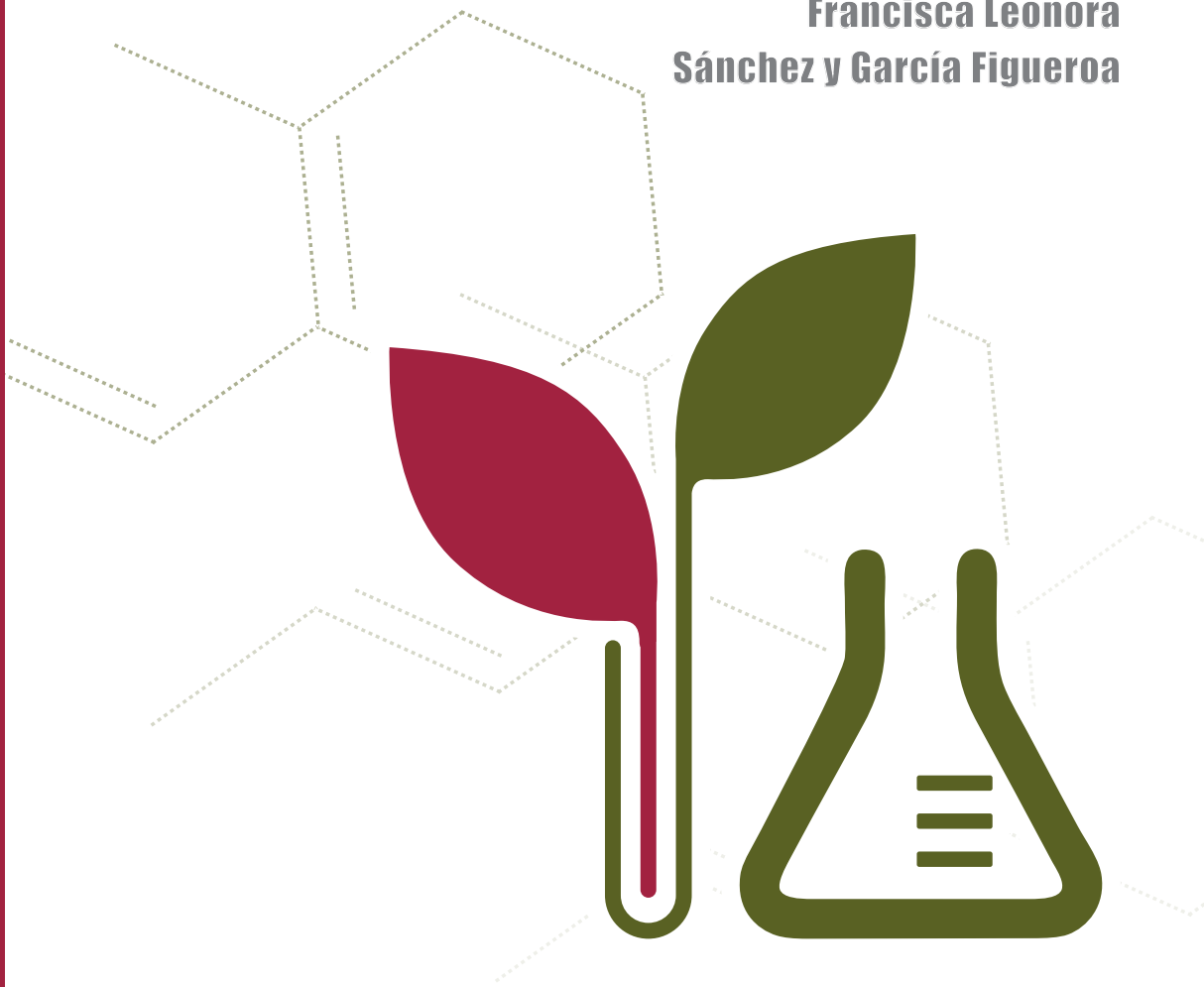


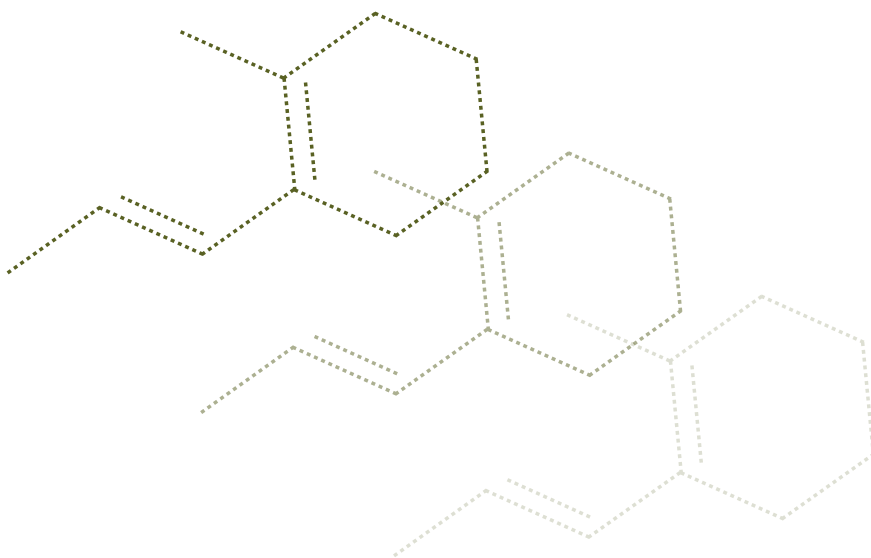
Fitoquímica

Francisca Leonora
Sánchez y García Figueroa



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

Fitoquímica



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores Zaragoza



Dr. Vicente Jesús Hernández Abad
Director

Dra. Mirna García Méndez
Secretaría General

Dr. José Luis Alfredo Mora Guevara
Secretario de Desarrollo Académico

CD. Yolanda Lucina Gómez Gutiérrez
Secretaría de Desarrollo Estudiantil

Mtro. Luis Alberto Huerta López
Secretario Administrativo

Dra. María Susana González Velázquez
Jefa de la División de Planeación Institucional

Dra. Rosalva Rangel Corona
Jefa de la División de Vinculación

Dr. David Nahum Espinosa Organista
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación

Lic. Carlos Raziel Leañes Castillo
Diseño de portada

Claudia Ahumada Ballesteros
Diseño y formación de interiores

Datos para catalogación bibliográfica

Autora: Dra. Francisca Leonora Sánchez y García Figueroa.

Fitoquímica.

UNAM, FES Zaragoza.

Peso: 2.6 MB.

ISBN: 978-607-30-6019-6.

Diseño de portada: Carlos Raziel Leañes Castillo.

Formación de interiores: Claudia Ahumada Ballesteros.

Este libro fue dictaminado a través del Comité Editorial de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza y se aprobó en diciembre de 2022.

DERECHOS RESERVADOS

Queda prohibida la reproducción o transmisión total o parcial del texto o las ilustraciones de la presente obra bajo cualesquiera formas, electrónicas o mecánicas, incluyendo fotocopiado, almacenamiento en algún sistema de recuperación de información, dispositivo de memoria digital o grabado sin el consentimiento previo y por escrito del editor.

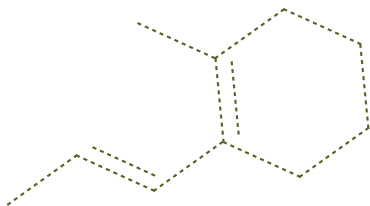
Fitoquímica.

D.R. © Universidad Nacional Autónoma de México

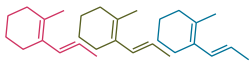
Av. Universidad # 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma de México, C.U.,
Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

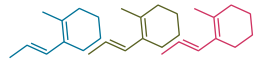
Av. Guelatao # 66, Col. Ejército de Oriente,
Alcaldía Iztapalapa, C.P. 09230, Ciudad de México, México.



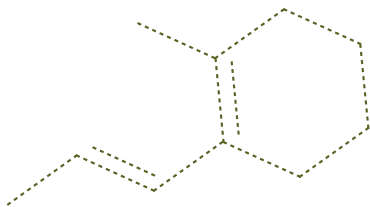
Introducción	9
Capítulo 1. Fitoquímica y metabolitos	11
Bibliografía	15
Capítulo 2. Lípidos	17
Triglicéridos	17
Ácidos grasos	18
Ácidos grasos omega	20
Compuestos insaponificables	22
Terpenos	23
Hidrocarburos	23
Pigmentos	24
Poliacetilenos	24
Ceras	25
Cutina	26
Cera de carnauba	27
Cera de candelilla	27
Cera de jojoba	28
Referencias	29



Capítulo 3. Compuestos terpenoides	31
Aceites esenciales	32
Monoterpenos	33
Iridoides	36
Sesquiterpenos	40
Sesquiterpenos alifáticos	40
Sesquiterpenos bicíclicos	40
Diterpenos	42
Diterpenos acíclicos	43
Diterpenos bicíclicos	43
Diterpenos tricíclicos	44
Triterpenos	46
Tetraterpenos	46
Politerpenos	50
Bibliografía	51
Capítulo 4. Triterpenos	55
Esteroides	55
Esteroles	56
Glucósidos cardiacos	58
Brasinoesteroides	60
Fitoecdisteroides	61
Triterpenos comunes	61
Cucurbitacinas	63
Saponinas	64
Bibliografía	74
Capítulo 5. Compuestos fenólicos	79
Fenoles simples	80
Fenilpropanoides	84
Flavonoides	86



Chalconas	88
Flavonas	89
Flavonoles	90
Isoflavonas	91
Flavanoles	92
Flavanona	93
Flavandiol	93
Antocianinas	93
Pterocarpanos	94
Cumarinas	96
Ligninas	99
Taninos	101
Quinonas	104
Bibliografía	107
Capítulo 6. Compuestos nitrogenados	113
Hormonas vegetales	113
Alcaloides	114
Aminas	116
Alcaloides del tropano	118
Alcaloides de quinolina e isoquinolina	119
Alcaloides purínicos	122
Alcaloides de la piperidina	123
Aminoácidos no proteicos	123
Glucósidos	124
Glucósidos cianogénicos	124
Glucosinolatos	126
Betalaínas	128
Bibliografía	132



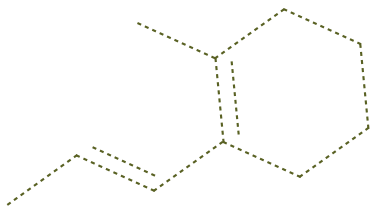
Después de impartir cursos de Química Orgánica, Biotecnología y Fitoquímica, de trabajar con alumnos en el laboratorio, de servicio social y tesis, me he dado cuenta que, para una comprensión más rápida de la Química de las plantas, es necesario un libro de Fitoquímica. Existen muchos, es cierto; sin embargo, falta uno que sirva como introducción a los grupos de compuestos más importantes en las plantas con ejemplos interesantes. Además de una lista selecta de material bibliográfico que ayude a comprender y analizar la información sobre los metabolitos que se producen en el reino vegetal. Cómo son. Cuáles son sus propiedades. Para qué sirven. Por qué los producen. Dónde y cómo encontrar información acerca de ellos.

El contenido que aquí se presenta es de utilidad para Biólogos, Químicos, Enfermeras, Médicos, Etnobotánicos, Ecólogos, Investigadores, Industriales, Nutriólogos, Agricultores e interesados en la Medicina Herbolaria.

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento a la Lic. en Ciencias de la Comunicación Sofía Martínez Sánchez por la revisión del manuscrito.

La autora



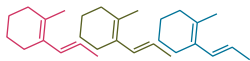
La química es la ciencia que estudia las sustancias que forman la materia, sus estructuras, propiedades y las transformaciones derivadas de su naturaleza estructural. Los compuestos que forman a los seres vivos contienen átomos de carbono. Estos átomos pueden unirse entre sí: forman cadenas, ciclos y ramificaciones; además se unen con átomos de diferente naturaleza como H, O, N, S y otros, sean metales, fósforo y halógenos. Por ello forman más compuestos que todos los demás elementos de la tabla periódica juntos.

La química orgánica es la química de los compuestos de carbono. El estudio de los productos naturales, es el punto de partida para ver la importancia de estos compuestos en la biología, ecología, etnobotánica, farmacia, medicina, agricultura, medicina veterinaria, enfermería, nutrición y en las industrias de alimentos, farmacéuticas, de cosméticos e infinidad más.

La información que se presenta en este libro es resultado de la experiencia adquirida durante 45 años de trabajar en la docencia y una recopilación de los trabajos científicos de varias y varios investigadores del mundo. Este es un trabajo de recopilación, análisis y redacción. En cada capítulo se adiciona la bibliografía que se utilizó para su redacción. Con ello el estudiante podrá tener acceso a los temas en los que desee profundizar.

El libro está organizado por tipos de compuestos, con los siguientes capítulos

1. Fitoquímicos y metabolismo secundario
2. Lípidos
3. Compuestos terpenoides
4. Triterpenos



5. Compuestos fenólicos

6. Compuestos de nitrógeno

Primero se presentan las definiciones pertinentes, la estructura química fundamental, las especies vegetales que los contienen, sus propiedades y usos. Cada sección tiene una breve introducción en la que se pretende proporcionar conocimientos generales sobre el tema a tratar en particular. Posteriormente se detalla la información de los fitoquímicos más relevantes, para terminar con la bibliografía utilizada.

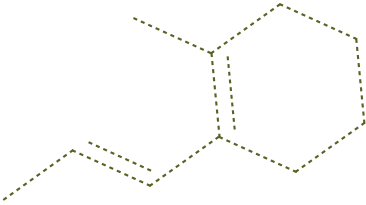
Con esta bibliografía podrán profundizar en los temas y conocer los avances recientes en las diferentes áreas que se relacionan con la fitoquímica.

Palabras para el estudiante

La química está en la naturaleza, en nuestro cuerpo y en la vida diaria. Con este libro quiero mostrar a nuestros estudiantes que no hay fronteras bien definidas en la ciencia: sin la química no hay vida y la vida es biología.

Con esta obra también quiero mostrar a nuestros estudiantes la grandeza de las plantas. Personalmente, creo que son los mejores químicos del planeta y producen sustancias adecuadas para cada momento de su vida a partir de materiales simples. Son capaces de sintetizar gran diversidad de compuestos que sirven para hacer sus tejidos, crecer y desarrollarse al mismo tiempo que hacen estrategias de protección y señalización. Sin ellas no existiríamos.

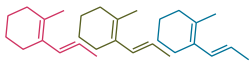
Espero que este libro los invite a estudiar la química de las plantas y, en general, la química de todos los productos naturales para adentrarse más en el conocimiento de la vida. Espero hacer honor a los fitoquímicos, quienes son de gran valor para la humanidad.



Durante billones de años de evolución la naturaleza ha desarrollado una enorme diversidad de especies. Se estiman al menos 250,000 especies diferentes de plantas, más de 30 millones de especies de insectos, 1.5 millones de especies de hongos y números similares de algas. Todas estas especies coexisten en los ecosistemas e interactúan entre sí en varias formas. Los compuestos químicos que producen estas interacciones juegan un papel importante en la defensa, simbiosis y polinización. Considerando el número de organismos y el número de interacciones posibles entre ellos, no es sorprendente la enorme variedad de los metabolitos que se encuentran dentro de los organismos (Agrawal y Weber, 2015).

Ahora bien, el hombre ha usado a las plantas para su alimentación, en su vestido, como materiales de construcción y para combatir enfermedades. En un punto de la historia científica comenzaron los estudios químicos de las plantas. Estos conducen a la clasificación de dos tipos de compuestos: los metabolitos primarios y los metabolitos secundarios.

Los compuestos que son imprescindibles para las funciones vitales de las plantas (crecer y reproducirse) son los metabolitos primarios, entre ellos se encuentran las proteínas, los carbohidratos, los lípidos (grasas y aceites), los ácidos nucleicos y las vitaminas. Los animales y el hombre usan los metabolitos primarios principalmente como alimento. Aunque también tienen otras aplicaciones: enzimas como las lipasas y proteasas de las plantas, pueden utilizarse en la fabricación de detergentes en polvo, la pectinasa se utiliza para mejorar la extracción de jugos. Diversos preparados enzimáticos capaces de degradar los polisacáridos de la pared celular y los tejidos sirven para extraer colorantes, aceites, almidón y antioxidantes, las celulasas son útiles en la fabricación de textiles. Los carbohidratos tienen aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica, cosmética, del papel, etc. Los lípidos además de ser valiosos en la alimentación, tienen valor en las industrias farmacéutica, de plásticos, barnices y pinturas (Ovando Chacón, 2005).



Por otro lado los compuestos de las plantas que la gente usa con fines diferentes a la alimentación son los metabolitos secundarios. Lo curioso de este tipo de metabolitos es que al principio se pensó que eran productos de desecho porque no participan de manera directa en los procesos de crecimiento, desarrollo o reproducción de las plantas, se consideró que eran “no indispensables para la supervivencia del ser vivo”. Actualmente se sabe que protegen a las plantas de enfermedades y que atraen a los polinizadores, entre otras funciones. La línea divisoria entre metabolitos primarios y secundarios cada vez se va haciendo más borrosa, existen varios casos en donde se observa que cierta hormona además de funcionar como hormona, funciona como fitoquímico de defensa; que un metabolito primario actúa también como regulador y que un metabolito secundario que actúa como defensa, también es regulador y metabolito primario (Erb y Kliebenstein, 2020).

