del proceso de optimización restringida de la producción, y la productividad asociada a cada vector de insumos.

Para obtener la productividad asociada a cada vector de insumos, en la tabla 5 se indican los precios en dólares para cada insumo, consultados con proveedores especializados: \$1 Kg⁻¹ para melaza (consultado en alibaba.com), \$2 Kg⁻¹ para licor (consultado en quiminet.com) y \$28 kg⁻¹ para levadura (consultado en mercadlibre.com). Con estos precios y las cantidades de cada X_i se calcula el costo total de operación de cada experimento, indicado en la columna 6 de la tabla 5, y se calcula la productividad reportada en la columna 7 de la tabla 5. En la columna 8 se reporta el costo unitario por experimento estimado por U mL⁻¹ de glucosiltransferasa.

En el renglón 4 se indican los valores óptimos reportados por Kawaguti *et al.* (2005) en su publicación original (100. 60, 8) con la cual reporta que (en el tercer DOE secuencial) obtuvieron 6.65 U mL⁻¹ de glucosiltransferasa con el modelo de segundo orden pero que medido con el modelo de FDPI se pronosticaron 4.35 U mL⁻¹ de producto, con un costo de \$0.444 por corrida, productividad de 9.8 y costo unitario por experimento de 0.10 \$mLU⁻¹.

En el renglón 5 se describe la cantidad de insumos a aplicar para obtener la máxima producción física, respetando el modelo de la Ec. (4), tal que con el vector de insumos (129.39, 72.897, 16.77) se pronostican 5.78 U mL⁻¹ de glucosiltransferasa a un costo de \$0.74 por corrida, lo cual nos da una productividad de 7.76 U exper \$⁻¹mL⁻¹ y un costo unitario por experimento de 0.12 \$mLU⁻¹ de glucosiltransferasa.

Una empresa con enfoque de producción operaría con el vector de insumos (129.39, 72.897, 16.77) para producir 5.78 U mL⁻¹ de glucosiltransferasa y obtener una productividad de 7.76 U exper \$⁻¹mL⁻¹ a pesar de incurrir en mayor costo unitario por experimento de producción (0.12 \$mLU⁻¹) de glucosiltransferasa. Con la descripción del máximo físico se cumple con el objetivo 1 planteado.

3.3 Optimización económica del modelo

En el renglón 6 se describe la cantidad de insumos a aplicar para obtener la máxima productividad, respetando el modelo de la Ec. (5), tal que con el vector de insumos (118.39, 42,14, 4) con el cual se pronostica una producción de 4.56 U mL⁻¹ de glucosiltransferasa a un costo de \$0.31 por corrida lo cual nos da una productividad de 14.49 U exper \$⁻¹mL⁻¹ y un costo unitario por experimento de 0.06 \$mLU⁻¹ de glucosiltransferasa.

Una empresa con enfoque de productividad operaría en el vector de insumos (118.32, 42,14, 4) para producir 4.56 U mL⁻¹ de glucosiltransferasa y obtener una productividad de 14.49 U exper \$⁻¹mL⁻¹ y costo unitario por experimento de 0.06 \$mLU⁻¹. En condiciones de igualdad, una empresa con información analítica del óptimo físico y óptimo económico preferirá operar en el óptimo económico para maximizar sus beneficios, al disminuir su costo de producción (Gilpin & Rusik, 2001; Ho *et al.* 2017).

3.4 Rendimientos de escala, elasticidad de la producción y productividad

Dada la función definida por las Ecs. (2), los resultados de multiplicar cada modelo por el escalar λ se reportan en la tabla 6, evidenciando que los rendimientos de la FDPI dependen de los valores de los insumos, a diferencia de la función de producción de Cobb-Douglas (CD) en la cual los rendimientos de la función no dependen del valor de los insumos. Los rendimientos de la FDPI permiten optimizar la escala del experimento o tamaño de la empresa, permitiendo transitar de rendimientos decrecientes a crecientes y viceversa, como lo describen Ho *et al.* (2017).

Tabla 5. Tabla comparativa de resultados de optimización física y económica.

Table 5. Comparative table of economics and physical optimization results.

Indicadores De optimización	Melaza (gL ⁻¹) (X ₁)	Licor (gL ⁻¹) (X ₂)	Levadura (gL ⁻¹) (X ₃)	Valor Estimado (Y*)(U mL ⁻¹)	Costo C (USD Exp ⁻¹)	PT= Y*/C	Costo Unitario (C/Y*)
US/unit	0.001	0.002	0.028				
Xi min	70.24	42.14	7.23				
Xi max	129.76	77.86	16.77				
Óptimo	100	60	8	4.348	0.444	9.7941	0.1
Max Q	129.76	72.8699	16.77	5.779	0.745	7.7566	0.12
Max PT	118.317721	42.14	4	4.557	0.314	14.4866	0.06

En general, el operador λ transforma la función original tal que $Y(\lambda, X) = RTS(\lambda, X) Y(X)$ donde $RTS(\lambda, X)$ es la función de rendimientos de escala, que se reportan en la columna 2 de la tabla 6.

Para estimar los rendimientos de la FDPI de la Ec. (2) es más práctico utilizar la equivalencia de rendimientos de la Ec. (6) que las deducciones particulares de $RTS(\lambda, X)$ indicadas en la columna 2 de la tabla 6. En la tabla 7 se reportan las estimaciones de elasticidades a diferentes intensidades de uso de los insumos.

Tabla 6. La FDPI y cálculo de rendimientos $RTS(\lambda, X)$

Table 6. FDPI and returns calculus $RTS(\lambda, X)$

Y(X)	RTS (λ, X)
$A \prod X_i^{a_i} \left[C_0 + \sum C_i \ln(d_i X_i) \right]$	$\lambda^{\sum a_i} \left[1 + \frac{\ln \lambda \sum C_i}{C_0 + \sum C_i \ln(d_i X_i)} \right]$
$A \prod X_i^{a_i} \left[C_0 + \sum C_i \ln(d_i - X_i) \right]$	$\frac{\lambda^{\sum a_i} [C_0 + \sum C_i \ln(d_i - \lambda X_i)]}{C_0 + \sum C_i \ln(d_i - X_i)}$
$A \prod X_i^{a_i} \left[\prod \ln(d_i X_i) \right]$	$\frac{\lambda^{\sum a_i} \prod \ln(\lambda d_i X_i)}{\prod \ln(d_i X_i)}$
$A \prod X_i^{a_i} \left[\prod (d_i - X_i) \right]$	$\frac{\lambda^{\sum a_i} \prod \ln(d_i - \lambda X_i)}{\prod \ln(d_i - X_i)}$

A partir de la máxima productividad del modelo, indicada en la tabla 5 con los valores del vector óptimo de insumos (118.32, 42.14, 4) con los cuales se obtiene la producción de 4.56 U mL⁻¹ de glucosiltransferasa con un costo total de insumos de 31 centavos y una productividad de 14.48 U

exper $\$^{-1}\text{mL}^{-1}$ ($\lambda=1$); Si aumentamos en 0.1% los insumos ($\lambda=1.001$), la producción aumenta marginalmente y la productividad baja marginalmente. Cambiar la operación del proceso de $\lambda=1$ a $\lambda=1.001$ baja la productividad, disminuye los rendimientos y genera inelasticidad en la producción, como se evidencia en los renglones 1 y 2 de la tabla 7.

Si utilizamos un valor $\lambda=0.8658$ los valores del vector de insumos son (102.44, 36.48, 3.46) con los cuales se obtiene la producción de 4.01 U mL^{-1} de glucosiltransferasa con un costo total de insumos de 27 centavos y una productividad de 14.73 U exper $\$^{-1}\text{mL}^{-1}$ y costo unitario de 0.065 $\$ \text{mLU}^{-1}$ de glucosiltransferasa; si aumentamos marginalmente los insumos, aplicando $\lambda=0.8668$, la tasa de cambio de la producción es igual a la tasa de cambio de los insumos (0.0011) como se indica en las columnas 8 y 9 de la tabla 7, la productividad se mantiene constante y la elasticidad es unitaria, evidenciando rendimientos constantes de escala, como se evidencia en los renglones 3 y 4 de la tabla 7. De esta manera, la elasticidad de la producción nos permite llegar al óptimo global de productividad; cumpliendo así el objetivo 3 planteado.

Por otra parte, si utilizamos un valor $\lambda=0.8558$ y aumentamos el vector en $\lambda=0.8568$, la tasa de cambio de la producción es mayor a la tasa de cambio de los insumos, la producción es elástica, evidenciando rendimientos crecientes de escala. Aumentos en el vector de insumos generan aumentos en la productividad, como se evidencia en los renglones 5 y 6 de la tabla 7.

Tabla 7. Relaciones de λ con los rendimientos, productividad y elasticidad.

Table 7. λ relations with returns to scale, productivity and elasticity.

Lambda (λ)	Melaza (gL^{-1}) (X_1)	Licor (gL^{-1}) (X_2)	Levadura (gL^{-1}) (X_3)	Valor Estimado (Y^*)(U mL^{-1})	Costo (USD Exper $^{-1}$)	PT= Y^*/C	Cambio $\% \Delta Y^*$	Cambio $\% \Delta C$	elasticidad
1	118.317	42.14	4	4.55747	0.3146	14.487			
1.001	118.436	42.182	4.004	4.5608	0.3149	14.483	0.00073	0.00101	0.7306
0.8658	102.44	36.485	3.4632	4.0127	0.2724	14.732			
0.8668	102.558	36.527	3.4672	4.0173	0.2727	14.732	0.00115	0.00115	1
0.8558	101.256	36.063	3.4232	3.9663	0.2692	14.731			
0.8568	101.374	36.106	3.4272	3.9707	0.2695	14.731	0.00118	0.00116	1.0172

En general, se corresponden las relaciones siguientes: a producción con elasticidad unitaria le corresponden rendimientos constantes y máxima productividad global; a producción inelástica le corresponde rendimientos decrecientes y productividad subóptima; a producción elástica le corresponde rendimientos crecientes y productividad subóptima. La teoría económica sostiene que a medida que la escala física de producción aumenta, el proceso de producción exhibirá primero rendimientos crecientes a escala, seguida de rendimientos constantes a escala, y finalmente rendimientos decrecientes a escala (Dollery *et al*; 2007).

Thayaparan & Neruja (2021) también confirman las relaciones de eficiencia y rendimientos al analizar la eficiencia de 120 predios agrícolas donde encontraron que 112 de ellos estaban operando con rendimientos crecientes a escala, lo que significa que la mayoría de los cultivadores de arroz

estaban operando en una región preóptima de la frontera de producción. Solo uno de los agricultores produjo arroz con rendimientos decrecientes a escala, lo que indica que operó en una región postóptima de la frontera de producción. Los restantes 7 agricultores operaron con rendimientos constantes, encontrándose en la región óptima de la frontera de producción.

Los resultados de elasticidad, rendimientos y eficiencia obtenidos son concordantes con otros estudios realizados por Gülbiten y Taymaz (2000) quienes analizan la industria de manufactura de diversos países, comparada con la industria turca y encuentran que los rendimientos a escala no son un factor importante para explicar el diferencial de productividad entre establecimientos pequeños y grandes, pero que el tamaño de la planta es uno de los principales determinantes de la eficiencia.

La tabla 7 evidencia el tamaño de la planta con el tamaño del vector, determinado por λ . Shehu y Mshelia (2007), quienes analizaron la eficiencia técnica de 180 pequeñas granjas y encontraron que el 95% de los granjeros operaron en la etapa I de producción con retornos de escala de 1.06. Esto indica que los granjeros fueron ineficientes en la asignación y uso de los insumos productivos. Los granjeros podrían mejorar la productividad aumentando la cantidad de insumos.

En consecuencia, se deduce que para alcanzar la máxima eficiencia y productividad del proceso conviene explorar la operación en el vector de insumos (102.56, 36.52, 3.47) como centro del próximo diseño experimental secuencial, tal que en este diseño experimental se logre una mejor aproximación a los rendimientos constantes.

4. Conclusiones

Con el modelo FDPI propuesto en este trabajo se estimaron las combinaciones óptimas de insumos que maximizan la producción, la productividad, la elasticidad de la producción y la escala del experimento, cumpliendo los objetivos planteados. A los datos del primer DOE publicados por Kawaguti se les aplicó regresión estadística restringida y optimización restringida en el software Excel con los resultados que se describen. La producción óptima se localiza en el vector de insumos (129.39, 72.897, 16.77) con el cual se pronostican 5.78 U mL⁻¹ de glucosiltransferasa a un costo de \$0.74 por corrida, lo cual nos da una productividad de 7.76 U exper \$⁻¹mL⁻¹. La productividad máxima se localiza en el vector de insumos (118.39, 42.14, 4) con el cual se pronostica una producción de 4.56 U mL⁻¹ de glucosiltransferasa a un costo de \$0.31 por corrida lo cual nos da una productividad de 14.49 U exper \$⁻¹mL⁻¹. La escala óptima del experimento, en la cual la elasticidad es unitaria y los rendimientos son constantes, se localiza en el vector de insumos (102.44, 36.48, 3.46) con el cual se pronostica una producción de 4.01 U mL⁻¹ de glucosiltransferasa con un costo total de insumos de 27 centavos por experimento, lo cual nos da una productividad de 14.73 U exper \$⁻¹mL⁻¹. La función de producción tiene rendimientos decrecientes si el vector de insumos es proporcionalmente mayor que el vector (102.5, 36.5, 3.47), y rendimientos crecientes si el vector de insumos es proporcionalmente menor. Así, la intensidad de uso de los insumos permite transitar de rendimientos crecientes a rendimientos decrecientes y viceversa. Una empresa con enfoque de producción operaría con el vector de insumos (129.39, 72.897, 16.77) para producir 5.78 U mL⁻¹ de glucosiltransferasa y obtener una productividad de 7.76 a pesar de incurrir en mayor costo unitario de producción (0.12 \$mLU⁻¹); mientras que una empresa con enfoque de productividad operaría en el vector (118.39, 42.14, 4) para producir 4.56 U mL⁻¹ de glucosiltransferasa y obtener una productividad de 14.49 U exper \$⁻¹mL⁻¹ y costo unitario de 0.06 \$mLU⁻¹. El análisis de los rendimientos y elasticidad de la producción refieren que para alcanzar la máxima eficiencia y productividad del proceso conviene explorar la operación en el vector de coordenadas (102.56, 36.52, 3.47) como centro del próximo diseño experimental

secuencial, tal que en este diseño se logre una mejor aproximación a los rendimientos constantes y una productividad óptima global de 14.732

La generalización del teorema de elasticidad plantea la oportunidad de explorar la aplicación del análisis de elasticidad a otros modelos, como el de superficie de respuesta aplicada en DOEs.

Conflicto de interés

El autor declara que no tienen conflictos de interés con respecto al trabajo presentado en este reporte.

Nomenclatura

% Δ C	Cambio porcentual en costo
% Δ Y	Cambio porcentual en la variable dependiente
Δ X	Incremento en la variable independiente (insumo)
Δ Y	Incremento en variable dependiente, producción)
CD	Función de Producción de Cobb-Douglas
CES	Función de Producción Constant Elasticity of Substitution
CME=MSE	Cuadrado Medio del Error, Mean Square Error
DE	Diseño Experimental
DOE	Diseño de Experimentos, Design of Experiments
FDP	Función de Producción
FDPI	Función de Producción de Ingeniería
ONU	Organización de las Naciones Unidas
RTS(λ X)	Función de Rendimientos de Escala, Returns To Scale
λ	Multiplicador escalar
R^2	Coefficiente de correlación global
X_i	Cantidad de insumo i utilizado en el DOE

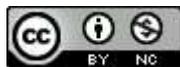
5. Referencias

- Barlow, J., and Vodenska, I. (2020). Socio-Economic Impact of COVID-19 Pandemic. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3720785>
- Chenery, H. B. (1949). Engineering Production Function. The Quarterly Journal of Economics 63, 507-531. <https://doi.org/10.2307/1882136>
- Davis, M., & Davis, R. (2003). Fundamentals of Chemical Reaction Engineering. Mc. Graw Hill. <https://resolver.caltech.edu/CaltechBOOK:2003.001>
- Dollery, B., Byrnes, J. y Crase, L. (2007). Economies of Scale and Population Size in Australian Local Government Structural Reform Programs. Working Papers Series. <https://bit.ly/3MI2nDk>
- Fogler, S. (2016). Elements of Chemical Reaction Engineering. Prentice Hall.
- Gechert, S., Havranek, T., Irsova, Z., & Kolcunova, D. (2019). Douglas production Function? A Quantitative Survey of the Capital-Labor Substitution Elasticity. Leibniz Information Centre for Economics. <https://bit.ly/3KGB2QL>
- Gilpin, R., & Rusik, D. (2001). Global Political Economy Understanding the International Economic Order. Princeton University Press.

- Gülbiten, Ö; Taymaz, E. (2000) Are Small Firms Inefficient? a Schumpeterian Analysis of Productivity Differentials. 9th Annual Conference of Economic Research Forum (ERF). <https://bit.ly/3F9XrES>
- Ho, S. J., & Dimitrije R. (2017). Returns to Scale, Productivity Measurement, and Trends in U.S. Manufacturing Misallocation. Workink Papers. <https://bit.ly/3iRBxvv>
- Humphrey, T. M. (1997). Algebraic Production Functions and Their Uses Before Cobb-Douglas. Economic Quarterly Volume 83/1. <https://bit.ly/3LHErjs>
- Kawaguti, H. Y., Manrich, E., Fleuri, L., & Sato, H. (2005). Production of Glucosyltransferase by *Erwinia* Sp. Using Experimental. Brazilian Journal of Microbiology, 227-234. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822005000300005>
- Lee, Y., Kim, T. (2017). The Effects of Agricultural Extension Service on Farm Productivity: Evidence from Mbale District in Uganda. Preprints.org; 2017. <http://dx.doi.org/10.20944/preprints201704.0162.v1>.
- Levenspiel, O. (1999). Elements of Chemical Reactions Engineering. Prentice Hall.
- Marsden, J., Pingry, D., & Whinston, A. (1974). Engineering Foundations of Production Functions. Journal of Economic Theory, 124-140. <https://bit.ly/3w0wqj0>
- ONU. (1978). Industry and Development No. 2. New York.
- Paredes-Lizárraga, M. A. (2020). Modelación de la fermentación para la producción de fenilalanina. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 14(2), 48-65. <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v14i2.511>
- Shehu, J.F. and Mshelia, S.I., (2007). Productivity and technical efficiency of small-scale rice farmers in Adamawa State, Nigeria. Journal of Agriculture & Social Sciences 3(4), 117-120. <https://bit.ly/3LJcXtR>
- Thayaparan, A. & Neruja, N. (2021) Factors Influencing Technical Efficiency of Paddy Farms in Mullaitivu District: Non – Parametric Approach. Wayamba Journal of Management. Vol. 12. <http://doi.org/10.4038/wjm.v12i1.7528>
- Wibe, S. (1983). Engineering Production Functions: A Survey. *Economica*, New Series, 51(204), pp. 401-411. <https://bit.ly/3vFdDeb>

2021 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Artículo de Revisión

El género *Fouquieria*: descripción y revisión de aspectos etnobotánicos, fitoquímicos y biotecnológicos

The genus *Fouquieria*: description and review of ethnobotanical, phytochemical, and biotechnological aspects

Lenin O Nevárez-Prado¹, Beatriz A Rocha-Gutiérrez¹, David Neder-Suárez¹, María Teresa Cordova-Lozoya¹, Juan Guillermo Ayala Soto¹, Mayra Isabel Salazar Balderrama², Teresita de Jesús Ruiz Anchondo², León R. Hernández-Ochoa^{1*}

¹Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Químicas. Circuito Universitario, Campus Universitario #2, Chihuahua, Chihuahua, C.P. 31125, México.

²Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrotecnológicas. Av. Pascual Orozco, Campus Universitario #1, Santo Niño, Chihuahua, Chihuahua, México.

*Correspondencia: lhernandez@uach.mx (León R. Hernández Ochoa)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v15i3.840>

Recibido: 19 de agosto de 2021; Aceptado: 28 de octubre de 2021

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Resumen

Las plantas del género *Fouquieria* se distribuyen en las zonas áridas de México y Estados Unidos de América, Siendo los estados de Durango, Zacatecas, Coahuila, San Luis Potosí, Sonora, Baja California, Baja California Sur y Chihuahua donde éstas se distribuyen especialmente en México; y en Arizona, Nuevo México, Nevada, Colorado, y Utah en Estados Unidos de América. Tienen usos diversos ya sea como plantas de ornato, plantas medicinales o alimento. Las infrutescencias de este género son en forma de panícula, color rojo anaranjado de forma alargada y acampanada. Según la comunidad rural, los tallos, raíces y flores de estas especies se utilizaban en la medicina tradicional para tratar enfermedades cardiovasculares y trastornos del sistema urinario, entre otras. Hoy en día, las investigaciones demuestran que los extractos tienen entre algunas otras actividades, la antimicrobiana, antihelmíntica, e insecticida, cuyos efectos son atribuidos a metabolitos secundarios (fenoles, saponinas terpenoides, alcanos, etc.). En esta revisión se dan a conocer los usos etnobotánicos, características fitoquímicas, actividad biológica y estudios tecnológicos reportados del género *Fouquieria*.

Palabras clave: plantas medicinales, fitoquímica, actividad biológica, biotecnología

Abstract

Plants of the genus *Fouquieria* are distributed in the arid zones of Mexico and the United States of

America, being the states of Durango, Zacatecas, Coahuila, San Luis Potosi, Sonora, Baja California, Baja California Sur, and Mexico especially in Chihuahua; and in Arizona, New Mexico, Nevada, Colorado, and Utah in the United States of America. They have various uses either as ornamental plants, medicinal plants, or food. The inflorescences of this genus are panicle-shaped, orange-red in color, elongated, and flared. According to the rural community, the stems, roots, and flowers of these species were used in traditional medicine to treat cardiovascular diseases and disorders of the urinary system, among others. Today, research shows that the extracts have, among some other activities, antimicrobial, anthelmintic, and insecticidal, whose effects are attributed to secondary metabolites (phenols, terpenoid saponins, alkanes, etc.). In this review, the ethnobotanical uses, phytochemical characteristics, biological activity, and reported technological studies of the genus *Fouquieria* are presented.

Keywords: medicinal plants, phytochemistry, biological activity, biotechnology.

1. INTRODUCCIÓN

La familia Fouquieriaceae comprende pequeños árboles y arbustos con numerosas adaptaciones xeromórficas. Dentro de estas resaltan sus tallos leñosos y suculentos que consienten el almacenamiento de agua para sobrevivir a las condiciones extremas del desierto norteamericano (Henrikson, 1972). En las siguientes secciones se presenta información sobre las diferencias de cada especie del género *Fouquieria* con respecto a la distribución geográfica, anatomía vegetal, constituyentes químicos, aspectos etnobotánicos y aplicaciones tecnológicas. Gran parte de estos datos se utilizan para comprender cómo se adaptan estas plantas y el motivo de expresar actividades biológicas variadas. Todo esto debido a que el género *Fouquieria* integra plantas con relevancia ecológica por su alta distribución y tolerancia a climas extremos de México y Estados Unidos, donde nativos y personas locales emplean sus propiedades para tratar diversas afecciones.

2. DISTRIBUCIÓN DEL GÉNERO *Fouquieria*

Los biomas áridos son notorios en América del Norte como el Desierto de Sonora y el Desierto de Chihuahua. Comprenden matorrales xerófilos secos (semidesérticos) y bosques secos (selvas secas) que varían de acuerdo con las estaciones climatológicas y son considerados importantes por su gran diversidad de especies tanto vegetales como animales (De Nova *et al.*, 2018). Los desiertos del suroeste de América del Norte proporcionan un sinnúmero de especies, entre las que se encuentran las familias Fouquieriaceae, Simmondsiaceae, Agavaceae, Fabaceae, entre otras (Moore y Jansen, 2006). La mayoría de estas familias son comprendidas por especies arborescentes con tallos fotosintéticos, que en su mayoría presentan succulencia como lo es el característico género *Fouquieria* (Ericales) (Franco-Vizcaino *et al.*, 1994). Este género incluye once especies (De Nova *et al.*, 2018) (Tabla 1) distribuidas del norte y centro de México hasta el sureste de América del Norte, presentándose favorablemente en colinas bajas y áridas (Behnke, 1976) (**Figura 1**). Las plantas de este género se encuentran distribuidas desde el oeste de Baja California, norte de Arizona y este de Texas hasta el sureste de Oaxaca. Aquellas que son pertenecientes al norte de México y sur de los Estados Unidos se encuentran principalmente en hábitats desérticos y en bosques tropicales caducifolios. *F. splendens* (ocotillo) es la especie más distribuida de la familia y se esparce desde el Desierto de Sonora, Baja California y Sonora, así como en el suroeste de los Estados Unidos de América y el Desierto de

Chihuahua (Henrikson, 1972). Varias de estas especies están asociadas a condiciones edáficas específicas como el caso de *F. ochoterenae* que comúnmente se le encuentra en afloramientos de selenita y yeso.

Por otro lado, otras especies como la *F. shrevei* están estrictamente restringidas a suelos de yeso en Coahuila, o, por ejemplo, en el Desierto de Chihuahua donde la *F. splendens* subsp. *splendens* está

Tabla 1. Clasificación taxonómica de la familia Fouquieriaceae
Table 1. Taxonomic classification of the family Fouquieriaceae

Orden	<i>Ericales</i>
Familia	Fouquieriaceae
Género	<i>Fouquieria</i>
Especie	<i>F. burragei</i>
	<i>F. columnaris</i>
	<i>F. diguetii</i>
	<i>F. fasciculata</i>
	<i>F. formosa</i>
	<i>F. leonilae</i>
	<i>F. macdougalii</i>
	<i>F. ochoterenae</i>
	<i>F. purpusii</i>
	<i>F. shrevei</i>
	<i>F. splendens</i>
	<i>F. splendens</i> subsp. <i>breviflora</i>
	<i>F. splendens</i> subsp. <i>campanulata</i>
	<i>F. splendens</i> subsp. <i>splendens</i>

estrictamente con suelos de piedra caliza (Henrikson, 1972). Otra característica para tomar en cuenta es su capacidad de distribuirse de manera aislada, que dependerá en su totalidad de los climas de cada zona. Esto impulsó a la variación genética (Zavala-Hurtado y Jiménez 2020), especialmente por los ambientes secos durante la diversificación entre el Mioceno y el Plioceno (Majure *et al.*, 2019). Este período intermedio corresponde al momento en el que se diversificaron la mayoría de las familias de las angiospermas a causa de las actividades tectónicas, geológicas y climatológicas (Zavala-Hurtado y Jiménez 2020). Además, se ha propuesto que la evolución de los desiertos mexicanos fue motivada por la elevación de montañas y mesetas que desencadenó diferencias de temperatura y exposición a minerales subterráneos (De Nova *et al.*, 2018).

En la actualidad, el género es particular por su gran cobertura vegetativa de hasta un 70% del matorral rosetófilo (bosque de plantas suculentas y generalmente espinosas) (Abd El-Ghani *et al.*, 2018). Esto debido a que estas especies presentan una excelente tolerancia al calor y la salinidad (Pasternak *et al.*, 2001). Todas estas especies se han clasificado como plantas de tallo leñoso y suculento verde, las primeras se hallan en climas secos tropicales a diferencia de las de tallo verde que son encontradas en áreas con alta precipitación (Avila-Lovera y Garcillan, 2021). A continuación, se describe la distribución de cada una de las especies y sus características particulares:

F. burragei: El “ocotillo Peninsular” es la única especie de su género endémico de la península de Baja California (**Figura 1**) (Johansen, 1936, De Nova *et al.*, 2018; Zavala-Hurtado y Jiménez, 2020). Puede soportar temperaturas elevadas, pero no aquellas que estén por debajo de los 0°C, lo que la hace una especie restringida a las costas de la región (Gorelik, 2008). Se le puede asociar con árboles como *Prosopis articulata*, y arbustos como *Acacia pacensi*, *Atamisquea emarginata* y *Larrea tridentata* (De la luz *et al.*, 2000).

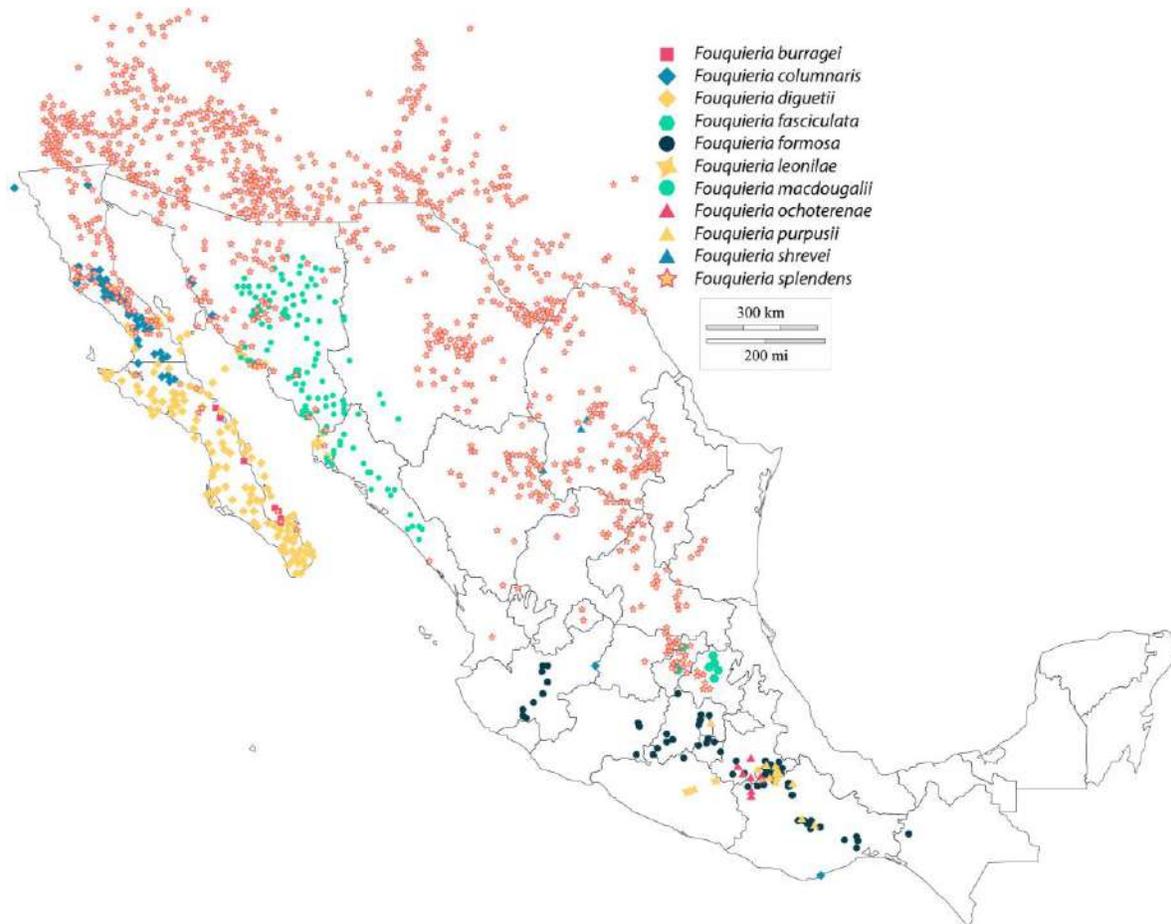


Figura 1. Distribución del género *Fouquieria*
Figure 1. Distribution of the genus *Fouquieria*

F. columnaris: Mejor conocido como “cirio”, es una de las especies más representativas del género, sólo por debajo de *F. splendens* (Morton *et al.*, 1997). Prospera en suelos volcánicos profundos de valles y suelos de las colinas rocosas donde las precipitaciones son aproximadamente 120 mm al año y las temperaturas rara vez caen por debajo de 35°C (Bashan *et al.*, 2007). Al igual que *F. burragei* esta planta se extiende con mayor frecuencia entre los Estados Unidos, al sur de California, norte de Nevada, sur de Arizona y Nuevo México, así como al suroeste de Texas, desierto del Vizcaino, el cañón de San Andrés, las llanuras de Magdalena y la región tropical baja de la península de Baja California (**Figura 1**) (Humphrey, 1935; Amundson *et al.*, 1994; De Nova *et al.*, 2018; Abd El-Ghani *et al.*, 2018). Además, es comúnmente visto en colinas de granito que se extienden hasta la orilla de los

cuerpos de agua de las zonas descritas anteriormente, o en las laderas de éstos formando un "bosque de cirios" (Humphrey, 1935; Webb y Turner, 2020). Se ha estimado que esta especie tiene límites climatológicos fluctuantes que pocas especies pueden tolerar (Arundel, 2005), como la *Ambrosia dumosa*, *Hymenoclea salsola*, *Larrea tridentata*, *Echinocereus*, *Opuntia*, y *Pachycereus pringlei*, *Acacia*, *Lysiloma*, *Cardiospermum*, *Rhamnus*, entre otras (Axelrod, 1978, Sternburg y Rodriguez, 1982). Además, se ha descubierto que se diversificó de sus especies hermanas en laderas séricas desde hace 9000 años aproximadamente (Scott, 1995). Las condiciones climáticas donde crece sugieren que puede no estar tan amenazada por los cambios climáticos como otras especies endémicas (Webb y Turner, 2020).

F. diguetii: El "palo de Adán" es una especie con una distribución relativamente amplia, desde laderas volcánicas rocosas con poco suelo, mesas aluviales rocosas y laderas con arcillas volcánicas rojizas, así como en arcillas y llanuras arcillosas arenosas, arena granítica descompuesta, y playas costeras arenosas (Henrickson, 1972). Es muy común en el desierto de Sonora y Baja California con una población dominante en el bosque tropical caducifolio debajo de La Paz hasta Cabo San Lucas, cerca de Guaymas y en muchas islas en el Golfo de California. Sin embargo, existe mayor relevancia en el estado de Hidalgo, algunas zonas de la Sierra de San Francisco y el Paso del Oeste de Tres Vírgenes en Baja California (**Figura 1**) (Arnaud et al., 2014; Webb y Turner, 2015; Webb y Turner, 2020). Se ha encontrado una relación de crecimiento positiva en estos suelos y con una cobertura vegetal del 40% acompañada de especies como *Stenocereus gummosus*, *Cilindropuntia cholla*, *Jatropha cinerea*, *Bursera microphylla*, *Colubrina viridis*, *Lysiloma candida*, *Adelia virgata* y *Cordia brevispicata* (De la luz et al., 2000; Álvarez-Castañeda et al., 2006; Venegas Barrera et al., 2008).

F. fasciculata: El "árbol del Barril" es una planta rara y escasa, considerada como vulnerable a la extinción, la cual se extiende de manera estrecha y restringida en pocos sitios del desierto peninsular de Baja California (Henrickson, 1972), así como en los cañones o barrancas del Río Moctezuma, y al oeste de la Sierra Madre Oriental. Cabe destacar, que se ha encontrado comúnmente en el estado de Querétaro e Hidalgo, al norte de Actopan y Atotonilco El Grande (**Figura 1**) (De Nova et al., 2018).

F. formosa: El "cascabelillo" es una especie que tiene una distribución relativamente amplia y restringida a bosques caducifolios tropicales, y semidesértica con laderas y valles aluviales rocosos y en suelos lateríticos a calcáreos desde la región del Lago de Chapala de Jalisco hasta el sureste de Oaxaca, Hidalgo, Guadalajara y Puebla (**Figura 1**) (Henrickson, 1972; De Nova et al., 2018; Pérez-Negon y Casas, 2007). Esta especie se encuentra asociada a plantas como *Mimosa luisana*, *Agave karwinskii*, *Agave marmorata*, *Neobuxbaumia tetetzo*, *Verbesina neotenorensis*, *Escontria chiotilla*, *Pachycereus weberi*, *Neobuxbaumia*, *Cephalocereus*, entre otras (Avenidaño et al., 2006; López-Jiménez et al., 2019).

F. leonilae: Esta especie coloquialmente denominada como "ocotillo de Guerrero" se conoció por primera vez en dicho estado mexicano, en laderas rocosas sobre afloramientos de un suelo blanquecino de yeso o calcáreo (Henrickson, 1972). Tiene una distribución relativamente estrecha y restringida en algunas zonas semidesérticas del suroeste mexicano como en los estados de Guerrero, Morelos y algunas partes de Puebla (De Nova et al., 2018).

F. macdougalii: El “jaboncillo” es característico de la zona de matorrales espinosos y pastos jóvenes, desde el desierto Sonorense hasta el bosque tropical caducifolio a lo largo de la Sierra Madre Occidental y el bosque espinoso del centro-sur de Sinaloa, especialmente en sus arroyos, llanos rocosos aluviales y laderas sobre suelos graníticos, arcillosos y lechos de lava abiertos, así como en playas arenosas costeras (**Figura 1**) (Búrquez *et al.*, 2010; Tinoco-Ojanguren *et al.*, 2013; De Nova *et al.*, 2018). Está limitado por la susceptibilidad a heladas, por lo que comúnmente se encuentra en laderas orientadas al sur. Cabe destacar que existen diferencias morfológicas clave dependiendo de la zona de crecimiento, por ejemplo, las poblaciones de la costa de Sinaloa tienen inflorescencias más cortas en comparación con regiones áridas del mismo estado (Henrickson, 1972). Está asociada con otros árboles como *Olneya tesota* y arbustos como *Jatropha cardiophylla*, *Mimosa laxiflora*, *Lycium berlandieri*, entre otros (Hinojos-Hinojos *et al.*, 2019).

F. ochoterena: El “rabo de Iguana” es considerado una especie con una distribución relativamente estrecha y restringida a zonas semidesérticas del suroeste mexicano, especialmente en los estados de Guerrero, Morelos y algunas partes de Puebla donde se encuentra en la vegetación de matorrales tropicales áridos caducifolios (Henrickson, 1972; De Nova *et al.*, 2018).

F. purpusii: Esta especie tiene una distribución estrecha y restringida a vegetación de matorral árido tropical en afloramientos rocosos expuestos de piedra caliza, y laderas basálticas abiertas como el desierto de Tehuacán-Cuicatlán (de ahí su nombre común “ocotillo de Tehuacán”). También es posible encontrarle en algunas localidades del sur de Puebla y el norte de Oaxaca (**Figura 1**) (Henrickson, 1972). Actualmente, según la NOM-059-SEMARNAT-2010, en México es considerada una especie en peligro de extinción (De Nova *et al.*, 2018; Zavala-Hurtado y Jiménez, 2020).

F. shrevei: El “ocotillo de Mapimí” es una planta gipsófila (concentraciones altas de sulfato de calcio) que tiene una distribución particular en el centro y sureste de Coahuila y Chihuahua, en sus valles y cordilleras del oeste y alrededor de Cuatro Ciénegas (**Figura 1**) (De Nova *et al.*, 2018; Zavala-Hurtado y Jiménez, 2020). Los arbustos gipsófilos de estos desiertos muestran una distribución irregular que es separada por diferentes distancias. No obstante, *F. shrevei* produce semillas secas que son dispersadas por el viento, lo cual le ha permitido diseminarse con éxito (Zavala-Hurtado y Jiménez, 2020).

F. splendens: El “ocotillo”, “albarda”, “tacote” o “cardo Santo” es una de las plantas más interesantes y llamativas de la flora del desierto de los Estados Unidos de América y de México (Johansen, 1936; Baskin y Baskin, 2014; Aguirre-Ligouri, *et al.*, 2014). Las plántulas de Ocotillo necesitan relativamente más recursos de suelo que las plantas más grandes, además de condiciones ambientales más específicas como una temperatura de germinación de entre 20 y 25° C, suelos xerófilos de yeso y cierta cantidad de humedad ambiental para sobrevivir los primeros años de vida (Bowers, 2006; Austin, 2014). Estas condiciones exigentes para las plántulas se deben a que sus raíces tienen una profundidad de enraizamiento promedio de 19 cm por metro de altura, lo que refleja una dependencia del agua del suelo (Nobel y Zutta, 2005; Bobich y Huxman 2009). Presenta variaciones morfológicas a lo largo de su área de distribución, por lo que fue dividida en tres subespecies: *F. splendens* subsp. *campanulata*, *F. splendens* subsp. *brevisflora* y *F. splendens* subsp. *splendens*, las cuales crecen en matorrales xerófilos, sobre laderas pedregosas o terrenos planos (Molina-Guerra *et al.*, 2017). La subespecie *campanulata* forma poblaciones extensas a lo largo del borde oriental de la

Sierra Madre Occidental al oeste del Desierto de Chihuahua, desde las cercanías de Santiago Papasquiaro hasta la Cuenca del Río Nazas cerca de Rodeo en Durango (Henrickson, 1972; Monreal-García *et al.*, 2019). La subespecie *breviflora* comúnmente se encuentra desde San Luis Potosí y Tamaulipas, así como al sur hasta Hidalgo y Querétaro (Henrickson, 1972). La subespecie *splendens* crece con mayor frecuencia en laderas rocosas o en llanuras, pero también en suelos de textura fina y arena en regiones más áridas (Henrickson, 1972). Se extiende desde el desierto de Sonora en el sur de California, Arizona y al extremo sur de Nevada hasta Baja California y Sonora, así como en el desierto de Chihuahua y los pastizales adyacentes desde Nuevo México, al sur de Texas hasta Zacatecas y el norte de San Luis Potosí (Johansen, 1936; De Nova *et al.*, 2018). A diferencia de sus subespecies hermanas, ésta requiere una profundidad óptima de germinación de 0.5 centímetros (Brown, 1998) y de sombra proporcionada por una planta nodriza o rocas, y acumulación de agua local, por lo que es comúnmente vista cerca de un cuerpo de agua abundante o alta humedad ambiental (Nobel, 2005). Tiene otras ventajas como tolerar las altas temperaturas desérticas y épocas de sequía extensas cuando ya es una planta adulta. Además, las semillas aladas del ocotillo pueden tolerar altas concentraciones de sales y valores de pH de hasta 7.5 siempre y cuando exista una humedad considerable para su germinación (Baskin y Baskin, 2014). Los nativos de las zonas endémicas de estas plantas consideran al ocotillo una “planta mágica” por la capacidad de sobrepasar largas temporadas de sequías y dejar caer sus hojas conforme la humedad del suelo reduce, teniendo una fenología como planta seca y muerta y las recupera en cuestión de días después del aumento de la humedad (Monreal-García *et al.*, 2019). Por otro lado, según Scott (2021) las plantas de ocotillo mueren por 3 razones en condiciones naturales: la primera es la edad del ocotillo, ya que su vida media es de 51 años y cuando se supera dicho valor las plantas se hacen susceptibles a varios factores como la sequía. El segundo punto es la falta de humedad ya que descubrió una tasa de mortalidad elevada en años secos, sin embargo, sigue siendo mucho más resistente que otras plantas endémicas como *Ambrosia dumosa*, *A. deltoidea* y *Larrea tridentata*. El tercer factor es el tamaño y su ubicación ya que se ha visto que pueden ser volcados por los altos vientos ya que presentan raíces poco profundas (Scott, 2021).

3. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA DEL GÉNERO *Fouquieria*

El género *Fouquieria* incluye especies perennes, xeromórficas y con metabolismo C3 modificado, con una gran variedad de formas ya sea extendidos, sobre el suelo o erectos (**Figura 2**) (Franco-Vizcaino *et al.*, 1990; Soltis *et al.*, 1995; Abd El-Ghani *et al.*, 2018). Todas las especies residen en árboles pequeños y arbustos con tallos espinosos, leñosos y suculentos (Takhtajan, 2009). Estos tallos son hiperdensos y consisten en brotes largos espinosos que llevan brotes cortos axilares con filotaxia distinta. La corteza engrosada contiene almidón y tejido de almacenamiento de agua que le permiten su crecimiento máximo (Schultheis y Baldwin, 1999). Además, presentan sistemas de raíces poco profundas, pero lateralmente extensas. Estas adaptaciones en conjunto les otorgan a las especies habilidades de supervivencia a los climas extremos (Ezcurra y Mellink, 2013). Los tallos y ramas presentan brotes largos con hojas pecioladas simples, pequeñas, enteras, estipuladas, rápidamente desechadas (Henrickson, 1967, Avila-Lovera y Garcillan, 2021).

La producción de brotes y hojas requiere un gran gasto de energía y humedad, y su formación exitosa depende de un suministro adecuado de humedad durante el período de desarrollo. Si la humedad es insuficiente, se puede detener el alargamiento antes o morir por completo. Sin embargo, especies como el ocotillo y el cirio pueden perder sus hojas durante los ciclos de sequía y recuperarlas dentro

de pocos días después de períodos de precipitación, lo que las hace resistentes a las condiciones hidro-estresantes (Humphrey, 1931).

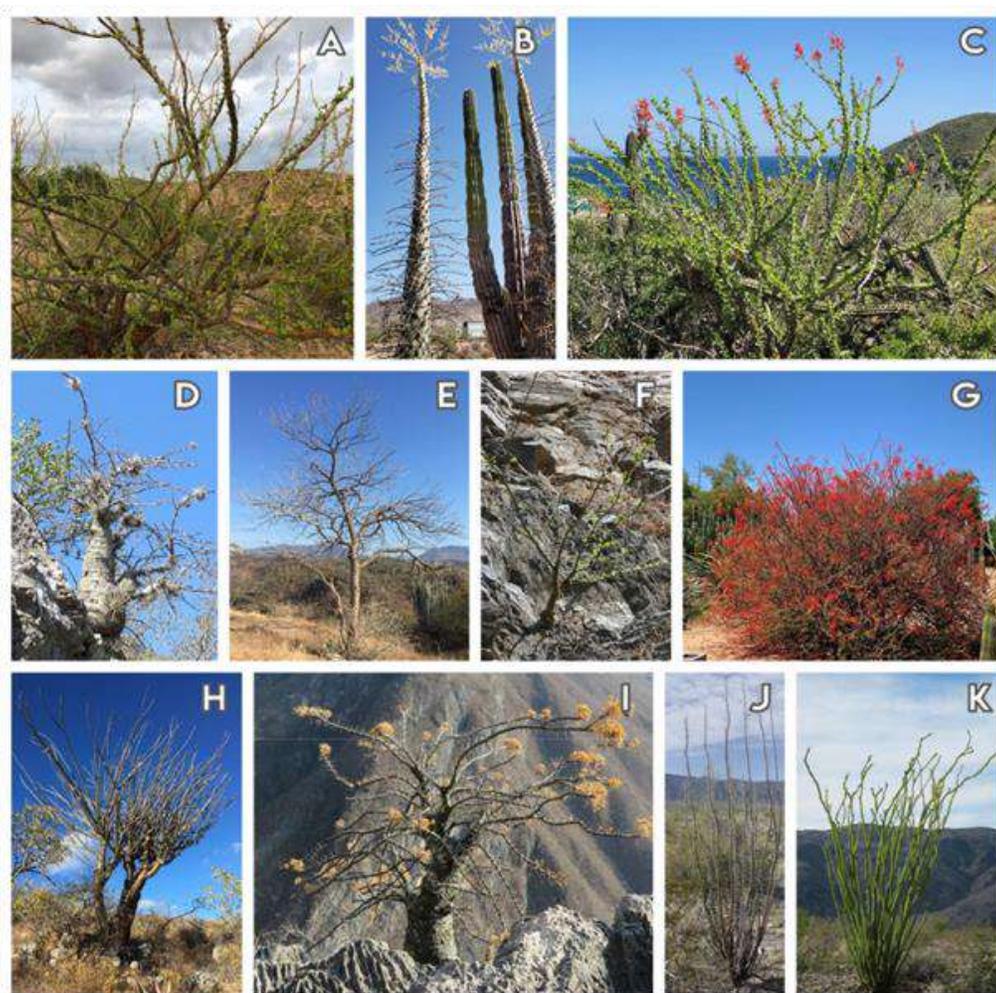


Figura 2. Morfología general de las especies del género *Fouquieria*: A) *F. burragei*; B) *F. columnaris*; C) *F. diguetii*; D) *F. fasciculata*; E) *F. formosa*; F) *F. leonilae*; G) *F. macdougalii*; H) *F. ochoterenae*; I) *F. purpusii*; J) *F. shrevei*; K) *F. splendens*.

Figure 2. General morphology of the species of the genus *Fouquieria*: A) *F. burragei*; B) *F. columnaris*; C) *F. diguetii*; D) *F. fasciculata*; E) *F. formosa*; F) *F. leonilae*; G) *F. macdougalii*; H) *F. ochoterenae*; I) *F. purpusii*; J) *F. shrevei*; K) *F. splendens*.

Las hojas de brotes cortos emergen de las yemas axilares adyacentes a las espinas (**Figura 3 izquierda**), las hojas de brotes largos (nuevas) tienen pecíolos largos cuyo pecíolo y nervadura principal se convierte en una espina lignificada, cónica, rígida y puntiaguda de extensión variable (**Figura 3 derecha**).



Figura 3. Hojas presentes en *F. splendens* izquierda: hojas de brotes cortos; derecha: hojas de brotes largos.
Figure 3. Leaves present on *F. splendens* left: leaves with short shoots; right: leaves with long shoots.

Como se observa en la **Figura 4**, todas las inflorescencias tienen una estructura paniculada básica con ramas laterales y pedicelos dispuestos que presentan flores bisexuales y actinomorfas tubulares e hipoginas con estambres largos con tonos diversos y cálices formados con 5 sépalos imbricados (Simon, 2001). Estas panículas se caracterizan por un perianto pentámero básico y androceo, y un ovario superior de tres carpelos. Los cinco sépalos persistentes están fuertemente imbricados y dispuestos en una filotaxia espiral (Henrickson, 1972). La corola está conformada de cinco pétalos connatos que forman un tubo cilíndrico ligeramente ensanchado. Estas flores pueden exhibir un número de estambres que varía de entre 10 – 23 con distintos pigmentos (Schönenberg y Grenhagen, 2005). Además, se han logrado establecer las dimensiones del polen que oscila entre 25 a 50 μm , el cual comúnmente es tricolporado con estrías habituales a los márgenes, lo que indica que existe una extensa variación entre la familia (Henrickson, 1972; Takhtajan, 2009). La principal diferencia entre estas inflorescencias parece ser solo la dirección de maduración, el tamaño y el color. Presentan corolas de tamaño y color variable que abarcan del rojo brillante a blanco. Se ha asumido que las flores blancas son polinizadas por insectos, y aquellas que presentan pigmentos rojos son polinizadas por aves como el colibrí (ornitofilia), por insectos como abejas (entomofilia) y por pequeños mamíferos como murciélagos (quiropterofilia) (Davis, 2011; Landis *et al.*, 2018; Scott, 2021). El fruto es una cápsula dehiscente loculicida seca, es parenquimatoso y contiene entre 5 y 18 semillas anchas y aladas que varían de 8 a 20 mm de longitud total. Estas semillas son aplanadas y tienen alas membranosas conspicuas y contienen un embrión pequeño y una capa delgada de endospermo.

El ala de la semilla está formada por tricomas unicelulares derivados de la epidermis del tegumento externo. Por otro lado, se ha descubierto que la mayoría de las especies del género son diploides ($2n$

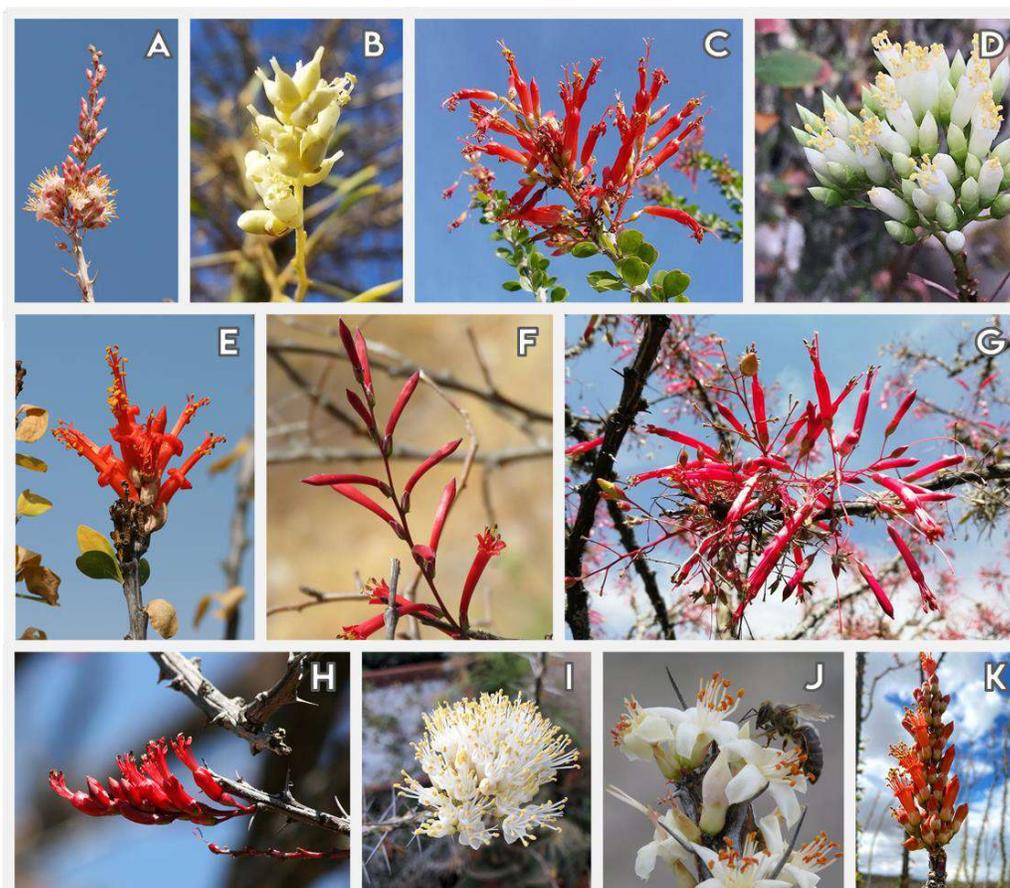


Figura 4. Inflorescencias del género *Fouquieria*. A) *F. burragei*; B) *F. columnaris*; C) *F. diguetii*; D) *F. fasciculata*; E) *F. formosa*; F) *F. leonilae*; G) *F. macdougallii*; H) *F. ochoterenae*; I) *F. purpusii*; J) *F. shrevei*; K) *F. splendens*.

Figure 4. Inflorescences of the genus *Fouquieria*. A) *F. burragei*; B) *F. columnaris*; C) *F. diguetii*; D) *F. fasciculata*; E) *F. formosa*; F) *F. leonilae*; G) *F. macdougallii*; H) *F. ochoterenae*; I) *F. purpusii*; J) *F. shrevei*; K) *F. splendens*.

= 24), a diferencia de *F. diguetii* que es clasificado como tetraploide ($2n = 48$) y *F. burragei* y *F. columnaris* son hexaploides ($2n = 72$) (De nova *et al.*, 2018). Estas adaptaciones, que han sido mencionadas, les permiten a las especies subsistir en el medio, lo que dificulta comprender sus relaciones filogenéticas a partir de su morfología. En efecto, el género ha sido ubicado dentro de diferentes órdenes, incluyendo Tamaricales y Ebenales, lo cual, con el tiempo ha sido confirmado como erróneo (Cyrus, 1990; Kuila y Sharma, 2018). En la actualidad existen estrechas relaciones filogenéticas entre su familia hermana Polemoniaceae, esto por su gran similitud morfológica (floral) (Johnson *et al.*, 2008, Kuila Sharma, 2018) también presenta similitudes en características fitoquímicas, morfológicas y genéticas con los géneros Crassulaceae, Turneraceae, Loasaceae e incluso con Rosaceae (Henrickson, 1967; Alice y Campbell, 2017). A continuación, se describen las diferencias botánicas de cada una de las especies del género *Fouquieria*

***F. burragei*:** Es perteneciente al clado leñoso de la familia Fouquieriaceae. Como se observa en la **Figura 2 A**, comprende arbustos espinosos bajos de 1 a 3 m de altura con aproximadamente de 2 a 5 troncos cortos, retorcidos, ascendentes y altamente ramificados que pueden medir hasta 5 cm de diámetro. Estos troncos presentan ramas jóvenes de 3 a 4 mm de diámetro que regularmente se

encuentran surcadas. Presentan ramas que en su mayoría están divididas y extendidas horizontalmente con una corteza amarillenta o naranja con cicatrices grises y espinas delgadas en forma de agujas de 10 a 25 mm de largo, delgadas y ascendentes. Presenta un período de floración sólo en temporadas de lluvia peninsular (julio y marzo), lo que también permite la generación de hojas y brotes que son frecuentemente consumidos por la fauna silvestre de la zona (Johansen, 1936; Gorelick, 2008). Producen hojas y quizás flores una vez cada uno o dos años, estas hojas son de aproximadamente de 10 a 18 mm de largo por 3 a 6 mm de ancho, elípticas, agudas en el ápice, cuneadas en la base. Se parecen mucho a *F. diguetii* con la diferencia de que *F. burragei* suelen ser en su mayoría color blanco (**Figura 4 A**) con pétalos exteriores rosas con numerosos estambres (15 a 23) que permiten una polinización efectiva por parte de los colibríes (Martinez, 1945). Los tallos de las flores a menudo aparecen en la base de las infrutescencias del año anterior, por lo que son clasificadas como parcialmente paniculadas. Asimismo, la variación de color en *F. burragei*, no parece tener un origen geográfico preciso, ya que no se han reportado subespecies o variedades (Davis, 2011). Se ha establecido que esta especie surgió como un híbrido entre *F. diguetii* y *F. splendens*, que es la única especie diploide actualmente en la península, además de la posible explicación del color de sus flores (Gorelick, 2011).

F. columnaris: Antes perteneciente al género *Idria* (Bashan et al., 2007) y actualmente perteneciente al clado suculento temprano de la familia Fouquieriaceae. Las plantas maduras miden comúnmente 14 m y pueden consistir en un solo tronco central ramificado con varias bifurcaciones (**Figura 2 B**). Como se mencionó anteriormente, todas las especies son consideradas plantas C3 modificadas, esto porque en condiciones secas, el agua almacenada está protegida de la demanda evaporativa por su corteza (Franco-Vizcaino et al., 1990; Franco-Vizcaino, 1994) y su fuerte control sobre las estomas (Gartner, 1995). Es debido a esto que, durante las sequías, la turgencia disminuye y los troncos centrales o laterales pueden colapsar y doblarse hacia abajo. Por otro lado, se ha discutido que el Cirio, ha evolucionado para almacenar agua como si fuese un cactus (a pesar de que no es un cactus verdadero), pero cuando la humedad relativa es óptima, pueden producir hojas verdes abundantes y desplazar su metabolismo como las plantas de hoja normal (planta C3) facilitando almacenar la mayor parte del CO₂ respiratorio durante este período, permitiéndole sobrevivir por varios meses en condiciones ambientales extremas (Mc Auliffe 1991; Escoto-Rodríguez y Bullock, 2002). Presenta un tronco central cónico, ahusado y suculento que le permite la reserva de agua. De acuerdo con su morfología, este tronco es grueso, de color verde amarillento y de apariencia casi prehistórica (Humphrey, 1935). Comúnmente presentan un diámetro basal de 30 a 60 cm y una altura de 8 a 12 m (Bullock et al., 2005) los cuales, en su mayoría suelen ser erectos, dividiéndose muy a menudo en 2 tallos con pequeñas ramas espinosas a lo largo de éste. Conforme pasan los años de crecimiento, las ramas inferiores desaparecen dejando únicamente las superiores, dándole una forma como de cirio encendido cuando entra en estado de floración (Humphrey, 1935). Este tronco está compuesto por una capa fina y continua de corcho, una corteza bastante gruesa, floema, un xilema ancho, mayoritariamente parenquimatoso, además de una cantidad relativamente pequeña de médula. Esta corteza está constituida de una vaina externa de grupos de células empaquetadas y una región parenquimatoso delgada que permite el intercambio de gases y el almacenamiento de agua (Nedoff et al., 1985). Aproximadamente el 50% de la luz incidente es transmitida a través de esta corteza translúcida, permitiéndole activar los procesos fotosintéticos sin la necesidad de hojas, sin embargo, en épocas de follaje, la asimilación exógena de CO₂ en *F. columnaris* no ocurre en el tallo, sino más bien en las hojas (Franco-Vizcaino et al., 1990). Este ciclo puede repetirse siete u ocho veces durante el transcurso de un solo año y dependerá de las condiciones climatológicas de la zona (Humphrey,

1931). Las hojas son elípticas u obovadas y ligeramente puntiagudas en el ápice, se desprenden cuando las condiciones son secas, sin embargo, en temporadas húmedas, las hojas secundarias surgen en las axilas de las espinas, las cuales son abundantes y se forman en el tronco; éstas se proyectan desde el tallo en un ángulo de aproximadamente 90° y presentan una longitud de 2 a 4 cm. Esta especie crece muy lentamente (4-6 cm al año) y puede tardar hasta 50 años desde la germinación para producir sus primeras flores, las cuales están distribuidas en una inflorescencia alargada, producidas en el tallo superior del crecimiento del año en curso, o raramente de brotes a lo largo de todo el tronco. Como se observa en la **Figura 4 B**, presenta sépalos de color amarillo crema que pueden medir de 3 a 5 mm de largo por 3 a 7 mm de ancho y con regularidad presentan de 10 a 12 estambres de 9 a 12 mm de largo (Bashan *et al.*, 2007; Bullock y Heath 2006; López *at al.*, 2016). Es bien sabido que la interacción de plantas con microorganismos es una adaptación importante para la supervivencia en áreas desérticas (Gutierrez-Ruacho *et al.*, 2018). En esta especie, se ha demostrado una simbiosis planta-hongo en las raíces que conforman especies fúngicas como *Glomus etunicatum*, *G. mosseae*, *G. intraradices* y *G. macrocarpumb* (Bashan *et al.*, 2007), acompañadas con algunas actinobacterias y hongos filamentosos como *Aspergillus* y *Penicillium* (frecuencias del 48% y 28% respectivamente) (Gutierrez-Ruacho *et al.*, 2018).

F. diguetii: Es una especie perteneciente al clado leñoso parecido a *F. burragei* con la diferencia de que éste presenta arbustos y árboles pequeños de 1 a 4 m de altura, con regularidad entre 1 y 5 tallos basales de hasta 2 m de altura y hasta 3 cm de diámetro con abundantes tallos secundarios ascendentes, torcidos, moderadamente ramificados y con numerosos tallos jóvenes divergentes en la parte superior (**Figura 2 C**). Éstos están caracterizados, una gran cantidad de tallos con espinas de entre 5 y 25 mm en forma de agujas y hojas enteras, ovadas, agudas a redondeadas, ocasionalmente puntiagudo en el ápice, cuneadas, rara vez redondeadas en la base, pecioladas y glabras de aproximadamente 3 cm de largo dispuestas en fascículos de hojas múltiples y simples con alto contenido de agua, alto volumen foliar y bajo peso seco (Henrickson 1972; Schultheis y Baldwin, 1999). Presenta una rápida respuesta a la humedad, y es por eso por lo que sus hojas se observan únicamente durante al menos 5 meses del año (Arriaga y Maya, 2007). Muestra un patrón de estructuras vegetativas cuando hay agua disponible, y de floración cuando no lo está por motivos de supervivencia (Arriaga y Maya, 2007). La floración predomina en el invierno, pero algunas flores pueden producirse durante todo el año. Exhibe panículas de flores rojas con corolas tubulares (**Figura 4 C**) (Arriaga y Maya, 2007; Hong y Sullivan 2013). Está estrechamente relacionado con *F. macdougalii* ya que presenta inflorescencias con características muy parecidas, a pesar de ello, tiene pedúnculos y pedicelos más gruesos. Se han observado visitas de colibríes a las flores cilíndricas rojas ascendentes, y estos animales aparentemente son los principales polinizadores (Arriaga y Maya, 2007). Con respecto a la cantidad de nutrientes, se informa que esta especie presenta un 16.04% en un período invernal, el cual es una fuente de energía principal para la fauna local (Guerrero-Cardenas, 2018). Por otro lado, se ha determinado que la descomposición de hojas de esta especie es principalmente por termitas y hongos del suelo, sólo en ciclos de forraje y de micro artrópodos en períodos secos (Arriaga y Maya, 2007; Hong y Sullivan, 2013).

F. fasciculata: Perteneciente al clado suculento temprano; son arbustos o árboles bajos, parecidos en la juventud con *F. columnaris*, con la diferencia de que éstos sólo pueden medir de 2 a 5 m de alto, con 1 a 3 troncos engrosados en la base, de 25 a 60 cm de diámetro, de color verde lustroso, con la epidermis lisa persistente, corteza externa dura, gris, exfoliante (**Figura 2 D**). Presenta troncos y tallos más grandes de color verde brillante, con epidermis persistente, lisos excepto por las cuñas

horizontales de epidermis gris duro que se forman debajo. Estos tallos generan hojas de los brotes cortos en fascículos de 2 a 7, oblanceoladas, agudas en el ápice, cuneadas en la base, con una nervadura central prominente en la parte inferior de entre 16 y 40 mm de largo, por 10 mm de ancho (Henrickson, 1972). Genera espinas con medidas de aproximadamente 20 mm de longitud, las cuales son delgadas, filosas y ascendentes, e inflorescencias paniculadas que se observan en la estación seca de diciembre a marzo de 4 a 9 cm de longitud que presentan flores con sépalos blanco-amarillentos de 3 a 4 mm de largo, por 2.3 a 5 mm de ancho y estambres con aproximadamente 10 unidades que con frecuencia miden entre 7 a 11 mm de longitud (**Figura 4 D**). Las flores tienen una delicada fragancia dulce, y producen un notable néctar endulzado que atrae a colibríes, grandes abejorros y una variedad de insectos que permiten la polinización y la generación de semillas que pueden medir de 7 a 9 mm de largo, por 4 mm de ancho, con alas de hasta 2 mm de ancho (Brown, 1998).

F. formosa: Es parte del clado leñoso; son plantas leñosas con troncos basales de 1 a 5 m de altura y tallos moderadamente ramificados en la parte superior (**Figura 2 E**), los cuales en su extremo presentan inflorescencias con corolas escarlatas a rojo anaranjado parecidas a las de *F. splendens* de entre 6 y 9 mm de largo que aparecen de octubre a febrero (**Figura 4 E**); a pesar de ello, puede ocurrir algo de floración durante todo el año (Zavala-Hurtado y Jiménez, 2020). Se han observado colibríes no identificados visitando las flores tubulares en el sureste de Puebla y en Yautepéc Morelos, y probablemente sean los principales polinizadores. Sin embargo, también puede ocurrir la utilización de flores por aves posadas que permiten la generación de semillas, las cuales pueden medir de entre 10 y 13 mm y son de color amarillo tostado con una membrana parecida al papel (Henrickson, 1972).

F. leonilae: Forma parte del clado leñoso constituido especialmente por árboles pequeños, escasamente ramificados con un máximo de 3 m de altura con 1 o 3 troncos de 5 o 6 cm de diámetro que contienen ramas muy delgadas y delicadas de aproximadamente 3 mm de diámetro y muy ligeramente surcadas (**Figura 2 F**). Estas ramas contienen hojas con dimensiones que van desde los 30 a 42 mm de largo por 12 mm de ancho, oblanceoladas, a elípticas o ampliamente elípticas, agudas a redondeadas en el ápice, cuneadas en la base, de las cuales pueden generarse espinas de 5-11 mm de largo, delgadas, ligeramente curvadas (Henrickson, 1972). Incluye inflorescencia racemosa, de entre 5 y 10 mm de largo, con pedicelos cortos y corolas rojo granate oscuro que comúnmente se forman durante la estación seca de diciembre a marzo (**Figura 4 F**). Estas inflorescencias son delicadas, largas y dispersas con flores parecidas a las de *F. diguetii* y *F. macdougalii* de color rojo oscuro comúnmente polinizadas por colibríes generando semillas de color tostado blanquecino de entre 13 y 16 mm de largo por 7 mm de ancho (Henrickson, 1972).

F. macdougalii: Es una especie leñosa con árboles extendidos de 2 a 6 m de altura con 1 a 4 troncos basales a máximo 2 m de altura con 30 cm de diámetro (**Figura 2 G**). Presentan tallos divergentes, muy ramificados en la parte superior, a menudo colgantes en las puntas que contienen hojas de brotes largos de 30 a 55 mm de largo, con pecíolos de aproximadamente 20 mm de largo y en ocasiones en forma de corazón y espinas de entre 4 y 35 mm de largo, delgadas y muy puntiagudas (Henrickson, 1972; Zavala-Hurtado y Jiménez, 2020). Como se observa en la **Figura 4 G**, incluyen inflorescencias paniculadas que ocasionalmente se ven a finales de verano, junio y octubre que son racemosas de entre 3 y 8 cm de largo, que contienen flores muy largas y en disposición como de fuego artificial con sépalos de color rosa rojizo con aproximadamente 10 estambres y semillas color amarillo bronceado a beige de entre 12 y 15 mm de largo por 5 o 6 mm de ancho (Henrickson, 1972).