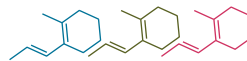
Prácticamente todas las sustancias que el hombre ha obtenido de las plantas a lo largo de su historia con algún fin diferente al alimentario, se consideran productos del metabolismo secundario. Los metabolitos secundarios con frecuencia tienen color, olor, sabor y actividad biológica y son especialmente abundantes en organismos que carecen de un sistema inmunológico (Almaraz, 2006).

Luckner (2013) observó que algunas rutas biosintéticas del metabolismo primario, llevan a la formación de metabolitos secundarios y las rutas biosintéticas de los metabolitos secundarios conducen a una amplia variedad de compuestos, característicos de diversas familias.

La fitoquímica es la disciplina científica que tiene como objeto la obtención de los compuestos elaborados por las plantas a través de la extracción, aislamiento, purificación y elucidación de la estructura química. También le interesa la caracterización de la actividad biológica de diversas sustancias producidas por los vegetales que benefician o perjudican la salud humana, a las plantas, animales y microorganismos.

El término fitoquímico fito viene de φυτόν (*phuton*, planta). Se usa para las sustancias de las que están hechas las plantas (Cseke, 2006) y realizan diferentes funciones útiles para los hombres como alimento, aromas, saborizantes, colorantes, espesantes, insecticidas, herbicidas, hormonas, entre otros. El término fitoquímico se usa principalmente para hacer referencia a los compuestos bioactivos de las plantas; actualmente con frecuencia al estudiarlas químicamente se encuentran nuevas estructuras que son útiles en la producción de nuevos medicamentos (Olivoto, 2016).

El metabolismo secundario está asociado con los mecanismos de defensa de las plantas, esto se debe a que en condiciones naturales están rodeadas de enemigos potenciales,



por lo que han creado mecanismos para su supervivencia y combatir herbívoros, microorganismos, virus o plantas que compitan con ellas (Dixon 2001; Agrawal, 2015). El metabolismo secundario representa caracteres adaptativos sujetos a la selección natural durante la evolución (Wink, 2003). En la reproducción actúa generando compuestos señalizadores que atraen a los polinizadores y a los dispersores de semillas. Con frecuencia son específicos del linaje y ayudan a las plantas a interactuar con no solamente el ambiente biótico, también con el abiótico (Hartmann, 2007). De esta forma, las plantas son una fuente importante de compuestos como alcaloides, ceras, antocianinas, flavonoides, quinonas, lignanos, acetogeninas, terpenos, esteroides y otros. En el cuadro 1 se pueden observar en forma simplificada las diferentes rutas metabólicas que conducen a algunos de los metabolitos secundarios.

A diferencia del metabolismo primario, el secundario presenta una gran variabilidad, por la gran diversidad de funciones que realizan los metabolitos secundarios en las plantas. Químicamente, los metabolitos secundarios de las plantas se clasifican en tres grupos principales: terpenoides, compuestos fenólicos y compuestos de nitrógeno (Balasundram y col., 2006).

Además, la fitoquímica se encarga de la clasificación de los componentes activos de acuerdo al grupo funcional al que pertenecen y estudia los métodos analíticos para comprobar su calidad y cantidad en un producto. Interesa a la fitoquímica la distribución de los compuestos en las diferentes partes de la planta, de las especies y las familias en diferentes condiciones ambientales. Según Harborne 1991: “La fitoquímica es una disciplina que está entre la química orgánica de los productos naturales y la bioquímica”. La comparación de especie es la piedra angular de la biología y se usa para estudiar ecología y la evolución de los rasgos defensivos y reproductivos de las plantas. La evolución de la química de los metabolitos secundarios de las plantas en respuesta a la herbivoría de insectos es un clásico ejemplo de coevolución (Anaya, 2003).

Recapitulando, las plantas superiores soportan una gran variedad de tensiones ambientales, nutricionales, por herbivoría, estrés acuoso y otras. Para combatir estas tensiones se aclimatan a sí mismas mediante la producción de diversos metabolitos secundarios. Estos metabolitos secundarios además tienen aplicaciones industriales, son útiles para la comercialización (Verpoorte y col. 2002).

Cuando no se requiere una gran producción de metabolitos secundarios es posible obtenerlos directamente de las plantas. Sin embargo, debido a las limitaciones de su producción por plantas y de la extracción natural de los fitoquímicos, se requieren procesos biotecnológicos. Estos son aquellos en donde la célula y los tejidos vegetales

son las alternativas para la activación de la producción *in vitro* de metabolitos secundarios bioactivos.

La implementación de estrategias para aumentar la productividad, incluyendo a la obtención del producto, pueden resolver las limitaciones a las que se enfrenta la tecnología para aumentar la comercialización (Narayani y Srivastava, 2017).

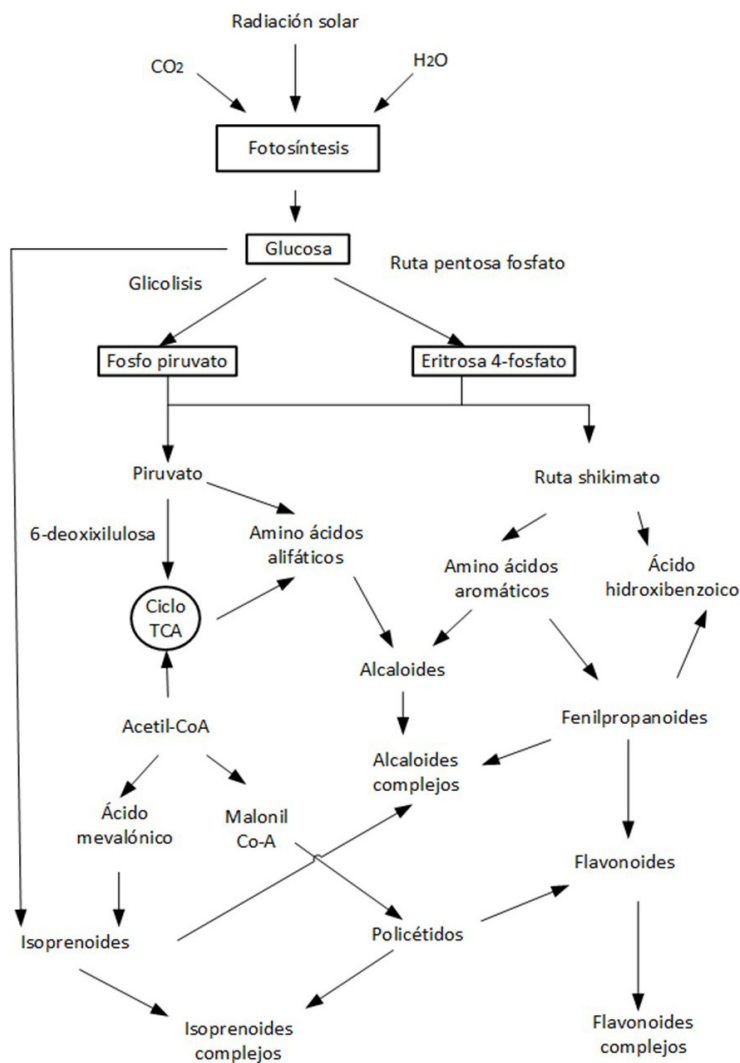
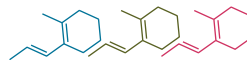
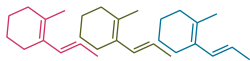


Figura 1. Biosíntesis de metabolitos secundarios.

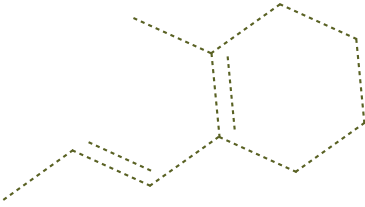


Bibliografía

- Agrawal AA, Weber MG.(2015) On the study of plant defence and herbivory using comparative approaches: how important are secondary plant compounds. *Ecology Letters* 18: 985-91.
- Almaraz, N., Ávila, J., Delgado A., Naranjo-Jiménez N. y Herrera, J. (2006) El metabolismo secundario de las plantas, un nuevo concepto. <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/8292/1/METABOLISMO%20SECUNDARIO-ALMARAZ.pdf>
- Anaya-Lang, A. (2003) *Ecología Química*. México: Plaza y Valdés Editores pags. 77-92.
- Balasundram, N., SundramK., Samman, S. (2006) Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses *Food chemistry* 99: 191-203.
- Cseke L., Kirakosyan A., Kaufman P., Warber S., Duke J. y Brielmann H. (2006) *Natural Products from Plants*. Second Edition. CRC. USA: Taylor & Francis.
- Dixon R.A. (2001) Natural products and plant disease resistance. *Nature* 411: 843–847.
- Dodds P., Rathien J. (2010) Plant immunity: towards an integrated view of plant-pathogen interactions. *Nature Reviews Genetics* 11: 539-548.
- Erb M and Kliebenstein (2020) Plant secondary metabolites as defenses, regulators and primary metabolites- The blurred functional trichotomy *Chemistry Biology and Ecology* DOI-10.31219/osf.io/6ba7r
- Harborne, J. B., (1991) *Phytochemical Methods. A guide to Modern Techniques of Plant Analysis*. Second Edition. London: Chapman and Hall.
- Hartmann T (2007) From waste products to ecochemicals: Fifty years research of plant secondary metabolism. *Phytochemistry* 68: 2831–2846.
- Luckner, M. (2013) *Secondary metabolism in microorganisms, plants and animals*. Springer Science and business media.



- Narayani M., and Srivastava N. (2017) Elicitation: a stimulation of stress in in vitro plant cell/tissuecultures for enhancement of secondary metaboliteproduction. *Phytochem Rev* (2017) 16:1227–1252.
- Olivoto, T., Nardino, M., Carvalho, I. R., Follmann, D. N., Szareski, V. J., Ferrari, M., de Pelegrin, A. Jr., & de Souza, V. Q. (2017). Plant secondary metabolites and its dynamical systems of induction in response to environmental factors: A review. *African Journal of Agricultural Research*, 12: 71-84.
- Ovando-Chacón,S., Waliszewski K. (2005) Commercial cellulases preparations and their applications in extractives processes. *Trópico húmedo* 21: 111-120.
- Senthil-Kumar M., MysoreK.S.(2013) Nonhost resistance against bacterial pathogens: retrospectives and prospects. *Annu. Rev. Phytopathol.*51: 407-427.
- Verpoorte R., Contin A. y Memelink J. (2002) Biotechnology for the production of plant secondary metabolites. *Phytochemistry Reviews* 1: 13-25.
- Wink M.(2003) Evolution of secondary metabolites from an ecological and molecular phylogenetic perspective. *Phytochemistry* 64: 3-19.

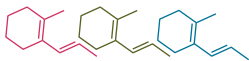


Los lípidos son importantes en las células de las plantas debido al aislamiento que proporcionan; sirven para tener protección térmica, conforman membranas celulares formando capas impermeables y tienen múltiples funciones especializadas por su estructura. También tienen muchas aplicaciones en la industria de alimentos, farmacéutica, cosmética, de combustibles, forrajes y reactivos químicos (Vallerio y cols. 2014). Están formados principalmente por átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno, algunos contienen fósforo y azufre.

Dentro de los lípidos existen compuestos con estructuras muy diferentes, pero una propiedad que comparten es que no son solubles en agua, son hidrófobos, por ser no polares. Ejemplos de lípidos son las grasas y los aceites, las ceras y los esteroides. Los más abundantes son los glicerolípidos. También se consideran lípidos a moléculas anfipáticas (tienen un extremo hidrófilo y otro hidrófobo).

Triglicéridos

Algunas plantas almacenan energía en forma de aceites, especialmente en las semillas y los frutos. Como los triglicéridos contienen más enlaces carbono-hidrógeno que los carbohidratos, proporcionan más energía. Las grasas, al no ser solubles en agua, no la absorben y por ello almacenan más energía que el glucógeno, el cual sí absorbe agua. Éste es el motivo por el cual desempeñaron un papel fundamental en la evolución (Li-Beisson, 2016). Dependiendo de la especie varía el contenido de grasa en las semillas: el arroz, la cebada y la avena contienen de 0.6 a 1.7 %; maíz 69-74%; trigo 2.6; las leguminosas como soya, frijol y haba contienen entre el 2 al 7% y las oleaginosas (ajonjolí, almendras, avellana, cacao, cacahuete, nuez, semilla de calabaza, coco 47-68% del peso seco en semillas, hojas y frutas.



Los triacilglicéridos reciben el nombre de grasas si son sólidos a temperatura ambiente y aceites si son líquidos. *Aceite* es una palabra árabe “az-zait” que significa jugo de aceituna. Las grasas y los aceites tienen una molécula de glicerol unida a tres de ácidos grasos por medio de un grupo funcional éster en cada unión, el triéster resultante es un triacilglicérido, también llamado triacilglicerol o triglicérido. Los ácidos grasos pueden tener desde 4 hasta 36 átomos de carbono, casi siempre en número par. Los triglicéridos pueden tener tres ácidos grasos idénticos o diferentes. Aunque muchos ácidos grasos se encuentran en las moléculas de grasa, algunos otros están libres en el cuerpo y se consideran como un tipo aparte.

Cuando el glicerol reacciona con tres moléculas de ácido esteárico forma el éster triestearato de glicerilo.

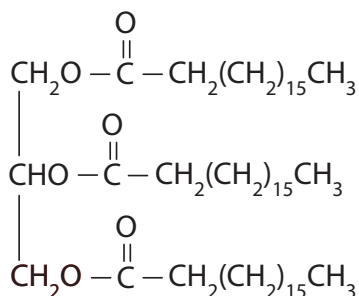
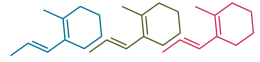


Figura 1. Triestearato de glicerilo.

Los glicéridos son los lípidos más abundantes en las plantas (tienen ácidos grasos esterificados en dos carbonos del glicerol y otra molécula que puede ser un grupo fosfato (glicerofosfolípidos) o un glúcido (gliceroglucolípidos). Estos compuestos son moléculas anfipáticas formadas por dos colas o cadenas hidrocarbonadas apolares (hidrofóbicas) y una cabeza polar (hidrófila).

Ácidos grasos

Los ácidos grasos son ácidos carboxílicos con diferentes longitudes de cadena de carbono y diferentes grados de saturación, se llaman saturados cuando no hay dobles enlaces, es



decir, solamente tienen enlaces sencillos. Si hay en la molécula un doble enlace se trata de un ácido graso monoinsaturado y si son varios los dobles enlaces, se trata de un ácido graso poliinsaturado.

Las propiedades de los ácidos grasos dependen de la longitud de su cadena de carbonos y del grado de saturación. Los ácidos grasos no saturados tienen puntos de fusión más bajos que los ácidos grasos saturados de la misma longitud. Esto puede si comparamos dos ácidos grasos de dieciocho átomos de carbono: el ácido esteárico, saturado (p.f. 69.6°C) con el ácido oleico que tiene un enlace doble *cis* entre los átomos de carbono 9 y 10 (p.f. 15°C). Los puntos de fusión de los ácidos poliinsaturados de la serie C18 son menores.

La longitud de la cadena también afecta el punto de fusión como en el caso del ácido palmítico (C16) que tiene su punto de fusión menor por 6.5°C al del ácido esteárico (C18).

Así observamos que la cadena corta y la insaturación aumentan la fluidez de los ácidos grasos y sus derivados. Se ha visto que las plantas que crecen en temperaturas más frías tienen un mayor contenido de ácidos trienoicos y que en las plantas del desierto cuando aumenta la temperatura se produce una reducción de los ácidos trienoicos como el α -linolénico (18:3) y el hexadecatrienoico (16:3) (Murakami y col. 2000).

Los enlaces dobles en los ácidos grasos insaturados, como otros tipos de enlaces dobles, pueden existir en una configuración *cis* o *trans*.

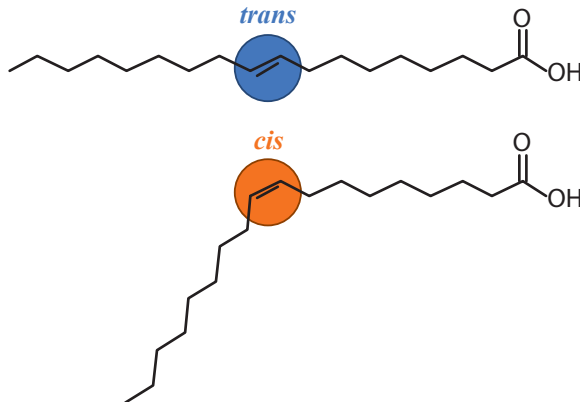
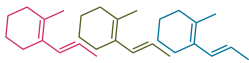


Figura 2. Ácidos grasos *trans* y *cis*.



Las grasas *trans* se encuentran en muy pequeñas cantidades en algunas semillas. Se producen fácilmente mediante un procedimiento industrial, la hidrogenación parcial. Esta hidrogenación es una forma conveniente de obtener sustancias parecidas a la mantequilla a precio de aceite. Desafortunadamente las grasas *trans* tienen efectos nocivos en la salud humana por la estrecha relación entre las grasas *trans* y la cardiopatía coronaria. La Administración de Alimentos y Medicamentos, (Food and Drug Administration, FDA, por sus siglas en inglés) recientemente prohibió las grasas *trans* en los alimentos.