F. ochoterenae: Clado leñoso; son árboles pequeños de 4 a 8 m de altura con 1 o 2 troncos de 10 a 20 cm de diámetro. Los tallos jóvenes son gruesos, surcados profundamente y tienen espinas robustas que comúnmente son curvadas hacia arriba y muy delgadas (**Figura 2 H**) (Zavala-Hurtado y Jiménez, 2020). Presentan hojas de brotes cortos en fascículos de 1 a 3 que comúnmente miden de 50 a 60 mm de largo por 22 mm de ancho, las cuales son ampliamente obovadas o elípticas y a menudo puntiagudas en el ápice (Henrickson, 1972). Esta especie está estrechamente relacionada con *F. leonilae* porque también presenta hojas dorsi-ventrales, hábito de árbol pequeño, flores con corolas rojo oscuro y diez estambres. La especie florece en la estación seca de noviembre a abril, produce flores erectas, pero menos cortas, de color rojo granate, en racimos a lo largo de las ramas superiores hasta un diámetro de 2,5 cm (**Figura 4 H**) (Henrickson, 1972). La proximidad de las inflorescencias a los tallos gruesos permite la explotación de las flores por varias aves posadas como palomas, y en algunos casos abejas carpinteras. Produce semillas de entre 3 y 6 por fruto de color bronceado blanquecino que pueden medir de entre 10 y 12 mm de largo por 6 mm de ancho.

F. purpusii: Perteneciente al clado suculento temprano con arbustos a árboles muy pequeños que parecen pequeños bonsáis de 1 a 5 m de altura con 1 a 4 troncos cónicos y abultados en la corola y con numerosas ramas delgadas, horizontalmente espinosas y muy parecidos a *F. fasciculata*. Esta especie tiene una forma de crecimiento muy distintiva, caracterizada por uno o más troncos centrales cónicos agrandados de color verde con epidermis persistente, lisa y brillante, que contienen grandes cantidades de parénquima xilemático no lignificado (**Figura 2 I**) (Zavala-Hurtado y Jiménez, 2020). Los tallos más grandes están marcados con las crestas a menudo masivas, orientadas transversalmente de corcho duro esclerificado que se forma inicialmente debajo de las bases de las hojas y espinas de 17 a 28 mm de largo, delgadas, ascendentes, muy recatas y puntiagudas. Las hojas son muy largas a diferencia de las otras especies que miden de entre 35 y 50 mm de largo, con pecíolos de hasta 30 mm de largo, están estrechamente redondeadas-obtusas a agudas en el ápice y estrechamente cuneadas en la base (Henrickson, 1972). Presentan inflorescencias que comúnmente ocurren durante la estación seca de febrero a abril formando corolas tubulares de color blanco marfil de hasta 13 mm de largo que contienen hasta 10 estambres (**Figura 4 I**). Estas flores erectas tienen un olor dulce delicado, son nectaríferas y lo suficientemente cortas para permitir la explotación del néctar y/o el polen por parte de varios insectos.

F. shrevei: Es una especie leñosa que junto con *F. splendens* presenta un hábito de crecimiento en forma de candelabro u "ocotillo", caracterizado por un tronco reducido y rechoncho, suculentos en la base o en toda su extensión, con xilema muy parenquimatoso, epidermis persistente, leñosos en la punta, suculentos y agrandados en la parte inferior (**Figura J**). Presentan ramificación, ya sea terminal o axilar en plantas más viejas (Henrickson, 1972). Sus tallos son fotosintéticos como el cirio y el ocotillo que pueden estar solos o con hojas nuevas. Forma grandes acumulaciones de un peridermo "resinoso" de color bronce oscuro en los tallos más viejos, con hojas caducas de color verde oscuro, coriáceas, enteras, con amplios márgenes escariosos blancos o raramente rojizos, anchas y obovadas (Henrickson, 1972). Genera flores de 3 a 9 cm de largo con flores solitarias o apareadas en los nudos superiores, sésiles o pediceladas y raramente en racimos. Como se observa en la **Figura 4 J**, contiene corolas de color blanco a amarillo crema, que comúnmente aparecen en la primavera de marzo a mayo, cuando las plantas están sin hojas, siendo generalmente polinizadas por insectos, produciendo semillas secas que se dispersan por el viento, se podría promover la dispersión a larga distancia como ocurre en otras especies (Muller *et al.*, 2017; Sánchez del pino *et al.*, 2020).

F. splendens: Esta especie es quizás el miembro más conocido de las Fouquieriaceae, y del cual se asignó el nombre de “la familia de la madera de vela”. Se ha determinado que los ocotillos tienen una longevidad media de 51 años por lo que se considera una planta perenne de larga vida (Scott, 2021). Presenta ramas que pueden medir de los 2 m hasta los 10 m de altura, pero a diferencia del Cirio, posee una gran cantidad de ramas que nacen y se desarrollan desde un tronco muy corto en forma de corona (**Figura 2 K**). La formación del corcho ocurre debajo de las espinas que luego provoca su separación generando grietas características de tallo viejos. La corteza es gruesa, en gran parte de parénquima donde se encuentran hebras de almacenamiento de agua parecidas a las del cirio (Kreulen *et al.*, 1989). Forma arbustos con ramas delgadas y espinosas dispuestas en racimos en forma de candelabro perteneciente al clado leñoso (Zavala-Hurtado y Jiménez, 2020). Es una planta dicotiledónea típica (Scott, 1932), que en su adultez tiene forma de candelabro invertido (Bower 2006). Normalmente son plantas con gran cantidad de tallos que pueden ir desde los 6 hasta los 100 tallos erectos y ascendentes, ocasionalmente pendulares y poco ramificados, que pueden tener un máximo de 12 cm de diámetro basal.

A diferencia del cirio, el tallo xeromórfico no suculento del ocotillo permite sobrevivir a condiciones más extremas, esto debido a la corteza y la fotosíntesis del tallo que aparentemente sirve para reciclar el CO₂ respiratorio endógeno (de otras especies) manteniendo así las reservas de energía que son dirigidas para la producción rápida de hojas después de la lluvia (Franco-Vizcaino, 1994; Nedoff, 2013). Se ha monitoreado y concluido que los ocotillos jóvenes experimentan una absorción máxima de CO₂ en primavera, que es cuando el agua del suelo está disponible durante el período más largo (Bobich y Huxman, 2009). Así mismo, cuando es adulto el ocotillo, en épocas secas presenta una fenología muerta (planta seca), pese a ello, la planta no está inactiva, ya que debajo de su corteza gris hay un tejido clorofílico que permite procesos fotosintéticos, los cuales en su mayoría se presentan de manera débil, aunque siempre se puede detectar transpiración y una asimilación del CO₂ para mantener un suministro de hidratos de carbono durante estos largos períodos de sequía (Nedoff, 2013). Los cloroplastos presentes en la corteza verde del ocotillo reciben la luz transmitida a través de las bases de las hojas jóvenes y el corcho en las regiones de los surcos. A medida que se agregan capas de corcho, conforme la edad de la planta, la luz aprovechable disminuye generando ineficiencia en el metabolismo, esto podría explicar la necesidad de generar más tallos fotosintéticos en condiciones más extremas del desierto (Nedoff *et al.*, 1985).

Como se mencionó anteriormente, el ocotillo presenta una corteza verde y cerosa (Wollenweber, 1994), la cual consiste en tejido cortical con alta cantidad de cloroplastos o un felodermo clorenquimatoso producido por un cambium de corcho. Comprensiblemente, el CO₂ llega a este tejido por lenticelas en el corcho, las cuales pueden o no almacenar almidón. Se ha descubierto la presencia de sustancias reductoras que es posible se trate de azúcares necesarias para la producción de hojas y desarrollo fotosintético (Nedoff *et al.*, 1985). Anteriormente se describió que el ocotillo, el ocotillo de Mapimí y el cirio presentan una característica importante ya que pueden perder sus hojas cuando las condiciones ambientales no son favorables. Esta defoliación protege al ocotillo de la pérdida excesiva de agua por transpiración, y le permite mantener un potencial hídrico bastante alto en ausencia de la humedad del suelo disponible (Nedoff *et al.*, 1985). Ahora bien, desde la base de la planta ocurre algo interesante ya que existe una pérdida relativamente rápida de hojas con el objetivo de reducir la herbívora del tallo para acelerar la maduración de la columna (Killingbeck, 2006). Cuando se encuentran en condiciones óptimas se forman hojas de brotes cortos en fascículos de 9 a 15 mm de largo por 4 a 9 mm de ancho, con pecíolos de 2 a 30 mm de largo, de forma amplia a

estrechamente obovadas a espatuladas, agudas, redondeadas a emarginadas en el ápice (**Figura 3**) (Henrickson, 1972). Además, en estas épocas los tallos del ocotillo están bien cubiertos de rosetas de pequeñas hojas que nacen en las axilas de las espinas, pueden medir de 15 a 25 mm de largo, son rectas o curvas, denominadas morfológicamente nervaduras centrales de las hojas primarias. Cuando es joven, tiene el tallo completamente enfundado por las espinas decurrentes, las cuales anteriormente se creía que eran pecíolos modificados, en la actualidad se sabe que éstas sirven para proteger la planta después de la caída de las hojas (Henrickson, 1972).

La producción de flores y frutos en el desierto de Chihuahua ocurre en primavera y en otoño, lo que respalda la importancia de la suculencia de los tallos y el agua almacenada en ellos (Whitford y Duval, 2020). Estas Inflorescencias comúnmente son de contorno ancho a estrecho cónico, ascendente y ocasionalmente pendular con flores de color rojo brillante que aparecen en o cerca del final de las ramas en los meses de abril o mayo (Wollenweber, 1994), raramente se producen flores rosadas cerca de la base, con un margen amplio blanquecino o corolas naranja rojizo fuerte, con menos frecuencia rojo fuerte o rosa amarillento fuerte, con poca frecuencia amarillo pálido. Comúnmente producen entre 14 y 18 estambres. La producción de flores tubulares rojas en primavera coincide con la migración de colibríes hacia el norte a través de áreas desérticas, y se ha confirmado que existe una correlación positiva con la polinización de estas aves (Waser, 1979; Currah, 2018). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, las flores de color rojo también pueden ser mayormente polinizadas por los insectos locales como las abejas, moscas o incluso murciélagos (Cross *et al.*, 1966). Además del paso de estos polinizadores, el agua almacenada en los tallos permite que la producción de flores y frutos se desarrolle de manera relativamente constante durante los años más secos, es en estas épocas cuando las hojas se forman y las ramas del ocotillo se alargan hacia arriba y hacia afuera (Killingbeck, 2019).

Presentan semillas de aproximadamente 11 mm que son aladas y color blanco como la mayoría de las especies descritas anteriormente. Las inflorescencias del ocotillo son muy parecidas a las flores de *Halesia tetráptera* (Xiang *et al.*, 1998; Xian y Thomas 2011). No obstante, se ha confirmado que existe una variación en el color característico de las plantas de ocotillo, y es que como se mencionó antes, esta especie presenta 3 subespecies: la primera (*Campanulata*) se divide en dos variedades (*Campanulata* y *Albiflora*) y las subespecies *splendens* y *breviflora* que normalmente son identificadas parcialmente por el color de la flor que puede ser blanca y rosada parecida a *F. burragei*. Dato interesante es que las plantas de ocotillo florecen y dan fruto de manera contante y abundante en cada primavera generando más de 1000 semillas al año (Scott, 2021).

Presentan semillas de aproximadamente 11 mm que son aladas y color blanco como la mayoría de las especies descritas anteriormente. Las inflorescencias del ocotillo son muy parecidas a las flores de *Halesia tetráptera* (Xiang *et al.*, 1998; Xian y Thomas 2011). No obstante, se ha confirmado que existe una variación en el color característico de las plantas de ocotillo, y es que como se mencionó antes, esta especie presenta 3 subespecies: la primera (*Campanulata*) se divide en dos variedades (*Campanulata* y *Albiflora*) y las subespecies *splendens* y *breviflora* que normalmente son identificadas parcialmente por el color de la flor que puede ser blanca y rosada parecida a *F. burragei*. Dato interesante es que las plantas de ocotillo florecen y dan fruto de manera contante y abundante en cada primavera generando más de 1000 semillas al año (Scott, 2021).

***F. splendens* subsp. *breviflora*:** Arbusto bajo con ramas divergentes y ampliamente dispersas, con ramas más arqueadas y hojas generalmente más grandes que las otras subespecies. Presenta inflorescencias en épocas invernales de la zona que generalmente miden de 15 a 18 cm de largo con sépalos amarillos a blancos rosados de 5 a 6 mm de longitud y 4 a 5.5 mm de ancho (**Figura 5**) (Henrickson, 1972; Vivoni et al., 2010).

***F. splendens* subsp. *campanulata* var *campanulata*:** Son plantas de hasta 5 m de altura con 5 a 40 ramas delgadas, erectas o muy extendidas que a menudo son colgantes en plantas más viejas. La subespecie es muy similar a *F. splendens* subsp. *splendens* en forma de crecimiento, pero tiene tallos jóvenes mucho más delgados (3 a 5 mm de diámetro), y los tallos maduros rara vez superan los 5 cm en diámetro basal. Presentan inflorescencias estrechamente cónicas, de 6 a 14 cm de largo con sépalos de color rosa púrpura claro a oscuro en el centro, ligeramente verdoso en la base con márgenes escariosos blanquecinos. Esas flores comúnmente se observan en la primavera de marzo a mayo, mientras que las plantas no tienen hojas (Henrickson, 1972; Lima et al., 2021).



Figura 5. Inflorescencias de *F. splendens*. Izquierda; *F. splendens* subsp. *Breviflora*. Derecha; *F. splendens* subsp. *campanulata* var *albiflora*

Figure 5. Inflorescences *F. splendens*. Left; *F. splendens* subsp. *Breviflora*. Right; *F. splendens* subsp. *campanulata* var *albiflora*

***F. splendens* subsp. *campanulata* var *albiflora*:** Muy parecida a la variedad *Campanulata* ya que son arbustos de hasta 5 m de altura apomadamente 30 ramas delgadas, erectas o muy extendidas que a menudo son colgantes en plantas más viejas; se destaca que presenta pétalos rojizos en la yema, los cuales se tornan blancos en la madurez (**Figura 5**) (Henrickson, 1972).

4. USOS GENERALES Y ETNOBOTÁNICOS DEL GÉNERO *Fouquieria*

Como se describe en las secciones anteriores, estas plantas tienen la característica de crecer en suelos áridos, e históricamente se han descrito sus usos en las culturas nativas, ya sea como medicina alternativa y/o complementaria o como plantas ceremoniales y de construcción. El uso comestible de las flores del género es dulce y se pueden acompañar en ensaladas por su alto contenido de nutrientes y azúcares, también se han aportado usos de las raíces y los tallos para preparaciones medicinales. Hablando de sus usos nativos y como se describió anteriormente, las especies poseen espinas fuertes por lo que es común que sus ramas y tallos sean utilizados como setos y barreras clavando los extremos de las ramas espinosas en el suelo (Andrade-Cetto y Heinrich, 2005).

Antiguamente, los hombres durante las largas expediciones anuales de caza empleaban los tallos del ocotillo en la construcción de refugios temporales que les permitían seguridad contra otros cazadores y animales salvajes (Robinson, 1904). Es común su uso para construir cercos vivos en casas o corrales, aprovechando su excelente capacidad de regeneración por estacas; también se usa en la construcción de casas rústicas y chozas. Las ramas secas se utilizan como leña, ya que hacen un buen combustible por su alto contenido de resinas. Por otro lado, el cirio se ha sometido a la extracción para maderas útiles y decorativas por ser considerado una planta ornamental por sus hermosas flores (Bullock *et al.*, 2005). Comúnmente el ocotillo se emplea para hacer infusiones o cataplasmas usando los tallos con una gran variedad de propósitos con énfasis en el tratamiento de enfermedades. Se ha demostrado que las generaciones prehistóricas consumían plantas de este género como medicina alternativa o en rituales, ya que mediante un análisis de secuencias de DNA de coprolitos se identificó la presencia de genes pertenecientes al género *Fouquieria* en dichos fósiles (Reinhard *et al.*, 2008). Esto se ha confirmado ya que en la actualidad la gente local utiliza los preparados vegetales del ocotillo para aliviar el cansancio y la fatiga, algunos otros datos históricos mencionan que los indios Apache se bañaban en una decocción de las raíces del ocotillo y ponían sus polvos sobre inflamaciones dolorosas. Además, los nativos creaban vendajes para cinturones a base de la cera que recubre los tallos (Krochmal *et al.*, 1954), y para desmanchar ropa utilizaban macerados de *F. burragei*, especialmente en prendas de lana (Martínez, 1945). En la actualidad, se sabe que los tallos frescos de *F. splendens* son utilizados en la medicina tradicional mexicana como remedio para mejorar la circulación pélvica, congestión, hinchazón abdominal, hemorroides, hiperplasia de la próstata, entre otros; la dosis habitual de tintura empleada varía desde los 3 a 5 ml tres veces al día, o dosis más pequeñas cuando se combina con otras hierbas en las fórmulas (**Tabla 2**) (Romm *et al.*, 2010).

Así mismo, sus aplicaciones se asocian a la asimilación de grasas, regulación en el metabolismo de la glucosa, alivio de la tos, venas varicosas, infecciones urinarias, y el dolor premenstrual y uterino (Moore, 1989; Vega *et al.*, 2013). En algunos lugares el tallo de *F. splendens* subsp. *breviflora* se emplea como infusión para la tos (Henrickson 1972). Ahora bien, un dato muy interesante es el que se refiere a la determinación de que el uso de los tallos de *F. fasciculata* ayudan a eliminar tumores benignos (Graham *et al.*, 2000). Algunos autores sugieren que el ocotillo es capaz de prevenir y tratar enfermedades crónicas, como la colitis ulcerosa, la enfermedad de Crohn, la enfermedad de Alzheimer, la diabetes, los trastornos hepáticos y el cáncer (Monreal-García *et al.*, 2019; Derosa, 2016). Se ha logrado concluir que el extracto, usando como solventes hexano y metanol del tallo y la raíz de ocotillo, tienen una actividad biológica contra el crecimiento de *S. littoralis*, además se ha observado que los extractos de raíz y tallo del ocotillo inhiben el crecimiento de *M. persicae* y *R. padi* (Pérez-leal *et al.*, 2020), y generan una actividad fitotóxica contra *L. sativa* y *L. perenne*, así como actividad herbicida contra el pulgón del durazno *M. persicae* (Pérez-leal *et al.*, 2020).

En contraste con lo anterior, se ha determinado que los extractos de *F. splendens* presentan una actividad antimicrobiana de los extractos metanólicos contra *B. cereus*, *B. subtilis*, *E. coli* y *S. aureus* por métodos de difusión en disco, mostrando un halo de inhibición de 11 a 15 mm a una concentración de 250 - 1000 µg / ml, ya sea de aislados clínicos o cepas de referencia (Menchaca, 2013).

También se ha demostrado una actividad antimicrobiana contra los hongos *M. gypseum*, *M. nanum*, *M. cookie* y *M. canis* a una concentración de 125 mg/ mL y antiparasitaria contra trofozoítos de *E. histolytica* a una concentración de 0.25 mg/ mL (Vega *et al.*, 2013; Morales-Rubio *et al.*, 2016).

Tabla 2 Actividad biológica de las especies del género *Fouquieria*
Table 2 Biological activity of the species of the genus *Fouquieria*

Actividad	Especie	Órgano de la planta	Modelo	Dosis	Efecto	Cita
Fitotóxica	<i>F. splendens</i>	Tallo	Bioensayo de toxicidad de extractos en la germinación de <i>L. sativa</i> y <i>L. perenne</i>	10 mg / ml Extracto metanólico	Fitotóxico	(Pérez-Leal et al., 2020)
Insecticida	<i>F. splendens</i>	Tallo	Bioensayo contra el pulgón del durazno <i>M. Persicae</i>	10 mg / ml Extracto metanólico	Insecticida 53.53% de respuesta	(Pérez-Leal et al., 2020)
Antiparasitaria	<i>F. splendens</i>	Tallo	bioensayo contra <i>E. histolytica</i>	0.25 mg / mL Extracto metanólico	Inhibición parasitaria	(Vega et al. 2013; Morales-Rubio et al., 2016)
Antibacteriana	<i>F. burragei</i>	Corteza	Actividad antimicrobiana contra <i>Mycobacterium</i>	Material vegetal EtOH 1:3	Inhibición del crecimiento	(Nickell 1959; Menchaca 2013)
	<i>F. diguetii</i>	Corteza	Actividad antimicrobiana contra <i>S. aureus</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>S. faecalis</i> , <i>E. coli</i> y <i>C. albicans</i>	250 - 1000 µg / ml (macerado)		
Antimicótica	<i>F. splendens</i>	Tallo	Actividad antimicrobiana del extracto metanólico	125 mg/ mL	<i>M. gypseum</i> , <i>M. nanum</i> , <i>M. Cookie</i> y <i>M. canis</i>	(Vega et al. 2013; Morales-Rubio et al., 2016)
Fitoremediadora	<i>F. splendens</i> y <i>F. fasciculata</i>	Cultivo vegetal	Exposición de fenantreno a cultivos celulares a 36° C y en agitación continúa.	1mg/L, 5mg/L y 10mg/L de fenantreno	Remoción de entre 40% y 90% sin daño celular.	(Herrera-García et al., 2008).
DL50	<i>F. splendens</i>	Tallo	extractos metanolicos	DL50 > 1000 mg/mL	Los extractos son inocuos por debajo de esta concentración	(Vega et al., 2013)

Se han identificado moléculas antisépticas de naturaleza terpenoide de tipo Ocotillo provenientes de las plantas de ocotillo y se determinó que éstas tienen la capacidad de mejorar la susceptibilidad de algunos antibióticos, mostrando fuertes efectos contra bacterias como *S. aureus*, *B. subtilis* e incluso *P. aeruginosa* ya que estas moléculas pueden ejercer su efecto antibacteriano al dañar las membranas de las células bacterianas (Zhang et al., 2020; Zhou et al., 2013). En contraste, se ha determinado la concentración letal media de los extractos obtenidos por maceración usando metanol como solvente, mediante el ensayo de letalidad de *Artemia salina* mostrando una dosis letal media > 1000 mg/mL (DL50), demostrando que los extractos metanólicos son inocuos por debajo de esta concentración (Vega et al., 2013). Dicho parámetro es de suma importancia ya que nos permiten conocer el rango de eficiencia de una sustancia con respecto a su toxicidad y hacer comparaciones con su actividad biológica y sus concentraciones máximas con las que se pueden correr ensayos. Además de dar una perspectiva de que tanto se puede suministrar de dicha sustancia ya sea compleja o simple. Esta información evidencia la necesidad de investigar sobre la abundancia, diversidad y efectos toxicológicos de metabolitos secundarios provenientes de *F. splendens* que permitan que éste sea considerado como una alternativa biotecnológica.

5. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y SU RELACIÓN CON LAS ACTIVIDADES BIOLÓGICAS

La mayoría de las especies de origen vegetal tienen algún tipo de análisis químico. Sin embargo, siguen siendo una limitación para el análisis de los componentes bioactivos y sus aplicaciones (Pérez-Leal et al., 2020). Desde el punto de vista metódico, los constituyentes más característicos del género *Fouquieria* corresponden a la leucocianidina, el kaempferol, quercetina, ácido p-cumárico, ácido cafeico, ácido ferúlico, ácido elálgico, la cumarina y la escopoletina (Bate Smith, 1964). La variación química del contenido fenólico entre las plantas puede representar mecanismos de adaptación para sobrevivir en condiciones ambientales variables. Estos compuestos juegan un papel importante en las plantas, como protectores contra la radiación solar UV, patógenos y herbívoros que pueden ser considerados como relevantes debido a las condiciones ambientales donde se encuentra el género (Monreal-García et al., 2019).

Como se menciona anteriormente *F. splendens* se puede dividir en 3 subespecies morfológicamente diferenciada por el color de sus flores (**Figura 5**), esto debido a que las subespecies expresan diferentes polifenoles (flavonoides y taninos). El contenido de taninos condensados (proantocianidinas) en todas las subespecies del ocotillo les permiten resistencia a condiciones ambientales duras como salinidad, altas temperaturas y déficit hídrico (Monreal-García et al., 2019). Los constituyentes fenólicos de las hojas tienen un perfil muy cauteloso en las Fouquieriaceae ya que se han identificado compuestos como el ácido elálgico, isoquercitrina (quercetina 3-glucósido), rutina y ácido cafeico en las 11 especies del género, pero en especial en *F. splendens*. Se ha informado que el ácido elálgico es un agente potencial para tratar ciertas enfermedades crónicas, como colitis ulcerosa, enfermedad de Crohn, enfermedad de Alzheimer, diabetes, trastornos hepáticos y cáncer; lo que puede convertirle en uno de los responsables de dar actividades biológicas importantes en estas especies. Este compuesto se acumula como glucósido o como parte de los elagitaninos, en frutas, verduras, frutos secos y vino. En cuanto a los pigmentos de las flores del género, los antocianos tienen un papel más relevante que los carotenoides, ya que éstos se acumulan en concentraciones (Scogin, 1977). Con base en lo anterior y como se muestra en la **Figura 6**, ha sido útil para clasificar a las especies en cuatro grupos importantes: 1) aquellos en los cuales no se han determinado antocianos florales como lo son *F. purpusii*, *F. fasciculata* y *F. columnaris*; 2) aquellos que presentan la

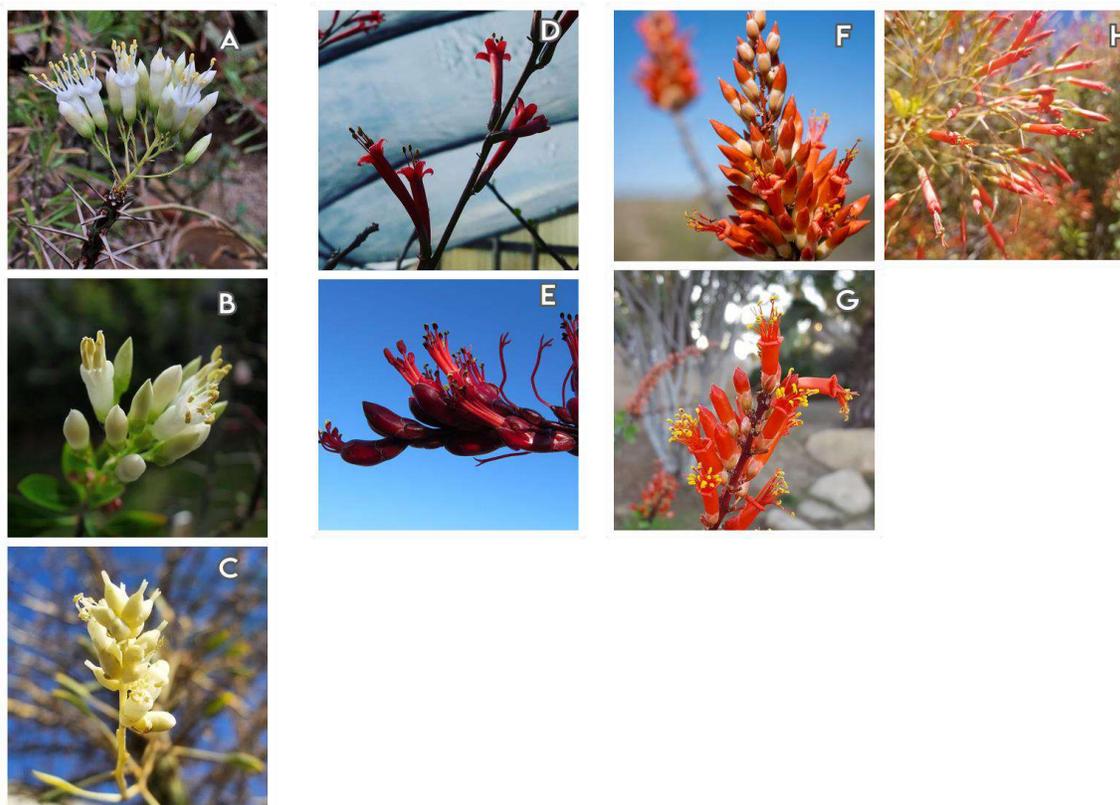


Figura 6. Clasificación de las inflorescencias del género *Fouquieria* con respecto a sus antocianos: A) *F. purpusii*; B) *F. fasciculata*; C) *F. columnaris*; D) *F. leonilae*; E) *F. ochoterena*; F) *F. splendens*; G) *F. diguetii*; H) *F. macdougalii*
Figure 6. Classification of the inflorescences of the genus *Fouquieria* with respect to their anthocyanins: A) *F. purpusii*; B) *F. fasciculata*; C) *F. columnaris*; D) *F. leonilae*; E) *F. ochoterena*; F) *F. splendens*; G) *F. diguetii*; H) *F. macdougalii*

cianidina-3-glucósido y la delfinidina-3-glucósido en el tejido floral como lo son *F. leonilae* y *F. ochoterena*; 3) formada por *F. splendens*, *F. diguetii* y *F. macdougalii* que presentan en sus flores la cianidina-3-glucósido y pelargonidin-3-glucósido; 4) consiste en *F. formosa* que presenta dos glucósidos de pelargonidina (Monreal-García *et al.*, 2019; Scogin, 1978). Respecto a la clasificación anterior, y como se ha informado en las secciones anteriores, se sabe que *F. shrevei* presenta flores color rosado con el centro blanco que van decolorándose conforme madura, esto es probable que se deba a la posible pérdida de la capacidad de producir antocianos cuando se diferenció del ancestro en común con *F. splendens* (Scogin, 1978).

Por otro lado, se ha reportado que *F. leonilae* y *F. ochoterena* conservan caracteres morfológicos y fitoquímicos primitivos como la presencia del anillo B trihidroxilado de sus antocianos florales, el cual es consistente en plantas leñosas del desierto. Resultados actuales revelaron que las flores de *F. splendens* junto con *F. diguetii*, *F. macdougalii* y *F. burragei* están angostamente relacionados, son una fuente importante de antocianos, y pueden mejorar la ingesta de glucosa en las células del músculo esquelético humano y animal con una biodisponibilidad mayor de lo que se suponía (Monreal-García *et al.*, 2019). Otro tipo de polifenoles de importancia son los flavonoides agliconas ya que son excretados y acumulados externamente en la superficie de las hojas y del tallo por miembros de

muchas familias de angiospermas (Wollenweber, 1994). Estos flavonoides son el grupo de compuestos fenólicos más conocido y se encuentran en prácticamente todas las partes de las plantas, y su ingesta humana está relacionada con los beneficios para la salud. Dentro de la composición del ocotillo se descubrió que tanto los tallos como las hojas producían soluciones amarillas producto de varios flavonoides como el kaempferol, la ermanina y cetina, además las flavonas apigenina, la acetina, luteolina y el crisoeriol. Entre estos, la apigenina y la ermanina, rutina y quercetina-3-O-glucósido fueron los principales compuestos fenólicos en las hojas (Wollenweber, 1994; Monreal-García *et al.*, 2019).

Dejando de lado los compuestos polifenólicos, también se han encontrado triterpenos, triterpenoides, saponinas esteroideas y compuestos iridoides (Takhtajan, 2009), y dentro de las flores los fitoesteroles y alcanos de cadena larga y corta; y en el tallo compuestos como el Dammaran-triterpeno, el fouquierol y el isofouquierol, así como el dammarendiol en las raíces (**Figura 7**) (Hegnauer, 1989; Waterman 1985). Además de los compuestos mencionados, se aislaron el ácido adoxosídico, loganina y 6 β -hidroxiloganina de *F. columnaris* (Purushothaman *et al.* 1985) y el 6 β -hidroxisplendosido y 7 β -hidroxisplendosido, asperulosido, el fouquierol y el isofouquierol de *F. splendens* y *F. diguetii*. Esta última especie también contenía epoxisplendosido y 3 monoacetatos y el 10-benzoyl galiosido (Plouvier y Favre-Bonvin, 1971; Pant, 1979; Damtoft *et al.*, 1993; Hegnauer 1989; Reinhad *et al.*, 2008).

Por otro lado, en el ocotillo se ha aislado el Pyxinol y el Ocotillol (**Figura 8**), el último es una saponina triterpenoides el cual presenta actividades interesantes como la inhibición del crecimiento de bacterias Gram-positivas y negativas con bajas tasas de toxicidad (Bi Y. *et al.*, 2017; Pokhilo y Uvarova, 1988), además de presentar sinergismo a una concentración inhibitoria por debajo del mínimo (2-16 $\mu\text{g} / \text{mL}$) cuando se usa con kanamicina y cloranfenicol e inducir la liberación de óxido nítrico en la membrana bacteriana (Bi Y., 2015).

Por último, se ha informado que la corteza de *F. splendens* contiene un 11.3% de sustancias resinosas solubles en acetona. Y es que una característica del género, un tallo ceroso, el cual puede servir como barrera y refugio contra el estrés ambiental, siendo algunas de sus funciones más importantes la reducción de la transpiración (característica importante del género), la resistencia contra patógenos, y el aumento de la resistencia a las heladas (Kurtz, 1958). Normalmente la composición química de estas ceras es bastante singular, con constituyentes alifáticos de cadena larga como alcanos o compuestos poco oxigenados. Se ha descubierto que *F. columnaris* presenta un 87.2% de con alcanos n-C27, n-C29 y n-C31 como los más representativos (Proksch *et al.*, 1981). Se reporta, además, que las flores del ocotillo contienen un 85 % de nutrientes digestibles, entre ellos 12 % de proteína (en base seca), carbohidratos (67 %), y 3,085.98 kcal/kg de energía metabolizable, es debido a esto que es considerada una especie de importancia por su alto valor proteico, energético y de digestibilidad que puede ser aprovechado por diferentes especies (Gallina *et al.*, 2017).

Las diferencias en los contenidos de fenólicos totales, foliares y florales, flavonoides, taninos, antocianinas, carotenoides, así como las diferencias en la concentración de compuestos individuales, permitieron la conclusión de que pueden ser resultado de las diferentes condiciones ambientales en las que cada una crece, pues se ha informado de factores ambientales que alteran la expresión de genes involucrados en la síntesis de fitoquímicos (Monreal-García *et al.*, 2019).