Ácidos grasos omega

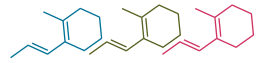
Los ácidos grasos omega reciben este nombre por la estructura de sus moléculas, el carbono más alejado del grupo carboxilo de cualquier ácido graso es el carbono omega. La molécula llamada ácido graso omega-3 es aquella en la que el primer enlace doble en un ácido graso poliinsaturado se encuentra entre el tercer y cuarto carbono del extremo omega. En los ácidos grasos omega-6 el primer enlace doble se encuentra entre el sexto y séptimo carbono del extremo omega (contrario al grupo carboxilo).

A su vez, existen diferentes tipos de ácidos grasos omega-3 y omega-6, sus precursores son: ácido alfa-linolénico (ALA) para los omega-3 y ácido linoléico (LA) para los omega-6. Su función en las plantas es proporcionar flexibilidad a la membrana celular, permitiendo el movimiento de proteínas en su superficie y dentro de la bicapa lipídica.

El cuerpo humano necesita estas moléculas y sus derivados pero no los puede sintetizar. Por ello los ácidos linoleico y linoléico se clasifican como ácidos grasos esenciales y deben obtenerse de la dieta. Algunas semillas, como la chía y la linaza, son buenas fuentes de ácidos grasos omega-3.

Los ácidos grasos omega-3 y omega-6 tienen al menos dos enlaces *cis*-insaturados, lo que les da una forma curva para desempeñar diversas funciones en el cuerpo humano. Son precursores de la síntesis de moléculas de señalización importantes, como las que regulan la inflamación y el estado de ánimo (Calder, 2017).

Los ácidos omega-3 pueden reducir el riesgo de muerte súbita por ataques cardíacos, bajar la concentración de triglicéridos en la sangre, disminuir la presión arterial y prevenir la formación de coágulos sanguíneos (Calder, 2017).



Estos dos ácidos omega 3 y omega 6, inhiben la producción de las prostaglandinas inflamatorias y estimulan la producción de prostaglandinas de la serie 1 y 3 (PGE1 y PGE3), que tienen efecto antiinflamatorio, vasodilatador y antiagregante plaquetario. De esta forma, disminuye el riesgo de trombosis (Damude y Kinney 2008).

Los ácidos grasos son un ejemplo de metabolitos primarios que además de constituir la membrana celular de las plantas, tienen actividad biológica en el hombre, es decir que funcionan también como metabolitos secundarios; por lo que puede verse que no hay una barrera muy definida entre los dos tipos de metabolitos primarios y secundarios (Erb y Kliebenstein, 2020).

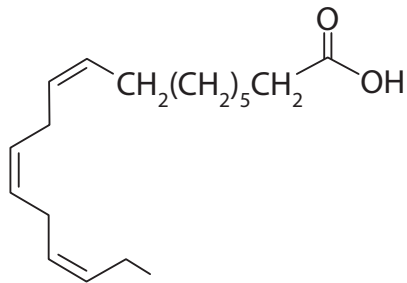
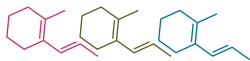


Figura 3. Estructura del ácido alfa-linolénico (ALA), se puede observar su forma rizada debido a sus tres dobles enlaces *cis*.

Los aceites vegetales son la fuente principal de lípidos comestibles que se consumen en el mundo. Se extraen del endospermo de las semillas que contienen aceite o del pericarpio de las frutas de alto contenido de aceite, principalmente palma y aceituna. Otro fruto importante con alto contenido de aceite es el aguacate (Ozdemir y Topuz, 2004).

Las semillas de plantas como la aceituna, palma, coco y cacahuate, se utilizan comercialmente en la fabricación de jabones y de pinturas, además son importantes como alimento. En el cuadro 1 se presentan los ácidos grasos más abundantes en algunas especies de algas y en hojas y semillas de algunas plantas.

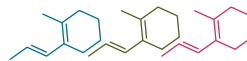


Cuadro I. Composición de ácidos grasos de diversos aceites. El número antes de los puntos es el número de carbonos, el siguiente señala el número de enlaces dobles.

Tipo de aceite	Composición de ácidos grasos (% del total)						
	16:0	16:1	18:0	18:1	18:2	18:3	otros
Hoja palma	4	-	2	62	20	10	2
Semilla de palma	44	tr	4	39	11	1	1
Hoja de maíz	8	4	2	7	8	66	5
Hoja chícharo	12	3	1	2	22	56	5
Hoja de espinaca	13	3	0.01	7	16	56	5
<i>Scenedesmus obliquus</i>	35	2	-	9	6	30	36
<i>Chlorella vulgaris</i>	26	8	-	2	33	20	9
Aguacate mesocarpio	22	6	32	59	10	0.17	0.33
Semilla de soya	43	-	5.4	40	10	.4	1.1
Semilla de cacahuete	10	-	3.6	21	22	-	-
Semilla de olivo	-	-	-	69.5	8	6	-

Compuestos insaponificables

La saponificación es una reacción en la que se fraccionan los lípidos extraídos de los tejidos vegetales, primero se lleva a cabo una hidrólisis básica (saponificación) y después los productos se extraen con un disolvente no polar, estos productos son los compuestos insaponificables. Esta reacción de hidrólisis alcalina tiene la característica de que algunos lípidos, los que tienen el grupo funcional éster, se convierten en jabón (soluble en agua) y los que no tienen el grupo éster no reaccionan con la base y continúan siendo solubles en el disolvente no polar. De esta forma se pueden separar los lípidos saponificables de los insaponificables, por medio su solubilidad, ya que los jabones son las sales de los ácidos grasos y por su estructura pueden disolverse en el agua, mientras que los lípidos insaponificables permanecen insolubles al agua y de disuelven en solventes no polares.



Los compuestos insaponificables son los compuestos lipídicos que no se hidrolizan en esta reacción de saponificación como: los hidrocarburos, los terpenos y los esteroides. Los lípidos saponificables son los ésteres como los triacilglicéridos principalmente y los ésteres cerosos.

Terpenos

Los terpenos destacan por su contribución al aroma de frutos y flores, algunos de ellos son vitaminas, en este grupo también se incluyen esteroides como el sitosterol y el campesterol, se incluyen hidrocarburos funcionalizados o no funcionalizados.

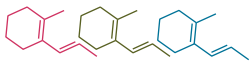
Hidrocarburos

Los hidrocarburos son un grupo pequeño y son los menos polares de todos los productos naturales. Contienen solamente C e H. Normalmente, tienen un número impar de átomos de carbono, resultado de la descarboxilación de los ácidos grasos. Ejemplos de plantas con hidrocarburos son el aceite de oliva contiene hidrocarburos de C13 a C28 y algunas algas acumulan hidrocarburos como *Botryococcus braunii*.

Los hidrocarburos pueden ser saturados o no saturados, los insaturados tienen menos hidrógenos que los saturados y por lo tanto están más oxidados. Pueden tener cadenas rectas o las cadenas pueden tener ramificaciones o formar anillos. Son grasos, insolubles y menos densos que el agua. Los hidrocarburos con anillos aromáticos son más estables. En las plantas vivas los hidrocarburos saturados forman parte de las ceras que cubren las superficies de los frutos como el n-nonacosano y el hentriacontano. Los alcanos ramificados, a excepción de los terpenos están presentes con poca frecuencia en las plantas.

El etileno es un hidrocarburo insaturado, el más simple, es una hormona vegetal importante que produce la maduración de los frutos, la abscisión de las hojas de los árboles y que los tallos engruesen. Los alquenos de cadena larga son comunes en las ceras de la caña de azúcar y de algunos frutos.

En las plantas de especies del carbonífero que sirvieron como alimento a los dinosaurios en África, se han aislado alcanos C10 a C37. También se han encontrado hidrocarburos



aromáticos en el petróleo de Túnez, provenientes de algas, como los esteranos y los hopanos (Mohamed y col., 2013).

Se consideran hidrocarburos funcionalizados a los halogenuros de alquilo, los alcoholes y los hidrocarburos con azufre. Son menos abundantes pero se les encuentra con frecuencia en las plantas.

Pigmentos

Otro tipo de lípidos son los pigmentos vegetales carotenoides y clorofilas. Aprovechando su hidrofobicidad, los lípidos se separan de los tejidos vegetales con disolventes orgánicos como cloroformo, éter y hexano.

Poliacetilenos

Los poliacetilenos son productos insaturados que pueden contener dobles y triples enlaces. Con frecuencia tienen otros grupos funcionales adicionales. La zanahoria contiene cuatro poliacetilenos como el falcarinol el cual es una neurotoxina, se encuentra en sus raíces en una concentración de 2 mg/kg de peso seco (Figura 6). Las zanahorias son la mayor fuente de estos poliacetilenos. Se ha comprobado que el falcarinol inhibe transformaciones neoplásicas en el colon y junto con el facarindiol hay un efecto sinérgico *in vitro*, con un aumento significativo en la actividad citotóxica.

Los poliacetilenos están presentes en forma regular en las familias Campanulacea, Asteraceae, Araliaceae, Pittosporaceae, y Apiaceae. Se les encuentra en hongos superiores en cadenas de C_8 a C_{14} , mientras que los de plantas superiores tienen de C_{14} a C_{18} en su cadena. Biosintéticamente los poliacetilenos son resultado de la deshidrogenación enzimática de las olefinas correspondientes. Se ha visto que el poliacetileno de *Vicia faba* actúa como fitoalexina.

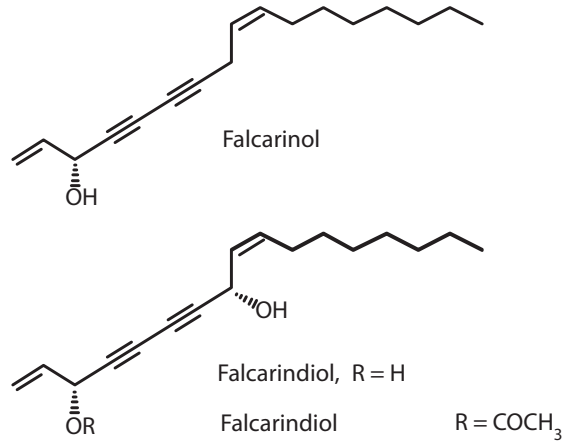
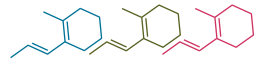


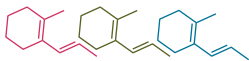
Figura 4. El falcarinol y falcarindiol se encuentran en muchas plantas alimenticias de la familia Apiaceae. (Kobaek-Larsen y col. 2017).

Ceras

Las ceras de las plantas forman una capa superficial que impide el paso del agua. Estas superficies cerosas son más frecuentes en plantas que están sometidas a largos períodos de sequía, puesto que la cera les permite conservar su humedad interna impidiendo la transpiración excesiva.

Las ceras no están limitadas a xerofitas, también se encuentran en mesofitas como la caña de azúcar y el bambú. Se encuentran con abundancia, en la familia de las Crasuláceas, entre las que se encuentran hierbas y arbustos suculentos, con hojas y tallos gruesos que almacenan agua y que se conocen comúnmente con los nombres de conchitas, lenguas de vaca, colas de borrego, plantas de jade y siemprevivas. En algunas plantas, como la jojoba se acumulan las ceras y se les denomina ceras de almacenamiento.

La transición de un ambiente acuático a la vida terrestre requirió de varios cambios, entre ellos la habilidad de retener agua en hábitats deshidratantes. Por lo que la habilidad de sintetizar depositar y mantener una capa hidrofóbica superficial o cutícula sobre las superficies de los órganos aéreos es una de las innovaciones más importantes en la evolución de las plantas. Esta capa exterior esta forrada por una estructura cristalina de un polímero a prueba de agua, formado por una mezcla de lípidos que en conjunto se llaman ceras.



Las ceras son una mezcla compleja, la mayor parte de los componentes de la cera cuticular son ácidos grasos de cadena muy larga C20-C34 también hay alcanos, aldehídos, alcoholes primarios y secundarios, cetonas y ésteres de cadena larga (Yeats y Rose, 2013).

Cutina

El sitio con mayor presencia de ceras es la cutícula. La cutina es el componente principal de la cutícula de las plantas terrestres, es una macromolécula polimérica formada por muchos ácidos grasos de cadena larga, unidos unos a otros por enlaces éster, lo que produce una red rígida tridimensional. Este biopoliéster cubre las superficies aéreas de las plantas. Para aislar la cutina es necesario romper el pegamento de pectinas que la une a la epidermis por medio de una serie de pasos que termina con la hidrólisis de los biopoliésteres (Zeisler Diehl, 2018).

La cutina forma parte de las paredes celulares, está formada por ácidos grasos 16:0 y 18:1, la cadena puede tener grupos hidroxilo o epóxido, interiormente o en el extremo opuesto al grupo carboxilo. Los componentes monómeros más comunes de la familia C16 son los ácidos 16-hidroxihexadecanoico y ácido 10,16-dihidroxihexadecanoico este dihidroxiácido es el componente dominante generalmente. La biosíntesis de las ceras inicia con la síntesis *de novo* de los ácidos grasos C16 y C18 y los alcoholes se forman a partir de los ácidos carboxílicos de cadena muy larga (Zeisler-Diehl, 2018, Tafolla y col. 2013).

En algunos casos otros derivados C16 son los dominantes. En la cutina de los cítricos y en las hojas muy jóvenes de *Vicia faba* están los ácidos 16-oxo-10-hidroxi-hexadecanoico. En algunos casos en plantas inferiores especialmente como componente principal hay un monómero reducido C16 como 1,8,16-hexadecanetriol.

La cutina primitiva en helechos y lycopodios se caracteriza por grandes cantidades de ácido 16-hidroxihexadecanoico. Entre los miembros más comunes de la familia C18 de monómeros de la cutina está el ácido 18-hidroxi-18,9-dienoico.

El componente mayoritario de todas las ceras son los ésteres formados por alcoholes de cadena larga y ácidos grasos de cadena larga.

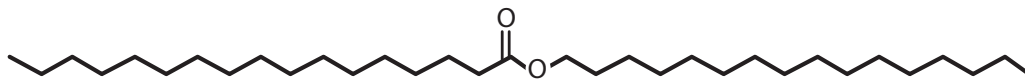
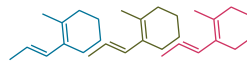


Figura 5. Éster ceroso (nótese la gran longitud de las cadenas del ácido carboxílico y del alcohol que forman el éster).

Como la cutícula está formada por compuestos sólidos e insolubles en agua, sus funciones en las plantas se deben a su solubilidad en agua y con su consistencia firme, protege contra la falta de humedad, como filtro UV y como impermeabilizante.

Las ceras más conocidas son productos de especies de zonas áridas o semiáridas en el hemisferio norte como las ceras de carnauba, de jojoba y candelilla.

Cera de carnauba

La cera vegetal más importante es la de carnauba que se obtiene de las hojas de la palma *Copernicia prunifera*, endémica del Brasil. Se utiliza en la industria farmacéutica en el pulido de grageas y para la fabricación de tabletas como excipiente y para modificar la liberación del principio activo. También se usa en la fabricación de chicles, ceras para coches, labiales, tintas y para aumentar la vida de anaquel de los frutos (Nart y col. 2017).

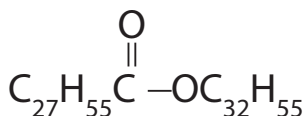
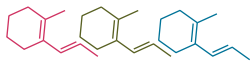


Figura 6. Éster que forma parte de la cera de carnauba.

Cera de candelilla

La cera de candelilla (vela pequeña) se produce a partir de *Euphorbia antisiphilitica* de las zonas áridas del norte de México como Coahuila, Zacatecas, Durango y Chihuahua. La planta es una hierba perenne, su cubierta cerosa es más gruesa en el invierno. Se obtienen alrededor de 8 millones de libras anuales, tres de las cuales se usan en la manufactura



de chicles. Su punto de fusión es de 70-77°C. La cera de candelilla contiene sitosterol, ésteres de cadena muy larga e hidrocarburos entre los que se encuentran hentriacontano y triacontano en proporción 9:1. Se utiliza en pesticidas líquidos para bajar su toxicidad, en la fabricación de chicles, cosméticos, crayones, aislantes eléctricos, pulidores, adhesivos, cementos, velas, papel carbón, tintas, materiales dentales, ungüentos, hules, plastificantes, entre otros.

Cera de jojoba

Es un arbusto nativo de los desiertos de Sonora y Baja California, taxonómicamente. El aceite de su semilla es inusual, está formado por ésteres cerosos líquidos. Es una de las fuentes sostenibles del aceite ceroso líquido y se utiliza para reemplazar aceites similares que antes se extraían del esperma de ballena, que las llevó prácticamente a su extinción.

Las ceras de jojoba son ésteres de ácido graso de cadena larga monoinsaturada (C_{20} - C_{24}) y alcohol graso (C_{20} - C_{24}) y puede llegar a ser hasta el 60% del peso de la semilla (Stutervant, 2020).

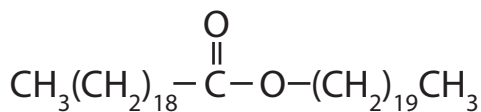
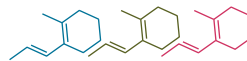
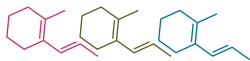


Figura 7. Éster componente de la cera de jojoba.