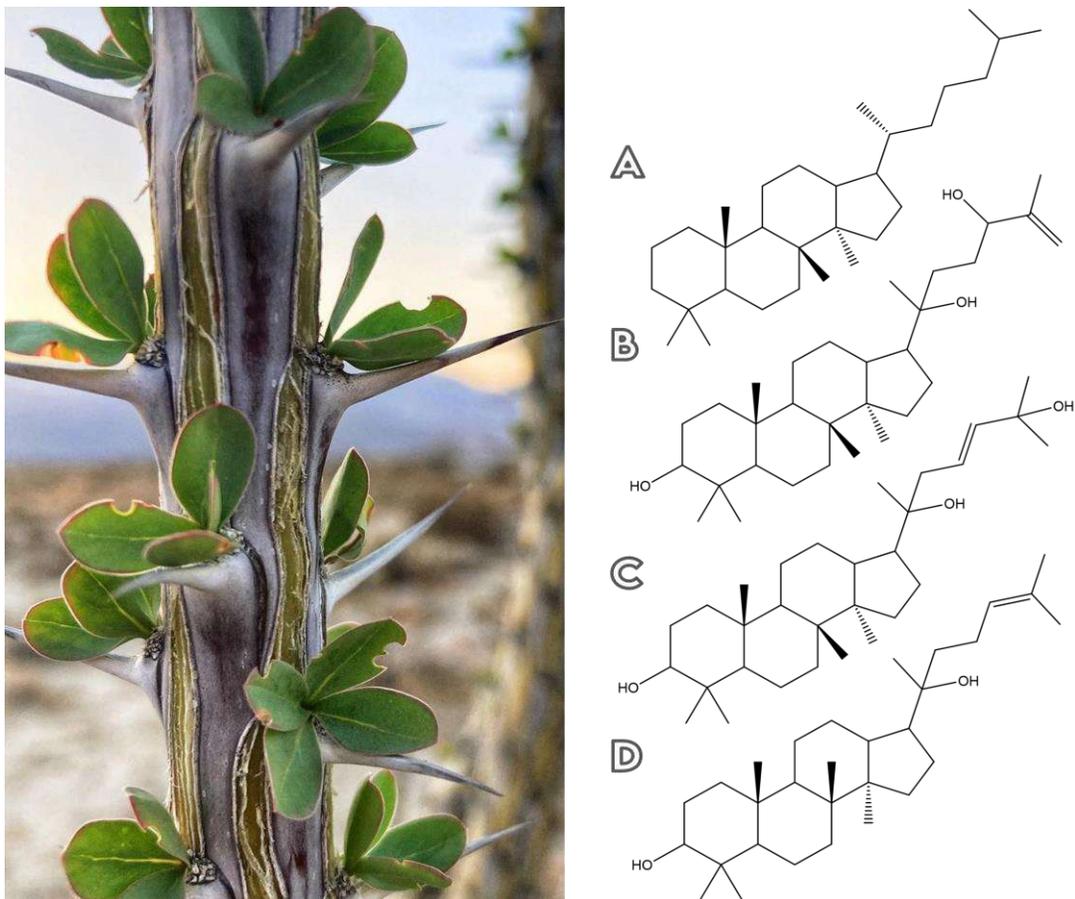


Figura 7. Principales Triterpenos identificados en los órganos del género *Fouquieria*: dammaran-triterpeno (A), fouquierol (B), isofouquierol (C) y dammarendiol (D).

Figure 7. Main Triterpenes identified in the organs of the genus *Fouquieria*: dammaran-triterpene (A), fouquierol (B), isofouquierol (C) and dammarendiol (D).

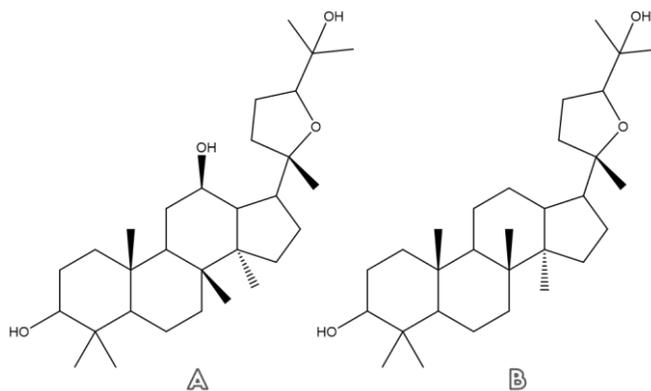


Figura 8. Moléculas de Pyxinol (A) y el Ocotillol (B) presentes en los tallos del ocotillo

Figure 8. Pyxinol (A) and Ocotillol (B) molecules present in ocotillo stems.

6. ESTUDIOS BIOTECNOLÓGICOS DEL GÉNERO *Fouquieria*

Hablando de aspectos biotecnológicos donde estas especies pueden ayudar a solucionar problemas, se ha hecho hincapié en que la respiración del suelo es una fuente muy importante en el intercambio de CO₂ y de otros gases. Se ha demostrado que, en condiciones húmedas, los suelos influenciados por *Fouquieria* generan una disminución de la tasa de respiración del suelo, lo que ayuda a la comunidad agrícola a solucionar problemas de fertilidad de suelo (Herrera-García *et al.*, 2008; Cueva Rodríguez, *et al.*, 2012). Por otro lado, en la actualidad, la comunidad científica ha mostrado interés en los contaminantes emergentes, ya que éstos pueden generar un problema para la salud humana. Una forma de eliminar estos contaminantes es a través de la biotransformación utilizando cultivos celulares vegetales (Herrera-García *et al.*, 2008). Una contribución que tienen las especies del género *Fouquieria* es que pueden ser empleadas en biotecnologías de Fitotransformación de contaminantes y se han reportado eficientes contra compuestos aromáticos policíclicos como el fenantreno, esto se descubrió utilizando células en suspensión de callos de ocotillo y del árbol de barril sin generar alteraciones morfológicas ni un efecto dañino o muerte celular a 10 ppm de fenantreno y con remociones desde 40% a 90%. Además, se demostró con un análisis de hemoperoxidasas que estas especies generan una oxidación del fenantreno sin daño alguno en su estructura celular (Herrera-García *et al.*, 2008). Los sistemas experimentales que utilizan cultivos celulares permiten estudiar con alta precisión las adaptaciones que sufren estos organismos bajo condiciones de estrés hídrico, sin generar interferencias con tejidos y el metabolismo y desarrollo vegetal. Un acercamiento sobre esas adaptaciones es la síntesis de proteínas en respuesta a ese estrés, que son resultado de la expresión génica propia de las especies. Se ha evaluado la exposición de callos de ocotillo al ácido abscísico (ABA) el cuales una hormona vegetal que se expresa en estado de estrés hídrico, y que mediante un análisis electroforético de proteínas totales se evidenció un cambio en la expresión proteica lo que afirma que las condiciones medioambientales secas y de baja cantidad de humedad promueven el impulso de mecanismos adaptativos a la baja disponibilidad de agua (Guerrero, 2017).

Los contaminantes emergentes más representativos son los metales pesados, y es que en las áreas donde se encuentran las minas abandonadas, contienen grandes cantidades de desechos en los que los minerales derivados de prácticas mineras ambientalmente inseguras son los más importantes. Se ha demostrado que *F. diguetii* es una planta biotecnológicamente importante para usarse en técnicas de fitorremediación ya que es adecuada para evaluar la movilidad de los metales del suelo a las plantas y animales. Aunque se registraron diferentes tendencias en las concentraciones de metales, se demostró que esta especie puede disminuir hasta 10 veces la cantidad de Fe del suelo, el cual una vez en la planta se distribuye entre las raíces y el resto de ésta (Mendez-Rodríguez *et al.*, 2016). Otro tipo de contaminantes emergentes de alta importancia es el arsénico ya que este elemento ha sido clasificado como carcinógeno humano, ahora bien, de igual manera han sido estudiadas algunas especies que crecen alrededor de minas, esto para evaluar la capacidad de remover este metal del suelo. Plantas como *F. splendens*, *Cineraria marítima* y *Baccharis salcifolia*, se han considerado por su capacidad de fitoabsorber As y retenerlo en tejidos de la raíz y el tallo (Loredo-Portales *et al.*, 2017). También, se ha descubierto que los cultivos celulares del ocotillo suplementados con *Staphylococcus pasteurii* (productor de ácido indol acético) permiten una estrategia para la fitorremediación de metales como el cadmio, mejorando la calidad del callo cuando se trabaja en biorreactores (Espinoza *et al.*, 2021).

Con respecto a beneficios de compuestos vegetales en el área farmacéutica el ocotillol (**Figura 8**), es un triterpeno aislado de *F. splendens*, que ha servido para el diseño de derivados de lactona de tipo ocotillol para estudiar su actividad antibacteriana. De los cuales, se demostró su efecto antibacteriano al dañar las membranas de las células bacterianas y alterar la función del DNA, que podrían conducir a una muerte celular rápida (Zhou *et al.*, 2013). Se afirma que pueden ejercer fuertes efectos sinérgicos cuando se combinan con kanamicina y cloranfenicol contra *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Bacillus subtilis*, lo que muestra que los derivados triterpenoides de tipo ocotillol podrían usarse de manera complementaria con algunos antibióticos para obtener efectos favorables para la inhibición de algunas bacterias (Zhang *et al.*, 2020). Todo lo anterior remarca la importancia de seguir estudiando los recursos vegetales o sus derivados en las áreas biotecnológicas para solicitar problemas que la comunidad se expone cotidianamente.

7. CONCLUSIONES

La mayoría de las especies del género *Fouquieria* son consideradas como plantas de carácter ornamental y medicinal. Los estudios sobre las propiedades del género *Fouquieria* demuestran que éstos tienen características importantes en las áreas químico biológica con interés médico. Los extractos presentan actividad fitotóxica, insecticida, antiparasitaria, antibacteriana, antimicótica y fitoremediadora, por lo que pueden aprovecharse en distintas áreas farmacéuticas. En cuanto a los constituyentes de las especies en revisión, es necesario profundizar en la identificación de los compuestos químicos a través de nuevos métodos analíticos, y a partir de diferentes métodos de extracción que permitan aislar diferentes metabolitos con potenciales actividades farmacológicas que faciliten presentar nuevas alternativas para la solución de problemas en áreas químico-biológicas. Las investigaciones deben continuar en el futuro para aportar evidencias que esclarezcan con mayor certeza el efecto de los extractos del género *Fouquieria* en la salud.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés con respecto al trabajo presentado en este reporte.

REFERENCIAS

- Abd El-Ghani M.M., Huerta-Martínez F.M., Hongyan L., Qureshi R. (2018) Erratum to: Plant Responses to Hyperarid Desert Environments. In: Plant Responses to Hyperarid Desert Environments. Springer, Cham. http://doi.org/10.1007/978-3-319-59135-3_14
- Aguirre-Liguori J.A., Scheinvar E., Eguiarte L.E. (2014). Gypsum soil restriction drives genetic differentiation in *Fouquieria shrevei* (Fouquieriaceae). American Journal of Botany. 101(4):730–736. <http://doi.org/10.3732/ajb.1400031>
- Alice L.A., Campbell C.S. (2017). Phylogeny of *Rubus* (Rosaceae) Based on Nuclear Ribosomal DNA Internal Transcribed Spacer Region Sequences. American Journal of Botany. 86(1):81–97. <http://doi.org/10.2307/2656957>

- Álvarez-Castañeda S.T., Correa-Ramírez M.M., Trujano-Álvarez A.L. (2006). Notes on *Notiosorex crawfordi* (coues) from two oases in the Baja California peninsula, México. *Journal of Arid Environments*. 66(4):773–777. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.12.004>
- Amundson R., Franco-Vizcaíno E., Graham R.C., DeNiro M. (1994). The relationship of precipitation seasonality to the flora and stable isotope chemistry of soils in the Vizcaíno desert, Baja California, México. *Journal of Arid Environments*. 28(4):265–279. [http://doi.org/10.1016/S0140-1963\(05\)80048-5](http://doi.org/10.1016/S0140-1963(05)80048-5)
- Andrade-Cetto A., Heinrich M. (2005). Mexican plants with hypoglycaemic effect used in the treatment of diabetes. *Journal of Ethnopharmacology*. 99(3):325–348. <http://doi.org/10.1016/j.jep.2005.04.019>
- Arnaud G., Carbajal-Márquez R.A., Rodríguez-Canseco J., Ferreyra E. (2014). Primeros registros de la cascabel roja (*Crotalus ruber*) en la isla Coronados, golfo de California, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 85(1):322–324. <http://doi.org/10.7550/rmb.40435>
- Arriaga L and Maya Y. (2007). Spatial variability in decomposition rates in a desert scrub of Northwestern Mexico. *Plant Ecology*. 189(2):213–225. <http://doi.org/10.1007/s11258-006-9178-4>
- Arundel S.T. (2005). Using spatial models to establish climatic limiters of plant species' distributions. *Ecological Modelling Journal*. 182(2):159–181. <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.07.016>
- Avendaño A., Casas A., Dávila P., Lira R. (2006). Use forms, management and commercialization of “pochote” *Ceiba aesculifolia* (H.B. & K.) Britten & Baker f. subsp. *parvifolia* (Rose) P.E. Gibbs & Semir (Bombacaceae) in the Tehuacán Valley, Central Mexico. *Journal of Arid Environments*. 67(1):15–35. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.004>
- Avila-Lovera E., Garcillán P.P. (2021). Phylogenetic signal and climatic niche of stem photosynthesis in the mediterranean and desert regions of California and Baja California Peninsula. *American Journal of Botany*. 108(2):334–345. <http://doi.org/10.1002/ajb2.1572>
- Axelrod D.I. (1978). The Origin of Coastal Sage Vegetation, Alta and Baja California. *American Journal of Botany*. 65(10):1117–1131. <http://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1978.tb06179.x>
- Bashan Y., Khaosaad T., Salazar B.G., Ocampo J.A., Wiemken A., Oehl F., Vierheiling H. (2007). Mycorrhizal characterization of the boojum tree, *Fouquieria columnaris*, an endemic ancient tree from the Baja California Peninsula, Mexico. *Trees - Struct Funct*. 21(3):329–335. <http://doi.org/10.1007/s00468-007-0126-2>
- Baskin C.C., Baskin J.M. (2014). *A Geographical Perspective on Germination Ecology: Tropical and Subtropical Zones. Seeds*. Academic Press. 375–590. <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-416677-6.00009-3>
- Bate-Smith E.C. (1964). Chemistry and taxonomy of *Fouquieria splendens* Engelm: A new member of the asperuloside group. *Phytochemistry*. 3(5):623–625. [http://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)82938-6](http://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)82938-6)

- Behnke H. D. (1976). Sieve-Element Plastids of *Fouquieria*, *Frankenia* (Tamaricales), and *Rhabdodendron* (Rutaceae), Taxa Sometimes Allied with Centrospermae (Caryophyllales). *Taxon*. 25(2-3):265-268. <http://doi.org/10.2307/1219452>
- Bi Y., Liu X.X., Zhang H.Y., Yang X., Liu Z.Y., Lu J., Lewis P.J., Wang Ch.Z., Xu J.Y., Meng Q.G., Ma K., and Yuan Ch.S. (2017). Synthesis and antibacterial evaluation of novel 3-substituted ocotillo-type derivatives as leads. *Molecules*. 22(4):1-10. <http://doi.org/10.3390/molecules22040590>
- Bi Y., Yang X., Zhang T., Liu Z., Zhang X., Lu J., Cheng K., Xu J. Wang H., Lv G., Lewis P.J., Meng Q., Ma C. (2015). Design, synthesis, nitric oxide release and antibacterial evaluation of novel nitrated ocotillo-type derivatives. *European Journal of Medical Chemistry*. 101:71-80. <http://doi.org/10.1016/j.ejmech.2015.06.021>
- Bobich E.G, Huxman T.E. (2009). Dry mass partitioning and gas exchange for young ocotillos (*Fouquieria splendens*) in the sonoran desert. *International Journal of Plant Science*. 170(3):283-289. <http://doi.org/10.1086/596331>
- Bowers J.E. (2006). Branch length mediates flower production and inflorescence architecture of *Fouquieria splendens* (ocotillo). *Plant Ecology*. 186(1):87-95. <http://doi.org/10.1007/s11258-006-9114-7>
- Brown C.D. (1998). Reproduced with permission of the copyright owner. Further reproduction prohibited without. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 130(2):556. <http://doi.org/10.1016/j.jaci.2012.05.050>
- Bullock S.H., Heath D. (2006). Growth rates and age of native palms in the Baja California desert. *Journal of Arid Environments*. 67(3):391-402. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.03.002>
- Bullock S.H., Martijena N.E., Webb R.H., Turner R.M. (2005). Twentieth century demographic changes in cirio and cardón in Baja California, México. *Journal of Biogeography*. 32(1):127-143. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01152.x>
- Búrquez A., Martínez-Yrizar A., Núñez S., Quintero T., Aparicio A. (2010). Aboveground biomass in three Sonoran Desert communities: Variability within and among sites using replicated plot harvesting. *Journal of Arid Environments*. 74(10):1240-1247. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.04.004>
- Cross A.T., Thompson G.G., Zaitzeff J.B. (1966). Source and distribution of palynomorphs in bottom sediments, southern part of gulf of california. Elsevier Publishing. 4:467-524.
- Cueva-Rodríguez A., Yépez E.A., Garatuza-payán J., Watts C.J. (2012). Respiración de suelo en ecosistemas design and use of a portable system for measuring soil respiration in ecosystems. *Terra latinoamerica*. 30:327-336. <https://bit.ly/3OXvRyU>

- Currah L. (2018). Onions and Allied Crops: Botany, Physiology, and Genetics. Chapter 6: Pollination biology. Rabinowitch, H.D., & Brewster, J.L. (Eds.). CRC Press. <http://doi.org/10.1201/9781351075169>
- Cyrus M. (Ed.) (1990). The Biology and Utilization of Shrubs. Stony Brook University. <http://doi.org/10.1086/416637>
- Damtoft S., Rosendal-Jensen S., Juhl-Nielsen B. (1993). Iridoid glucosides in epacridaceae. *Phytochemistry*. 33(2):377–378. [http://doi.org/10.1016/0031-9422\(93\)85522-S](http://doi.org/10.1016/0031-9422(93)85522-S)
- Davis T.J. (2011). Phenotypic Variation in Inflorescences of *Fouquieria burragei* (Fouquieriaceae). *Cactus Succulent Journal*. 83(2):61–66. <http://doi.org/10.2985/0007-9367-83.2.61>
- De la Luz L., Navarro P., Breceda A. (2000). A transitional xerophytic tropical plant community of the Cape Region, Baja California. *Journal of Vegetation Science*. 11(4):555–564. <http://doi.org/10.2307/3246585>
- De-Nova J.A., Sánchez-Reyes L.L., Eguiarte L.E., Magallón S. (2018). Recent radiation and dispersal of an ancient lineage: The case of *Fouquieria* (Fouquieriaceae, Ericales) in North American deserts. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 126:92–104. <http://doi.org/10.1016/j.ympev.2018.03.026>
- Derosa G., Maffioli P., Sahebkar A. (2016) Ellagic Acid and Its Role in Chronic Diseases. In: Gupta S., Prasad S., Aggarwal B. (eds) *Anti-inflammatory Nutraceuticals and Chronic Diseases*. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer Cham. http://doi.org/10.1007/978-3-319-41334-1_20
- Escoto-Rodríguez M., Bullock S.H. (2002). Long-term growth rates of cirio (*Fouquieria columnaris*), a giant succulent of the Sonoran Desert in Baja California. *Journal of Arid Environments* 50(4):593–611. <http://doi.org/10.1006/jare.2001.0921>
- Ezcurra E., Mellink E. (2013). Desert Ecosystems. *Encyclopedia of Biodiversity*. Elsevier Publishing. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00380-4>
- Espinoza-Mellado M., López-Villegas E., López-Gómez M., Rodríguez-Tovar A., García-Pineda M., Rodríguez-Doratez A. (2021). Biotization and in vitro plant cell cultures: plant endophyte strategy in response to heavy metals knowledge in assisted phytoremediation. *Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants*. 27-36. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-821199-1.00003-1>
- Franco-Vizcaíno A., Goldstein G., Ting I.P. (1990). Comparative gas exchange of leaves and bark in three stem succulents of Baja California. *American Journal of Botany*. 77(10):1272–1278. <http://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1990.tb11379.x>
- Franco-Vizcaíno E. (1994). Water regime in soil and plants along an aridity gradient in central Baja California, Mexico. *Journal of Arid Environments*. 27, 309-323. <http://doi.org/10.1006/jare.1994.1066>

- Gallina S., Feria L.G., González-Trápaga R. (2017). Ocotillo flowers as food resource for the mule deer during the dry season. *Therya*. 8(2):185–188. <http://doi.org/10.12933/therya-17-483>
- Gartner B.L. (Ed.). (1995). *Plant stems. Physiology and functional morphology*. Academic Press.
- Gorelick R. (2008). *Fouquieria burragei*. *Cactus and Succulent Journal*. 80(4):204–207. [http://doi.org/10.2985/0007-9367\(2008\)80\[204:fb\]2.0](http://doi.org/10.2985/0007-9367(2008)80[204:fb]2.0)
- Graham J.G., Quinn M.L., Fabricant D.S., Farnsworth N.R. (2000). Plants used against cancer - An extension of the work of Jonathan Hartwell. *J Ethnopharmacology*. 73(3):347–377. [http://doi.org/10.1016/S0378-8741\(00\)00341-X](http://doi.org/10.1016/S0378-8741(00)00341-X)
- Guerrero L. (2017). Evaluación de la respuesta de cultivos celulares de (*fouquieria splendens* ssp. *breviflora*) *fouquieriaceae* bajo estrés hídrico. *Acta biologica colombiana*. 22(2):149–156. <http://doi.org/10.15446/abc.v22n2.56809>
- Guerrero-Cárdenas, I., Álvarez-Cárdenas, S., Gallina, S., Corcuera, P., Ramírez-Orduña, R., & Tovar-Zamora, I. (2018). Variación estacional del contenido nutricional de la dieta del borrego cimarrón del desierto (*Ovis canadensis weemsi*), en Baja California Sur, México. *Acta Zoológica Mexicana*. 34(1), 1-18. <http://doi.org/10.21829/azm.2018.3412113>
- Gutiérrez-Ruacho O., Coronado M.L., Sánchez-Teyer F., Sánchez A., Gutiérrez A., Esqueda M. (2018). Abundance of rhizospheric bacteria and fungi associated with *Fouquieria columnaris* at Punta Cirio, Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 89(2):541–552. <http://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.2.1620>
- Hegnauer R. (1989). *Chemotaxonomie Der Pflanzen*. In an overview of the distribution and the systematic importance of plant substances. Springer Link
- Henrickson J. (1967). Pollen morphology of the Onagraceae. *Review Palaeobotany and Palynology*. 3(1–4):163–180. [http://doi.org/10.1016/0034-6667\(67\)90050-4](http://doi.org/10.1016/0034-6667(67)90050-4)
- Henrickson J. A (1972). Taxonomic Revision of the *Fouquieriaceae*. *Aliso*. 7(4):439–537. <http://doi.org/10.5642/aliso.19720704.08>
- Herrera-García M., Rodríguez-Dorantes A., Guerrero-Zúñiga L. (2008). Evaluación del crecimiento, actividad de hemoperoxidasas y remoción de fenantreno de los cultivos celulares de *Fouquieria splendens* y *Fouquieria fasciculata*. *Polibotánica*. (25):101–119. <https://bit.ly/3F9jqM9>
- Hinojo-Hinojo C., Castellanos A.E., Huxman T., Rodriguez J.C., Vargas R., Romo Leon J., Biederman J. (2019). Native shrubland and managed buffelgrass savanna in drylands: Implications for ecosystem carbon and water fluxes. *Agriculture and Forest Meteorology*. 268:269–278. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.030>

- Hong A.H., Sullivan F.R. (2013). Towards an idea-centered, principle-base design to as creation approach support learning knowledge. Educational Technology Research Development. 57(5):613–627. <http://doi.org/10.1007/s11423-009-9122-0>
- Humphrey R.R. (1931). A study of *Idria columnari* and *Fouquieria splendens*. American Journal of Botany. 22(2) 184–207. <http://doi.org/10.2307/2436008>
- Humphrey R.R. (1935). A Study of *Idria Columnaris* and *Fouquieria Splendens*. American Journal of Botany. 22(2):184–207. <http://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1935.tb05015.x>
- Johansen DA. (1936). Morphology and Embryology of *Fouquieria*. American Journal of Botany 23(2):95–99. <http://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1936.tb08959.x>
- Johansen DA. (1936). Morphology and Embryology of *Fouquieria*. American journal of Botany. 23(2):95–99. <http://doi.org/10.2307/2436301>
- Johnson L.A., Chan L.M., Weese T.L., Busby L.D., McMurry S. (2008). Nuclear and cpDNA sequences combined provide strong inference of higher phylogenetic relationships in the phlox family (Polemoniaceae). Molecular Phylogenetics and Evolution. 48(3):997–1012. <http://doi.org/10.1016/j.ympev.2008.05.036>
- Killingbeck K.T. (2006). Loss of long-shoot leaves may mask terminal stem segment age in ocotillo (*Fouquieria splendens*). *Haseltonia*. (12):11–12. [http://doi.org/10.2985/1070-0048\(2006\)12\[11:LOLLMM\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.2985/1070-0048(2006)12[11:LOLLMM]2.0.CO;2)
- Killingbeck K.T. (2019). Stem succulence controls flower and fruit production but not stem growth in the desert shrub ocotillo (*Fouquieria splendens*). American Journal of Botany. 106(2):223–230. <http://doi.org/10.1002/ajb2.1237>
- Kreulen D.A. (1989). Ecological Systems of the Geobiosphere. 2. Tropical and Subtropical Zonobiomes. Journal of Range Management. 42 (3) 260-264. <http://doi.org/10.2307/3899486>
- Krochmal A., Paur S., Duisberg P. (1954). Useful native plants in the American southwestern deserts. Economic Botany. 8(1):3–20. <http://doi.org/10.1007/BF02898875>
- Kuila A, Sharma V. (Eds.) (2018). Principles and Applications of Fermentation Technology. Wiley Online Library. <http://doi.org/10.1002/9781119460381>
- Kurtz E.B. (1958). A survey of some plant waxes of Southern Arizona. Journal of the American Oil Chemist's Society. 35(9):465–467. <http://doi.org/10.1007/BF02539916>
- Landis J.B., Bell C.D., Hernandez M., Zenil-Ferguson R., McCarthy E.W., Soltis D.E., Soltis P.S. (2018) Evolution of floral traits and impact of reproductive mode on diversification in the phlox family (Polemoniaceae). Molecular Phylogenetics and Evolution. 127:878-890. <http://doi.org/10.1016/j.ympev.2018.06.035>

- Lima L.R., Andrade F.K., Alves D.R., De Morais S.M., Vieira R.S. (2021). Anti-acetylcholinesterase and toxicity against *Artemia salina* of chitosan microparticles loaded with essential oils of *Cymbopogon flexuosus*, *Pelargonium x ssp* and *Copaifera officinalis*. *International Journal of Biological Macromolecules*. 167:1361–1370. <http://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.11.090>
- Lopez Z.R., Rodriguez-Navarro J.L. (2016). *Variance of Size-Age Curves : Bootstrapping with Autocorrelation* Wiley Publishers.85(8):2114–2117.
- López-Jiménez E., Vasquez-Gomez J.I., Sanchez-Acevedo M.A., Herrera-Lozada J.C., Uriarte-Arcia A.V. (2019). Columnar cactus recognition in aerial images using a deep learning approach. *Ecological Informatics*. 52:131–138. <http://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.05.005>
- Loredo-Portales R., Castillo-Michel H., Aquilanti G., De La Rosa-Álvarez M.G, Rocha-Amador D.O., Vogel-Mikus K., Kump P., Cruz-Jiménez G. (2017). Synchrotron based study of as mobility and speciation in tailings from a mining site in Mexico. *Journal Environmental of Chemistry Engineering*. 5(1):1140–1149. <http://doi.org/10.1016/j.jece.2017.01.019>
- Majure L.C., Baker M.A., Cloud-Hughes M., Salywon A., Neubig K.M. (2019). Phylogenomics in Cactaceae: A case study using the chollas sensu lato (Cylindropuntieae, Opuntioideae) reveals a common pattern out of the Chihuahuan and Sonoran deserts. *American Journal of Botany*. 106(10):1327–1345. <http://doi.org/10.1002/ajb2.1364>
- Martínez M. (1945). Breve relación de algunas de las principales plantas observadas en el distrito sur de la baja california. *Botanical Sciences*. 2, 1–14. <http://doi.org/10.17129/botsci.917>
- Maya Y. y Arriaga L. (1996). Litterfall and phenological patterns of the dominant overstorey species of a desert scrub community in north-western Mexico. *Journal of Arid Environments*. 34(1):23–35. <http://doi.org/10.1006/jare.1996.0090>
- McAuliffe J.R. (1991). Demographic shifts and plant succession along a late Holocene soil chronosequence in the Sonoran Desert of Baja California. *Journal of Arid Environments* 20(2):165–178. [http://doi.org/10.1016/s0140-1963\(18\)30706-7](http://doi.org/10.1016/s0140-1963(18)30706-7)
- Menchaca Vega M., Rivas Morales C., Verde Star J., Oranday Cárdenas A., Rubio Morales M.E., Núñez González M.A. y Serrano Gallardo L.B. (2013). Antimicrobial activity of five plants from Northern Mexico on medically important bacteria. *African Journal of Microbiology Research*. 7(43):5011–5017. <http://doi.org/10.5897/ajmr12.1759>
- Méndez-Rodríguez L.C, Álvarez-Castañeda S.T. (2016). Assessment of Trace Metals in Soil, Vegetation and Rodents in Relation to Metal Mining Activities in an Arid Environment. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 97(1):44–49. <http://doi.org/10.1007/s00128-016-1826-3>
- Molina Guerra V.M., Cervantes Balderas J.M., Soto Mata B., Alanís Rodríguez E., Marroquín-Castillo J.J., Sarmiento Muñoz T.I. (2017). Composición y estructura del matorral desértico rosetófilo del sureste de Coahuila, México Composition and structure of a rosetophyllus desert scrub of southeast Coahuila, Mexico. *Polibotánica*. 44:67–77. <http://doi.org/10.18387/polibotanica.44.5>

- Monreal-García H, Almaraz-Abarca N., Ávila-Reyes J., Torres-Ricario R., González-Elizondo S., Herrera-Arrieta Y., and Gutiérrez-Velázquez M.V. (2019). Phytochemical variation among populations of *Fouquieria splendens* (Fouquieriaceae). *Botanical Science*. 97(3):398–412. <http://doi.org/10.17129/botsci.2191>
- Moore M. (1989). *Medicinal Plants of the Desert and Canyon West: A Guide to Identifying, Preparing, and Using Traditional Medicinal Plants Found in the Deserts and Canyons of the West and Southwest*. <http://doi.org/10.5860/choice.27-5132>
- Moore M.J., Jansen R.K. (2006). Molecular evidence for the age, origin, and evolutionary history of the American desert plant genus *Tiquilia* (Boraginaceae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 39(3):668–687. <http://doi.org/10.1016/j.ympev.2006.01.020>
- Morales-Rubio M.E., Espinosa-Leal C., Garza-Padrón R.A. (2016). Cultivo de tejidos vegetales y su aplicación en productos naturales. En: *Investigación en plantas de importancia médica*. OmniaScience. 351–410. <http://doi.org/10.3926/oms.315>
- Morton C.M., Mori S.A., Prance G.T., Karol K.G., Chase M.W. (1997). Phylogenetic relationships of Lecythidaceae: A cladistic analysis using rbcL sequence and morphological data. *American Journal of Botany*. 84(4):530–540. <http://doi.org/10.2307/2446029>
- Muller C.T., Moore M.J., Feder Z., Tiley H., Drenovsky R.E. (2017). Phylogenetic patterns of foliar mineral nutrient accumulation among gypsophiles and their relatives in the chihuahua desert. *American Journal of Botany*. 104(10):1442–1450. <http://doi.org/10.3732/ajb.1700245>
- Nedoff J.A, Ting I.P, Lord E.M. (1985). Structure and Function of the Green Stem Tissue in *Ocotillo* (*Fouquieria splendens*). *American Journal of Botany*. 72(1):143–151. <http://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1985.tb05352.x>
- Nickell L.G. (1959). Antimicrobial activity of vascular plants. *Economic Botany*. 13(4):281–318. <http://doi.org/10.1007/BF02885664>
- Nobel P.S., Zutta B.R. (2005). Morphology, ecophysiology, and seedling establishment for *Fouquieria splendens* in the northwestern Sonoran Desert. *Journal of Arid Environments*. 62(2):251–265. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.11.002>
- Pant P., Rastogi R. (1979). The triterpenoids. *Phytochemistry*. 18(7):1095–1108. [http://doi.org/10.1016/0031-9422\(79\)80115-6](http://doi.org/10.1016/0031-9422(79)80115-6)
- Pasternak D., Schlissel A (Ed.). (2001). *Combating desertification with plants*. Springer Publisher. <http://doi.org/10.1007/978-1-4615-1327-8>
- Pérez-Leal R., Torres-Ramos M., Flores-Córdova M.A., González-Franco A.C., Hernandez-Rodríguez A., Soto-Parra J.M. & Robles-Hernandez L. (2020). Phytotoxic and dissuasive activity of Chihuahua desert plants. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(1), 426-435. <http://doi.org/10.15835/nbha4811150>