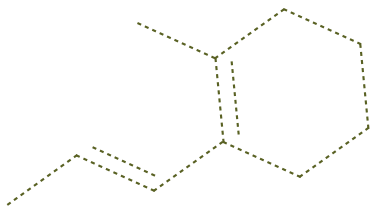


Referencias

- Damude H. y Kinney A. (2008) Generation of Biotech Crops. Enhancing Plant Seed Oils for Human Nutrition. *Plant Physiology* 147: 962-968.
- Erb, M. Kliebenstein D. (2020) Chemistry Biology and Ecology. Plant secondary metabolites as defenses, regulators and primary metabolites- The blurred functional trichotomy.
- Ishii T, Nagamine T., Binh C., Nguyenand Q., Tawata S. (2017) Insecticidal and Repellent Activities of Laurinterol from the Okinawan Red Alga *Laurencia nidifica* *Records of Naural Products* 11: 63-68.
- Li-Beisson Y., NakamuraY. Y. y Harwood J. (2016) Lipids in plants and algae development Vol. 86 Series Editor Harris J. Springer Alemania.
- Kobaek-Larsen M., El-Houri R., Christensen,L., Al-Najami I., Fretté X. and Baatrup G. (2017) Dietary polyacetylenes, falcarinol and falcarindiol, isolated from carrots prevents the formation of neoplastic lesions in the colon of azoxymethane-induced rats. *Food & Function* 22:964-974.
- Mohamed A., Saidi M., Bendriss W., Mahmoudi S., Bouazizi I. (2013) Geochemical Evaluation of Hydrocarbons and their Potential Sources in the Central and Meridional Atlas of Tunisia. *Hydrocarbons, Oils and Lipids: Diversity, Origin, Chemistry and Fate* 1-16 <https://doi.org/10.2118/164607-MS>
- Murakami Y., Tsuyama M., Kobayashi Y., Kodama,Y., Iba K. (2000) Trienoic Fatty Acids and Plant Tolerance of High Temperature. Recuperado de: <http://science.sciencemag.org/>
- Nart V., O'Reilly A., Beringsh M., Ramos Pezzini B., Stulzer H. (2017) Carnauba wax as a promising excipient in melt granulation targeting the preparation of mini-tablets for sustained release of highly soluble drugs. *Materials Science and Engineering: C* 70: 250-257.
- Ozdemir F., Topuz, A. (2004) Changes in dry matter, oil content and fatty acids composition of avocado during harvesting time and post-harvesting ripening period *Food Chemistry* 86: 79-83.



- Sturtevant D., Lu S., Zhou S., Shen Y. (2020) The genome of jojoba (*Simmondsia chinensis*): A taxonomically isolated species that directs wax ester accumulation in its sedes. Science Advances Vol. 6, no. 11, eaay3240 DOI: 10.1126/sciadv.aay3240
- Tafolla-Arellano J., González-León A, Tiznado-Hernández M., Zacarías García L. y Báez-Sañudo R. (2013) Composición, fisiología y biosíntesis de la cutícula en plantas Revista Fitotecnia Mexicana Vol. 36 no.1 Chapingo. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000100001
- Vallerio Rios, R; Durigan M., Fernandes P., Leonel C., Caetano S. (2014) Application of fats in some food products Food Sci. Technol (Campinas) Vol.34 no. 1 <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612014000100001>
- Yeats, T. y Rose, J. (2013) The formation and function of plant cuticles. Topical Review on Cuticle Synthesis and Function . Plant Physiology. 163: 5-20.
- Zeisler-Diehl V., Barthlott W, Schreiber L. (2018) Plant Cuticular Waxes: Composition, Function, and Interactions with Microorganisms. In: Wilkes H. (eds) Hydrocarbons, Oils and Lipids: Diversity, Origin, Chemistry and Fate. Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology. Springer, Cham.



Los terpenos forman la familia más grande de los productos naturales, su diversidad estructural hace que alrededor de 40 000 compuestos sean los ejemplos más impresionantes de la evolución divergente de las sustancias químicas de las plantas. Los terpenoides también se conocen como isoprenoides, ya que su estructura base está formada por unidades isoprénicas, algunos ejemplos son los aceites esenciales, triterpenoides y esteroides. Las plantas emplean a los terpenoides para funciones básicas como el crecimiento y el desarrollo pero usan la mayoría de los terpenoides para interacciones químicas más especializadas y la protección en el medio biótico y abiótico (Tholl,2014).

Los terpenos están formados por la unión de unidades isoprénicas (C₅H₈), el nombre de la UIQPA de la unidad isoprenoide es 2-metil-1,3-butadieno, tiene un esqueleto ramificado de 5 átomos de carbono (Figura 1). Las unidades isoprénicas se unen entre sí de tres diferentes maneras: cabeza-cabeza, cabeza-cola; a estas formas de unión se les conoce como la regla del isopreno. Sin embargo en 1970, se encontró que los isoprenoides no están hechos de isopreno, sus precursores biológicos son isopentenil pirofosfato (IPP) y su isómero dimetilalilpirofosfato (DAP). Sin embargo en 1970, se encontró que los isoprenoides no están hechos de isopreno, sus precursores biológicos son isopentenil pirofosfato (IPP) y su isómero dimetilalilpirofosfato (DAP).

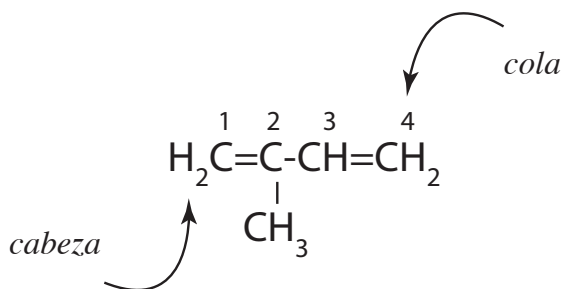
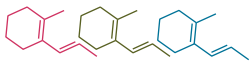


Figura 1. Estructura del isopreno.



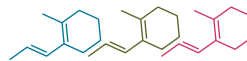
Los terpenos son las moléculas más antiguas conocidas que han sido recuperadas de sedimentos de 2.5 mil millones de años. Su éxito evolutivo está basado en parte por la simplicidad de la construcción de moléculas de diferente tamaño, de acuerdo con la regla del isopreno. Cuando se enlazan dos unidades isoprenicas se obtienen compuestos con aroma: los monoterpenos que tienen 10 átomos de carbono. Los terpenoides que tienen 15 átomos de carbono son los sesquiterpenos; los diterpenos tienen 20; los triterpenos 30, tetraterpenos (40) y politerpenos poseen más de 40 átomos de C.

Aceites esenciales

Las plantas producen aceites esenciales que son mezclas complejas de compuestos de bajo peso molecular como monoterpenos, en aproximadamente un 90% de su composición total, y en menor proporción contienen ésteres, aldehídos, cetonas, lactonas, alcoholes y ácidos carboxílicos. Estos compuestos volátiles están presentes en todas las partes de las plantas aromáticas, le dan su aroma característico y son contribuyentes importantes de su sabor.

Los aceites esenciales son solubles en alcohol, éter etílico y aceites fijos y son insolubles en agua. Estos aceites volátiles son generalmente líquidos e incoloros a temperatura ambiente. Tienen un olor característico, su densidad es menor que la unidad con pocas excepciones como canela, sassafras y vetiver que tienen índice de refracción y actividad óptica elevada.

Por sus propiedades contra hongos y bacterias, antiinflamatorias, antioxidantes, antiprurito, hipotensora y analgésica se utilizan en la industria farmacéutica (aceite de eucalipto, de clavo, tomillo y muchos otros). Su aroma, sabor y propiedades antimicrobianas son importantes en la fabricación de alimentos, como son los aceites esenciales de orégano, hierbabuena, romero, comino y otros. Se usan ampliamente en la industria del cosmético (lavanda, geranio, limón, naranja), en perfumería (como lavanda y jazmín) y también en aromaterapia (albahaca, té limón). También tienen importancia ecológica: atraen a los insectos polinizadores, son repelentes a los depredadores, inhiben la germinación de semillas, o la comunicación entre plantas como la alelopatía y otras; además los aceites esenciales poseen actividad insecticida (Dhiffi et al, 2016).



Monoterpenos

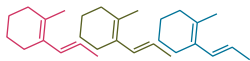
Pueden tener solamente C e H aunque algunos presentan enlaces con átomos de oxígeno y se forman diferentes compuestos del aroma. Pueden ser acíclicos (mirceno, nerol, linalol, geraniol), monocíclicos (limoneno, α -terpineol y terpinoleno) y bicíclicos (α -pineno, tujona, alcanfor, fenchona). En todos los grupos podemos encontrar hidrocarburos saturados (limoneno), alcoholes (mentol, citronelol, geraniol), aldehídos y cetonas (mirtenal, carvona, citronelal, geranial), lactonas como los iridoides y las tropolonas como γ -tujaplicina.

♦ Limoneno

El limoneno dextrorrotatorio es el responsable del aroma característico de los frutos cítricos, es un metabolito secundario que se produce abundantemente en la naturaleza. Se utiliza en la producción de aromas y sabores, en la síntesis de otros compuestos como el sabor de menta y más recientemente como disolvente no tóxico. De forma comercial se extrae de la cáscara de naranja con un 3.8% de rendimiento en base a peso seco. Es escasamente soluble en agua 13.8 mg/L tiene actividad antibacteriana, fungicida y anticancerígena. Las plantas los usan para repeler depredadores. El otro isómero óptico (-)-limoneno tiene un olor a aguarrás y se encuentra en robles y pinos se usa como biosolvente de pinturas (Ciriminna y col. 2014).

♦ Mentol

El mentol está presente en los aceites esenciales de las plantas del género *Mentha*, como *Mentha piperita* y *Mentha arvensis*, es responsable de su aroma y sabor fresco y frío. se usa en la elaboración de dulces, en fragancias, cigarrillos y medicamentos. Aplicado sobre la piel, desencadena una reacción química en los receptores de frío en la piel generando su bien conocida y agradable sensación de frescura y relajación. El mentol bloquea los canales de actividad neuronal, reduciendo la transmisión del dolor. Entre las aplicaciones medicinales se ha encontrado que alivia la comezón y es antiséptico. Se ocupa en desórdenes gastrointestinales, respiratorios, reproductivos e inflamatorios. Posee tres centros quirales y cuatro pares de isómeros ópticos, el único enantiómero presente en la naturaleza es el (-)-mentol. El (+)-mentol tiene muy reducidas sus propiedades



farmacológicas y se reporta como un compuesto tóxico. Sólido a temperatura ambiente, no es soluble completamente en agua, pero muy soluble en etanol. Por su logaritmo base 10 octanol/agua de 3.4 se sabe que es una molécula lipofílica capaz de interaccionar con las membranas celulares. El (-)-mentol es un producto con mucha demanda por lo que en la actualidad no se extrae de plantas, se obtiene por síntesis química (Silva, 2020).

◆ **Pineno**

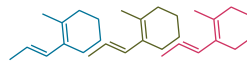
El pineno es el componente principal del aroma de pino, el pineno es un monoterpene bicíclico, que se produce naturalmente como dos isómeros el α -pineno y el β -pineno; por lo general, provienen de la trementina o aguarrás (es la fracción volátil de la resina exudada por las coníferas como el pino, el abeto) y de otras plantas como la salvia, romero o cannabis es parte de un mecanismo de defensa contra insectos, hongos y nemátodos.

Al α -pineno se le atribuyen propiedades antiinflamatorias (a través de la prostaglandina PGE1), antisépticas, es un **antibiótico** de amplio espectro. En esta línea, existen estudios que demuestran su efectividad para tratar diversas bronquitis víricas, actuando de escudo frente a ataques de virus infecciosos. Se emplea como expectorante y antiséptico. Inhibe la destrucción de moléculas relacionadas con la memoria, al romero y a la salvia se les considera buenos para la memoria. Además modula efectos adversos del tetrahidrocanabinol (THC) como la ansiedad, la paranoia o la pérdida de memoria a corto plazo. Parece claro que una variedad rica en THC y sin pineno perjudica más la memoria que una variedad con idéntico contenido en THC pero con pineno (Russo, 2011).

Con β -pineno se fabrica mirceno. Siempre que encontramos varios isómeros de un mismo terpeno, el sabor y olor de éstos presenta variaciones notables. El sabor y aroma del isómero α -pineno es muy similar al de la resina de pino, también al romero. Por contra, el isómero β -pineno presenta unas características organolépticas más similares al eneldo, al perejil, a la albahaca o al lúpulo (Risner y col. 2020).

◆ **Mirceno**

El mirceno es el monoterpene más abundante en el cannabis, lo que representa más del 60% del aceite esencial de algunas variedades. También se encuentra en las hojas



de laurel, en el tomillo, lúpulo, ylang-ylang, citronela o hierba de limón y verbena. El mirceno es responsable del “aroma a lúpulo” encontrado en las cervezas elaboradas con la técnica dry hopping (cervezas a las que se añade lúpulo después de finalizar la fermentación a bajas temperaturas, para aportarle un mayor aroma a “lúpulo”); el propio aroma se describe como resinoso, a hierbas, ligeramente metálico y muy penetrante en altas concentraciones.

◆ Linalol

El linalol tiene un aroma floral. Se obtiene a partir de lavanda, neroli y otros aceites esenciales. Se puede percibir por el humano a una concentración de 1 ppm. Es un compuesto sedante, abundante en el aceite esencial de *Bursera linanoe* (60-70% del aceite esencial). Se usa en cosméticos y alimentos como perfume y como sabor. Tiene efectos importantes en el sistema cardiovascular humano, se encontró que por inhalación el (+)-linalol tiene un efecto estimulante en el sistema cardiovascular, mientras que el (-)-linalol tiene un efecto depresivo (Santos y col. 2015).

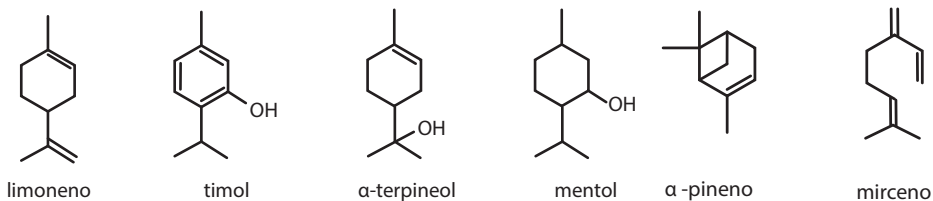
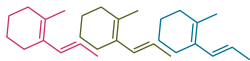


Figura 2. Estructuras de algunos monoterpenos.

◆ Timol

El timol es un fenol monoterpenoide que se encuentra en el tomillo y el orégano y posee diferentes actividades biológicas: modula la síntesis de las prostaglandinas, tiene efecto antiinflamatorio en los humanos, influye en la concentración del ácido docosanoico (DHA) y por ello es antioxidante. También previene la autooxidación de lípidos y la formación de productos tóxicos a través de las especies reactivas de nitrógeno. Es un antimicrobiano por lo que se usa como antiséptico y promueve la cicatrización. (Barreto y col. 2014).



♦ α -terpineol

El α -terpineol es un alcohol monoterpénico relativamente no tóxico presente en los aceites esenciales de naranja amarga y de pino entre otras especies. Tiene acción cicatrizante y antiinflamatoria es un potente bactericida y fungicida. Posee gran importancia en la industria de perfumes.

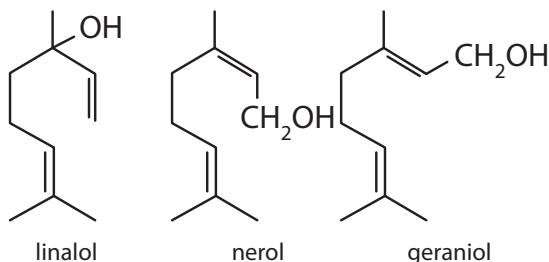


Figura 3. Estructura química de linalol, nerol y geraniol.

Iridoides

Los iridoides son monoterpenoides derivados del geraniol, que tienen un sistema bicíclico de anillos de ciclopentano-pirano y están en forma de glucósidos generalmente. Actúan como protectores de las plantas y son de utilidad como marcadores taxonómicos de varios géneros en varias familias de plantas como *Plantago* (Plantaginaceae), *Galium* (Rubiaceae), *Scrophularia* (Scrophulariaceae) (Liand-Liang et al, 2019). Biosintéticamente derivan del geraniol, el cual es un monoterpeno acíclico. La estructura básica de los iridoides es un anillo de 1-isopropil-2,3-dimetilciclopentano denominado iridano. El iridano con frecuencia está fusionado con un anillo de pirano y se le denomina iridoide. Se aisló la primera vez de hormigas del género *Iridomirmex*, donde desempeña funciones defensivas. Estos compuestos pueden encontrarse como estructuras abiertas (secoiridoides) o cerradas (iridoides) generalmente en forma heterosídica, mayoritariamente como glucósidos (Barreto y col. 2014).

Entre las especies más importantes que contienen iridoides destacan, la valeriana y la genciana de las cuales se utilizan los órganos subterráneos.

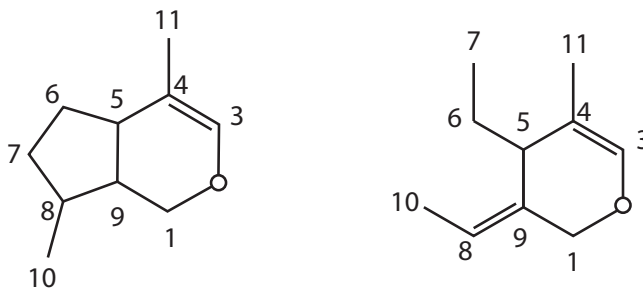
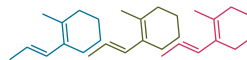


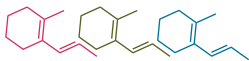
Figura 4. Estructura química del esqueleto iridoide y esqueleto secoiridoide.