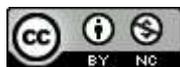
- Pérez-Negrón E, Casas A. (2007). Use, extraction rates and spatial availability of plant resources in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico: The case of Santiago Quiotepec, Oaxaca. *Journal of Arid Environments*. 70(2):356–379. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.12.016>
- Plouvier V., Favre-Bonvin J. (1971). Les iridoïdes et séco-iridoïdes: Répartition, structure, propriétés, biosynthèse. *Phytochemistry*. 10(8):1697–1722. [http://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)86428-6](http://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)86428-6)
- Pokhilo N.D., Uvarova N.I. (1988). Isoprenoids of various species of the genus *Betula*. *Chemistry of Natural Compounds*. 24(3):273–285. <http://doi.org/10.1007/BF00598568>
- Proksch P., Sternburg C., Rodriguez E. (1981). Epicuticular alkanes from desert plants of Baja California. *Biochemical Systematics and Ecology*. 9(2–3):205–206. [http://doi.org/10.1016/03051978\(81\)900417](http://doi.org/10.1016/03051978(81)900417)
- Purushothaman K., Venkatanarasimhan M., Sarada A. (1985). Arbortristoside A and B, two iridoid glucosides from *nyctanthes arbor-tristis*. *Phytochemistry*. 24:773–776. [http://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)84892-X](http://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)84892-X)
- Reinhard K.J., Chavez S.M., Jones J.G., Iñiguez A.M. (2008). Evaluating chloroplast DNA in prehistoric Texas coprolites: medicinal, dietary, or ambient ancient DNA? *Journal of Archaeological Science*. 35(6):1748–1755. <http://doi.org/10.1016/j.jas.2007.11.013>
- Robinson W.J. (1904). The Spines of *Fouquieria*. *Bulletin of Torrey Botanical Society*. 31(1):45–50.
- Romm A., Yarnell E.L., Winston D. (2010). *Urinary complaints*. Elsevier Publishing. <http://doi.org/10.1016/B978-0-443-07277-2.00011-8>
- Sánchez-del Pino I., Alfaro A., Andueza-Noh R.H., Mora-Olivo A., Chávez-Pesqueira M., Ibarra-Morales A., Moore M.J., Flores-Olvera H. (2020). High phylogeographic and genetic diversity of *Tidestromia lanuginosa* supports full-glacial refugia for arid-adapted plants in southern and central Coahuila, Mexico. *American Journal of Botany*. 107(9):1296–1308. <http://doi.org/10.1002/ajb2.1536.82>
- Schönenberger J., Grenhagen A. (2005). Early floral development and androecium organization in *Fouquieriaceae* (Ericales). *Plant Systematics and Evolution*. 254(3–4):233–249. <http://doi.org/10.1007/s00606-005-0331-7>
- Schultheis L.M., Baldwin B.G. (1999). Molecular phylogenetics of *Fouquieriaceae*: Evidence from nuclear rDNA ITS studies. *American Journal of Botany*. 86(4):578–589. <http://doi.org/10.2307/2656819>
- Scogin R. (1977). Anthocyanins of the *Fouquieriaceae*. *Biochemical Systematics and Ecology*. 5(4):265–267. [http://doi.org/10.1016/0305-1978\(77\)90023-0](http://doi.org/10.1016/0305-1978(77)90023-0)
- Scogin R. (1978). Leaf phenolics of the *fouquieriaceae*. *Biochemical Systematics and Ecology*. 6(4):297–298. [http://doi.org/10.1016/0305-1978\(78\)90049-2](http://doi.org/10.1016/0305-1978(78)90049-2)

- Scott Anderson R., Van Devender T.R. (1995). Vegetation history and paleoclimates of the coastal lowlands of Sonora, Mexico - pollen records from packrat middens. *Journal of Arid Environments*. 30(3):295–306. [http://doi.org/10.1016/S0140-1963\(05\)80004-7](http://doi.org/10.1016/S0140-1963(05)80004-7)
- Scott FM. (1932). Some Features of the Anatomy of *Fouquieria Splendens*. *American Journal of Botany*. 9(8):673–678. <http://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1932.tb08851.x>
- Scott P. (2021). Long-term survival and flowering of ocotillo (*Fouquieria splendens*) in Texas: A 33-year perspective. *Journal of Arid Environments*. 193: 104552. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104552>
- Simon M. (2001). *Plant Systematics*. Kew Bulletin. 56 (3) 648-649. <http://doi.org/10.2307/4117689>
- Soltis D.E., Xiang Q-Y, Hufford L. (1995). Relationships and evolution of Hydrangeaceae based on RBC I sequence data. *American Journal of Botany*. 82(4):504–514. <http://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1995.tb15671.x>
- Sternburg C., Rodriguez E. (1982). Hydrocarbons From *Pedilanthus Macrocarpus* (Euphorbiaceae) of Baja California and Sonora, Mexico. *American Journal of Botany*. 69(2):214–218. <http://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1982.tb13250.x>
- Takhtajan A. (Ed.) (2009). *Class Magnoliopsida (Dicotyledons). Flowering Plants*. Springer. 7–588. http://doi.org/10.1007/978-1-4020-9609-9_2
- Tinoco-Ojanguren C., Díaz A., Martínez J., Molina-Freaner F. (2013). Species diversity and regeneration of native species in *Pennisetum ciliare* (buffelgrass) pastures from the thornscrub of Sonora, México. *Journal of Arid Environments*. 97:26–37. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.05.009>
- Vega M., Rivas C., Verde J., Oranday A., Rubio M., Núñez M., Serrano L. (2013). “Antimicrobial activity of five plants from Northern Mexico on medically important bacteria”. *African Journal of Microbiology Research* 7(43): 5011–17. <http://dx.doi.org/10.5897/AJMR12.1759>
- Venegas-Barrera C.S. (2008). Stochastic approach to determine spatial patterns of lizard community on a desert island. *Acta Oecologica*. 33(3):280–290. <http://doi.org/10.1016/j.actao.2008.01.002>
- Vivoni E.R., Watts C.J., Rodríguez J.C., Garatuza-Payan J., Méndez-Barroso L.A., Sainz-Hernández J.A. (2010). Improved land-atmosphere relations through distributed footprint sampling in a subtropical scrubland during the North American monsoon. *Journal of Arid Environments*. 74(5):579–584. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.09.031>
- Waser N.M. (1979). Oecologia of Flowering Time in Ocotillo (*Fouquieria splendens*). *Oecologia*. 39:107–121. <https://doi.org/10.1007/bf00346001>
- Waterman P.D (1985). Triterpenes from the stem bark of *Commiphora Dalzielii*. *Phytochemistry*. 23(12):2925–2928. [http://doi.org/10.1016/s0031-9422\(00\)80607-x](http://doi.org/10.1016/s0031-9422(00)80607-x)

- Webb R.H., Salazar-Ceseña M.M. Turner R. (2014). The distribution of Cirio (*Fouquieria columnaris*) in Baja California, Mexico. *Haseltonia*. 19(19):26–37. <http://doi.org/10.2985/026.019.0105>
- Webb R.H., Turner R.M. (2015). Biodiversity of Cacti and Other Succulent Plants in Baja California, México. *Cactus and Succulent Journal* 87(5):206–216. <http://doi.org/10.2985/015.087.0504>
- Webb R.H., Turner R.M. (2020). Biodiversity of Perennial Vegetation in the Desert Regions of Baja California and Baja California Sur, Mexico. Elsevier. <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.11997-9>
- Whitford W.G., Duval B.D. (2020). Adaptations. En: *Ecology of Desert Systems*. Elsevier; 135–171. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-815055-9.00006-0>
- Wollenweber E. (1994). External Flavonoids of Ocotillo (*Fouquieria splendens*). *Journal of Biosciences*. 689–690. <https://bit.ly/3FfMMbC>
- Xiang Q.Y., Soltis D.E., Soltis P.S. (1998). Phylogenetic relationships of Cornaceae and close relatives inferred from matK and rbcL sequences. *American Journal of Botany*. 85(2):285–297. <http://doi.org/10.2307/2446317>
- Xiang Q.Y., Thomas D.T., Xiang Q.P. (2011). Resolving and dating the phylogeny of Cornales - Effects of taxon sampling, data partitions, and fossil calibrations. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 59(1):123–138. <http://doi.org/10.1016/j.ympev.2011.01.016>
- Zavala-Hurtado J.A., Jiménez M. (2020). Diversity and Uniqueness at Its Best: Vegetation of the Chihuahuan Desert in Plant Diversity and Ecology in the Chihuahuan Desert. (pp.1-17) Springer Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-44963-6_1
- Zhang Z, Chen Z, Zhang S, Shao X, Zhou Z. (2020). Antibacterial activity of the structurally novel ocotillo-type lactone and its analogues. *Fitoterapia*. 144:104597. <http://doi.org/10.1016/j.fitote.2020.104597>
- Zhou Z, Ma C, Zhang H, Bi Yi., Chen X., Tian H., Xie X., Meng Q., Lewis P.J., Xu J. (2013). Synthesis and biological evaluation of novel ocotillo-type triterpenoid derivatives as antibacterial agents. *European Journal of Medical Chemistry*. 68:444–453. <http://doi.org/10.1016/j.ejmech.2013.07.041>

2021 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Artículo de Revisión

Almidón de camote: Modificaciones enzimáticas, físicas y químicas: Una revisión

Sweet potato starch: Enzymatic, physical and chemical modifications:
A review

Luz Araceli Ochoa-Martínez¹, Héctor Alejandro Luna-Solís¹, Gabriela Bermúdez-Quiñones¹

¹Tecnológico Nacional de México/I T de Durango. Felipe Pescador 1830 Ote., 34080 Durango, Dgo., México

*Correspondencia: aochoa@itdurango.edu.mx (Luz Araceli Ochoa-Martínez)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v15i3.854>

Recibido: 23 de septiembre de 2021; Aceptado: 24 de noviembre de 2021

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Resumen

El almidón es el principal carbohidrato de reserva en productos vegetales y es ampliamente utilizado en la industria alimentaria. El camote (*Ipomea batatas* L.) es una fuente importante de almidón, ya que forma parte de su composición química en el rango de 50 - 80%. Sin embargo, en su forma nativa carece de propiedades que lo conviertan en un material adecuado para aplicaciones en productos alimenticios. Por esto, con la finalidad de subsanar tal desventaja se recurre a procesos de modificación que permitan cambiar sus propiedades fisicoquímicas como la cristalinidad, viscosidad, tamaño de gránulo, temperatura de gelatinización, retrogradación, solubilidad, poder de hinchamiento, absorción de aceite, propiedades reológicas y de empastado. Las modificaciones del almidón se centran en tres tipos de métodos: los enzimáticos (altamente eficientes), los físicos (diversos y económicos) y los químicos (selectivos). Cada vez resulta de mayor interés probar métodos de modificación en nuevas fuentes de almidón y debido a la alta producción de camote a nivel mundial, es importante mostrar los contrastes de los diferentes métodos utilizados. Por lo tanto, el objetivo de esta revisión es mostrar los estudios realizados para la modificación de almidón de camote y su efecto sobre las propiedades fisicoquímicas.

Palabras clave: hidrólisis, gelatinización, propiedades funcionales, amilosa, microestructura

Abstract

Starch is the main carbohydrate reserve in vegetable products and is widely used by the food industry. Sweet potato (*Ipomea batatas* L.) is an important source of starch. It accounts for 50 to 80% of the dry matter. However, its native form lacks properties that make it an ideal material for applications in food products. In order to overcome such disadvantages, it is necessary to carry out modification processes to change its physicochemical properties such as crystallinity, viscosity, granule size, gelatinization temperature, retrogradation, solubility, swelling power, oil absorption,

and rheology and pasting properties. Modifications of sweet potato starch focus on three types of methods: enzymatic (highly efficient), physical (diverse and inexpensive) and chemical (selective). Nowadays, it is important to try modification methods in new sources of starch, and due to the high production of sweet potato worldwide, it is important to show the contrasts of the different methods used. Therefore, this review aims to show the studies carried out for enzymatic, physical and chemical modification of sweet potato starch and its effect on the physicochemical properties.

Keywords: hydrolysis, gelatinization, functional properties, amylose, microstructure

Introducción

El camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) es una planta de la familia *Convolvulaceae*, presenta raíces de almacenamiento, con hojas alternas en forma de lóbulos palmeados o corazón, son afiladas y largas. Las raíces tienen una cáscara de color beige, amarillo, naranja, marrón, morado o rojo y su pulpa es amarilla, blanca, naranja, morada, roja, rosa o violeta según el cultivar (Mu y Jaspreet, 2019). La producción anual mundial de camote en 2019 fue de 91.8 millones de toneladas métricas (FAOSTAT, 2020), es cultivado principalmente en China, Nigeria y Estados Unidos.

Actualmente el aprovechamiento del camote está enfocado a la obtención de almidón, ya que es el componente principal (50 - 80%) de la materia seca (Ziska *et al.*, 2009; Trancoso-Reyes *et al.*, 2016). El almidón tiene un papel muy importante en la nutrición y suministro de energía metabólica para los seres humanos (Huang *et al.*, 2016). Estructuralmente es un carbohidrato de alto peso molecular que se compone principalmente de dos tipos de polímeros, amilosa (13.3 – 26.8 %) y amilopectina (73.2 - 86.7 %) (Abegunde *et al.*, 2013). La estructura de la amilosa consiste en una cadena polimérica lineal formada por monómeros de α -D-glucosa, unidas por enlaces α -(1- 4), con un grado de polimerización (DP) de 500 – 600 residuos de glucosa. La amilopectina es una estructura ramificada formada por unidades α -D-glucosa unidas con enlaces α -(1- 4) y α -(1- 6), con un grado de polimerización en el rango de 3×10^5 – 3×10^6 . La proporción de estos componentes en el almidón contribuyen sustancialmente a la definición de sus propiedades funcionales.

De acuerdo al ensamblaje de la amilosa y amilopectina, la estructura de agregación del almidón se puede dividir en la estructura granular, los anillos de crecimiento, la estructura laminar, las estructuras cristalina y helicoidal (Wang *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019). Los gránulos de almidón de camote son parcialmente ovalados y con forma de campana. El tamaño de partícula oscila en el rango de 3.4 a 27.5 μm , y de manera general, el tamaño medio se encuentra de 8.4 a 15.6 μm (Mu *et al.*, 2017), esto influye en el poder de hinchamiento, la solubilidad y la digestibilidad (Martínez, *et al.*, 2019). Igualmente, la funcionalidad del almidón se ve afectada por las propiedades de empastado, en cuya curva de viscosidad se observa el comportamiento durante el calentamiento, lo que permite establecer las características de la pasta formada y que finalmente definirá la utilización adecuada en un producto alimenticio o en otro tipo de producto. Algunas propiedades fisicoquímicas del almidón otorgan características favorables para su utilización en la industria alimentaria, en el desarrollo de productos alimenticios como materia prima, espesante, aditivo, estabilizador o intensificador de textura (Aina *et al.*, 2012), en gelatinas, fideos, envoltorios de alimentos, etc.

El almidón de camote con pureza por debajo del 100 %, contiene fracciones ricas en antioxidantes,

fibra dietética, minerales y vitaminas en contraste con el almidón de papa (Issa *et al.*, 2018). En comparación con almidones de trigo y maíz, el almidón de camote tiene un alto contenido de amilopectina, así como una alta transparencia después de la gelatinización (Chen *et al.*, 2003). Sin embargo, características inherentes del almidón de camote, tales como escaso grado de hinchamiento y solubilidad, alta viscosidad de la pasta y tendencia a la retrogradación, reducen significativamente su utilización. Por ejemplo, la alta viscosidad de la pasta de almidón de camote provoca dureza y poca transparencia de los productos a base de este almidón, afectando considerablemente la aceptabilidad para los consumidores (Wang *et al.*, 2020). La estructura del almidón dicta sus propiedades fisicoquímicas y tecnológicas asociadas, lo cual determina su aplicación y los atributos de calidad de productos generados. La modificación de las estructuras de agregación del almidón, se realiza con el fin de alterar sus propiedades fisicoquímicas para ampliar la potencial aplicación del mismo. En esta revisión, se resumen nuevos hallazgos y el progreso reciente sobre los diferentes tipos de modificación del almidón de camote.

2. Modificación enzimática

La modificación enzimática es un método ecológico, ya que posee una especificidad de producto y selectividad de sustrato, con la generación de menos subproductos dañinos. Investigaciones previas han indicado que la hidrólisis enzimática de los gránulos de almidón está influenciada principalmente por la estructura superficial, la distribución del tamaño de las partículas, la porosidad y la distribución de la longitud de la cadena ramificada de la amilopectina (Singh y Kaur, 2004). También se ha comprobado que el comportamiento funcional de los almidones se relaciona directamente con la longitud de las cadenas de amilopectina (Hizukuri, 1985; Vermeyley *et al.*, 2004; Zhu *et al.*, 2011).

Debido a que la amilosa solo contiene un extremo no reductor para la acción de la enzima, un alto contenido de amilosa hace que el almidón no se hidrolice fácilmente. En cambio, la amilopectina tiene varios extremos no reductores que son más susceptibles a la hidrólisis enzimática y la cantidad de extremos no reductores depende de la longitud de la cadena ramificada y el grado de ramificación (Naguleswaran *et al.*, 2014). Por lo tanto, el incremento del grado de ramificación y el número de cadenas laterales cortas de amilopectina, así como la reducción del contenido de amilosa incrementan el número de sitios de acceso para las reacciones de la amilasa.

Una alta cantidad de cadenas de amilopectina de ramificación corta favorece el grado de digestión del almidón y la capacidad de hinchamiento, pero disminuye el grado de cristalinidad y la temperatura de gelatinización (Li *et al.*, 2016). Los almidones con alta densidad de ramificaciones disminuyen la viscosidad máxima y el valor de retrogradación de la pasta de almidón. Por tanto, la modificación de la amilopectina podría ser una forma posible de mejorar las propiedades fisicoquímicas del almidón de camote y de ampliar su utilidad en productos alimenticios para que se cumpla con las características organolépticas que demanda el consumidor en un alimento.

Shariffa *et al.* (2017) estudiaron capacidades de la enzima STARGEN 001 (mezcla de glucoamilasa y α -amilasa fúngicas) a temperatura de 35 °C durante 24 h, para hidrolizar almidón de camote recocado y nativo. Después de 24 h de hidrólisis, el almidón nativo exhibió un grado de hidrólisis más bajo que el almidón recocado, 24 % y 29 % respectivamente. Esto se debe principalmente a la ruptura de los enlaces de hidrógeno entre las regiones cristalina y amorfa, así como un sutil aumento de la región amorfa después del recocado. La ruptura de los enlaces de hidrógeno debilita la estructura de

los gránulos, permitiendo la penetración de la enzima y la degradación de los enlaces α -1,6 y α -1,4 de manera más selectiva en comparación con el almidón nativo. Se observaron tanto en gránulos de almidón nativo y recocado superficies extensamente erosionadas (Figura 1) lo que supone incidencia de las enzimas a través de los poros o fisuras que se han expandido por el tratamiento de recocado. Aunque la modificación enzimática es un método adecuado, el costo de la utilización de enzimas sigue siendo alto por lo cual son pocas las investigaciones recientes que emplean este tipo de modificación. En la Tabla 1 se presenta una lista de las enzimas empleadas en la modificación de almidón de camote, así como los resultados obtenidos.

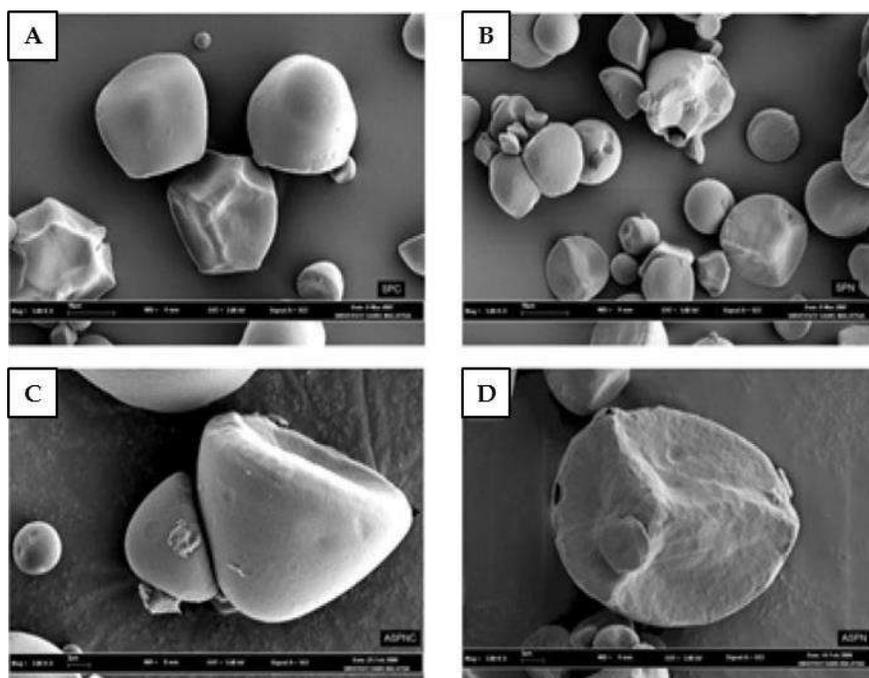


Fig. 1. Microfotografías electrónicas de barrido (SEM). (A) control de almidón de camote nativo, (B) almidón de camote nativo hidrolizado, (C) control de almidón de camote recocado, (D) almidón de camote recocado hidrolizado. **Fuente:** (Shariffa *et al.* 2017)

Fig. 1. Scanning electron micrographs (SEM). (A) native sweet potato starch control, (B) hydrolyzed native sweet potato starch, (C) overcooked sweet potato starch control, (D) hydrolyzed overcooked. **Source:** (Shariffa *et al.* 2017)

3. Modificación física

Recientemente, existe un interés creciente por la modificación física, debido a que los métodos son seguros, simples y de bajo costo para modificar el almidón. Entre los métodos físicos más empleados se encuentra la pregelatinización, ultrasonificación, extrusión, calor-humedad, secado por aspersión, alta presión hidrostática, recocado repetido y continuo. La pregelatinización consiste en precocinar, secar y moler el almidón; mejorando el poder de hinchamiento y la unión del almidón con el agua (Liu *et al.*, 2017).

Tabla 1. Enzimas empleadas en la modificación de almidón de camote.**Table 1.** Enzymes used in the modification of sweet potato starch

Enzima	Resultado	Referencia
α -amilasa y glucoamilasa	Grado de hidrólisis para almidón de camote recocido de 29%. La solubilidad y el poder de hinchamiento de los almidones recocidos disminuyeron significativamente después de la hidrólisis. El contenido de amilosa en almidón de camote hidrolizado aumentó.	(Shariffa <i>et al.</i> , 2017)
β -amilasa y transglucosidasa	Mayor grado de ramificación de amilopectina. Después de la modificación enzimática el pico endotérmico del almidón de camote desapareció. Aumento de la solubilidad en comparación con el almidón de camote nativo.	(Guo, 2018)
Glucoamilasa, α -amilasa y glicosiltransferasa	Aumento del tamaño de los poros y la cristalinidad relativa del almidón de camote, beneficiando la adsorción. Aumento del grado de ramificación de amilopectina.	(Guo <i>et al.</i> , 2019)
Transglucosidasa, β -amilasa y α -amilasa maltogénica	Aumento de las proporciones de cadena corta (Grado de polimerización ≤ 24) y la relación de enlace glicosídico α -1, 6 y. La solubilidad aumentó con la disminución de la viscosidad, la temperatura de gelatinización y la entalpía de fusión.	(Guo <i>et al.</i> , 2019)
α -amilasa	Disminución del orden molecular de rango corto, ΔH , la cristalinidad relativa y aumento del poder de hinchamiento y viscosidad máxima.	(Wang <i>et al.</i> , 2020)

En almidón de camote se ha optimizado el tiempo y temperatura de pregelatinización, determinándose 15 min y 59.5 °C como las condiciones adecuadas para obtener mejores características en solubilidad, poder de hinchamiento y capacidad de retención de agua (Tam *et al.*, 2021).

La modificación por ultrasonificación puede afectar o degradar las cadenas de almidón a nivel molecular. Se ha demostrado que este tipo de modificación puede disminuir la gelatinización, la viscosidad de empastado, el poder de hinchamiento y la retrogradación, pero aumenta la solubilidad

en agua (Bemiller y Huber, 2015). Lo anterior depende de factores como la intensidad, la frecuencia, el agua y la temperatura del sistema de almidón-agua, el tipo y estructura del almidón, el tiempo de ultrasonificación y composición del gas en la atmósfera. Wang *et al.* (2020) modificaron almidón de camote empleando ultrasonificación, a una potencia de 300 W, con diferentes tiempos de sonicación (30, 25, 20 y 15 min), encontrando grietas y poros en la superficie del almidón, evidencia de desorganizaciones estructurales al aumentar el tiempo, especialmente para órdenes moleculares de corto alcance para los grados de cristalinidad y estructuras moleculares ordenadas. Lo que produjo no solo un aumento en la solubilidad y el poder de hinchamiento, sino que también disminuyó la viscosidad máxima, la viscosidad final y la temperatura de empastado.

La alta presión hidrostática (APH) es una técnica de modificación física no térmica, la cual emplea presiones de 100-1000 MPa para extender la vida útil de productos alimenticios procesados y frescos, minimizando el impacto en sus valores nutricionales y sus atributos sensoriales (Liu *et al.*, 2017). El tratamiento con APH ha atraído gran atención en la modificación del almidón debido a que no requiere de reactivos químicos y el proceso se controla fácilmente (Zhang *et al.*, 2019).

Se han llevado a cabo investigaciones sobre la modificación de almidón de camote utilizando APH. Rahman *et al.* (2020), aplicaron 100, 300 y 500 MPa durante 15 y 30 min a 25 °C. Se observó incremento significativo de amilosa del 16.7% a un valor máximo de 17.7 % cuando se utilizó un tratamiento de 500 MPa por 15 min., lo cual podría estar asociado a la limitación de la lixiviación de amilosa al afectar la interacción amilosa-amilopectina y con la degradación de amilopectina inducida por APH. En comparación con el almidón nativo, el contenido de almidón dañado en camote aumentó significativamente al incrementar la presión a 500 MPa durante 30 min, obteniéndose un valor de 7 %, esto concuerda con lo reportado por (Zhang *et al.*, 2019) para almidón dañado de papa tratado a 500 MPa.

El secado por aspersión es un proceso de secado rápido, que convierte suspensiones líquidas en partículas semicristalinas o amorfas. Al disminuir o eliminar la fracción cristalina del almidón, se pueden observar cambios significativos en el poder de hinchamiento, la distribución del tamaño medio de los gránulos, cristalinidad y temperatura de gelatinización principalmente. Por su parte la extrusión puede provocar la pérdida de la integridad y cristalinidad de los gránulos de almidón, la despolimerización de los componentes del almidón y producir almidón gelatinizado. El proceso puede resultar en una ruptura estructural derivada de la pérdida de enlaces covalentes en el almidón y modificación de las propiedades funcionales del mismo (Rodrigues, *et al.*, 2018). Estos autores compararon las propiedades fisicoquímicas del almidón de camote modificado por aspersión y extrusión. El proceso de secado por aspersión se llevó a cabo utilizando un secador por aspersión con orificio de boquilla de 0.70 mm, temperatura de entrada de 130 °C y de salida de 105 °C y un caudal de alimentación 0.5 L h⁻¹. En cuanto al proceso de extrusión se utilizaron 20-25 °C, 40-45 °C y 70-75 °C, para los tres ciclos correspondientes, el diámetro del tornillo fue de 32.60 mm, la relación de compresión del tornillo 3:1 y la velocidad de alimentación 150 g/min. El almidón secado por aspersión mostró disminución en tamaño granular medio de 16.5 µm a 14.1 µm, así como una disminución en el peso molecular de la amilopectina de 3.1 a 2.7 X 10⁸ g/mol. El porcentaje de cristalinidad disminuyó de 25.3 % a 22.6 %, por lo tanto, el almidón obtenido se puede emplear para hacer productos más viscosos. En contraste, el almidón extrudido mostró una reducción significativa en el peso molecular de la amilopectina a 0.4 X 10⁸ g/mol, lo que manifiesta la gelatinización completa de los gránulos y una pérdida total de cristalinidad. En este caso, el almidón es ideal para productos que requieren una baja viscosidad final y rápida solubilidad. Ambos métodos producen almidón de

camote modificado con características particulares que se pueden utilizar potencialmente para diferentes aplicaciones.

El recocado es un método que expone los gránulos de almidón a un contenido de humedad del 40 % al 60 % (p/p) a una temperatura superior a la temperatura de transición vítrea, pero inferior a la de inicio de gelatinización en un período de tiempo. Se han investigado los efectos del tratamiento de recocado continuo (RECC) y tratamiento de recocado repetido (RECR) en el almidón de camote. En una investigación realizada por Zhang *et al.* (2019) se prepararon 25 g (base seca) de almidón de camote mezclado con 75 ml de agua destilada en frascos de boca de seda. Éstos se sellaron y se incubaron a 65 °C durante 12 horas y posteriormente se dejaron durante 30 min a temperatura ambiente. El procedimiento anterior se repitió 8 veces en un lapso de 96 horas. Se encontró que el poder de hinchamiento, la solubilidad, la viscosidad máxima y de rompimiento de los almidones disminuyeron. En contraste, las temperaturas de gelatinización, la viscosidad mínima, la viscosidad final, la de retroceso y las temperaturas de empastado de los almidones aumentaron después de los tratamientos de recocado. El RECR fue más efectivo en la modificación de la cristalinidad, solubilidad, empastado, poder de hinchamiento, temperaturas de transición de gelatinización y entalpía, y digestibilidad del almidón en comparación con el tratamiento RECC. Se concluye que el RECR puede ser un método con potencial para usarse en la modificación de las propiedades estructurales, fisicoquímicas y de digestibilidad del almidón.

El método de calor y humedad es un proceso hidrotérmico que involucra altas temperaturas de 80 °C a 140 °C a niveles bajos de humedad, con agitación de gránulos y bajas temperaturas de gelatinización. Cabe resaltar que éste es el método de modificación física más empleado por sus bajos costos y su seguridad. En la Tabla 2, se muestran investigaciones realizadas sobre las condiciones de operación de calor y humedad en la modificación de almidón de camote y los resultados obtenidos.

4. Modificación química

La modificación química está directamente relacionada con las reacciones de los grupos hidroxilo y su hidrólisis, o la introducción de grupos funcionales específicos en la molécula polimérica del gránulo de almidón nativo y así producir cambios en las propiedades como la gelatinización y retrogradación. Se han llevado a cabo modificaciones en almidón de camote a través de hidrólisis utilizando ácido clorhídrico al 6 % p/p durante 48 h, con el objetivo de emplear el almidón modificado como desintegrante en formulaciones de comprimidos de paracetamol (Akin-Ajani et al., 2016). Los comprimidos que contenían almidón modificado mostraron tiempos de desintegración más prolongados en comparación con el almidón nativo y almidón de maíz, por lo tanto, podría ser útil para formulaciones comerciales de comprimidos. Kwon et al. (2019), investigaron las propiedades fisicoquímicas del almidón de camote tratado con ácido málico. Se revelaron cambios importantes en la estructura interna del almidón sin perder su forma granular, ni la formación de enlaces éster entre el almidón y el ácido málico.

No se mostró la propiedad de empastado de los almidones modificados debido al daño provocado por la reticulación del ácido málico. El ácido peracético recientemente se ha utilizado para la modificación de camote, en este sentido, Minh (2021), demostró que una relación de suspensión de

Tabla 2. Condiciones de operación de calor y humedad en la modificación de almidón de camote.**Table 2.** Operating conditions of heat and humidity in the modification of sweet potato starch .

Condiciones de operación	Resultado	Referencia
Humedad: 15, 20, 25, 30 y 35 % Temperatura: 110 °C durante 12 h y posteriormente 45 °C durante 24 h, hasta 10 % de humedad	Disminución del poder de hinchamiento. El contenido de amilosa disminuyó del 24.1 % al 20.5 %, aumentando el contenido de humedad inicial del 15 % al 35 %. Aumento de la temperatura de empastado de 73 a 81 °C. Reducción de la tasa de retrogradación del almidón.	(Li <i>et al.</i> , 2017)
Humedad: 35 % Temperatura: 100 °C durante 6 h y posteriormente 40 °C durante 24 h, hasta 9-10 % de humedad	Reducción de la viscosidad máxima, la retrogradación y descomposición. Aumento de las viscosidades mínimas y finales, así como de la temperatura de empastado.	(Thanh <i>et al.</i> , 2017)
Humedad: 10, 15 y 20% Temperatura: 121 °C durante 1 h y posteriormente 40 °C durante 24 h, hasta humedad constante	Disminución del poder de hinchamiento, aumento de la estabilidad térmica y disminución de la cristalinidad relativa. Disminución del tamaño medio, aumento de la rugosidad y aglutinación de los gránulos.	(Soltovski <i>et al.</i> , 2018)
Humedad: 26, 30 y 34 % Temperatura: 105 °C durante 1 h y posteriormente almacenamiento a 4 °C	Aumento de la cristalinidad, tendencia a la retrogradación. Comportamiento elástico y lixiviación de amilosa.	(Liao <i>et al.</i> , 2019)
Humedad: 20, 25 y 30 % Temperatura: 90, 110 y 130 °C durante 2, 9 y 16 h Posteriormente 113 °C durante 8 h 35 min hasta 10 % de humedad	Presencia de grietas y poros, con mayor degradación granular. Aumento de la cristalinidad. Mayor temperatura de gelatinización	(Na <i>et al.</i> , 2020)

almidón 1:12 p/p y una concentración de 6 ppm, proporcionaron mayor solubilidad (2.7 %), poder de hinchamiento (57.3 %), y viscosidad máxima (6264 cP). Por lo tanto, este ácido demostró ser un eficaz agente oxidante en la modificación del almidón de camote.

Dentro de las modificaciones químicas, la utilización de anhídrido octenil succínico (OSA) para obtener un almidón esterificado, concede un excelente carácter anfifílico y propiedades interfaciales (Altuna *et al.*, 2018). Esto favorece la aplicación como espesante, emulsionante y estabilizador en la industria alimentaria. En la Tabla 3 se muestra las condiciones de octenilsuccinilación de almidón de camote y los resultados obtenidos.

Tabla 3. Condiciones de octenilsuccinilación de almidón de camote.

Table 3. Conditions of octenylsuccinylation of sweet potato starch.

Condiciones de octenilsuccinilación	Resultado	Referencia
Suspensión en agua destilada (30 % p/p) con agitación y pH 8.5 Adición de OSA (2, 4, 6, 8 y 10 %) Temperatura 35 °C durante 3 h con agitación.	Aumento del poder de hinchamiento. Disminución de la temperatura de gelatinización y degradación del gránulo.	(Lv <i>et al.</i> , 2018)
Suspensión en agua destilada (30 % p/p) con agitación y pH 8.5 Adición de OSA (3, 5 y 10 %) Temperatura 37 °C durante 5 h con agitación.	Aumento del poder de hinchamiento y de las temperaturas de gelatinización. Disminución de la sinéresis y la viscosidad de retroceso. Retención de la estructura granular.	(Remya <i>et al.</i> , 2018)
Suspensión en agua destilada (40 % p/p) con agitación y pH 8 Adición de OSA (3 %) Temperatura 45 °C durante 48 h	Disminución de cristalinidad. Degradación del gránulo y disminución de la temperatura de empastado.	(Zhang <i>et al.</i> , 2020)
Suspensión en agua destilada (35 % p/p) con agitación y pH 8.5 Adición de OSA (3 %) Temperatura 45 °C durante 24 h	Retención de la estructura granular. Mayor viscosidad y estabilidad Menor temperatura de gelatinización.	(Guo <i>et al.</i> , 2020)

5. Conclusiones

La modificación del almidón de camote al igual que otro tipo de almidones nativos, es necesaria para mejorar la viscosidad, la solubilidad y evitar la retrogradación o la pérdida de la estructura ordenada, lo cual proporciona un amplio valor tecnológico. La modificación enzimática presenta un

auge, debido a que es un método altamente eficiente y ecológico, pero de costos elevados. La modificación física por su parte, es la más empleada actualmente debido a la diversidad de métodos existentes los cuales son económicos y con mínimo impacto al medio ambiente. Otra característica interesante de estos métodos es la facilidad de acoplamiento con modificaciones químicas o enzimáticas. En el caso de la modificación química que hasta hace algunos años había perdido interés a causa de la generación de contaminantes; se está retomando gracias a la esterificación con anhídrido octenil succínico, sustancia que se considera segura y viable. Al comparar las distintas modificaciones para almidón de camote se puede inferir que la modificación física es la más utilizada por las ventajas antes mencionadas. Se espera que en los próximos años continúen creciendo exponencialmente las investigaciones relacionadas con la modificación del almidón de camote.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés con respecto al trabajo presentado en este reporte.

Referencias

- Abegunde, O. K., Mu, T., Chen, J., & Deng, F. (2013). Food Hydrocolloids Physicochemical characterization of sweet potato starches popularly used in Chinese starch industry. *Food Hydrocolloids*, 33(2), 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.03.005>
- Aina, A. J., Falade, K. O., Akingbala, J. O., Titus, P., & Titus, P. (2012). Physicochemical Properties of Caribbean Sweet Potato (*Ipomoea batatas* (L) Lam) Starches. *Food Bioprocess Technol*, 5, 576–583. <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0316-6>
- Akin-Ajani, O. D., Itiola, O. A., & Odeku, O. A. (2016). Evaluation of the disintegrant properties of native and modified forms of fonio and sweet potato starches. *Starch*, 68, 169–174. <https://doi.org/10.1002/star.201500188>
- Altuna, L., Herrera, M.L., & Foresti, M.L. (2018). Food Hydrocolloids Synthesis and characterization of octenyl succinic anhydride modified starches for food applications. A review of recent literature. *Food Hydrocolloids*, 80, 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.032>
- Bemiller, J. N., & Huber, K. C. (2015). Physical modification of food starch functionalities. *Annual Review of Food Science and Technology*, 6, 19–69. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022814-015552>
- FAOSTAT. (2020). Sweet potato. Retrieved on August 10, 2020, from FAO Website: www.fao.org/faostat/en/#data/QC
- Chen, Z., Schols, H.A., & Voragen, A.G.J. (2003). Physicochemical Properties of Starches Obtained from Three Varieties of Chinese Sweet Potatoes. *Food Chemistry and Toxicology Physicochemical*, 68(2), 431–437. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb05690.x>
- Guo, L. (2018). Sweet potato starch modified by branching enzyme, β -amylase and transglucosidase. *Food Hydrocolloids*, 83, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.05.005>
- Guo, L., Li, H., Zhu, Y., & Cui, B. (2019). The structure property and adsorption capacity of new enzyme-treated potato and sweet potato starches. *International Journal of Biological Macromolecules*, 1(144), 863–873. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.164>

- Guo, L., Tao, H., Cui, B., & Janaswamy, S. (2019). The effects of sequential enzyme modifications on structural and physicochemical properties of sweet potato starch granules. *Food Chemistry*, 277, 504–514. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.014>
- Guo, J., Tang, W., Quek, S. Y., Liu, Z., & Lu, S. (2020). Evaluation of structural and physicochemical properties of octenyl succinic anhydride modified sweet potato starch with different degrees of substitution. *Journal of Food Science*, 85, 666–672. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15031>
- Hizukuri, S. (1985). Relationship between length of the chain length of amylopectin and the crystalline structure of starch granules. *Carbohydrate Research*, 141, 141, 295–306. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(00\)90461-0](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)90461-0)
- Huang, T., Zhou, D., Jin, Z., Xu, X., & Chen, H. (2016). Food Hydrocolloids Effect of repeated heat-moisture treatments on digestibility, physicochemical and structural properties of sweet potato starch. *Food Hydrocolloids*, 54, 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.10.002>
- Issa, A. T., Schimmel, K. A., Worku, M., Shahbazi, A., Ibrahim, S. A., & Tahergorabi, R. (2018). Sweet Potato Starch-Based Nanocomposites: Development, Characterization, and Biodegradability. *Starch*, 70, 1700273. <https://doi.org/10.1002/star.201700273>
- Kwon, C., Kim, H. R., Moon, T. W., Lee, S. H., & Lee, C. J. (2019). Structural and Physicochemical Characteristics of Granular Malic Acid-Treated Sweet Potato Starch Containing Heat-Stable Resistant Starch. *Journal of Chemistry*, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2019/2903252>
- Li, W., Li, C., Gu, Z., Qiu, Y., Cheng, L., & Hong, Y. (2016). Relationship between structure and retrogradation properties of corn starch treated with 1,4- α -glucan branching enzyme. *Food Hydrocolloids*, 52, 868–875. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.09.009>
- Li, Y., Liu, S., Liu, X., Tang, X., & Zhang, J. (2017). The Impact of Heat-Moisture Treatment on Physicochemical Properties and Retrogradation Behavior of Sweet Potato Starch. *International Journal Of Food Engineering*, 20170001. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0001>
- Li, N., Cai, Z., Guo, Y., Xu, T., Qiao, D., Zhang, B., Zhao, S., Huang, Q., Niu, M., Jia, C., Lin, L., & Lin, Q. (2019). Hierarchical structure and slowly digestible features of rice starch following microwave cooking with storage. *Food Chemistry*, 295, 475–483. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.151>
- Liao, L., Liu, H., Gan, Z., & Wu, W. (2019). Structural properties of sweet potato starch and its vermicelli quality as affected by heat-moisture treatment. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 1122–1133. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1626418>
- Liu, Y., Chen, J., Luo, S., Li, C., Ye, J., Liu, C., & Gilbert, R. G. (2017). Physicochemical and structural properties of pregelatinized starch prepared by improved extrusion cooking technology. *Carbohydrate Polymers*, 175, 265–272. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.07.084>
- Lv, Q., Li, G., Xie, Q., Zhang, B., Li, X., Pan, Y., & Chen, H. (2018). Evaluation studies on the combined effect of hydrothermal treatment and octenyl succinylation on the physic-chemical, structural and digestibility characteristics of sweet potato starch. *Food Chemistry*, 256, 413–418. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.147>
- Martínez, P., Peña, F., Bello-Pérez, L.A., Nuñez-Santiago, C., Yee-Madeira, H., & Velezmoro, C. (2019). Physicochemical, functional and morphological characterization of starches isolated from three native potatoes of the Andean region. *Food Chemistry: X*, X 2 (2019) 100030. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2019.100030>
- Minh, N. P. (2021). Peracetic acid concentration and starch slurry ratio on functional properties of oxidized sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) starch. *Plant Science Today*, 8(1), 112–117. <https://dx.doi.org/10.14719/pst.2021.8.1.957>

- Mu, T., Sun, H. S., Zhang, M., & Wang, C. (2017). Sweet Potato Starch and its Series Products. In Sweet Potato Processing Technology (pp. 7–9). <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-812871-8.00001-5>
- Mu, T. & Jaspreet, S. (2019). Sweet potato: chemistry, processing, and nutrition—an introduction. In Sweet Potato: Chemistry, Processing, and Nutrition (pp. 1–2).
- Na, J. H., Kim, H. R., Kim, Y., Lee, J. S., Park, H. J., Moon, T. W., & Lee, C. J. (2020). Structural characteristics of low-digestible sweet potato starch prepared by heat-moisture treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 151, 1049–1057. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.146>
- Naguleswaran, S., Vasanthan, T., Hoover, R., & Bressler, D. (2014). Food Hydrocolloids Amylolysis of amylopectin and amylose isolated from wheat, triticale, corn and barley starches. *Food Hydrocolloids*, 35, 686–693. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.08.018>
- Rahman, M. H., Mu, T. H., Zhang, M., Ma, M. M., & Sun, H. N. (2020). Comparative study of the effects of high hydrostatic pressure on physicochemical, thermal, and structural properties of maize, potato, and sweet potato starches. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(11), 1–11. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14852>
- Remya, R., Jyothi, A. N., & Sreekumar, J. (2018). Morphological, structural and digestibility properties of RS4 enriched octenyl succinylated sweet potato, banana and lentil starches. *Food Hydrocolloids*, 82, 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.04.009>
- Rodrigues, T. P., Landi, C. M., do Carmo, E., Jane, J. lin, & Leonel, M. (2019). Effect of spray-drying and extrusion on physicochemical characteristics of sweet potato starch. *Journal of Food Science and Technology*, 56(1), 376–383. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3498-y>
- Shariffa, Y. N., Uthumporn, U., Karim, A. A., & Zaibunnisa, A. H. (2017). Hydrolysis of native and annealed tapioca and sweet potato starches at sub-gelatinization temperature using a mixture of amyolytic enzymes. *International Food Research Journal*, 24(5), 1925–1933. [http://ifrj.upm.edu.my/24%20\(05\)%202017/\(12\).pdf](http://ifrj.upm.edu.my/24%20(05)%202017/(12).pdf)
- Singh, N., & Kaur, L. (2004). Morphological, thermal, rheological and retrogradation properties of potato starch. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84, 1241–1252. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1746>
- Soltovski, C., Camila, D. O., Bet, D., Zabian, R., Bisinella, B., Henrique, L., Colman, D., & Schnitzler, E. (2018). Heat-moisture treatment (HMT) on blends from potato starch (PS) and sweet potato starch (SPS). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 133, 1491–1498. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7196-9>
- Thanh, P., Trung, B., Bui, L., Ngoc, B., Hoa, P. N., Ngoc, N., Tien, T., & Hung, P. Van. (2017). Impact of Heat-moisture and Annealing Treatments on Physicochemical Properties and Digestibility of Starches from Different Colored Sweet Potato Varieties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 105, 1071–1078. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.07.131>
- Trancoso-Reyes, N., Ochoa-Martínez, L. A., Bello-Pérez, L. A., Morales-Castro, J., Estévez-Santiago, R., & Olmedilla-Alonso, B. (2016). Effect of pre-treatment on physicochemical and structural properties, and the bioaccessibility of β -carotene in sweet potato flour. *Food Chemistry*, 200, 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.047>
- Ulfa, G. M., Putri, W. D. R., Fibrianto, K., & Widjanaarko, S. B. (2021). Optimization studies on pre-gelatinized sweet potato starch influenced by temperature and time. *Food Research*, 5(2), 25–30 [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(S2\).017](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(S2).017)
- Vermeulen, R., Goderis, B., Reynaers, H., & Delcour, J. A. (2004). Amylopectin molecular structure reflected in macromolecular organization of granular starch. *Biomacromolecules*, 5, 1775–1786. <https://doi.org/10.1021/bm049913z>

- Wang, H., Liu, Y., Chen, L., Li, X., Wang, J., & Xie, F. (2018). Insights into the multi-scale structure and digestibility of heat-moisture treated rice starch. *Food Chemistry*, 242, 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.014>
- Wang, H., Xu, K., Liang, Y., Zhang, H., Chen, L., Xu, K., Liang, Y., Zhang, H., & Chen, L. (2020). Impact of ultrasonication on the aggregation structure and physicochemical characteristics of sweet potato starch. *Ultrasonics Sonochemistry*, 63(104868). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104868>
- Wang, X., Hu, A., Zheng, J., Li, L., Li, L., & Li, Y. (2020). Physicochemical properties and structure of annealed sweet potato starch: effects of enzyme and ultrasound. *Starch*, 72, 1900247. <https://doi.org/10.1002/star.201900247>
- Zhang, B., Wu, H., Gou, M., Xu, M., Liu, Y., Jing, L., Zhao, K., & Jiang, H. (2019). The Comparison of Structural , Physicochemical , and Digestibility Properties of Repeatedly and Continuously Annealed Sweet Potato Starch. *Journal of Food Science*, 0(0), 1–9. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14711>
- Zhang, D., Mu, T., Sun, H., & He, J. (2019). Effects of different high hydrostatic pressure-treated potato starch on the processing performance of dough-like model systems. *Food Research International*, 120, 456–463. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.088>
- Zhang, Y., Chen, L., Yu, K., Dai, Y., Wang, L., Ding, X., Hou, H., & Wang, W. (2020). Mechanochemical effect of ultrasound on sweet potato starch and its influence mechanism on the quality of octenyl succinic anhydride modified starch. *Food Science and Technology International*, 26(3), 254–264. <https://doi.org/10.1177/1082013219883054>
- Zhu, F., Corke, H., & Bertoft, E. (2011). Amylopectin internal molecular structure in relation to physical properties of sweetpotato starch. *Carbohydrate Polymers*, 84(3), 907–918. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.039>
- Ziska, L. H., Runion, G. B., Tomecek, M., Prior, S. A., Torbet, H. A., & Sicher, R. (2009). An evaluation of cassava , sweet potato and field corn as potential carbohydrate sources for bioethanol production in Alabama and Maryland. *Biomass and Bioenergy*, 33(11), 1503–1508. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.07.014>

2021 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Artículo de Revisión

Producción de leche de cabra en México y uso de aceites esenciales de plantas aromáticas en su producción

Goat Milk Production in Mexico and Use of Essential Oils of Aromatic Plants on Production

Jocelyn Cyan López-Puga¹, Alondra Valadez-Pineda², Jorge R. Kawas², Sughey Ramona Sinagawa-García², Gustavo Sobrevilla-Hernández³, Sara Paola Hernández-Martínez³, Daniela Saraí Rico-Costilla¹, Gerardo Méndez-Zamora^{2*}

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Francisco Villa s/n, Ex-Hacienda El Canadá, CP. 66050. General Escobedo, Nuevo León, México

² Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía, Francisco Villa s/n, Ex-Hacienda El Canadá, CP. 66050. General Escobedo, Nuevo León, México

³ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas, Av. Universidad s/n, Cd. Universitaria, CP. 66451, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

*Correspondencia: gerardo.mendezm@uanl.edu.mx (Gerardo Méndez-Zamora)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v15i3.839>

Recibido: 16 de agosto de 2021; Aceptado: 25 de noviembre de 2021

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Resumen

La población de cabras resalta en los países en desarrollo. México es un país en desarrollo, donde la producción de leche de cabra crece. Sin embargo, nuevos retos y áreas de oportunidad continúan atendándose. Un desafío es la preferencia del consumidor hacia el uso de alternativas naturales en la producción animal y una de éstas son los aceites esenciales de plantas aromáticas. Los estudios comprueban que los aceites esenciales ejercen actividad antioxidante y antibacteriana selectiva en el rumen que mejora el comportamiento productivo y la composición de la leche. Aunque la información existente sobre su uso en cabras lecheras es limitada, el presente escrito recopila información sobre la producción de leche de cabra en México y el uso de los aceites esenciales de plantas aromáticas en dietas de cabras lecheras sobre la salud, producción y calidad de la leche.

Palabras clave: alternativa natural, calidad, consumidor, plantas aromáticas, rumen.

Abstract

Goat population is found in developing countries. Mexico is a developing country, where the goat milk production is growing. However, new challenges and opportunity areas continue attending it.

One challenge is consumer preference for natural alternatives in animal production. Essential oils from aromatic plants are an alternative. Studies have shown that essential oils of aromatic plants have a selective antioxidant and an antibacterial activity in the rumen, improving productive behavior and milk composition. Although existing information on use in dairy goats is limited, this review compiles information on goat milk production in México and essential oils from aromatic plants in dairy goat diets on health, production and milk quality.

Keywords: natural alternative, quality, consumer, aromatic plants, rumen

Introducción

La industria láctea caprina a nivel mundial está creciendo. Los factores decisivos en el aumento del consumo de la leche de cabra y productos derivados son los beneficios que ofrece sobre la salud humana (García *et al.*, 2014). Entre los beneficios destaca por ser menos alérgica que la leche de vaca (Park *et al.*, 2007) y es más digestible para el ser humano (Jandal, 1996). En el 2018 se produjeron 18,712.09 toneladas de leche de cabra en el mundo, donde México ocupó el lugar 24 (FAO, 2021). En este sentido, diversos sistemas de manejo y adición de ingredientes alternativos en las dietas de los animales han sido empleados, buscando mejorar la eficiencia y el rendimiento de la producción animal.

La inclusión de subproductos agroindustriales en las dietas de rumiantes puede ser de interés para reducir los costos de alimentación y disminuir el impacto ambiental asociado con la acumulación de subproductos (Vasta *et al.*, 2008; Arco-Pérez *et al.*, 2017). Recientemente, los subproductos de la industria han sido investigados sobre su impacto en la producción animal, así como en productos y subproductos de origen animal, principalmente de vacas lecheras; aunque en años recientes se ha extendido la investigación sobre su utilización en caprinos y ovinos. Algunos subproductos de la industria que han sido investigados en caprinos son los aceites vegetales, harinas, subproductos de frutas o verduras y aceites esenciales de plantas aromáticas. En la presente revisión se muestra información de la producción mundial y nacional de leche de cabra, así como el estudio de los aceites esenciales de plantas aromáticas en cabras y sus efectos sobre la salud animal, rendimiento productivo y calidad de la leche. El objetivo de la presente revisión es mostrar información útil que pueda generar nuevas hipótesis sobre la inclusión de compuestos naturales en raciones caprinas para mejorar la producción y calidad de la leche y en consecuencia los productos derivados.

Producción de leche de cabra Mundial y en México.

Producción Mundial

La población caprina se localiza en países en desarrollo, donde predominan los sistemas doble propósito o vaca-cría. Por otro lado, los países desarrollados han optado por una orientación especialmente lechera (Bidot-Fernández *et al.*, 2017). La producción mundial de leche de cabra de los años 2016, 2017 y 2018 se muestra en la Tabla 1 con un total de 18.15, 18.83 y 18.71 millones de toneladas de leche, respectivamente. Los primeros tres países productores son India, Sudán y Bangladesh con un total de 18.15, 18.83 y 18.71 millones de toneladas de leche, respectivamente. México ocupó el lugar 26 durante el año 2016 y 2017 con una producción de 160.0 y 162.0 mil toneladas de leche de cabra, y en el año 2018 ocupó el lugar 24 con producción de 163 mil toneladas.

Tabla 1. Producción mundial de leche de cabra del 2016 al 2018.**Table 1.** World production of goat milk from 2016 to 2018

Lugar	2016 País	Producción (miles ton)	Lugar	2017 País	Producción (miles ton)	Lugar	2018 País	Producción (mil ton)
1	India	5,752.39	1	India	6,165.50	1	India	6,098.73
2	Sudán	1,136.00	2	Sudán	1,143.00	2	Sudán	1,151.00
3	Bangladesh	1,066.87	3	Bangladesh	1,114.32	3	Bangladesh	1,122.65
4	Pakistán	867.00	4	Pakistán	891.00	4	Pakistán	915.00
5	Francia	628.44	5	Francia	648.90	5	Francia	652.33
26	México	160.22	26	México	162.32	24	México	163.65
	Otros	8,542.78		Otros	8,710.72		Otros	8,608.74
	Total	18,153.69		Total	18,835.76		Total	18,712.09

FAO, 2020.

La leche caprina contiene proteínas similares a las de leche de vacas Holstein; sin embargo, la leche caprina posee mayor contenido de grasa, permitiendo mayor rendimiento en queso (FAO, 2000). De acuerdo con la Tabla 2, Luxemburgo, Francia y Alemania representaron los primeros tres países productores en el año 2016 y 2017, mientras que en el 2018 correspondió a Bélgica (12.09 hg/An), Luxemburgo (11.00 hg/An) y Francia (7.35 hg/An). Numerosas variedades de quesos blandos y semiduros se elaboran particularmente con leche de cabra; Grecia y Francia tienen la mayor producción de queso de leche de cabra. Los quesos producidos en países europeos son considerados de excelente calidad (Pal *et al.*, 2011; Bhattarai, 2014), lo cual puede deberse a la calidad de la leche con la que son elaborados. México ocupó el lugar 33 durante el año 2016 y 2018 con un rendimiento 2.11 y 2.17 hg/An, mientras que en el año 2017 obtuvo el lugar 35 con 2.14 hg/An.

Tabla 2. Rendimiento mundial de leche de cabra del 2016 al 2018.**Table 2.** World yield of goat milk from 2016 to 2018

Lugar	2016 País ¹	Rendimiento (hg/An) ²	Lugar	2017 País	Rendimiento (hg/An)	Lugar	2018 País	Rendimiento (hg/An)
1	Luxemburgo	10.99	1	Luxemburgo	11.00	1	Bélgica	12.09
2	Francia	7.30	2	Francia	7.45	2	Luxemburgo	11.00
3	Alemania	7.19	3	Alemania	7.19	3	Francia	7.35
4	Países Bajos	7.18	4	Países Bajos	7.17	4	Alemania	7.18
5	Austria	6.57	5	Austria	6.59	5	Países Bajos	7.15
33	México	2.11	35	México	2.14	33	México	2.17
	Otros	165.50		Otros	168.30		Otros	166.12
	Total	206.84		Total	209.84		Total	213.06

²Hg/An: Hectogramo por animal (miles)

Fuente: FAO, 2020.

Producción de México

La producción de leche de cabra en México se localiza principalmente en zonas áridas y semiáridas del país (La Laguna, centro y El Bajío), y se produce cabrito como subproducto de esta

industria; además, la cabra aporta una fuente de ingresos en estas regiones y la producción de leche caprina y su transformación se ha incrementado (Escareño *et al.*, 2013). Como se muestra en la Tabla 3, los primeros tres estados productores son Coahuila, Guanajuato y Durango con un total de 163,650.0 miles de litros de leche en el 2019, donde el precio promedio por litro se estimó en \$5.51 y el total del valor de la producción en miles de pesos de 902,530.0. En el 2018, los primeros tres estados productores se representaron por Coahuila, Guanajuato y Durango, con un total de 161, 901.0 miles de litros de leche, promediando \$6.10 por litro, y \$987,347.0 el valor de la producción.

Por otro lado, datos oficiales de la FAO (2021) registraron una producción de 12,005,692 toneladas de leche fresca de vaca producida en México en 2018; sin embargo, debido a la alta demanda de leche en el país, fueron importadas 37,174.0 toneladas el mismo año, lo cual indica que es importante mejorar la producción en la industria lechera. La leche caprina puede servir como una fuerte alternativa a la leche bovina que complementa esta demanda. Sin embargo, es importante atender algunas áreas de oportunidad como el mejoramiento genético del hato, los sistemas de producción y mejorar la formulación de las dietas.

Tabla 3. Producción Mexicana de leche de cabra durante 2018 y 2019.

Table 3. Mexican production of goat milk during 2018 and 2019.

2018					2019				
Lugar	Estado	Producción (miles L)	Precio (\$/L)	Valor (miles \$)	Lugar	Estado	Producción (miles L)	Precio (\$/L)	Valor (miles \$)
1	Coahuila	45,065.22	6.01	270,821.86	1	Coahuila	44,956.73	5.26	236,280.14
2	Guanajuato	42,196.38	5.80	244,748.02	2	Guanajuato	43,766.86	5.20	227,454.91
3	Durango	25,180.58	6.09	153,264.78	3	Durango	25,687.50	5.31	136,400.33
4	Jalisco	9,015.30	6.26	56,391.06	4	Jalisco	8,767.49	5.87	51,501.91
5	Chihuahua	7,340.81	6.00	44,009.13	5	Chihuahua	7,220.68	5.62	40,574.60
	Otros	29,206.38	6.96	190,379.91		Otros	29,324.74	6.95	184,792.69
	Total	161,901.26	6.10	987,347.70		Total	163,650.43	5.51	902,530.93

Fuente: SIAP, 2020.

El rumen: enfoque de análisis en la síntesis de leche

El microbioma ruminal está conformado por bacterias (1010-1011 células/mL), arqueobacterias (107-109 células/mL), protozoarios (104-106 células/mL), hongos (103-106 células/mL) y bacteriófagos (109-1010 células/mL), poblaciones importantes en el desarrollo productivo del rumiante, ya que promueven las condiciones óptimas (factores químicos y físicos) para llevar a cabo la fermentación y metabolismo ruminal (Portela-Díaz, 2018).

La fermentación producida por las bacterias del rumen produce ácidos grasos volátiles (acético, propiónico y butírico), los cuales son absorbidos por las papilas ruminales y son importantes para el metabolismo en la producción de leche y carne, aunque también el metano es liberado durante este proceso (Klein, 2013). Por otro lado, el crecimiento y productividad del rumiante están en función de la alimentación y poblaciones bacterianas; por lo que las cantidades de poblaciones bacterianas y producción de gases pueden variar. En consecuencia, la fermentación ruminal puede ser controlada para alterar las poblaciones bacterianas con el fin de disminuir gases como el metano y producir cierto tipo de ácido graso volátil en mayor o menor cantidad, y por ende mejorar la producción láctea (Calabrò, 2015).

Antibióticos en la producción de leche y alternativas naturales

Durante años los ionóforos (antibióticos coccidiostáticos) han sido usados como aditivos en la dieta de rumiantes debido a que mejoran la relación de ácido propiónico: ácido acético y disminuyen la degradación de proteína en amoníaco (Russell and Strobel, 1989), previenen la acidosis y mejoran el metabolismo energético, la producción de leche y su composición (Duffield and Bagg, 2000). Sin embargo, el uso incontrolado de los antibióticos ha generado resistencia bacteriana de microorganismos patógenos que pueden poner en riesgo la salud humana (Wallace, 2004; Castanon, 2007; Martínez-Martínez *et al.*, 2015). Esta situación causó la prohibición de estos compuestos en la Unión Europea en el 2000 (Anadón *et al.*, 2018).

En consecuencia, los compuestos naturales y plantas medicinales han sido evaluados como alternativa a los ionóforos, entre ellos los aceites esenciales (AE) de plantas aromáticas; esto debido a que el microbioma ruminal es dinámico, por lo que las poblaciones de microorganismos se adaptan con facilidad al consumo de diferentes ingredientes de la dieta (Portela-Díaz, 2018). Los AE son metabolitos secundarios de plantas aromáticas con actividad antimicrobiana y antioxidante. Estos se consideran seguros para el consumo humano, lo cual ha propiciado su evaluación en la microbiota ruminal (Kim *et al.*, 2019). La adición de plantas aromáticas en las dietas de cabras u ovejas proporciona compuestos fenólicos que enriquecen los productos de leche y carne (Boutoial *et al.*, 2013). Adicionalmente, estas dietas suplementadas con compuestos aromáticos pueden beneficiar el comportamiento productivo de las cabras debido a la actividad antibacteriana selectiva e inhibir la degradación de proteínas en el rumen, lo que aumenta potencialmente el suministro intestinal de aminoácidos (Wallace, 2004; Chaves *et al.*, 2008). Ha sido descrito que la reformulación de las dietas para caprinos e incorporación de nuevos ingredientes de plantas aromáticas ofrecen resultados prometedores (García *et al.*, 2014). En la Tabla 4 se observa información de artículos en cabras lecheras donde se estudiaron los AE.

Tabla 4. Aceites esenciales investigados en dietas de cabras para la producción y calidad de leche.

Table 4. Essential oils studied in goat diets on production and quality of milk

Autor	Planta		Forma utilizada	Dosis	Tiempo de estudio	Resultados sobresalientes
	Nombre común	Nombre científico				
Paraskevakis (2015)	Orégano	<i>Origanum vulgare ssp. hirtum</i>	Hoja seca molida	30 g de hoja (equivalente a 1 mL de aceite/animal/día)	24 días	Mejóro el sistema antioxidante, redujo la producción de metano y estimuló la proteólisis
Paraskevakis (2017)	Orégano	<i>Origanum vulgare ssp. hirtum</i>	Hoja seca molida	20 g de orégano seco y molido (equivalente a 1 mL de aceite/animal/día)	69 días	Disminuyó las poblaciones de bacterias metanogénicas
Kholif <i>et al.</i> (2012)	Ajo; Canela; Jengibre	<i>Alilum sativum</i> ; <i>Cinnamomum cassia</i> ; <i>Zingiber officinale</i>	Aceite esencial	2 mL / animal / día	90 días	Aumentó la producción de leche (16.48%), proteína y sólidos no grasos e incrementó los CLA (ácido linoleico conjugado); Disminuyó el colesterol, aumentó la glucosa, proteína en suero

Boutoial et al. (2013)	Romero	<i>Rosmarinus officinalis</i> L.	Hoja seca	115 g y 230 g hoja seca/animal/día	7 meses	sanguíneo y producción láctea (23.74%). Aumentó la producción de leche (18.85%), el contenido de proteínas y sólidos no grasos Inclusión de 20% disminuyó el tiempo de coagulación de la leche y 10% aumentó los AGP (ácidos grasos poliinsaturados) Mejoró la digestibilidad nutricional y la producción láctea (15.11%); Mejoró la producción de leche (11.70%) y la digestibilidad de los nutrientes
Kholif et al. (2017)	Romero; Zacate de limón	<i>Rosmarinus officinalis</i> L.; <i>Cymbopogon citratus</i> (DC.) Stapf.	Hoja seca	10 g / animal /día	12 semanas	Aumentó la producción de leche (31.67% aceite esencial y 57.01% hoja seca), el contenido de grasa y mejoró el crecimiento de cabritos cuando las madres fueron alimentadas con hojas de romero
Smeti et al. (2014)	Romero	<i>Rosmarinus officinalis</i> L.	Hoja seca y aceite esencial	0.36g aceite esencial de romero/animal/día y 36 g de hojas de romero/animal/día	95 días	Aumentó enzimas importantes para el sistema antioxidante
Yesilbag et al. (2016)	Enebro	<i>Juniperus communis</i>	Aceite esencial	0.4, 0.8 y 2 ml/kg de aceite esencial de enebro esparcido	60 días	Aumentó la producción (6%), el rendimiento en leche y ácidos grasos insaturados
Kholif et al. (2018)	Moringa	<i>Moringa oleifera</i>	Extracto	10, 20 y 40 mL/cabra/día	7 días	

Aceites esenciales en la producción lechera caprina

Aceite esencial de orégano

El aceite esencial de orégano (AEO) se ha estudiado en la producción animal. Se puede obtener del orégano griego (*Origanum vulgare ssp. hirtum*) y orégano mexicano (*Lippia berlandieri* Schauer y *Poliomintha longiflora* Gray). El AEO contiene más de 30 compuestos, donde el carvacrol y timol constituyen del 78% al 82% de su composición, mismos que poseen propiedades antioxidantes y antimicrobianas (Bakry et al., 2015).

Paraskevakis (2015) evaluó la inclusión de 30 g de orégano griego molido (*Origanum vulgare ssp. hirtum*); equivalente a 1 mL de AEO por animal, en la dieta de cabras Alpinas en lactación. Estos autores encontraron que hubo aumento significativo del glutatión peroxidasa y reductasa en sangre y en leche, resaltando que mejoró el sistema antioxidante, minimizando el daño oxidativo durante el periodo de lactancia. Además, la suplementación de orégano griego seco con un perfil rico en carvacrol y bajo en timol redujo la población total de metanógenos, afectando la producción de metano en las cabras y estimuló la proteólisis, aumentando así la producción de amoníaco. En ovinos ha sido reportado que la inclusión en la dieta de AEO produce cambios en la fermentación ruminal, aumentando la producción de ácidos grasos volátiles (Chaves et al., 2008). Lo anterior sugiere que lo mismo ocurra en caprinos, aunque es necesaria más investigación en este tema. Por otro lado, Paraskevakis (2017) evaluó la adición a la dieta de 1 mL AEO/animal/día para evaluar cambios en la fermentación ruminal de cabras Alpinas adultas no lactantes. Encontró que el AEO aumentó la actividad de la proteasa y la concentración de amoníaco en el rumen; además, observó que

Peptostreptococcus anaerobius y *Clostridium sticklandii* eran los microorganismos más sensibles al AEO bajo las condiciones en su estudio. Así mismo, la población total de bacterias metanogénicas disminuyó, comprobando que la adición a la dieta de AEO puede suprimir microorganismos específicos del rumen, entre ellos bacterias metanogénicas.

La hoja triturada de orégano griego (*Origanum vulgare* ssp. *hirtum*) mejoró los valores de actividad antioxidante mediante la prueba FRAP en leche, por lo que Paraskevakis (2015) concluyó que, en el caso de hoja triturada, el consumo de orégano girego seco puede fortalecer el sistema antioxidante enzimático y no enzimático minimizando el daño oxidativo en la lactancia de las cabras. La actividad antioxidante se atribuyó a las propiedades de activación de enzimas antioxidantes y directamente a través de la eliminación de especies reactivas de oxígeno (ROS). Por otro lado, en vacas lecheras suplementadas con AEO, se demostró durante el análisis sensorial de la leche, que los evaluadores percibieron la leche proveniente de vacas suplementadas con aceite de orégano como leche más fresca (Lejonklev et al., 2016). Este hallazgo podría ser información útil para utilizarlo en cabras lecheras y así favorecer en el sabor de la leche proveniente de los caprinos.

Aceite esencial de Ajo

El aceite esencial de ajo (*Allium sativum*) se caracteriza por sus compuestos que contienen azufre como la aliína, sulfuros de dialilo y alicina, mismos que le confieren su efecto antibacteriano y reductor de metano (Amagase et al., 2001; Kholif et al., 2012). Kholif et al. (2012) adicionaron aceite de ajo (*Allium sativum*) en dosis de 2 mL/cabeza/día a la dieta de cabras Damasco lactantes durante 90 días; sus resultados mostraron que el aceite de ajo aumentó la producción de leche, el contenido de proteínas y sólidos no grasos; sin embargo, el porcentaje de grasa y el nitrógeno no proteico de la leche disminuyeron. El aceite de ajo incrementó ácidos grasos insaturados en la leche especialmente C18: 1n9c y ácidos linoleicos conjugados (CLA) (Kholif et al., 2012).