◆ Iridoides de noni (*Morinda citrifolia*)

Morinda citrifolia es una planta de la familia Rubiaceae, nativa del Sudeste Asiático se ha consumido por más de 2000 años, su gran valor nutricional puede inducir efectos terapéuticos. Entre los iridoides del noni se aisló aucubina, con propiedades bactericidas. En las hojas se encontró un glicósido iridoide citrifolinósido A junto con otros dos glicósidos iridoides ya conocidos asperulósido que actúa contra la obesidad y el ácido asperulosídico que es un inmuoestimulante y aumenta el flujo sanguíneo, actuando contra la hipertensión. El ácido deacetasperulósico es el 78% del contenido total de iridoides en esta planta y es un compuesto con actividad antitumoral (Almeida y col.2019; D'eбора y Dachamir, 2019).

Las especies de *Nepeta cataria* se usan en medicina tradicional por su actividad antiespasmódica, expectorante, diurética, antiséptica, antitusiva, antiasmática y febrífuga.

Nepeta cataria también conocida como la hierba de los gatos o catnip en su aceite esencial tiene dos isómeros de nepetalactona, el *E,Z*- y el *Z,E*-nepetalactona que tienen actividad repelente contra las cucarachas adultas machos y contra los mosquitos (Ibrahim y El-Moaty, 2010; Peterson y cols, 2002).



♦ Genipina

La genipina es un compuesto iridoide, además de ser un colorante natural, es un agente de reticulado natural (agente entrecruzante) útil en la preparación de hidrogeles, tiene una citotoxicidad baja, es un agente antiinflamatorio, cura heridas, tiene efectos antioxidativos e inhibe la peroxidación de lípidos y la producción de monóxido de nitrógeno. También puede aumentar el potencial de membrana de las mitocondrias y aumentar los niveles de ATP. Se utiliza para combatir la anorexia y es hepatoprotectora. Se encuentra en la raíz fermentada de *Gentiana lutea*, *Gardenia jasmínoides* y en *Genipina americana* (Lárez-Velázquez 2014).

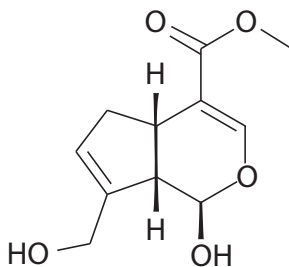
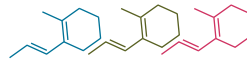


Figura 5. Estructura química de la genipina (1R,2R,6S)-2-Hidroxi-9-(hidroximetil)-3-oxabicyclo [4.3.0] nona-4,8-dieno-5-carboxilato de metilo (Lárez-Velázquez, 2014).

♦ Aucubina

Aucubina es un glucósido iridoide entre sus efectos farmacológicos esta su capacidad anti-edad, antifibrosis, antitumoral, hepatoprotector, neuroprotector, osteoprotector, antimicrobiana, antiinflamatoria, la curación de heridas y es un antioxidante *in vitro* En adición muestra inhibición del RNA y de la biosíntesis de proteínas. Se le considera un agente quimiopreventivo y no tiene ninguna actividad citotóxica. Todos los monoterpenos evaluados mostraron el efecto de curar heridas el cual se relaciona y correlaciona con el efecto antiinflamatorio. Un miligramo de aucubina tiene una actividad similar a la de 0.5 mg de indometacina en el bioensayo de inducción de edema en la oreja de ratón con carragenina.



Fue aislada por primera vez de *Aucuba japonica* y posteriormente se encontró en las familias Garryaceae, Plantaginaceae, Orobanchaceae, Globulariaceae, Scrophulariaceae, y Eucommiaceae.

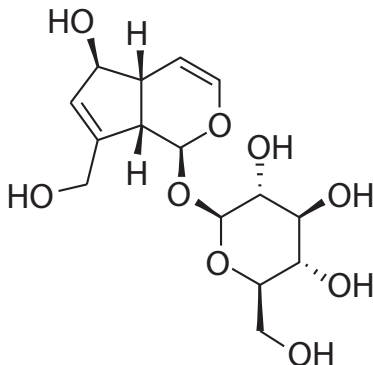
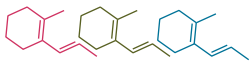


Figura 6. Estructura química de la aucubina (Zeng, y col. 2020)

◆ Iridoides en *Plantago*

Se estudió la distribución de 14 iridoides glucósidos en 14 especies de *Plantago* L (44 especies correspondientes a 18 taxones). Los patrones de iridoides mostraron una buena correlación con características morfológicas y químicas de los representantes del género *Plantago*. El género *Plantago* L. comprende más de 200 especies con una distribución cosmopolita se usan en la medicina tradicional para heridas, picaduras de insectos, irritación de los ojos e inflamación de boca y garganta (Ma y col. 2019).

Las especies estudiadas se agruparon de acuerdo a los patrones de iridoides: las especies que contienen aucubina principalmente (*P. major*, *P. cornuti*, *P.gentianoides*); especies que contienen aucubina y derivados de la aucubina (*P. subulata*, *P. media*); especies que contienen aucubina y catalpol (*P. lanceolata*, *P. altissima*, *P. argentea*, *P. lagopus*, *P. atrata*); especies que contienen aucubina y plantarenalósido (*P. afra*, *P. scabra*) (Taskova y col. 2002).



Sesquiterpenos

Están formados por 3 unidades isoprenicas, pueden ser alifáticos o cíclicos, entre los cíclicos hay mono-, bi- y tricíclicos.

Sesquiterpenos alifáticos

El farnesol y el nerolidol son de los más importantes de esta serie, los dos poseen tres dobles enlaces. El farnesol se obtiene a partir de nerolidol y se utiliza en fragancias finas, shampos, jabones de tocador, limpiadores de casa y detergentes por su aroma a lirio; en el mundo se usan alrededor de 10 toneladas métricas al año. Es precursor de los sesquiterpenos cíclicos. El nerolidol es el componente principal del aceite de neroli.

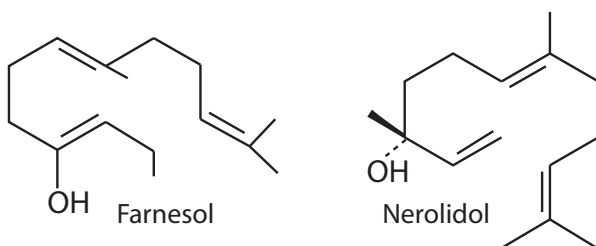
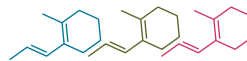


Figura 7. Estructuras del farnesol y del nerolidol.

Sesquiterpenos bicíclicos

Cadineno es el nombre trivial de varios isómeros del aceite esencial de cubeba, uno de los componentes de la esencia de cubeba, en *Rhododendron nivale* el δ -cadineno es el compuesto más importante del aceite esencial que lo contiene en un 60%, este compuesto es el responsable de la actividad acaricida contra *Psoroptes cuniculi* en yaks y borregos del Tibet. Por los resultados obtenidos *in vitro* en el laboratorio de la Academia de Ciencias

Agrícolas de China, se concluye que su uso en otros animales que infesta *P. cuniculis* como caballos, conejos, cabras, vacas, búfalos el cadineno y el aceite esencial de *Rhododendron nivales*, se pueden usar para controlar la población de ácaros (Guo X. y col 2017).



♦ Selineno

El selineno y es también el nombre trivial de varios isómeros de la esencia de apio de un 2-3% (Nurzinka-Wierdak y col. 2018) y de la de canela. La canela se utiliza en la cocina desde hace miles de años y por sus usos medicinales como antiemético, antifatulento y agente estimulante en la medicina Ayurveda, los egipcios la usaron en la momificación y los portugueses la llevaron a Europa desde Sri Lanka en el siglo XVI. El aceite de canela se utiliza en la industria farmacéutica y en la de alimentos (Kumar y col., 2019).

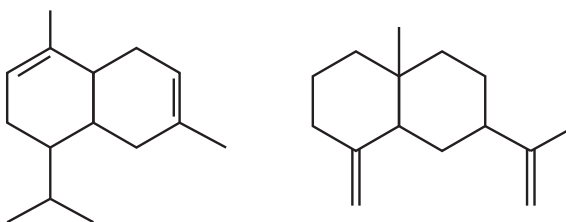


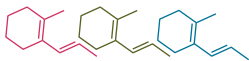
Figura 8. Estructura del cadineno y selineno.

♦ Lactonas sesquiterpénicas

Son metabolitos secundarios terpenoides que contienen 15 átomos de carbono con estructura isoprenoide y un grupo funcional lactona. Existen varios subtipos según el arreglo de sus esqueletos, los más representativos son los germacranólidos, eudesmanólidos y los guayanólidos. Subtipos menos representativos son los helenanólidos y pseudoguayanólidos. La mayoría de las lactonas sesquiterpénicas contienen un metileno anexo al ciclo conjugado con un grupo carbonilo, sus actividades biológicas se atribuyen a este grupo de átomos.

Las lactonas sesquiterpénicas se encuentran en varias familias de Angiospermas, incluyendo Acanthaceae, Amaranthaceae, Apiaceae, Aristolochiaceae, Asteraceae, Bombacaceae, Burseraceae, Coriariaceae, Chloranthaceae, Euphorbiaceae, Illiciaceae, Lamiaceae, Lauraceae, Magnoliaceae, Menispermaceae, Orchidaceae, Polygonaceae y Winteraceae.

Algunas lactonas sesquiterpénicas representativas son la partenina, la lactupicrina, la vernolepina la artemisina y las mexicaninas.



Las artemisias son un género de plantas herbáceas de la familia de las asteráceas. En México se conocen como estafiate son muy olorosas y de sabor amargo, *Artemisia klotzchiana* crece en el Valle del Mezquital aislada porque produce alelopáticos (alcanfor, cineol, β -tujona) que inhiben la germinación de las semillas de otras plantas, para evitar la competencia por el agua.

La artemisinina es una lactona sesquiterpénica con un puente peróxido y sus derivados son fármacos que se utilizan contra el paludismo se aísla de *Artemisia annua* que es una especie del género *Artemisia*. En la artemisinina el metileno exocíclico está reducido como en la artemisinina.

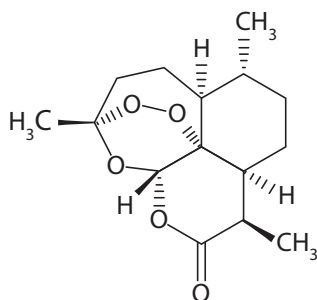


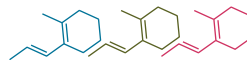
Figura 9. Artemisina es una lactona sesquiterpénica con un puente de peróxido.

Estudios recientes en *Artemisia annua*, revelan que varios factores de transcripción activados por la fitohormona jasmonato, conducen a la síntesis de artemisinina. También los estudios han mostrado que la sequía modula la síntesis de artemisinina en la planta reduciendo la densidad y el tamaño de los tricomas glandulares, sin embargo, la síntesis de algunos monoterpenos y compuestos volátiles se induce por el déficit de agua (Ritesh y col. 2014)

La partenina se aisló de una maleza muy invasiva del trópico *Parthenium hysterophorus* contra el trigo (*Triticum aestivum*), frijoles (*Phaseolus vulgaris*), y jitomate (*Solanum lycopersicum*) y mozote (*Bidens pilosa*) (Ritesh y col. 2014).

Diterpenos

Están formados por cuatro unidades isoprénicas, se encuentran en las resinas de las plantas superiores y están presentes normalmente como compuestos cíclicos.



Diterpenos acíclicos

El fitol fue aislado en 1909 a partir de la hidrólisis de la clorofila, se usa para la elaboración de las vitaminas E (tocoferol) y la vitamina K.

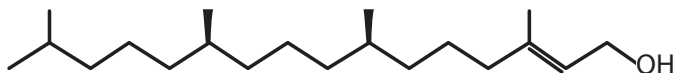


Figura 10. Estructura química del fitol.

Otro ejemplo de diterpenos acíclicos lineales es el zoapatanol que contiene una lactona o un éter cíclico que proviene de la apertura de oxiranos. El zoapatanol se encuentra en *Montanoa tomentosa* (zoapatle) que se ha usado durante mucho tiempo como té, en la medicina tradicional mexicana, para inducir el trabajo de parto.

Dentro de los constituyentes solubles en agua presentes en el género *Capsicum* se han encontrado los capsianósidos que son glicósidos de terpenos acíclicos (Lee y col. 2008). Los capsianósidos son útiles para aumentar la permeabilidad de la mucosa intestinal hacia los fármacos o para otras sustancias hidrofílicas biológicamente importantes, a lo largo de la mucosa intestinal (Hashimoto, 1997).

Diterpenos cíclicos

La vitamina A o retinol en 1931 fue aislada por Karrer en 1931 del hígado de mero.

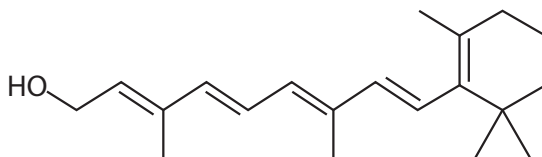
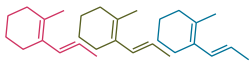


Figura 11. Estructura química del retinol.



Diterpenos tricíclicos

Entre las sustancias diterpénicas están los taxanos (figura 12) que se aíslan de la corteza de los árboles *Taxus* spp, se utilizan ampliamente contra diferentes tipos de cáncer. La actividad citotóxica del taxol no distingue entre las células normales y las células cancerosas, por lo que su efecto puede extenderse a las células de las plantas que lo producen, por ello la planta requiere de tejidos especiales y después de su biosíntesis en los tejidos vegetales, utiliza mecanismos adecuados de transporte.

El taxol se localiza en cuerpos resinosos hidrofóbicos y es liberado en respuesta a la invasión de hongos patógenos de la madera (Soliman y col. 2020).

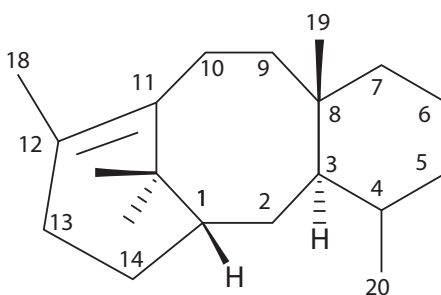
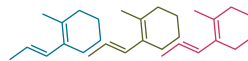


Figura 12. Esqueleto de taxano.

El ácido abiético se aísla de la resina color ámbar que se obtiene de las coníferas por exudación, se conoce como colofonia), es el principal agente irritante del pino. Es soluble en disolventes orgánicos como alcoholes, acetona y éteres. Se usa en la fabricación de barnices, lacas, jabones y para fabricar resيناتos metálicos. Es una fitoalexina que protege a los árboles de los ataques de los hongos. La resina está formada por 90% de ácidos resínicos y el 10% de sustancias neutras. La resina habitualmente contiene más del 50% de ácido abiético, este metabolito secundario es antiinflamatorio, antialérgico, anticonvulsivo y tiene efecto inhibitorio en la metástasis del melanoma (Park y col. 2017).

Entre los compuestos terpénicos destacan las giberelinas que son diterpenos ácidos, importantes en el crecimiento vegetal, ya que regulan la elongación celular y la germinación de las semillas, su nombre se debe a un hongo del género *Giberella* en el cual científicos japoneses, encontraron esta sustancia química que alargaba los tallos



del arroz, hasta hacerlos caer. Se conocen 136 estructuras relacionadas con la giberelina, todas ellas se han identificado en plantas.

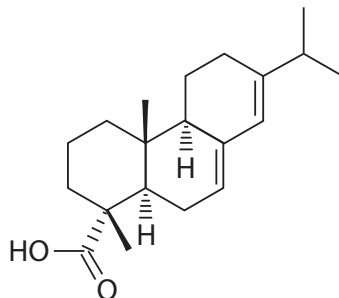


Figura 13. Estructura del ácido abiético.

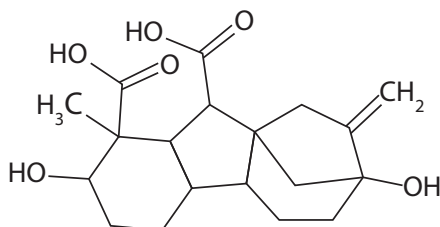
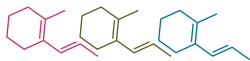


Figura 14. El esqueleto principal de las giberelinas tiene 4 anillos.

◆ Esteviol

Stevia rebaudiana Bertoni (kaê heê) es un arbusto originario de la Región Oriental de Paraguay. Sus hojas contienen glucósidos diterpénicos que producen un sabor dulce, pero sin valor calórico y son de 150 a 300 veces más dulces que la sacarosa (solución al 0,4%). El esteviósido y el rebaudiósido A son los glicósidos de mayor interés para su propiedad endulzante. Por siglos esta hierba edulcorante ha sido usada por nativos Guaraníes para contrarrestar el sabor amargo de varias medicinas y bebidas a base de plantas. El producto se obtiene de las hojas de *Stevia rebaudiana* Bertoni.