Aceite esencial de romero

El romero se adiciona en la dieta de los animales como fuente de polifenoles, entre ellos el rosmanol, genikwanina, carnosol, rosmadial, cafeico, rosmarínico y ácido carnósico (Cuvelier et al., 1996; Boutoial et al., 2013). Los autores han reportado que el aceite esencial de romero beneficia la producción de leche y favorece la producción de quesos maduros (Boutoial et al., 2013; Smeti et al., 2014). Kholif et al. (2017) evaluaron romero en dosis de 10 g/animal/día sobre el consumo de alimento, la producción de leche, la composición y el perfil de ácidos grasos en cabras lactantes de Damasco; esos autores concluyeron que la inclusión de romero mejoró la digestibilidad de los nutrientes, producción de leche y mejoró la fermentación ruminal sin afectar el pH.

Los efectos de la adición de hojas de romero o la inclusión de aceite esencial de romero sobre el rendimiento productivo de las cabras se investigaron por Smeti et al. (2014). Entre sus principales hallazgos en encuentra el incremento de la producción diaria de leche para los grupos de romero en comparación con la dieta control. El romero aumentó el contenido de grasa y proteína en leche; también evaluaron el crecimiento de los cabritos alimentados con leche proveniente de las madres suplementadas con los tratamientos, y se observó mayor crecimiento de los cabritos para el grupo de hojas de orégano respecto al grupo de aceite esencial de romero. Las dos formas de adicionar los compuestos a la dieta mostraron resultados favorables en comparación con la dieta control.

Boutoial et al. (2013) estudiaron la inclusión de un suplemento (50% hojas destiladas de *R. officinalis* spp. y 50% cebada) en 10 y 20% (115 y 230 g hoja seca de romero/animal/día) adicional a la dieta control de cabras Muriciano-Granadina en la composición fisicoquímica, el conteo de células somáticas de leche pasteurizada y queso Mucia Al Vino. El experimento se realizó desde el parto hasta los siete meses de lactación. La inclusión de 20% de romero en la dieta redujo el tiempo de

coagulación de la leche (3.68% a comparación del control), reduciéndolo hasta la materia seca y el contenido de lactosa, mientras que la adición del 10% de esta planta disminuyó el porcentaje de ácidos grasos C14:0 y aumentó el contenido de C18:2 y AGP (ácidos grasos poliinsaturados); por otro lado, la suplementación con 20% de romero disminuyó el contenido de ácidos grasos C10:0 y C14:0, y aumentó el porcentaje de ácidos grasos C17:0, C18:2 y AGP. También observaron que el 20% de inclusión de hojas de romero, hubo diferencia en proteína, pH y actividad del agua de los quesos. Finalmente, en los parámetros sensoriales, la adición del 10% de romero afectó el olor del queso Mucia Al Vino. Gillian *et al.* (2008) atribuyen un mayor contenido de ácidos grasos saturados a enfermedades cardiovasculares y obesidad, mientras que los ácidos grasos insaturados tienen un efecto positivo en la salud humana (Boutoial *et al.*, 2013).

Aceite esencial de zacate de limón

El limoncillo o zacate limón (*Cymbopogon citratus*) está compuesto por citral, que es esencial para la síntesis de vitamina A, y también ha llamado la atención por tener actividad selectiva ruminal, actividad antioxidante y anti-hiperproductora de amoníaco (Wanapat *et al.*, 2008; Kholif *et al.*, 2017). Además, el limoncillo ejerció un efecto en la utilización del alimento, la producción de leche, su composición y el perfil de ácidos grasos se mostró similar a los encontrados en la adición de romero en la ración (Kholif *et al.*, 2017).

Otros aceites esenciales

El aceite esencial de enebro se evaluó en 0.4 mL/kg, 0.8 mL/kg o 2 mL/kg sobre el crecimiento, parámetros de fermentación y población de protozoos en el rumen, enzimas antioxidantes de la sangre y el contenido fecal en cabritos Saanen en crecimiento por Yesilbag *et al.* (2016). En su estudio, determinaron que las enzimas más responsables de la neutralización de ROS en el sistema antioxidante (superóxido dismutasa), catalasa y actividades antioxidantes totales) aumentaron significativamente en los grupos experimentales con este aceite.

En un experimento realizado por Kholif *et al.* (2018) se evaluó la administración oral de extracto de hoja de *Moringa oleifera* a diferentes dosis y demostró que este extracto mejoró la producción de leche (6%), la composición y el perfil de ácidos grasos en cabras Nubias. Las dosis consistieron en 0, 10, 20 o 40 mL diarios del extracto. Se observaron mayores rendimientos de leche y contenido de energía bruta en leche, sólidos totales, sólidos no grasos, grasas, proteínas, lactosa y cenizas con el extracto de *M. oleifera*, y a medida que la dosis aumentó, los efectos mostraron un comportamiento lineal en las concentraciones de sólidos totales, sólidos no grasos, grasas y lactosa en la leche. En la leche, las proporciones de ácidos grasos insaturados y ácidos linoleicos conjugados incrementaron, mientras que los ácidos grasos saturados disminuyeron, por lo que este extracto redujo un 4.6% los ácidos grasos individuales y totales en 4.6-5.6%, y aumentó los ácidos grasos insaturados individuales y totales entre 11.5 y 13.9%.

Conclusiones

México se encuentra en los primeros 30 países productores de leche de cabra, y a nivel nacional Coahuila es el principal productor. Los aceites esenciales de plantas aromáticas son una alternativa en los sistemas de producción de leche de cabra en México, sobre todo en la producción orgánica. Los estudios demuestran que los aceites esenciales en las dietas de cabras son capaces de modificar la fermentación ruminal, por lo que son una alternativa en la alimentación de las cabras lecheras, y

tienen efectos positivos en el sistema antioxidante y salud de las cabras, como el caso de la adición a la dieta de hoja seca de orégano. Los aceites esenciales de ajo, jengibre, romero y zacate limón mejoran la producción de leche, mientras que el aceite esencial de canela disminuye el contenido de colesterol en leche y el aceite esencial de romero reduce el tiempo de coagulación de la leche. Estos compuestos naturales en las dietas de cabras lecheras pueden tener un efecto en el procesamiento de los productos lácteos, lo que serían benéficos para la salud del consumidor, desde el punto de vista funcional.

Conflicto de interés

No existe conflicto de interés entre los autores.

Referencias

- Amagase, H., Petesch, B. L., & Matsuura, H. (2001). Intake of garlic and its bioactive components. *The Journal of Nutrition*, 131, 955S-962S. <http://doi.org/10.1093/jn/131.3.955S>
- Anadón, A., Martínez-Larrañaga, M. R., Ares, I., & Martínez, M. A. (2018). Regulatory aspects for the drugs and chemicals used in food-producing animals in the European Union. *Veterinary Toxicology*, 103-131. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-811410-0.00007-6>
- Arco-Pérez, A.; Ramos-Morales, E.; Yáñez-Ruiz, D. R.; Abecia, L., & Martín-García, A. I. (2017). Nutritive evaluation and milk quality of including of tomato or olive by-products silages with sunflower oil in the diet of dairy goats. *Animal Feed Science and Technology*, 232, 57-70. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.08.008>
- Bakry, A. M., Abbas, S., Ali, B., Majeed, H., Abouelwafa, M. Y., Mousa, A., & Liang, L. (2015). Microencapsulation of oils: A comprehensive review of benefits, techniques, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15, 143-182. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12179>
- Bhattarai, R. R. (2014). Importance of goat milk. *Journal of Food Science and Technology Nepal*, 7, 107-111. <https://doi.org/10.3126/jfstn.v7i0.11209>
- Bidot-Fernández, A. (2017). Composición, cualidades y beneficios de la leche de cabra: revisión bibliográfica. *Revista de Producción Animal*, 29, 32-41. <https://bit.ly/3yao0Ix>
- Boutoial, K., Ferrandini, E., Rovira, S., García, V., & López, M. B. (2013). Effect of feeding goats with rosemary (*Rosmarinus officinalis* spp.) by-product on milk and cheese properties. *Small Ruminant Research*, 112, 147-153. <https://doi.org/10.1016/J.SMALLRUMRES.2012.12.002>
- Calabrò, S. (2015). Plant Secondary Metabolites. In *Rumen Microbiology: From Evolution to Revolution*. (pp. 153-159). Springer, New Delhi.
- Castanon, J. I. R. (2007). History of the use of antibiotic as growth promoters in European poultry feeds. *Poultry Science*, 86, 2466-2471. <https://doi.org/10.3382/ps.2007-00249>

- Cuvelier, M. E., Richard, H., & Berset, C. (1996). Antioxidative activity and phenolic composition of pilot-plant and commercial extracts of sage and rosemary. *The Journal of the American Oil Chemists' Society*, 73, 645-652. <https://doi.org/10.1007/BF02518121>
- Chaves, A. V., Stanford, K., Gibson, L. L., McAllister, T. A., & Benchaar, C. (2008). Effects of carvacrol and cinnamaldehyde on intake, rumen fermentation, growth performance, and carcass characteristics of growing lambs. *Animal Feed Science and Technology*, 145, 396-408. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.04.016>
- Duffield, T. F., & Bagg, R. N. (2000). Use of ionophores in lactating dairy cattle: a review. *The Canadian veterinary journal*, 41, 388-394. <https://bit.ly/3KDLmsE>
- Escareño, L., Salinas-Gonzalez, H., Wurzinger, M., Iñiguez, L., Sölkner, J., & Meza-Herrera, C. (2013). Dairy goat production systems. *Tropical Animal Health and Production*, 45, 17-34. <https://doi.org/10.1007/s11250-012-0246-6>
- FAO (2000). <http://www.fao.org/3/v5290s/v5290s00.htm#TopOfPage>
- FAO. (2020). <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- FAO. (2021). <http://www.fao.org/faostat/es/#data/TCL>
- García, V., Rovira, S., Boutoial, K., & López, M. B. (2014). Improvements in goat milk quality: A review. *Small Ruminant Research*, 121, 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2013.12.034>
- Gillian, B., Nielsen, J. H., Slots, T., Seal, C., Eyre, M. D., Sanderson, R., & Leifert, C. (2008). Fatty acid and fat soluble antioxidant concentrations in milk from high- and low-input conventional and organic systems: seasonal variation. *Journal of the Science Food Agriculture*, 88, 1431-1441. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3235>
- Jandal, J. M. (1996). Comparative aspects of goat and sheep milk. *Small Ruminant Research*, 22, 177-185. [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(96\)00880-2](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(96)00880-2)
- Kholif, A. E., Matloup, O. H., Morsy, T. A., Abdo, M. M., Abu Elella, A. A., Anele, U. Y., & Swanson, K. C. (2017). Rosemary and lemongrass herbs as phytogetic feed additives to improve efficient feed utilization, manipulate rumen fermentation and elevate milk production of Damascus goats. *Livestock Science*, 204, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.08.001>
- Kholif, A., Gouda, G., Olafadehan, O., & Abdo, M. (2018). Effects of replacement of *Moringa oleifera* for berseem clover in the diets of Nubian goats on feed utilisation, and milk yield, composition and fatty acid profile. *Animal*, 12, 964-972. <https://doi.org/10.1017/S1751731117002336>
- Kholif, S. M., Morsy, T. A., Abdo, M. M., Matloup, O. H., & Abu El-Ella, A. A. (2012). Effect of supplementing lactating goats rations with garlic, cinnamon or ginger oils on milk yield, milk

- composition and milk fatty acids profile. *Journal of Life Sciences*, 4, 27-34. <https://doi.org/10.1080/09751270.2012.11885191>
- Kim, H., Jung, E., & Lee, H. (2019). Essential oil mixture on rumen fermentation and microbial community-an *in vitro* study. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences (Animal Bioscience)*, 32, 808-814. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0652>
- Klein, B. G. (5^oEd). (2013). Digestion: The Fermentative Processes. In Cunningham's Textbook of Veterinary Physiology (pp. 320-341). Elsevier Inc.
- Lejonklev, J., Kidmose, U., Jensen, S., Petersen, M. A., Helwing, A. L. F., Mortensen, G., Weisbjerg, M. R., & Larsen, M. K. (2016). Effect of oregano and caraway essential oils on the production and flavor of cow milk. *Journal of Dairy Science*, 99, 7898-7903. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-10910>
- Martínez-Martínez, R., Ortega-Cerrilla, M. E., Herrera-Haro, J.G., Kawas-Garza, J. R., Zarate-Ramos, J. J. & Robles-Soriano, R. (2015). Uso de aceites esenciales en animales de granja. *Interciencia*, 40, 744-750. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33942541003>
- Pal, U. K., Mandal, P. K., Rao, V. K., & Das, C. D. (2011). Quality and utility of goat milk with special reference to India: An overview. *Asian Journal of Animal Sciences*, 5, 56-63. <https://doi.org/10.3923/ajas.2011.56.63>
- Paraskevakis, N. (2015). Effects of dietary dried Greek Oregano (*Origanum vulgare* ssp. *hirtum*) supplementation on blood and milk enzymatic antioxidant indices, on milk total antioxidant capacity and on productivity in goats. *Animal Feed Science and Technology*, 209, 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.001>
- Paraskevakis, N. (2017). Effects of dietary Greek oregano (*Origanum vulgare* ssp. *hirtum*) supplementation on rumen fermentation, enzyme profile and microbial communities in goats. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 102, 701-705. <https://doi.org/10.1111/jpn.12812>
- Park, Y. W., Juárez, M., Ramos, M., & Haenlein, G. F. W. (2007). Physico-chemical characteristics of goat and sheep milk. *Small Ruminant Research*, 68, 88-113. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2006.09.013>
- Portela-Díaz, D. F. (2018). Importancia de la interacción de bacteriófagos y bacterias ruminales en el desarrollo productivo del rumiante. *Revista Ciencias Agropecuarias*, 4, 41-45. <https://doi.org/10.36436/24223484.244>
- Russell, J. B., & Strobel, H. J. (1989). Effect of ionophores on ruminal fermentation. *Applied and environmental microbiology*, 55, 1-6. <https://dx.doi.org/10.1128%2Faem.55.1.1-6.1989>
- SIAP. (2020). https://nube.siap.gob.mx/cierre_pecuario/
- Smeti, S., Hajji, H., Bouzid, K., Abdelmoula, J., Muñoz, F., Mahouachi, M., & Atti, N. (2014). Effects of *Rosmarinus officinalis* L. as essential oils or in form of leaves supplementation on goat's

- production and metabolic statute. *Tropical Animal Health and Production*, 47, 451-457. <https://doi.org/10.1007/s11250-014-0721-3>
- Vasta, V., Nudda, A., Cannas, A., Lanza, M., & Priolo A. (2008). Alternative feed resources and their effects on the quality of meat and milk from small ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 147, 223-246. <https://doi.org/10.1016/J.ANIFEEDSCI.2007.09.020>
- Wallace, R. J. (2004). Symposium on plants as animal foods: a case of catch 22?. Antimicrobial properties of plant secondary metabolites. *Proceedings of the Nutrition Society*, 63, 621-629. <https://doi.org/10.1079/PNS2004393>
- Wanapat, M., Cherdthong, A., Pakdee, P., & Wanapat, S. (2008). Manipulation of rumen ecology by dietary lemongrass (*Cymbopogon citratus* Stapf.) powder supplementation. *Journal of Animal Science*, 86, 3497-3503. <https://doi.org/10.2527/jas.2008-0885>
- Yesilbag, D., Biricik, H., Cetin, I., Kara, C., Meral, Y., Cengiz, S. S., Orman, A., & Udum, D. (2016). Effects of juniper essential oil on growth performance, some rumen protozoa, rumen fermentation and antioxidant blood enzyme parameters of growing Saanen kids. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 101, e67-e76. <https://doi.org/10.1111/jpn.12560>

2021 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Artículo de Revisión

Compuestos organometálicos y de coordinación: Más que sólo una buena relación de metales de transición y moléculas orgánicas

Organometallic and coordination compounds: More than just a happy relationship between transition metals and organic molecules

Rebeca Nayely Osorio-Yáñez¹ y David Morales-Morales^{1*}

¹ Instituto de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México.

*Correspondencia: damor@unam.mx (David Morales-Morales)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v15i3.855>

Recibido: 22 de septiembre de 2021; Aceptado: 03 de noviembre de 2021

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Resumen

La química organometálica y de coordinación ha sido la inspiración de muchos científicos alrededor del mundo durante décadas, debido a que las aplicaciones en las que los compuestos organometálicos y de coordinación han encontrado cabida, es diversa y estimulante, tal es el caso de la catálisis, en la síntesis de metalodrogas o en la activación de moléculas pequeñas como CO₂, H₂, CH₄ y N₂. La síntesis de estos compuestos *per se* es interesante y el estudio de su reactividad ha permitido el desarrollo de procesos más eficientes y selectivos que permiten que nuestra vida cotidiana sea, no solamente más cómoda y duradera, sino más amigable con el medio ambiente. En este artículo de revisión se presenta un panorama general de los avances que se han tenido a partir de la síntesis de los primeros compuestos inorgánicos hasta nuestros días y que han permitido el nacimiento de una plétora de subáreas que siguen siendo motivación para nosotros y para muchos grupos de investigación en el mundo. De igual manera se presentan las perspectivas a las que estas investigaciones de la química organometálica y de coordinación apuntan a futuro.

Palabras clave: química organometálica, química de coordinación, catálisis, química bioinorgánica, química de materiales, química medicinal.

Abstract

Organometallic and coordination chemistry has been the inspiration of many scientist around the world for decades due to the applications in which organometallic and coordination compounds have found use being this diverse and stimulating. For example, in catalysis, for the synthesis of metalodrugs or in the activation of small molecules such as CO₂, H₂, CH₄ and N₂. The synthesis of these compounds *per se* is interesting and the study of their reactivity has allowed the development

of more efficient and selective processes which permit our daily life to be, not only, more comfortable and lasting but also, more environmentally-friendly. Thus in this review, we present a general overview of the advances achieved since the synthesis of the first inorganic compounds until our days, that have permitted the birth of a plethora of subareas that represent a motivation for us and many research groups around the world. Furthermore, we present future perspectives with the goal this to serve as catalysts for the reader to follow the stimulant path of the study of organometallic and coordination chemistry.

Keywords: organometallic chemistry, coordination chemistry, catalysis, bioinorganic chemistry, materials sciences.

Introducción

La química inorgánica es hoy en día una de las disciplinas más importantes en la investigación científica en todo el mundo pues promueve, a diferencia de la química orgánica, el estudio de toda la tabla periódica, sus tendencias e interacciones. Es de esperarse que, debido a que la química inorgánica estudia una enorme cantidad de propiedades y reactividades entre los elementos químicos, haya sido necesario el desarrollo de subáreas dedicadas específicamente a cada una de las interacciones de los metales con diferentes moléculas orgánicas. De manera general, estas áreas pueden dividirse en química de coordinación, química organometálica y bioorganometálica, las cuales a su vez se han dividido en más categorías. Este hecho se ve reflejado en la publicación mensual de miles de artículos científicos en revistas de alto impacto que han permitido el lanzamiento de revistas cada vez más específicas, tal es el caso de *Organometallics*, *ACS Catalysis*, *Journal of Applied Organometallic Chemistry*, *Journal of the Biological Inorganic Chemistry*, *Green Chemistry* entre muchas otras. El inicio de la química de coordinación puede atribuirse a los estudios de dos científicos prominentes, Alfred Werner en Suiza y Sophus Mads Jørgensen en Dinamarca, los cuales tenían dos diferentes teorías para explicar las interacciones de los metales con las moléculas orgánicas. Werner postuló la *teoría de coordinación* (Werner, 1899) mientras Jørgensen defendía la *teoría de cadena* propuesta por Blumstrand (Jørgensen, 1899). A pesar de que el último tenía más tiempo estudiando los enlaces químicos que involucraban a los metales de transición, su teoría era errónea y lo aceptó finalmente mediante la publicación de sus resultados en la síntesis de $[\text{Ir}(\text{NH}_3)_3\text{Cl}_3]$ los cuáles demostraban la veracidad de la *teoría de coordinación*. Dicha teoría llevó a Werner a ganar el Premio Nobel de Química en 1913. A partir de ese momento, la cantidad de publicaciones relacionadas con la química de coordinación incrementó exponencialmente demostrando el entusiasmo de la comunidad por entender la naturaleza de la nueva disciplina. Aproximadamente 40 años después, alrededor de 1950, se publicó la síntesis del ferroceno (Kealy y Pauson, 1951) con lo que, de acuerdo con muchos, se inició el estudio de la química organometálica. La diferencia entre los compuestos de coordinación y los compuestos organometálicos es que los últimos se caracterizan por tener al menos un enlace M-C (Fig. 1). Durante los 70 años que han transcurrido a partir de esa publicación, se ha observado el nacimiento de diferentes tecnologías que han permitido continuar con la síntesis de compuestos organometálicos y de coordinación, por ejemplo, el desarrollo de técnicas espectrométricas (espectrometría de masas) y espectroscópicas (Resonancia Magnética Nuclear, Espectroscopía infrarroja, Espectroscopía de UV-visible) o el uso de la técnica Schlenk (para la cual, tan solo el año pasado se publicó un manual de supervivencia) para la síntesis de compuestos sensibles al aire y al agua (Borys, 2020). En un inicio, la mayoría de los compuestos organometálicos eran sensibles a las condiciones atmosféricas normales, sin embargo hoy en día, se incentiva la síntesis

de compuestos inorgánicos que permitan su manipulación en una atmósfera que no necesariamente sea libre de oxígeno y agua (Marion *et al.*, 2017). Para una mayor cobertura sobre el inicio de la química inorgánica y sus alcances recomendamos leer la historia de su nacimiento, explicada desde sus inicios y palabras de dos de los investigadores contemporáneos que vivieron desde muy temprano con esta gran disciplina: Werner Helmut y Fred Basolo (Basolo, 2002).

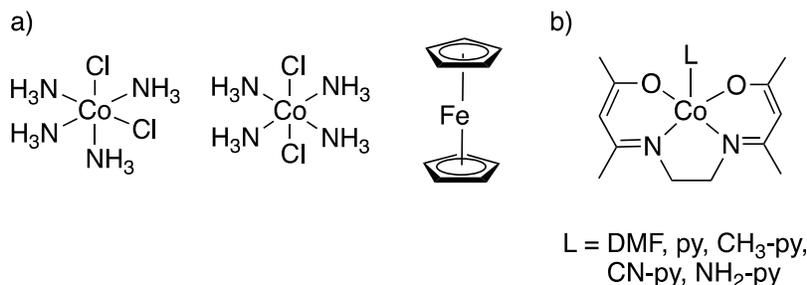


Figura 1. a) Primeros compuestos de coordinación: *cis*- y *trans*- $[\text{Co}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2]^+$ y primer compuesto organometálico: ferroceno (Kealy y Pauson, 1951). b) $\text{Co}(\text{acacac})\text{L}$ (Crumbliss y Basolo, 1969).
Figure 1. a) First coordination compounds synthesized: *cis*- and *trans*- $[\text{Co}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2]^+$ and organometallic: ferrocene (Kealy y Pauson, 1951).. b) $\text{Co}(\text{acacac})\text{L}$. (Crumbliss y Basolo, 1969).

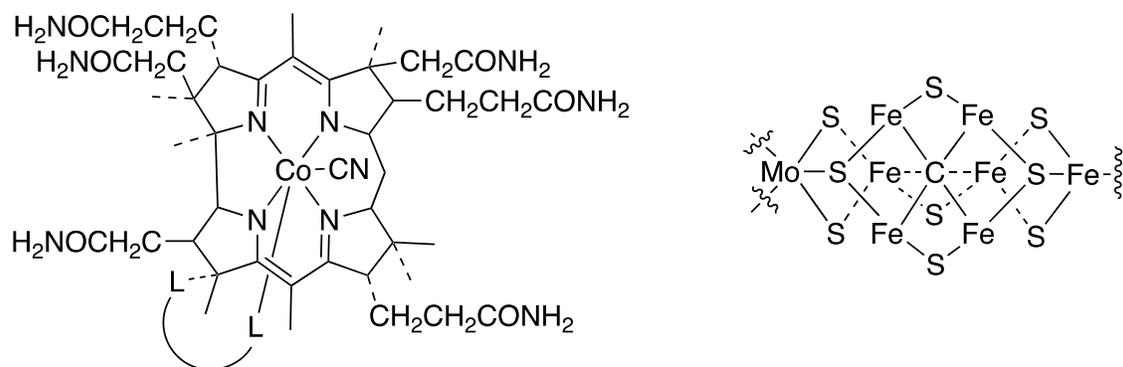
Existe un interés latente en seguir explorando estas subáreas y se ha visto el desarrollo de una disciplina que tiene todavía mucho que ofrecer. Actualmente, existen diferentes aplicaciones en las que los compuestos de coordinación y organometálicos han encontrado uso. Dichas aplicaciones van desde el diseño de catalizadores para la síntesis orgánica, la síntesis de materiales o el estudio del mecanismo catalítico de los catalizadores biológicos: las metaloenzimas. Así mismo, los químicos inorgánicos, tienen un interés creciente en realizar procesos que no sean tan dañinos con el medio ambiente e incluso se investigan procesos que intenten revertir los efectos del cambio climático. A continuación, se mencionan las aplicaciones más importantes de esta disciplina.

Aplicaciones de los compuestos organometálicos y de coordinación

La diversidad estructural de los metales de transición, que es considerablemente mayor en comparación con la del carbono, ha permitido el desarrollo de una gran cantidad de aplicaciones por ejemplo, en medicina o en la fabricación de materiales, funcionales. En medicina, la investigación y síntesis de compuestos organometálicos y de coordinación para el tratamiento y longevidad de pacientes con enfermedades crónicas como el cáncer es sobresaliente. Así mismo, se resalta la importancia del desarrollo de la investigación para encontrar tratamientos y técnicas cada vez menos invasivas para ambos, el cuerpo humano y el medio ambiente.

De manera natural, los compuestos de coordinación se observan en sistemas biológicos, por ejemplo, en la hemoglobina, que inspiró la síntesis del $\text{Co}(\text{acacac})\text{L}$ (Fig. 1), un compuesto de cobalto que serviría como acarreador de oxígeno y pretendía ser utilizado en la segunda guerra mundial evitando que los aviones cargaran tanques llenos de oxígeno (Crumbliss & Basolo, 1969), o la vitamina B12 (Fig. 2), un catalizador biológico responsable de reacciones de óxido-reducción y/o rupturas homolíticas que derivan en reacciones de biometilación y que, de no funcionar adecuadamente, puede ser responsable de la anemia perniciosa (O'Leary & Samman, 2010). La vitamina B12 es la única capaz de formar un enlace M-C en un sistema biológico, es decir, es el único

compuesto organometálico en el cuerpo humano. En general, existe también un creciente interés en entender los mecanismos de acción de los catalizadores biológicos: las enzimas. Uno de los ejemplos de mayor importancia actualmente, es el estudio de la fijación de nitrógeno gaseoso (N_2) llevado a cabo por una enzima presente solamente en algunas bacterias, la nitrogenasa (Fig. 3) pues, a pesar de que el nitrógeno es considerado como un gas inerte debido a su alta energía de enlace (946 kJ mol^{-1}), la nitrogenasa puede activarlo incluso a temperatura ambiente para la generación de amonio (o derivados, los cuales pueden ser utilizados como fertilizantes, y más recientemente incluso como combustibles). Dicho mecanismo sirvió como inspiración en el proceso Haber-Bosch (Nobel de Química 1918 y 1931). Actualmente diversos grupos de investigación en el mundo sintetizan catalizadores bien definidos (Chalkley *et al.*, 2020) o basados en enzimas (Chen & Arnold, 2020) y estudian este mecanismo (M. Siegbahn, 2019) pues el proceso Haber-Bosch utiliza condiciones de reacción extremas ($15\text{-}25 \text{ MPa}$, $400\text{-}500 \text{ }^\circ\text{C}$) y es necesario encontrar catalizadores más eficientes. Otra reacción que lleva a cabo la nitrogenasa es la reducción del CO atmosférico (energía de enlace: 1079 kJ mol^{-1}) en hidrocarburos pequeños (cadena corta y/o bajo peso molecular), lo que dio lugar al proceso Fischer-Tropsch que se utiliza industrialmente en la actualidad y que de igual manera utiliza condiciones de reacción moderadas ($150\text{-}300 \text{ }^\circ\text{C}$, $1\text{-}4 \text{ MPa}$).



L = quelato orgánico

Figura 2. Vitamina B-12 y el cofactor más estudiado de la nitrogenasa (cofactor MoFe).

Figure 2. Vitamin B-12 and the most studied nitrogenase cofactor (cofactor MoFe).

Dado lo anterior, es de esperarse que el diseño de compuestos de coordinación y organometálicos estén inspirados en estos sistemas. Un ejemplo es el diseño de catalizadores, que es una de las áreas de mayor aplicación de compuestos organometálicos y de coordinación actualmente y que seguramente seguirá en las próximas décadas. Existen diversos procesos catalíticos que permiten la activación de enlaces C-H, C-X ($X = N, O, P, S$) o C-C los cuales son fundamentales para la síntesis de moléculas orgánicas tales como medicamentos o materias primas utilizadas en procesos industriales (Astruc, 2007). A este respecto, una gran variedad de científicos han sido acreedores al Premio Nobel de Química por sus invaluable contribuciones a la química organometálica, tales como: Robert H. Grubbs, Yves Chauvin y Richard R. Schrock en 2005 y Akira Suzuki, Richard F. Heck y Ei-ichi Negishi en 2010.

Especialmente en el área de la medicina, especialistas de diferentes áreas como Química, Física y Biología han logrado establecer un lenguaje común que ha permitido el desarrollo de técnicas como la MRI (*Magnetic Resonance Imaging*) o la radioterapia. La técnica de MRI permite la visualización de estructuras biológicas (órganos y tejidos) opacas con una resolución espacial relativamente alta (ca. 10 μM) en un procedimiento no invasivo y no doloroso. Mediante esta técnica, es posible observar tumores o anomalías en todo el cuerpo humano. En consecuencia, se han detectado enfermedades en riñones, útero, hígado, corazón, senos, entre otros y el potencial de su aplicación sigue en desarrollo. La resolución de las imágenes observadas puede ser mejorada por la presencia de agentes contrastantes (CAs: *contrast agents*) los cuales son iones metálicos que estando en contacto con las moléculas de agua en el cuerpo y debido a la emisión de ondas electromagnéticas de radio permiten que la imagen del órgano o tejido sea más brillante y se observe más claramente. La posibilidad de modular la selectividad e intensidad del brillo de la imagen es responsabilidad de los CAs que son compuestos de coordinación y que actualmente son estudiados intensamente con la finalidad, por ejemplo, de que respondan a estímulos biológicos o cambios en el ambiente para ser activados, así como los apagadores en nuestras casas (Lowe, 2004). En la Figura 3 se observa el primer CA estudiado, conocido comercialmente como Magnevist.

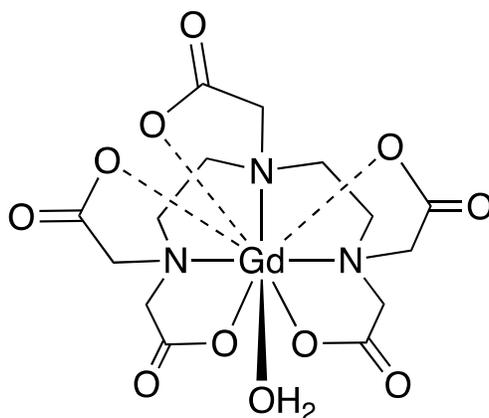
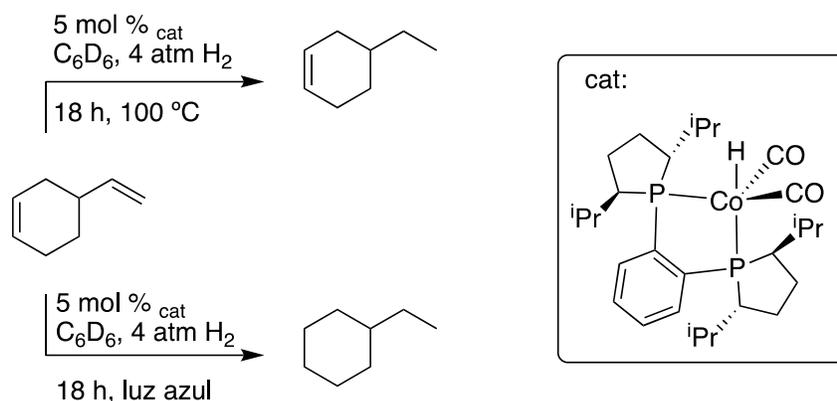


Figura 3. Magnevist: agente contrastante utilizado comúnmente en la técnica MRI.

Figure 3. Magnevist: Contrast Agent normally used in MRI.

Se ha visto el desarrollo de estos mecanismos de cambio o “switch” en los compuestos organometálicos y de coordinación durante años, pero recientemente la cantidad de artículos publicados ha crecido exponencialmente y las aplicaciones son cada vez más interesantes. Por ejemplo, en los catalizadores, al inicio de este año Chirik (quien es editor en jefe de la revista *Organometallics*) y colaboradores, publicaron que el mecanismo de un catalizador de cobalto sigue dos diferentes trayectorias de acuerdo con el estímulo energético utilizado (Mendelsohn *et al.*, 2021). Es decir, cuando la reacción se lleva a cabo con calentamiento térmico se obtiene un producto alqueno y cuando el estímulo energético es luz azul se obtiene otro producto, alcano (Esquema 1). Este es un claro ejemplo de la versatilidad de los mecanismos catalíticos con metales de transición (que además son abundantes en la corteza terrestre), en donde los mecanismos de reacción pueden ser intercambiados de acuerdo con el estímulo energético utilizado.



Esquema 1. Ejemplo de catalizador switch activado por dos mecanismos diferentes de acuerdo con el estímulo externo utilizado. *Arriba:* térmico; *abajo:* luz azul.