Para obtener los esteviósidos las hojas se extraen con agua caliente y se pasa el extracto por una resina de absorción para atrapar y concentrar los glicósidos de esteviol. La resina



se lava con alcohol para liberar los glicósidos y el producto se recristaliza de metanol o de etanol acuoso. El producto final se seca por aspersión. Entre los glucósidos diterpénicos de la estevia, el esteviósido es el componente principal, constituyendo cerca del 85% de los edulcorantes totales, y rebaudiósido A, en menor proporción es el componente más dulce. Estos dos componentes han sido empleados por el altísimo poder edulcorante y la baja toxicidad (Brusik, 2008, Ceunen y Geuns, 2013).

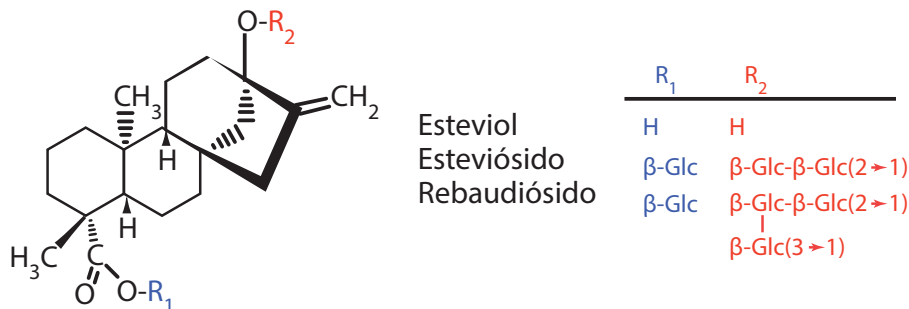


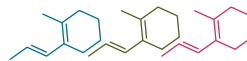
Figura 15. Estructura de los glucósidos principales de la estevia y sus agliconas.

Triterpenos

Los triterpenos tienen 30 átomos de carbono, esto es (6 unidades isoprénicas y 3 unidades terpénicas). Son importantes el ácido ursólico y el ácido oleanólico, los esteroides, las saponinas y otros. Por su distribución en el reino vegetal y su gran importancia por el impacto que tienen sus propiedades farmacológicas, se tratan en el siguiente capítulo, especial para triterpenos.

Tetraterpenos

Los tetraterpenos tienen 40 átomos de carbono (8 unidades isoprénicas). En especial los carotenos (pigmentos vegetales) contienen únicamente carbono e hidrógeno, varios enlaces dobles conjugados en su molécula y tienen simetría.



Carotenoides

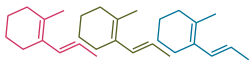
En la primera mitad del siglo XIX se encontraron los carotenoides de la paprika, del azafrán, el anatto, las zanahorias y las hojas de otoño. En la década de 1930, Karrer and Khun elucidaron las estructuras de β -caroteno y licopeno. Más tarde encontraron que el β -caroteno es un precursor de la vitamina A, con este trabajo Kuhn obtuvo el premio Nobel de química en 1938. Posteriormente elucidaron las estructuras de luteína, zeaxantina y Estos estudios se realizaron a través de la reacción de degradación oxidativa de los carotenoides con permanganato de potasio (KMnO_4) y las estructuras formadas se analizaron por medio del análisis elemental.

Los carotenoides son polienos lineales que actúan como recolectores de energía de la luz y antioxidantes que inactivan especies reactivas del oxígeno (ROS) formadas por la exposición de células al estrés ambiental. Los carotenoides son considerados pigmentos accesorios puesto que aumentan la cosecha de luz de las algas pasando la excitación de las clorofilas. Los carotenos se pueden clasificar hidrocarburos no saturados, y xantofilas, que presentan uno o más grupos funcionales que contienen oxígeno en forma de hidróxidos y cetonas, son más resistentes a la oxidación que las clorofilas y producen los colores amarillos y pardos de las hojas secas. El betacaroteno, la luteína y la violaxantina son los carotenoides primarios de las plantas y las algas verdes, distribuidos dentro de los cloroplastos junto con las clorofilas. Existen más de 600 xantofilas debido a la variedad de grupos funcionales que contienen oxígeno y sus diferentes combinaciones (Maoka, 2020).

◆ Astaxantina

La astaxantina (3,3'-dihidroxi- β , β '-caroteno-4,4'-diona) es el principal carotenoide encontrado en los animales acuáticos. Se utiliza en el cultivo del salmón y algunos crustáceos porque proporciona el color rosa de esas especies, esta es la aplicación más importante para este pigmento en el mercado.

En la industria se utiliza principalmente la astaxantina sintética pero el interés por las fuentes naturales se incrementa día a día. Sirve como precursor de la vitamina A y está asociado con la reproducción celular y el desarrollo del embrión. Tiene una actividad antioxidante superior al α , β -caroteno, luteína, licopeno, cantaxantina y vitamina E. Así como otras funciones biológicas como la prevención de enfermedades cardiovasculares,



bioactividad contra *Helicobacter pylori* y la prevención de cataratas, cada día es más popular como suplemento en la dieta humana. La presencia de este carotenoide secundario aumenta la capacidad de supervivencia de las células y la resistencia al estrés oxidativo.

Las algas verdes *Haematococcus pluvialis* y la levadura roja *Phaffia rhodozyma*, así como los subproductos de crustáceos son las fuentes naturales más importantes. Como la astaxantina tiene una actividad antioxidante elevada se fabrica en cápsulas como nutraceutico. Es útil para prevenir enfermedades del corazón y previene las cataratas. Plantas como los jitomates y especies del género *Tagetes* contienen astaxantinas (Higuera, 2006).

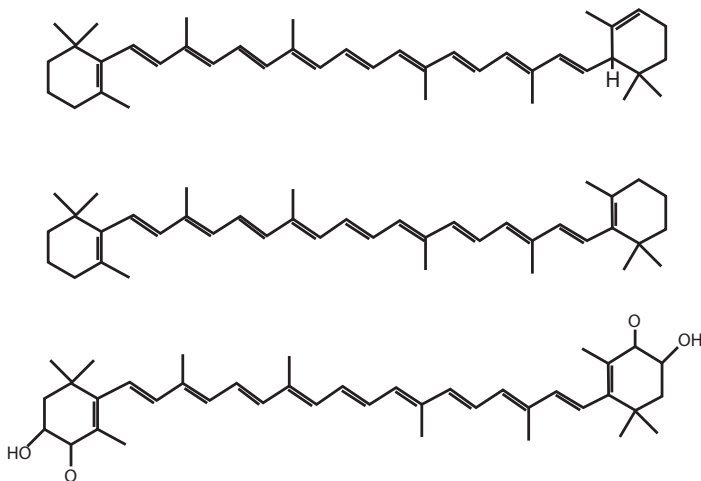
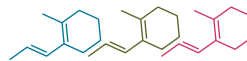


Figura 16. α -caroteno, β -caroteno y astaxantina.

En estudios con jitomates se ha encontrado que la síntesis de los terpenoides se puede inducir con factores ambientales como altas temperaturas, radiación y evapotranspiración por aplicación de estimulantes químicos como jasmonatos o por daño mecánico. Temperaturas arriba de 32° reducen la concentración de tetraterpenos como el licopeno si el estrés se induce durante los últimos estados de maduración de la fruta. Altas temperaturas desde el estado vegetativo, no muestran cambios, lo que indica la aclimatación del metabolismo de estas plantas a las temperaturas altas. El estrés acuoso puede estar relacionado con un aumento de licopeno en jitomates, con esto se



evidencia que la síntesis dinámica y compleja de estos compuestos, depende de factores ambientales (Perveen y col. 2015).

◆ Apocarotenoides

Los apocarotenoides (C₃₀H₄₀O) son carotenoides en los que el esqueleto de carbono está cortado por las dioxigenasas o por otros procesos no enzimáticos, en los cuales se removieron uno o dos fragmentos de uno o de los dos extremos. Sus funciones son como hormonas, volátiles y señales. Algunos ejemplos son el apocarotenal, la bixina, el ácido absícico y la estrigolactona (la dos últimas son hormonas vegetales). Los apocarotenoides son precursores de la vitamina A y actúan como antioxidantes.

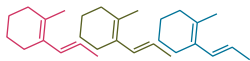
◆ Apocarotenal

Se encuentra en las espinacas y en los cítricos. Al igual que los carotenoides tiene la mitad de la actividad provitamina A que tiene el β-caroteno. Tiene una tonalidad rojo-naranja por lo que se usa en los alimentos, medicamentos y cosméticos por ser un lípido, se utiliza en productos basados en grasa.

◆ Bixina

El achiote (*Bixa orellana*) tiene su origen al suroeste del Amazonas. En México su nombre proviene del náhuatl *achiyotl*, de *achi*, grano o semilla, aunque también recibe otros nombres según los diferentes grupos étnicos. El pigmento mayoritario (57%) que se encuentra en el pericarpio de las semillas es el apocarotenoide bixina, el cual es un apocarotenoide. En medicina tradicional sus semillas se usan para la diabetes, diarrea, hepatitis y dislipidemia. Estudios farmacológicos anteriores muestran que las semillas del achiote son antimicrobianas, antiinflamatorias, antioxidantes y tienen efectos citotóxicos (Jondiko y Pattenden, 1989).

La bixina es el alcohol terpénico E,E,E-geranilgeraniol, es el 1% en peso de las semillas secas, por lo que *B. orellana* es la fuente más rica de este alcohol. En la industria es un ingrediente importante para perfumes y también es materia prima para la síntesis



de vitaminas A y E. Induce apoptosis en varios tumores y líneas de cáncer (Jondiko y Pattenden, 1989). La bixina es insoluble en agua por ser liposoluble y la norbixina, también presente en el achiote, es hidrosoluble e insoluble en grasas. Se puede obtener la norbixina (es un diácido) por medio de álcalis. Estos dos compuestos se usan como materias primas de la industria de alimentos y dan color rojo o naranja.

Politerpenos

El hule es un biopolímero contenido en el látex, producido principalmente por la planta *Hevea brasiliensis* (jefe o árbol del caucho). Está formado por 1,4-poliisopreno con la configuración *cis*.

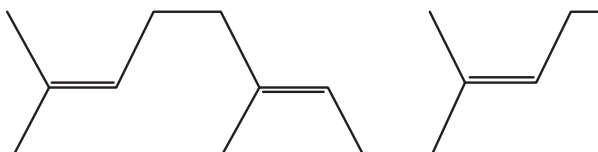
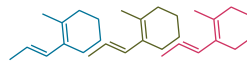


Figura 17. Cis-1,4-poliisopreno

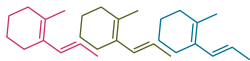
La gutapercha o balata es otro biopolímero lo encontramos en el látex producido por otras especies. Se diferencia del caucho en el predominio de la configuración *trans*. Los mayas hacían un tipo de zapato de goma sumergiendo sus pies en una mezcla de látex. A principios del siglo XVIII, Charles de La Condamine, descubrió que el caucho natural estaba compuesto por cadenas de hidrocarburo, con lo que dejó abierta la posibilidad de producir caucho sintético (Maugh, 2010).

En un estudio reciente realizado por investigadores del MIT, John McCloy y Dorothy Hosler, especialistas en materiales, sostienen que los pueblos mesoamericanos fueron los primeros científicos que estudiaron los polímeros, fabricaban pelotas que botaban, sandalias y mangos para herramientas. Al estudiar los registros escritos por los conquistadores españoles, descubrieron que los mayas fabricaban sus bolas mezclando el látex con el jugo de una enredadera llamada gloria de la mañana (*Ipomoea alba*) y calor. Al parecer el jugo de la enredadera contiene aminoácidos ricos en azufre, por lo que los mayas descubrieron el proceso de la vulcanización 3500 años antes de que a Goodyear se le cayese la mezcla de caucho y azufre sobre la estufa (Larqué-Saavedra, 2017).

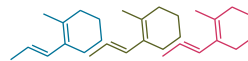


Referencias

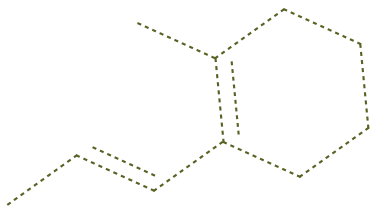
- Almeida E., De Oliveira D. y Hotza D. (2019) Properties and Applications of *Morinda citrifolia* (Noni): A Review. *Food science and food safety* 883-909.
- Barreto R., Albuquerque R., Araújo A., Jackson R., Almeida S., Márcio R., Santos V., Barreto A., De Santana J., Siqueira-Lima P., Jullyana S.S. Quintans 1 and Quintans-Junior L. (2014) A Systematic Review of the Wound-Healing Effects of Monoterpenes and Iridoid Derivatives. *Molecules* 19, 846-862
- Brusick D. (2008) A critical review of the genetic toxicity of steviol and steviol glycosides *Food and Chemical Toxicology* 46: S83–S91
- Ceunen S. y Geuns J. (2013) Steviol Glycosides: Chemical Diversity, Metabolism, and Function | *Journal of Natural Products* 76: 1201–1228
- Ciriminna R, Lomeli M., Demma Carà P., Lopez-Sanchez J. y Pagliaro M. (2014) Chemical Communications. Limonene: A Versatile Chemical of the Bioeconomy <https://doi.org/10.1039/C4CC06147K>
- Dhifi, W., Bellili, S., Jazi, Bahloul S., Mnif, W., (2016) Essential Oils? Chemical Characterization and Investigation of Some Biological Activities: A Critical Review 3: 25 doi: 10.3390/medicines3040025
- D'ebora de Oliveira, and Dachamir Hotza (2019) Properties and Applications of *Morinda citrifolia* (Noni): A Review Edipo S. Almeida. *Comprehensive reviews in food science and food safety* 18: 883-909
- Guo X, Shang X., Li B., Zheng Zhou X., Wen H., Zhang X. (2017) Acaricidal activities of the essential oil from *Rhododendron nivale* Hook.f. and its main compound, cadinene against *Psoroptes cuniculi* *Veterinary Parasitology* 236: 51–54
- Hashimoto K., Kawagishi H., Nakayama T., Shimizu M., (1997) Effect of capsaicin, a diterpene glycoside, on tight-junctional permeability. *Biochimica et Biophysica Acta* 1323: 281–290.
- Higuera-Ciapara L, Valenzuela F. y Goycoolea F.M. (2006) Astaxanthin: A Review of its Chemistry and Applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46:185–196 DOI: 10.1080/10408690590957188



- Ibrahim H., El-Moaty A. (2010) Essential oil and iridoide glycosides of *Nepeta septemcrenata* *Journal of Natural Products INDIA*, 3:103-111
- Jondiko, I. and Pattenden G. (1989) Terpenoids and an apocarotenoid from seeds of *Bixa orellana*. *Phytochemistry* 28:3159-3162
- Larqué Saavedra A. (2017) Notas sobre la biotecnología prehispanica en Mesoamérica. <https://pdfs.semanticscholar.org/78cf/4fd536c8cc42917db75ae97863749b8803f6.pdf>
- Lee J., Kiyota N., Ikeda T. and Nohara, T. (2008) Three New Acyclic Diterpene Glycosides from the Aerial Parts of Paprika and PimienMaa *Chemical Pharmaceutical Bulletin* 56: 582—584.
- Liu J. (2005) Oleanolic acid and ursolic acid: Research perspectives. *Journal of Ethnopharmacology*. 100: 92-94
- Larez -Velázquez C, Rivas A, Ocanto I (2014) Obtención de Genipina a partir de frutos de caruto (*Genipa americana* L.) del llano venezolano. *Avances en Química* 9:75-86.
- Ma L, Wang L, Zhang Y., Jiang X, Zhu X, Pan K. (2019) A new chlorine-containing iridoid glycoside from *Plantago máxima*. *Natural Product research* <https://doi.org/10.1080/14786419.2019.1655410>
- Maoka, T. (2020) Carotenoids as natural functional pigments. *Journal of Natural Medicines* 74:1–16 <https://doi.org/10.1007/s11418-019-01364-x> REVIEW
- Maugh T. (2010) Mayas mastered rubber long before Goodyear. *Los Angeles Times*. Recuperado de <http://articles.latimes.com/2010/may/31/science/la-sci-rubber-20100531>
- Nurzyńska-Wierdak R, Gruszecki R., Kosior M. (2018) Does preservation modify the essential oil content and chemical composition of leaf celery (*Apium graveolens* L. var. *secalinum* Alef.) *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 17: 27–36
- Park Y., Lee K. , LeeD. , Yoo J. , Shin M., YamabeN., Kim, Lee S., Kim H, Lee H., Sun S., Kang K. (2017) Abietic acid isolated from pine resin (Resina Pini) enhances angiogenesis inHUVCEs and accelerates cutaneous wound healing in mice *Journal of Ethnopharmacology* 203 (2017) 279–287.