Scheme 1. Example of a switch catalyst activated by two different mechanisms according to the external energy source. *Above:* conventional heating; *below:* blue light

Otra aplicación en la que los compuestos organometálicos y de coordinación han sido utilizados es en la fabricación de OLEDs (*Organic Light Emitting Diodes*), este descubrimiento es el que nos ha permitido tener imágenes a todo color con una tecnología amigable con el ambiente (pues estos dispositivos sólo emiten energía cuando es necesario y cuando no se utilizan se quedan completamente apagados en negro). Por ejemplo, en la fabricación de focos para interiores o pantallas de celulares, cámaras digitales y televisores de alta definición. Sin embargo, debido a que los OLEDs están compuestos de múltiples capas finas, el flujo de energía que puede observarse afuera del dispositivo es alrededor del 20–30 %. En consecuencia, hay un interés creciente en el diseño de dispositivos que eviten la pérdida energética, es aquí donde se utilizan los metales de transición, en el proceso de dopaje donde se utilizan óxidos de Mo, W, Re o compuestos organometálicos de Ir, Pt, Ru, Os y Cu.

Actualmente se sintetizan compuestos organometálicos y de coordinación que son materiales fosforescentes o fluorescentes, es decir, que pueden emitir radiaciones de alta energía no solamente en el intervalo del espectro visible que necesitan los OLEDs de alta eficiencia (color azul) sino en todo el espectro visible, dando lugar a diferentes aplicaciones como la separación foto química del agua (en hidrógeno y oxígeno), sensores químicos, fotocatalisis, celdas solares sensibles a la coloración (DSSCs: *Dye-Sensitised Solar Cells*), sensores de oxígeno, para etiquetado de muestras biológicas, reacciones de transferencia de carga en el ADN y como agentes antitumorales (Visbal y Gimeno, 2014; Zou *et al.*, 2020).

También, una de las aplicaciones más conocidas de los compuestos de coordinación es como metalodrogas, específicamente en el tratamiento del cáncer (Hartinger & Dyson, 2009). Todo comenzó en un hecho fortuito mientras Barnett Rosenberg estaba investigando si la corriente eléctrica jugaba algún papel importante en la división celular. El experimento utilizaba células de *Escherichia coli* creciendo en una disolución de cloruro de amonio a la cual se le aplicaba una corriente eléctrica a través de un electrodo de platino. Al pasar el tiempo encontró una aparente inhibición celular y después de cuidadosas observaciones, se hizo el reporte de que era debida al compuesto *cis*-platino *cis*-[PtCl₄(NH₃)₂]. El compuesto *trans* no presentó ninguna citotoxicidad (Rosenberg *et al.*, 1967). En la actualidad, este compuesto es el mayormente utilizado para el tratamiento del cáncer, sin embargo, existen bastantes efectos secundarios relacionados con su uso, por ejemplo, alopecia,

sangrado o anemia (Galluzzi *et al.*, 2014). Obviamente, a raíz de semejante descubrimiento, la comunidad empezó a examinar otros compuestos que presentaran mayor selectividad hacia las células carcinogénicas y en consecuencia disminuir los efectos secundarios de la quimioterapia. Así se han estudiado diferentes compuestos de coordinación y organometálicos con diversos mecanismos de acción contra las células cancerosas que son menos invasivos en comparación con la agresiva intercalación con el ADN realizada por los compuestos de platino. Entre los mecanismos de acción menos invasivos reportados se encuentran, el ataque al retículo endoplásmico, a la mitocondria y la generación excesiva de especies reactivas de oxígeno (ROS: *Reactive Oxygen Species*) que provocan la muerte celular (Kovacic & Osuna, 2000). Hoy en día tenemos una variedad de compuestos que están siendo evaluados por su mecanismo de acción, toxicidad y selectividad que sirven de ejemplo claro de la versatilidad de los compuestos organometálicos y de coordinación debido a que permiten la modulación de su actividad, la cual no se puede realizar con moléculas orgánicas puras. Además, los diferentes tipos de ligantes que los acompañan (tales como NHC, heterociclos, organoarsénicos, drogas aprobadas clínicamente o incluso estructuras supramoleculares) también sirven como variable de modulación. Entre los compuestos que se han estudiado, los más sobresalientes son los de Ru, Os, Ir, Fe (familias de compuestos organometálicos derivados del ferroceno y familias de compuestos de coordinación con ligantes quelantes), Cu (las famosas casiopeínas desarrolladas en nuestro país) (Espinal-Enríquez *et al.*, 2016; Valdez-Camacho *et al.*, 2020), Au, Ti, V e incluso compuestos heterometálicos. Algunos de estos compuestos han alcanzado pruebas en fase clínica tales como los de Ru (KP1019), Au y Cu (Fig. 4), algunos no han sido evaluados clínicamente y muchos más se encuentran bajo estudio (Casini *et al.*, 2019).

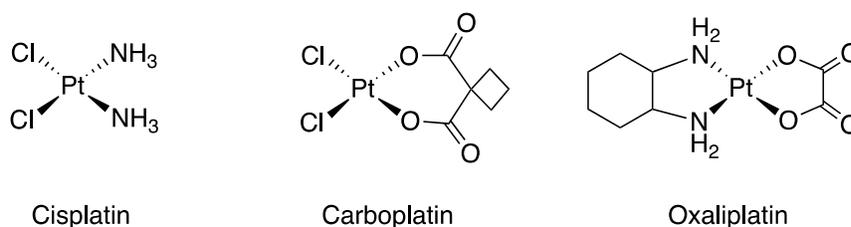
En este contexto, Zhang y Sadler (2017a, b) estudiaron el interesante concepto de agentes para el tratamiento del cáncer que, como muchos compuestos organometálicos, también son catalizadores. Esta característica los hace ser relativamente inertes a la activación por hidrólisis y muy citotóxicos hacia células cancerosas. Este tipo de compuestos inducen reacciones redox dentro de la célula cancerosa por lo que se incrementan las ROS dentro de ella causando la muerte celular (Dougan *et al.*, 2008; Zhang y Sadler, 2017a, 2017b).

Relacionado con estos compuestos está la radiología terapéutica (radiación focalizada) o imagenología pues algunos de los compuestos mencionados previamente sirven también para localizar las células tumorales mediante técnicas radioactivas como la PDT (*Photodynamic Therapy*), la PET (*Positron Emission Tomography*), o la SPECT (*Single Photon Emission Computed Tomography*).

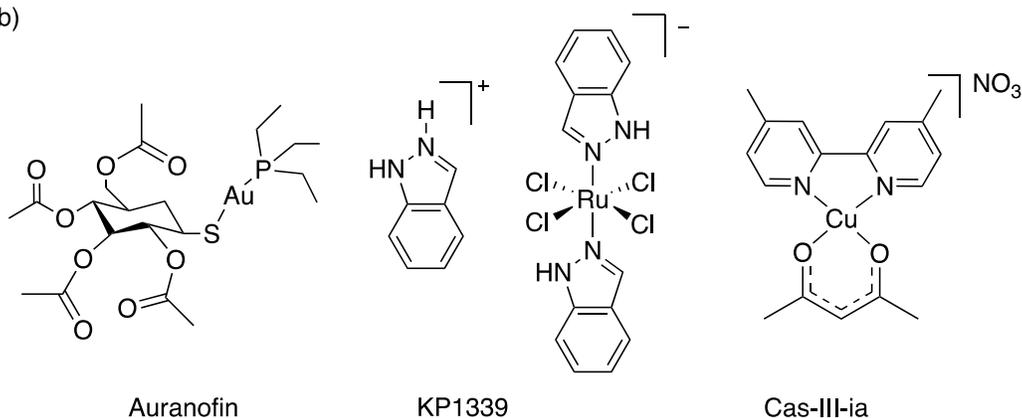
Cabe destacar que estas metodologías necesitan la modulación y alineación de los factores biológicos, así como del propio decaimiento de los núcleos radioactivos. Sin embargo, la flexibilidad de los compuestos organometálicos y de coordinación ofrece diferentes alternativas para hacer coincidir el metal radioactivo con el perfil farmacocinético del objetivo para la aplicación que se requiera. Actualmente existe un gran interés en el desarrollo y optimización de estas técnicas. Algunos de los núcleos que emiten partículas radioactivas (alfa, beta o electrones Auger) que han sido estudiados y que han demostrado resultados prometedores son ^{225}Ac , ^{64}Cu , ^{67}Cu , ^{177}Lu , ^{223}Ra , ^{186}Re , ^{188}Re , ^{47}Sc , ^{149}Tb , ^{227}Th y ^{90}Y e incluso algunos han alcanzado pruebas en fase clínica.

Así mismo, se han sintetizado compuestos de coordinación y organometálicos con propiedades farmacológicas para el tratamiento de diversas enfermedades causadas por virus (como la gripe y el sarampión) y bacterias (como la tuberculosis y la artritis), tal es el caso del auranofin (Fig. 4) utilizado para el tratamiento de la artritis. Sin embargo, al ser organismos vivos, los virus y bacterias van adquiriendo resistencia contra los medicamentos por lo que la investigación para encontrar nuevos metalofármacos debe ser continua (Frei, 2020).

a)



b)



c)

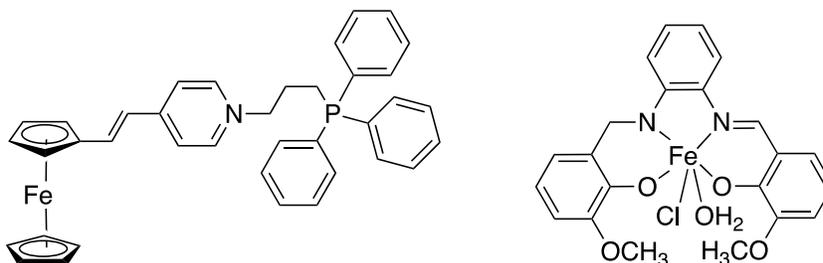


Figura 4. a) Cisplatino y derivados usados para el tratamiento de diferentes tipos de cáncer. b) metalofármacos actualmente en pruebas en fase clínica, auranofin usada también para el tratamiento de la artritis, c) metalofármacos de Fe que son candidatos para usar como agentes contra el cáncer: izquierda (organometálico): utilizado en terapia fotodinámica, derecha (de coordinación): induce apoptosis bloqueando la fase de síntesis en el ciclo celular de células cancerosas.

Figure 4. a) Cisplatin and examples of metalodrugs used for treatment of different types of cancer. b) metalodrugs currently on clinical trial, auranofin is also used for arthritis treatment, c) Fe metalodrugs that are good candidates for cancer treatment: left (organometallic): used for PDT (Photodynamic Therapy), right (coordination): induces apoptosis by blocking the S phase of the cellular cycle in cancer cells.

El grupo de investigación enfocado a la síntesis de catalizadores organometálicos bien definidos para la activación de enlaces C–H, C–C y C–S es liderado por David Morales-Morales (editor asociado de la revista *Applied Organometallic Chemistry*); fue uno de los pioneros en la síntesis de un tipo de ligantes conocidos como tipo pinza (van Koten & Gossage, 2016), los cuales poseen una alta estabilidad térmica y robustez, lo que les permite realizar una gran diversidad de procesos catalíticos

y alcanzar rendimientos de reacción sobresalientes (Morales-Morales, 2004). Recientemente han reportado la actividad de los catalizadores utilizando agua como disolvente y microondas como fuente de calentamiento, (Flores-Rojas *et al.*, 2020; Ortega-Gaxiola *et al.*, 2020) con lo que esperamos realizar procesos más amigables con el ambiente de acuerdo con los 12 principios de la química verde (ACS, 2021). Así mismo, también este grupo de investigadores ha encontrado que algunos de los compuestos que son excelentes catalizadores, también tienen actividad citotóxica contra células cancerosas de diversos tipos de cáncer de alta incidencia en México como colon, mama y próstata (Backman-Blanco *et al.*, 2020).

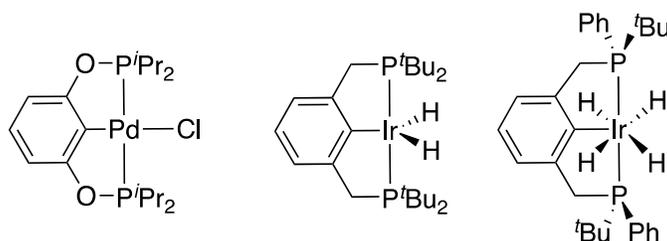


Figura 5. Ejemplos de catalizadores tipo pinza sintetizados David Morales-Morales y Craig M. Jensen de izquierda a derecha: POCOP-Pd^{II} (Morales-Morales *et al.*, 2000), PCP-Ir^{III} (Morales-Morales *et al.*, 2011), PCP-Ir^V (Morales-Morales *et al.*, 2002).

Figure 5. Examples of pincer type catalysts synthesized by David Morales-Morales and Craig M. Jensen from left to right: POCOP-Pd^{II}, PCP-Ir^{III}, PCP-Ir^V.

La química de coordinación y organometálica también ha fundado las bases de la llamada química supramolecular, en la que se sintetizan estructuras que están “más allá del límite”, en este caso del límite molecular, esta área de la química relativamente nueva fue llamada así por primera vez por Lehn haciendo referencia a la química relacionada con los éteres corona, la química de anfitrión-huésped y el reconocimiento molecular. Por sus investigaciones fue acreedor del premio Nobel de Química en 1987 en conjunto con Donald J. Cram y Charles J. Pedersen por el uso de los criptatos que son una familia de ligantes multidentados los cuales pueden ser coordinados a una gran variedad de cationes (Lehn, 1988). Nuevamente, el modo de trabajo de los sistemas biológicos fue lo que los inspiró a encontrar ligantes que imitaran el transporte de iones en las membranas celulares. A lo largo de los años siguientes, se han sintetizado en el mundo una gran cantidad de compuestos que pertenecen esta categoría y que han sido utilizados en la interfaz de áreas como física, biología o ingeniería de materiales en aplicaciones tales como máquinas moleculares, sensores moleculares, absorción de gases, extracción de metales de minerales, nanoreactores, catálisis y entrega de fármacos. El grado de innovación de estas estructuras es tal, que en 2016 el científico holandés Ben Feringa fue acreedor al premio Nobel de Química en conjunto con Jean-Pierre Sauvage y Sir J. Fraser Stoddart por desarrollar las máquinas más pequeñas del mundo que además están impulsadas por la luz (Koumura *et al.*, 1999).

Algunas de las estructuras que dentro de esta categoría tienen la finalidad de atrapar moléculas pequeñas o incluso iones, ya sea para hacer separaciones o para utilizarlas como almacén, por ejemplo: los MOFs (*Metal Organic Frameworks*) (Bhardwaj *et al.*, 2018), los POCs (*Porous Organic Cages*), los MOPs (*Metal-Organic Polyhedra*), las PCCs (*Porous Coordination Cages*) (Diercks *et al.*, 2018), las PAFs (*Porous Aromatic Frameworks*) y los MOCs (*Metal Organic Cubes*). Para más información sobre química supramolecular consultar el número nueve de la revista *Chemical Society Reviews* la cual

celebró el 30º año de aniversario de la Química Supramolecular en 2017 (Amabilino & Gale, 2017). Para una revisión más detallada sobre nanocontenedores consultar Albrecht y Hahn, 2012.

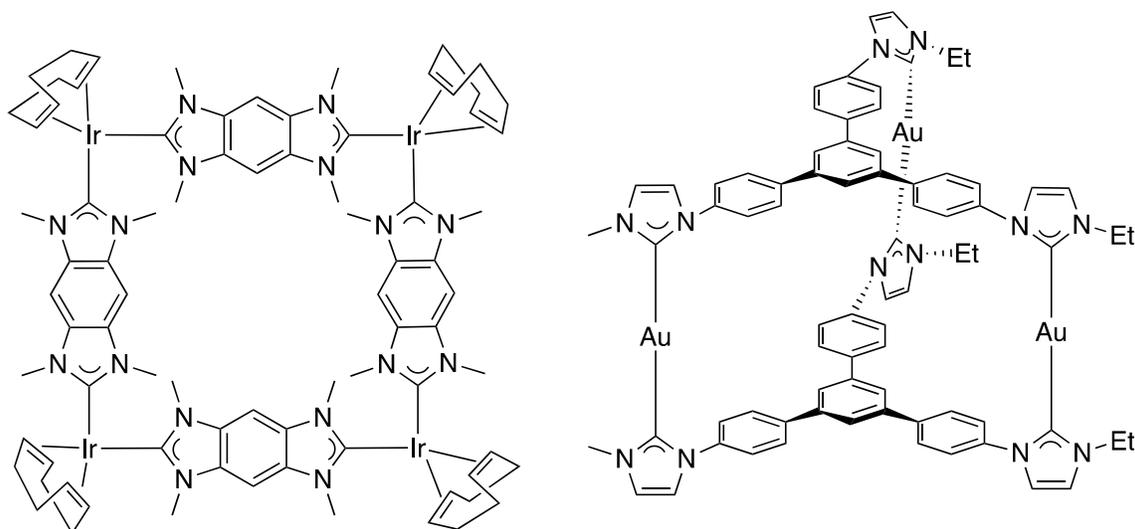


Figura 6. Ejemplos de estructuras supramoleculares derivadas de ligantes tipo NHCs (por sus siglas en inglés: N-heterocyclic carbene). *Izquierda:* cuadrado molecular; *derecha:* cilindro molecular (Sinha & Hahn, 2017).

Figure 6. Examples of supramolecular structures bearing NHC ligands. *Left:* molecular square; *right:* molecular cylinder.

Perspectivas de los compuestos organometálicos y de coordinación

El estudio de compuestos organometálicos y de coordinación ofrece una oportunidad de investigación que tiene lugar actualmente en su síntesis y aplicación en diferentes áreas. A continuación, se presentan algunos tópicos a considerar:

La síntesis de metalodrogas útiles y con menos efectos secundarios que las que se utilizan actualmente. Estudios recientes han demostrado resultados prometedores en el uso de agentes que se dirijan únicamente a una parte de la célula cancerosa, potencializando su selectividad hacia células cancerosas dejando intactas a las células saludables (Johnstone *et al.*, 2016).

Mejorar los procesos de síntesis y energéticos para disminuir los efectos del cambio climático. Se han desarrollado diversas técnicas y enfoques para este propósito en el transcurso de los años, sin embargo, todavía es necesario profundizar. Por ejemplo, considerando los desechos generados en los laboratorios, sintetizando catalizadores más eficientes y de fácil acceso para el ciudadano promedio (que conviertan los gases de efecto invernadero en materias primas de alto valor agregado) y eliminando el uso de combustibles fósiles, por ejemplo, mediante la técnica de licuefacción hidrotermal (Cabrera & Labatut, 2021). Una de las alternativas más prometedoras para lograr estas metas es la biocatálisis (Hauer, 2020).

Retomar la importancia de los compuestos que poseen un enlace directo alquílico o arílico y sus aplicaciones en catálisis, dichos compuestos fueron menospreciados en los años 50s debido al auge de los compuestos sándwich, pero a lo largo del tiempo han adquirido mayor interés por parte de los investigadores. Actualmente son compuestos esenciales para la transformación de metano o

compuestos saturados en compuestos de mayor valor comercial como metanol o aldehídos (Jia *et al.*, 2001; Lunsford, 1995).

El área de la luminiscencia está todavía en sus inicios y es necesario, por ejemplo, desarrollar la síntesis de compuestos emisores de luz azul para la fabricación de OLEDs de alta eficiencia o la síntesis de compuestos fluorescentes o fosforescentes que sean más selectivos mediante la respuesta ante un estímulo externo para activar las metalodrogas o para su uso en imagenología (Qi *et al.*, 2021).

Conclusiones

La diversidad estructural de los compuestos organometálicos y de coordinación debida no solamente al centro metálico (el cuál puede adoptar diferentes geometrías de coordinación, estados de oxidación y números de coordinación) sino también a la gran variedad de ligantes que se han descubierto tales como fosfinas, NHC, pinza entre muchos otros, han permitido el desarrollo de nuestra vida cotidiana tal como la conocemos actualmente y estamos lejos de haber encontrado todas las posibles aplicaciones que esconden estos, literalmente, metales preciosos.

Con la presente revisión se da una perspectiva del estado del arte de la síntesis y aplicación de compuestos organometálicos y de coordinación sintetizados hasta ahora. Su aplicación desde catalizadores para síntesis orgánica hasta su utilidad como agentes citotóxicos o drogas cada vez menos invasivas para el cuerpo humano. Se ofrece una plétora de posibilidades que se pueden seguir explorando y en las que se puede hacer una contribución para mejorar nuestra existencia en el planeta, ya sea disminuyendo nuestra huella de carbono, contrarrestando los efectos del cambio climático o para el tratamiento de pacientes terminales.

Agradecimientos

R. N. O. Y. agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de estancias posdoctorales por México otorgada (BP-PA-20200603135404104-98646).

D.M.-M. agradece el generoso financiamiento del programa PAPIIT-DGAPA-UNAM (PAPIIT IN210520) y del CONACYT a través de los proyectos A1-S-33933 FORDECYT-PRONACES FON.INST 22/2020 (FOINS 307152) para nuestra investigación.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de interés.

Nomenclatura

DMF	Dimetilformamida
py	piridina
acacen	Bis(acetilacetona)etilendiamina

^t Bu	<i>tert</i> -butilo
ⁱ Pr	<i>iso</i> -propilo
Ph	fenilo
MOF	Metal Organic Framework
POC	Porous Organic Cages
PCC	Porous Coordination Cages
MOC	Metal Organic Cubes
PAF	Porous Aromatic Frameworks
OLED	Organic Light Emitting Diode
PDT	Photodynamic Therapy
SPECT	Single Photon Emission Computed
PET	Positron Emission Tomography
NHC	N-heterocyclic carbene
ROS	Reactive Oxygen Species

Referencias

- ACS. (2021, March 15). 12 Principles of Green Chemistry. American Chemical Society. <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html>
- Albrecht, M., & Hahn, E. (Eds.). (2012). Chemistry of Nanocontainers (319). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28059-7>
- Amabilino, D. B., & Gale, P. A. (2017). Supramolecular chemistry anniversary. Chem. Soc. Rev., 46(9), 2376–2377. <https://doi.org/10.1039/C7CS90037F>
- Astruc, D. (2007). Organometallic Chemistry and Catalysis (2nd ed.). Springer.
- Backman-Blanco, G., Valdés, H., Ramírez-Apan, M. T., Cano-Sanchez, P., Hernandez-Ortega, S., Orjuela, A. L., Alí-Torres, J., Flores-Gaspar, A., Reyes-Martínez, R., & Morales-Morales, D. (2020). Synthesis of Pt(II) complexes of the type [Pt(1,10-phenanthroline)(SArFn)2] (SArFn = SC6H3-3,4-F2; SC6F4-4-H; SC6F5). Preliminary evaluation of their in vitro anticancer activity. J. Inorg. Biochem., 211, 111206. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2020.111206>

- Basolo, F. (2002). From Coello to Inorganic Chemistry. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0635-5>
- Bhardwaj, S. K., Bhardwaj, N., Kaur, R., Mehta, J., Sharma, A. L., Kim, K.-H., & Deep, A. (2018). An overview of different strategies to introduce conductivity in metal–organic frameworks and miscellaneous applications thereof. *J. Mater. Chem. A*, 6(31), 14992–15009. <https://doi.org/10.1039/C8TA04220A>
- Borys, A. (2020). The Schlenk Line Survival Guide. The Schlenk Line Survival Guide. <https://schlenklinesurvivalguide.com/>
- Cabrera, D. V., & Labatut, R. A. (2021). Outlook and challenges for recovering energy and water from complex organic waste using hydrothermal liquefaction. *Sustainable Energy Fuels*, 5(8), 2201–2227. <https://doi.org/10.1039/D0SE01857K>
- Casini, A., Vessières, A., & Meier-Menches, S. M. (Eds.). (2019). Metal-based anticancer agents. In *Metallobiology*, Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781788016452-FP001>.
- Chalkley, M. J., Drover, M. W., & Peters, J. C. (2020). Catalytic N₂-to-NH₃ (or -N₂H₄) Conversion by Well-Defined Molecular Coordination Complexes. *Chem. Rev.*, 120(12), 5582–5636. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00638>
- Chen, K., & Arnold, F. H. (2020). Engineering new catalytic activities in enzymes. *Nat. Catal.*, 3(3), 203–213. <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0385-5>
- Crumbliss, A. L., & Basolo, F. (1969). Monomeric Cobalt-Oxygen Complexes. *Science*, 164(3884), 1168–1170. <https://doi.org/10.1126/science.164.3884.1168>
- Diercks, C. S., Kalmutzki, M. J., Diercks, N. J., & Yaghi, O. M. (2018). Conceptual Advances from Werner Complexes to Metal–Organic Frameworks. *ACS Cent. Sci.*, 4(11), 1457–1464. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.8b00677>
- Dougan, S. J., Habtemariam, A., McHale, S. E., Parsons, S., & Sadler, P. J. (2008). Catalytic organometallic anticancer complexes. *PNAS*, 105(33), 11628–11633. <https://doi.org/10.1073/pnas.0800076105>
- Espinal-Enríquez, J., Hernández-Lemus, E., Mejía, C., & Ruiz-Azuara, L. (2016). Network Analysis Shows Novel Molecular Mechanisms of Action for Copper-Based Chemotherapy. *Front. Physiol.*, 6, 406. <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00406>.
- Frei, A. (2020). Metal Complexes, an Untapped Source of Antibiotic Potential? *Antibiotics*, 9(2), 90. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9020090>
- Gabriel Flores-Rojas, G., González-Sebastián, L., Reyes-Martínez, R., Aguilar-Castillo, B. A., Hernández-Ortega, S., & Morales-Morales, D. (2020). Synthesis and characterization of Pd(II) complexes bearing NS, CS, SNS and SCS ligands. Evaluation of their microwave assisted catalytic activity in C-C coupling reactions. *Polyhedron*, 185, 114601. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2020.114601>
- Galluzzi, L., Vitale, I., Michels, J., Brenner, C., Szabadkai, G., Harel-Bellan, A., Castedo, M., & Kroemer, G. (2014). Systems biology of cisplatin resistance: Past, present and future. *Cell Death Dis.*, 5, e1257. <https://doi.org/10.1038/cddis.2013.428>

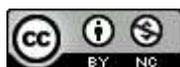
- Hartinger, C. G., & Dyson, P. J. (2009). Bioorganometallic chemistry—From teaching paradigms to medicinal applications. *Chem. Soc. Rev.*, 38(2), 391–401. <https://doi.org/10.1039/B707077M>
- Hauer, B. (2020). Embracing Nature's Catalysts: A Viewpoint on the Future of Biocatalysis. *ACS Catal.*, 10(15), 8418–8427. <https://doi.org/10.1021/acscatal.0c01708>
- Jia, C., Kitamura, T., & Fujiwara, Y. (2001). Catalytic Functionalization of Arenes and Alkanes via C–H Bond Activation. *Acc. Chem. Res.*, 34(8), 633–639. <https://doi.org/10.1021/ar000209h>
- Johnstone, T. C., Suntharalingam, K., & Lippard, S. J. (2016). The Next Generation of Platinum Drugs: Targeted Pt(II) Agents, Nanoparticle Delivery, and Pt(IV) Prodrugs. *Chem. Rev.*, 116(5), 3436–3486. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00597>
- Jørgensen, S. M. (1899). Zur Konstitution der Kobalt-, Chrom- und Rhodiumbasen. *Z. Anorg. Chem.*, 19(1), 109–157. <https://doi.org/10.1002/zaac.18990190113>
- Kealy, T. J., & Pauson, P. L. (1951). A New Type of Organo-Iron Compound. *Nature*, 168(4285), 1039–1040. <https://doi.org/10.1038/1681039b0>
- Koumura, N., & Zijlstra, R. W. J. (1999). Light-driven monodirectional molecular rotor. *Nature*, 401(6749), 152–155. <https://doi.org/10.1038/43646>
- Kovacic, P., & Osuna, J. A. (2000). Mechanisms of anti-cancer agents: Emphasis on oxidative stress and electron transfer. *Curr. Pharm. Des.*, 6(3), 277–309. <https://doi.org/10.2174/1381612003401046>
- Lehn, J.-M. (1988). Supramolecular chemistry. Scope and perspectives: Molecules-Supramolecules-Molecular devices. *J. Incl. Phenom.*, 6(4), 351–396. <https://doi.org/10.1007/BF00658981>
- Lowe, M. (2004). Activated MR Contrast Agents. *Curr. Pharm. Biotechnol.*, 5(6), 519–528. <https://doi.org/10.2174/1389201043376562>
- Lunsford, J. H. (1995). The Catalytic Oxidative Coupling of Methane. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 34(9), 970–980. <https://doi.org/10.1002/anie.199509701>
- Marion, P., Bernela, B., Piccirilli, A., Estrine, B., Patouillard, N., Guilbot, J., & Jérôme, F. (2017). Sustainable chemistry: How to produce better and more from less? *Green Chem.*, 19(21), 4973–4989. <https://doi.org/10.1039/C7GC02006F>
- Mendelsohn, L. N., MacNeil, C. S., Tian, L., Park, Y., Scholes, G. D., & Chirik, P. J. (2021). Visible-Light-Enhanced Cobalt-Catalyzed Hydrogenation: Switchable Catalysis Enabled by Divergence between Thermal and Photochemical Pathways. *ACS Catal.*, 11(3), 1351–1360. <https://doi.org/10.1021/acscatal.0c05136>
- Morales-Morales, D. (2004). Pincer Complexes: Applications in Catalysis. *Rev. Soc. Quím. Méx.*, 48(4), 338–346.
- Morales-Morales, D., Cramer, R. E., & Jensen, C. M. (2002). Enantioselective synthesis of platinum group metal complexes with the chiral PCP pincer ligand R,R-[C₆H₄-2,6-(CH₂P*PhBut)₂]. The crystal structure of R,R-PdCl{C₆H₃-2,6-(CH₂P*PhBut)₂}. *J. Organomet. Chem.*, 654(1), 44–50. [https://doi.org/10.1016/S0022-328X\(02\)01371-2](https://doi.org/10.1016/S0022-328X(02)01371-2)
- Morales-Morales, D., Grause, C., Kasaoka, K., Redón, R., Cramer, R. E., & Jensen, C. M. (2000). Highly efficient and regioselective production of trisubstituted alkenes through

- heck couplings catalyzed by a palladium phosphinito PCP pincer complex. *Inorganica Chim. Acta*, 300–302, 958–963. [https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(99\)00616-7](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(99)00616-7)
- Morales-Morales, D., Redón, R., Wang, Z., Lee, D. W., Yung, C., Magnuson, K., & Jensen, C. M. (2001). Selective dehydrogenation of alcohols and diols catalyzed by a dihydrido iridium PCP pincer complex. *Can. J. Chem.*, 79 (5), 823–829. <https://doi.org/10.1139/v01-070>
- M. Siegbahn, P. E. (2019). The mechanism for nitrogenase including all steps. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 21(28), 15747–15759. <https://doi.org/10.1039/C9CP02073J>
- O’Leary, F., & Samman, S. (2010). Vitamin B12 in Health and Disease. *Nutrients*, 2(3), 299–316. <https://doi.org/10.3390/nu2030299>
- Ortega-Gaxiola, J. I. (2020). Synthesis of Pd(II) complexes with P-N-OH ligands derived from 2-(diphenylphosphine)-benzaldehyde and various aminoalcohols and their catalytic evaluation on Suzuki-Miyaura couplings in aqueous media. *Inorganica Chim. Acta*, 504, 119460. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2020.119460>
- Qi, C., Wang, X., Chen, Z., Xiang, S., Wang, T., Feng, H.-T., & Tang, B. Z. (2021). Organometallic AIEgens for biological theranostics. *Mater. Chem. Front.*, 5(8), 3281–3297. <https://doi.org/10.1039/D0QM01130D>
- Rosenberg, B., Renshaw, E., Vancamp, L., Hartwick, J., & Drobnik, J. (1967). Platinum-Induced Filamentous Growth in *Escherichia coli*. *J. Bacteriol.*, 93(2), 716–721. <https://doi.org/10.1128/jb.93.2.716-721.1967>
- Sinha, N., & Hahn, F. E. (2017). Metallosupramolecular Architectures Obtained from Poly-N-heterocyclic Carbene Ligands. *Acc. Chem. Res.*, 50(9), 2167–2184. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.7b00158>
- Valdez-Camacho, J. R., Pérez-Salgado, Y., Espinoza-Guillén, A., Gómez-Vidales, V., Alberto Tavira-Montalvan, C., Meneses-Acosta, A., Leyva, M. A., Vázquez-Ríos, M. G., Juaristi, E., Höpfl, H., Ruiz-Azuara, L., & Escalante, J. (2020). Synthesis, structural characterization and antiproliferative activity on MCF-7 and A549 tumor cell lines of [Cu(N-N)(β3-aminoacidoate)]NO₃ complexes (Casiopeínas®). *Inorganica Chim. Acta*, 506, 119542. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2020.119542>
- van Koten, G., & Gossage, R. A. (Eds.). (2016). *The Privileged Pincer-Metal Platform: Coordination Chemistry & Applications*, 54. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22927-0>
- Visbal, R., & Gimeno, M. C. (2014). N-heterocyclic carbene metal complexes: Photoluminescence and applications. *Chem. Soc. Rev.*, 43(10), 3551–3574. <https://doi.org/10.1039/C3CS60466G>
- Werner, A. (1899). Beitrag zur Konstitution anorganischer Verbindungen. *Z. Anorg. Chem.*, 19(1), 158–178. <https://doi.org/10.1002/zaac.18990190114>
- Zhang, P., & Sadler, P. J. (2017a). Redox-Active Metal Complexes for Anticancer Therapy: Redox-Active Metal Complexes for Anticancer Therapy. *Eur. J. Inorg. Chem.*, 2017(12), 1541–1548. <https://doi.org/10.1002/ejic.201600908>

- Zhang, P., & Sadler, P. J. (2017b). Advances in the design of organometallic anticancer complexes. *J. Organomet. Chem.*, 839, 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2017.03.038>
- Zou, S.-J., Shen, Y., Xie, F.-M., Chen, J.-D., Li, Y.-Q., & Tang, J.-X. (2020). Recent advances in organic light-emitting diodes: Toward smart lighting and displays. *Mater. Chem. Front.*, 4(3), 788–820. <https://doi.org/10.1039/C9QM00716D>

2021 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado



FACULTAD DE ODONTOLOGÍA, UACH



TECNOCIENCIA CHIHUAHUA
Revista de ciencia y tecnología



UACH
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Dirección de
Investigación y Posgrado



**ESTATUA DE SANTA APOLONIA DE ALEJANDRÍA,
PATRONA DE LOS DENTISTAS
FACULTAD DE ODONTOLOGÍA, UACH**



TECNOCIENCIA CHIHUAHUA
Revista de ciencia y tecnología