- Perveen R., Rasul R., Anjum F., Sadiq Butt M., Pasha I. and Ahmad S. (2015) Tomato (*Solanum lycopersicum*) Carotenoids and Lycopenes Chemistry; Metabolism, Absorption, Nutrition, and Allied Health Claims—A Comprehensive Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55:919–929 (2015)
- Peterson, C, Nemetz L., Jone, L. Coat J. (2002) Behavioral Activity of Catnip (Lamiaceae) Essential Oil Components to the German Cockroach (Blattodea: Blattellidae) in *Journal of Economic Entomology* 95(2):377-80
- Risner D., Marco M., Pace S. y Spang E. (2020) The Potential Production of the Bioactive Compound Pinene Using Whey Permeate. *Processes* 8(3):263 -278.
- Ritesh K. Yadav, Rajender S. Sangwan, Farzana Sabir, Awadesh K. Srivastava, Neelam S. Sangwan (2014) Effect of prolonged water stress on specialized secondary metabolites, peltate glandular trichomes, and pathway gene expression in *Artemisia annua* L. 74:70-83 *Plant Physiology and Biochemistry*.
- Russo, E. (2011) Taming THC: potential cannabis synergy and phytocannabinoid-terpenoid entourage effects. *British Journal of Pharmacology* 163: 1344–1364.
- Santos M., Moreira F., Fraga B., De Souza D., Bonjardim L., Quintans, L. (2011) Cardiovascular effects of monoterpenes: a review. *Revista Brasileira de Farmacognosia* 21: 4.
- Silva, H. (2020) Current Knowledge on the Vascular Effects of Menthol. *Frontiers in Physiology* 11: 298
- Soliman S., Raizada, M. (2020) Sites of biosynthesis and storage of Taxol in *Taxus media* (Rehder) plants: Mechanism of accumulation. *Phytochemistry* 175:112369
- Taskova R., Evstatieva L., Handjieva and N., Popov, S. (2002) Iridoid Patterns of Genus *Plantago* L. and Their Systematic Significance. *Zeitschrift fur Naturforschung* 57c, 42-50
- Tholl D. (2015) Biosynthesis and Biological Functions of Terpenoids in Plants. *Advances in Biochememical Engineering/ Biotechnology*
- Zeng X., Guo F., Ouyang D. (2019) A review of the pharmacology and toxicology of aucubin. *Fitoterapia Journal. T. Fitoterapia*, 140 art. 104443



Biosintéticamente los triterpenos C 30 (6 unidades isoprénicas) se derivan del escualeno. Entre los triterpenos encontramos diversos grupos como: triterpenos (comunes), esteroides, saponinas, glucósidos cardiacos.

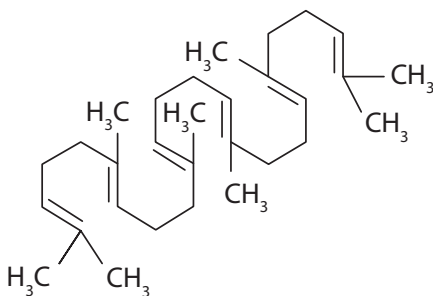
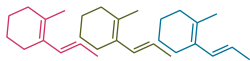


Figura 1. Estructura química del escualeno.

Esteroides

Los esteroides tienen la estructura básica de cuatro anillos de ciclopentano perhidrofenantreno, se encuentran tanto en plantas como animales. La historia del descubrimiento de los estrógenos es interesante pues primero se encontraron en las plantas en 1926 por un médico austríaco Otto Fellner –ahora, conocido como el pionero de la endocrinología de las gónadas-. Él demostró la actividad estrogénica en la avena y el arroz. Simultáneamente, otros investigadores del Instituto de Anatomía de Hamburgo, demostraron la actividad estrogénica de la remolacha, la papa y la levadura.

Pasaron tres años más hasta que se detectó actividad estrogénica en humanos. La estrona es una hormona que secreta el ovario, aunque también las plantas pueden producirla.



En 1933 se obtuvo estrona de las semillas y el polen de *Phoenix dactylifera*, *Punica granatum*, *Malus pumila*, *Hyphaene thebaica*, *Salix caprea* y *Glossostemon bruguieri*. En 1966 se aisló estrona a partir del polen y de las semillas de la palma datilera; ese mismo año se encontró en las semillas de granada.

Actualmente, siguen realizando más hallazgos de estrógenos en diversas especies de plantas (Tarkowská, 2019). El 17β -estradiol se encontró en las semillas de *Phaseolus vulgaris*. El estradiol, la estrona y el estriol se encontraron en *Salix sp.* y en *Glycyrrhiza glabra* los hallazgos continúan (Dembitski y col., 2012; García y López, 2004).

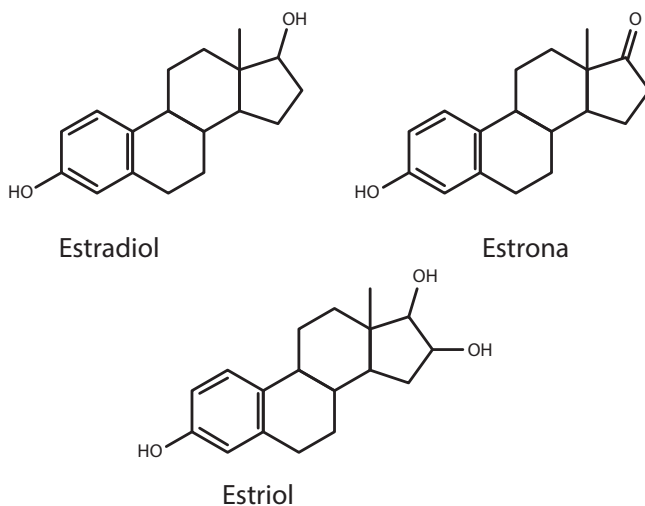
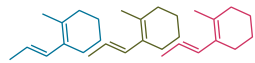


Figura 2. Estructuras químicas de estrona, estriol y estradiol.

Esteroles

Los esteroides son más abundantes en las plantas que los esteroles. Están presentes en la membrana celular y proporcionan resistencia de la membrana al estrés, realizan funciones de protección, estructurales, transporte y señalización (Balitova y col. 2016). Sus estructuras son diversas, comúnmente se encuentran mezclas de β -sitosterol (C29), campesterol (C28) y estigmasterol (C29).

Ahora bien, los reinos vegetal y animal no son mundos separados. Coexisten en el planeta y su evolución es simultánea. Por ello es razonable que, para un fin particular, las



plantas y los animales formen un mismo compuesto. Por ejemplo, el principal esteroide de origen animal es el colesterol (C₂₇), aunque también las plantas lo producen, es posible encontrarlo hasta en un 10% en las raíces de trigo y en un 10% en las raíces de arábidopsis en la cual el perfil de esteroides es β -sitosterol (64%), campesterol (11%), estigmasterol (6%), isofucoesterol (3%), y brasicasterol (2%). La cantidad de esteroides en las células vegetales es constante generalmente para cada especie y en promedio son 23 mg de esteroides totales por 1 g de peso seco (Sonawane y col. 2016).

El colesterol es un precursor de los esteroides vegetales de señalización como son los brasinoesteroides y fitoecdisteroides así como de las hormonas sexuales estrogénicas y androgénicas de los animales. Biosintéticamente, primero se forman los esteroides y después los esteroides en las plantas, menos abundantes en ellas (Tarkowská, 2019).

Las algas producen una amplia variedad de esteroides, mientras que las bacterias carecen de esteroides y las levaduras los acumulan en cantidades considerables (pueden llegar al 10% del peso seco). Los esteroides de las plantas pueden presentarse en estado libre, acoplados con ácidos grasos (ésteres de ácidos grasos) o como glicósidos.

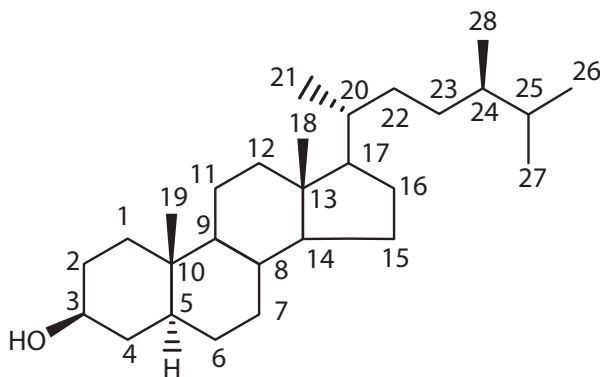


Figura 3. Estructura del campestanol y numeración de los átomos de carbono en la estructura esteroidal.

Los esteroides de vegetales poseen propiedades medicinales, agroquímicas antitumorales, inmunosupresoras, hepatoprotectoras, antibacterianas, reguladoras del crecimiento vegetal, hormonas sexuales, antihelmínticos, citotóxicos y cardiotónicos (García y López, 2004).

Glicósidos cardíacos

Los glicósidos cardíacos producen el aumento de la fuerza contráctil del corazón por medio de la inhibición de la enzima Na^+ , K^+ -ATPasa. Contienen un núcleo de perhidrofenantreno sustituido en C17 con un pentadienólido para los bufadienólidos (bufalin I) y un butenólido para los cardenólidos (digitoxigenina).

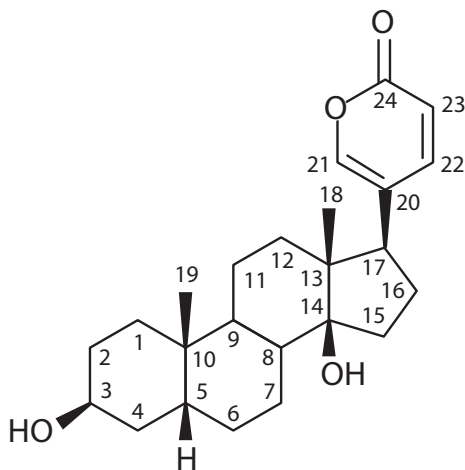


Figura 4. Estructura de la bufalina

Los cardenólidos tienen una larga historia en la terapéutica para insuficiencia cardíaca y la arritmia, a bajas concentraciones son útiles para tratar insuficiencia cardíaca en los humanos. En las plantas, su función principal es la protección de la planta contra la herbivoría. Los más utilizados terapéuticamente son la digoxina extraída de *Digitalis lanata* y la digitoxina, aisladas de *Digitalis purpurea*. Antiguamente, los nativos de África y América los usaron para envenenar sus flechas (Acharya y col. 2015).

Muchos glicósidos cardíacos se han aislado de plantas tropicales, aunque algunos de estos compuestos también están en las secreciones de sapos venenosos y la mariposa monarca. La familia Apocynaceae tiene una gran cantidad de cardenólidos comparada con otras familias: 55 géneros con cardenólidos, incluyendo dos géneros *Asclepias* y *Strophanthus* con la mayoría de las especies con cardenólidos.

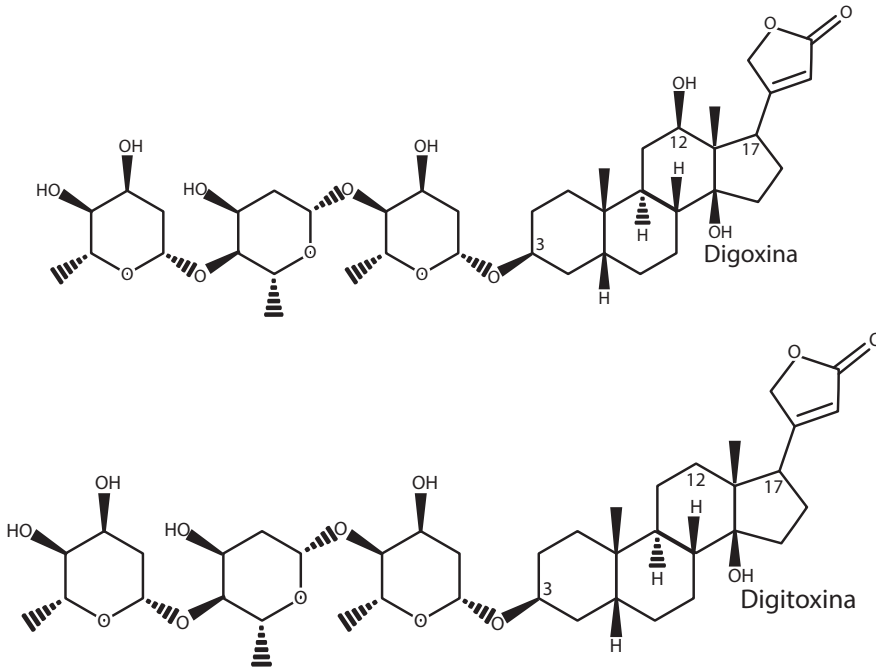
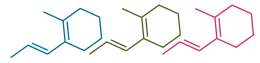
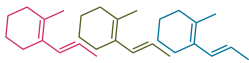


Figura 5. Estructura química de la digoxina y la digitoxina.

Las familias de plantas y especies que contienen cardenólidos son entonces: Apocynaceae, Asparagaceae, Asteraceae, Brassicaceae, Celastraceae, Combretaceae, Crassulaceae, Euphorbiaceae, Fabaceae, Moraceae, Ranunculaceae, Scrophulariaceae, Solanaceae y Malvaceae. Es importante notar que existe una notable diferencia en el contenido de cardenólidos en las diferentes partes de una planta.

Especies del género *Asclepias* son plantas hospederas de las larvas de la mariposa monarca, los insectos utilizan varias estrategias para impedir su intoxicación por los cardenólidos y minimizar sus impactos negativos, estos metabolitos secundarios son útiles para protegerse de los depredadores o los parásitos.

Algunas especies de entre las plantas crasuláceas, como *Cotyledon*, *Tylecodon* y *Kalanchoe* contienen bufadienólidos en sus estructuras y producen intoxicación en el ganado este efecto es de considerable importancia económica en África y Australia. Las crasuláceas tienen importancia en la medicina tradicional para infecciones, reumatismo e inflamación y los extractos de *Kalanchoe* tienen efectos inmunosupresores (Steyn, 1998).



Brasinoesteroides

Los brasinoesteroides son las únicas fitohormonas esteroidales, polihidroxiladas. Se descubrieron en 1970 al estudiar extractos de polen de colza (*Brassica napus* L.) y tienen una amplia distribución entre las plantas marinas y terrestres, pero en concentraciones muy bajas. Por ejemplo, con 40 kilogramos de polen de rapé se obtuvieron 4 mg del brasinólido.

Los brasinoesteroides tienen 27, 28 o 29 átomos de carbono en sus esqueletos. Existen variaciones en la sustitución de sus anillos A y B, por ejemplo pueden tener un oxígeno en el carbono 3 y otros adicionales en el dos y el seis. En la cadena lateral también pueden tener oxígenos en los carbonos 22 y 23. Se encuentran libres o conjugados con azúcares, ácidos grasos y ácidos inorgánicos.

Tienen una amplia distribución, se distribuyen en Algae, Briofita, Pteridofitas y Angiospermas. Se ha demostrado que influyen en la germinación, rizogénesis, floración, senescencia, abscisión y en los procesos de maduración. Estimulan el crecimiento de las plantas. Protegen a las plantas del estrés biótico y abiótico, como los ambientes salinos, la temperatura y el agua.

Los recientes descubrimientos de las propiedades fisiológicas de los brasinoesteroides permiten considerarlos como sustancias naturales apropiadas para su uso hacia la protección de las plantas y aumento en la producción agrícola, entre otras características (Barket, 2017; Hernández Silva y García Martín 2016).

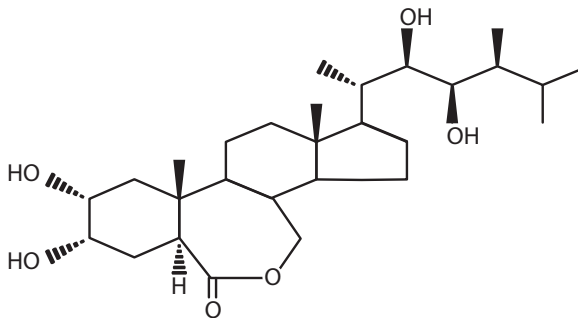
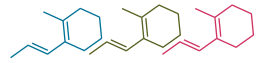


Figura 6. Estructura del brasinólido.



Fitoecdisteroides

Las plantas sintetizan los fitoecdisteroides para defenderse de los insectos fitófagos. Estos compuestos son iguales a los ecdisteroides que son hormonas que usan los artrópodos y los crustáceos en el proceso de muda o ecdisis.

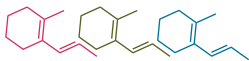
Los insectos que ingieren ecdisteroides y no están adaptados a ellos, sufren de efectos adversos como reducción de peso, reducción de muda y/o mortandad. Estos metabolitos secundarios estimulan la síntesis de proteínas en animales y humanos, además tienen propiedades adaptogénicas, antimutagénicas, hipercolesterolémicas, inmunoestimulante, nutritiva y tónica. La mayoría de las plantas biosintetizan los fitoecdisteroides a partir del ácido mevalónico por la ruta del mevalonato usando acetil-CoA como precursor. Tienen un esqueleto de carbono de cholest-7-en-6-ona que deriva biosintéticamente del colesterol y los fitoesteres. Frecuentemente con un -OH en el carbono 14.

Entre las especies con mayor cantidad de fitoecdisteroides está la espinaca (*Spinacia oleracea*, Chenopodiaceae) que contiene 50 ug/g en base fresca.

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) contiene niveles altos de fitoecdisteroides los cuales están involucrados en la defensa de las plantas de los ataques de los insectos y tienen propiedades farmacológicas que benefician a los mamíferos. El más abundante es 20-hidroxiecdisona (20HE), es secretado por las semillas de quinoa intactas en el agua durante los primeros estadios de germinación. Los fitoquímicos bioactivos de las semillas de quinoa producen una mezcla grado alimenticio útil para aplicaciones antidiabéticas (animal systems Graf y col. 2014).

Triterpenos comunes

Las amirinas, los ácidos oleanólicos y ursólico (comunes en las cubiertas protectoras de las plantas) y las cucurbitacinas son algunos de los triterpenos comunes presentes en las plantas.



◆ Amirinas

Son un par de triterpenos pentacíclicos, que se nombran como α -amirina y β -amirina. Están ampliamente distribuidas en la naturaleza y se han aislado a partir de una variedad de fuentes vegetales. La amirina tiene efectos antinociceptivos, antiinflamatorios, hepatoprotector y gastroprotector. La α -amirina se encuentra en el té de diente de león y en la resinas de varias especies de Burseras, en los propóleos se pueden encontrar ambas (Bracho 2009). Estos fitoquímicos se biosintetizan a través de la ciclización del escualeno (Osborn, 2003).

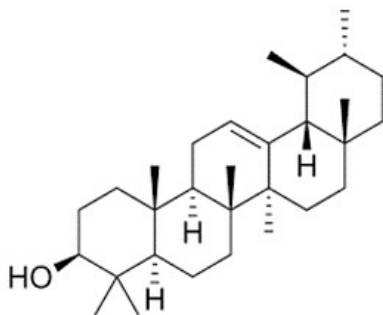
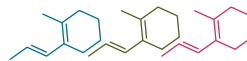


Figura 7. Estructura de α -amirina (triterpeno común).

◆ Ácidos oleanólico y ursólico

Los ácidos oleanólico y ursólico son ubicuos en las plantas, son triterpenos pentacíclicos y forman parte de la dieta humana debido a su presencia en hierbas medicinales y en las frutas (Liu, 2005). El ácido ursólico se puede aislar de *Calluna vulgaris* (brezo), *Rosmarinus officinalis* (romero), *Calendula officinalis* (calendula), *Malus domestica* (manzana), *Origanum vulgare* (orégano), *Salvia officinalis* (salvia), *Origanum majorana* (mejorana), *Lavandula angustifolia* (lavanda), *Thymus vulgaris* (timo) y *Eucalyptus* (eucalipto) (Cargnin y Gnoato 2017).

En el aceite de oliva y especialmente el orujo están el ácido oleanólico y el ácido maslínico que por su habilidad de modular la actividad de redes de señalización son prometedores para el tratamiento de enfermedades cardiovasculares, tumores y su proliferación, inflamación o hepatotoxicidad, el hecho de que los humanos han ingerido cantidades



significativas de ácido oleanólico y triterpenos relacionados estructuralmente, debido al consumo de aceitunas y aceite de oliva (ricas fuentes de triterpenoides) sugiere que los triterpenos pentacíclicos pueden ser relativamente seguros para el diseño de nuevos medicamentos (Rodríguez y Ruiz, 2010; Pironi y cols, 2018).

A pesar de la diversidad enorme de los compuestos antibacterianos, la resistencia de las bacterias se ha incrementado, por lo que es necesario explorar los metabolitos secundarios de nuevas especies de plantas. Desde el 2007 se han estudiado las propiedades antibacterianas del ácido ursólico y los resultados obtenidos contra diferentes cepas de bacterias lo hacen un prototipo para nuevos antibióticos principalmente contra bacterias (Pironi y col., 2018).

Cucurbitacinas

Las cucurbitacinas son triterpenoides que se producen en las cucurbitáceas y son responsables del sabor amargo y de la toxicidad de algunas especies. Su estructura es altamente oxigenada y poseen un esqueleto común que incluye un grupo *gem*-dimetilo en C-4 y otros metilos en C-9 y C-14.

Todas las cucurbitacinas también poseen un doble enlace C5-C6 y un metilo en C9 en lugar de C10. El esqueleto se puede encontrar libre o glicosilado. En un inicio se aislaron como los principios amargos de las cucurbitáceas. Posteriormente se encontró que están presentes en formas glicosiladas y no glicosiladas en las familias Brassicaceae, Scrophulariaceae, Begoniaceae, Elaeocarpaceae, Datisceae, Desfontainiaceae, Polemoniaceae, Primulaceae, Rubiaceae, Sterculiaceae, Rosaceae, y Thymelaeaceae (Marino-Valente 2004).

Las cucurbitacinas se han aislado de varios géneros de hongos como *Russula* y *Hebeloma* y de algunos moluscos marinos. Tienen actividad citotóxica, anticancerígena, son purgantes, antiinflamatorios y actúan contra la fertilidad.

La primera cucurbitacina se aisló como una sustancia cristalina en 1831 y se le llamó α -elaterina. La diversidad de las cucurbitacinas radica en la variedad de sustituyentes en su cadena lateral que contribuyen a sus diferentes actividades biológicas. Algunas plantas con cucurbitacinas como *Momordica charantia* tienen actividad contra la diabetes (Chen y col. 2005).

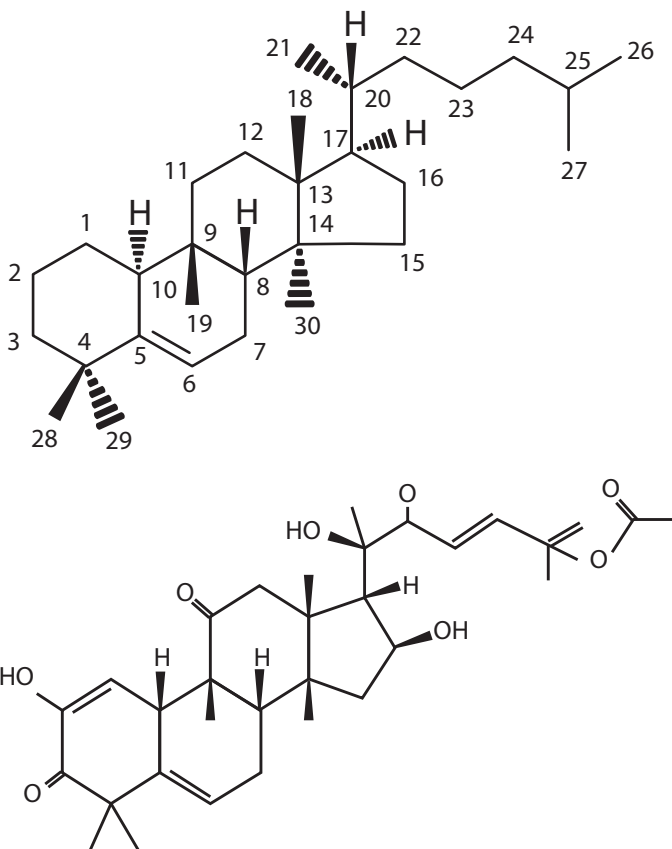
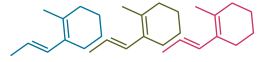


Figura 8. Esqueleto básico de cucurbitacinas

Saponinas

Las saponinas son un grupo de glicósidos esteroidales o triterpenoides, dependiendo de la aglicona. Se distribuyen en gran variedad de plantas. Se encuentran en más de 100 familias silvestres y cultivadas, además de algunos organismos marinos. Se les conoce desde la antigüedad por su capacidad de formar espuma cuando se les agita con agua. El nombre saponina se le dio debido a este comportamiento como jabón. Se caracterizan también por su sabor amargo y por la hemólisis de eritrocitos. Muchas tienen propiedades farmacológicas por lo que se usan en fitoterapia, medicina popular y en la industria de cosméticos.



Las saponinas o saponósidos, están presentes en muchas especies de plantas. Dichas saponinas naturales pueden ser terpénicas o esteroidales, dependiendo de si están formadas por un esteroide o un triterpeno y por una molécula de azúcar (parte hidrofílica) que se une a la sapogenina (parte hidrofóbica) por medio de un enlace glucosídico (Figura 9). Sin embargo, aquellas esteroidales son comunes en las monocotiledóneas. Su importancia radica en su estructura relacionada con las hormonas sexuales, la cortisona y otros esteroides y su utilidad en la industria farmacéutica. Las saponinas, como todos los heterósidos se hidrolizan en la presencia de ácidos o por medio de enzimas separando la genina (sapogenina) de los azúcares (López Luengo, 2001).

Según el número de posiciones de sustitución de los azúcares, las saponinas pueden clasificarse en monodesmosídicas cuando el azúcar se une por una única posición a la genina) y bidesmosídicas, si los azúcares se unen por dos puntos a la genina o tridesmosídicas. Las saponinas de carácter monodesmosídico se encuentran principalmente en raíces, cortezas y semillas. Mientras que las bidesmosídicas, más hidrosolubles, muestran preferencia por los tejidos de asimilación como hojas y ramas tiernas. Por otro lado, la sapogenina (también conocida como aglicona o genina) es la parte no glucosídica. Es un triterpeno o un esteroide y por su naturaleza no polar es insoluble en agua. La molécula de azúcar (glicona) en el caso de las saponinas esteroidales puede ser: glucosa, arabinosa, ramnosa, galactosa, xilosa; y en el caso de las saponinas triterpénicas puede contener también ácido glucurónico, el cual les da un carácter ácido (López Luengo, 2001).

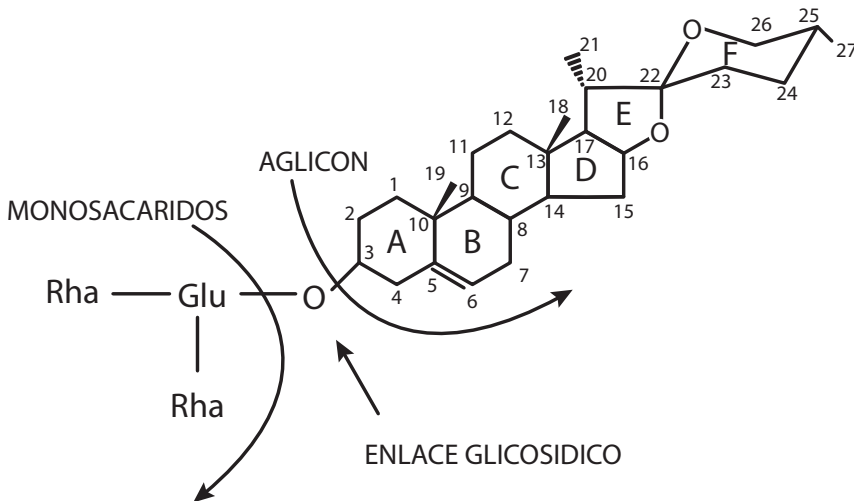
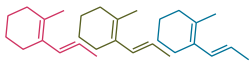


Figura 9. Partes de una saponina, en este caso es esteroidal.



Estructuralmente, las saponinas triterpénicas se distinguen por tener un esqueleto de 30 átomos de carbono y su parte glucosilada y las saponinas esteroidales que son esteroides glucosilados y tienen un esqueleto base de 27 carbonos, también se les conoce como saponinas neutras.

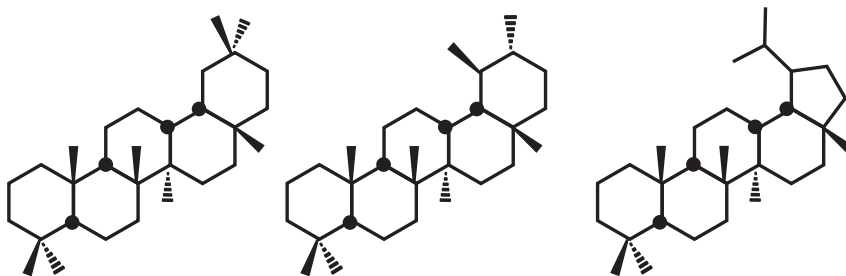


Figura 10. Esqueleto base de los triterpenos pentacíclicos. Oleanano, ursano y lupano.

Ambas clases de saponinas tienen el mismo origen biosintético por la ruta del mevalonato, la cual produce moléculas con cinco átomos de carbono: el difosfato de isopentenilo (IPP) y su isómero alílico dimetilalil difosfato diphosphate (DMAPP). Después a través del farnesil pirofosfato se obtiene por acción enzimática al escualeno como precursor de los triterpenos y los esteroides (Liao y col. 2016).

El primer paso en la síntesis de las saponinas es la ciclización del 2,3-óxido de escualeno, la cual da varios productos. La mayor parte de las saponinas triterpénicas derivan de los esqueletos oleanano o damarano, aunque los lupanos también son comunes.

La ciclización conduce a un punto de ramificación hacia la ruta biosintética de los esteroides en la cual el óxido de escualeno se cicla a lanosterol, esto sucede en los animales y en hongos, dentro de las plantas se forma el cicloartenol (Haralampidis y col., 2002).

Los saponósidos se encuentran en órganos vegetales muy diversos; sin embargo las saponinas esteroidales son menos abundantes en la naturaleza que las triterpénicas. En realidad, las esteroidales, encuentran de manera más abundante en las monocotiledóneas como en Liliaceae y Dioscoreaceae. Por otro lado, las saponinas triterpénicas son abundantes en las dicotiledóneas como Cariophyllaceae, Polygalaceae, Fabaceae, Apiaceae y Araliaceae, entre otras. Algunos ejemplos son: alfalfa, frijol soya, chícharos, frijoles, cacahuates, lentejas, raíces de ginseng, semillas de girasol regaliz, hojas de espinaca, hojas de té, quillaja, remolacha y especies de alliums.

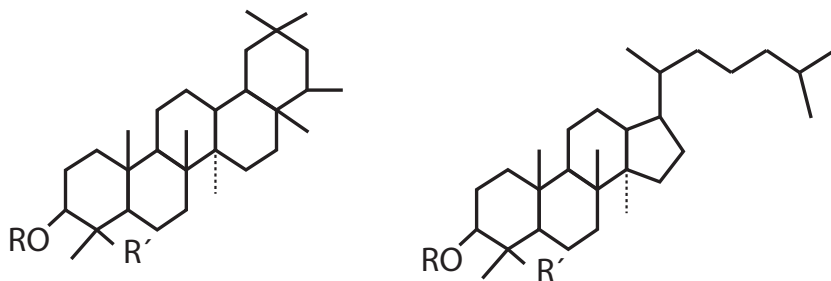
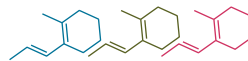


Figura 11. Sapogenina triterpénica y sapogenina esteroidal.

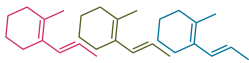
Las saponinas esteroidales pueden ser de dos tipos, de furostanol y estirostanol. Las de tipo furostanol, como las de carácter monodesmosídico, están en hojas y tallos –que son partes de asimilación. Las de tipo estirostanol están en sitios de reserva como raíces y semillas, como las bidesmosídicas.

Las estructuras químicas de las saponinas así como su concentración dentro de la misma especie vegetal es diferente en cada uno de sus órganos como rizomas, raíces, tallos cortezas, hojas, semillas y frutas, de acuerdo a su estructura sus actividades biológicas son diferentes. Pueden encontrarse en avena, yuca, semillas de jitomate, yam, semillas de fenogreco, raíces de ginseng, espárragos, berenjena y chiles.

Las saponinas tienen diferentes propiedades biológicas. Por ejemplo, en contacto con la sangre son hemolíticos, es decir, interactúan con el colesterol de la membrana de los eritrocitos, esta es una propiedad de las saponinas triterpénicas. Por ello son muy tóxicas administradas por vía sanguínea, mientras que por vía oral su toxicidad es muy baja. No obstante, en dosis altas, las saponinas irritan la mucosa bucofaríngea y digestiva por vía oral causando dolor abdominal, vómitos y diarrea.

En otras intervenciones al cuerpo, las saponinas a nivel renal, incrementa la filtración glomerular y se produce un efecto diurético. A nivel pulmonar tienen acción expectorante. Algunas otras saponinas, como la escina del castaño de Indias, tienen efecto antiinflamatorio, sobre todo en la insuficiencia venosa en las piernas. Algunos saponósidos pueden tener efecto estimulante, tonificante y antiestrés, denominado acción adaptógena.

Las saponinas muestran efectos en los animales como la permeabilización y otros efectos en las membranas. Tienen la habilidad lítica de formar poros en membranas.



Dicha lisis en las membranas de los eritrocitos se ha usado para detectar saponinas y otros estudios fisiológicos. La mayoría de las saponinas son tóxicas para animales de sangre fría, sobre todo los peces. Algunos de estos metabolitos son tóxicos para los moluscos, por lo que se usan para romper la cadena de transmisión de las esquistosomiasis (Banerje, 2012).

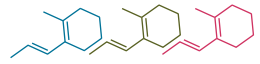
Las saponinas esteroidales son importantes en la industria farmacéutica por su relación estructural con las hormonas sexuales. Por esta relación estructural se les utiliza para la síntesis de compuestos como la cortisona, esteroides diuréticos, vitamina D y glicósidos cardíacos.

Ahora bien, las geninas esteroidales derivan de un esqueleto hexacíclico de 27 átomos de carbono, que es el núcleo espiroetano. La diosgenina es una saponina esterooidal en las partes subterráneas de distintas especies de lianas herbáceas tropicales del género *Dioscorea*. Para que estas especies sea de interés industrial, su contenido de diosgenina debe ser superior al 3%. El fenogreco también se utiliza como fuente de diosgenina. Semejante a la diosgenina, es la hecogenina, se obtiene de distintas especies de agaves o sisales.

Algunas saponinas de los rizomas de especies de *Amaryllidaceae* o nardos como *Polianthes tuberosus* se usaron desde la época prehispánica como jabón. A estos rizomas se les llama *amole*, significa jabón y se usaba para ropa delicada. Mientras que los rizomas de algunas cucurbitáceas se usan como jabón no alcalino, se les conoce como *sanacoche*, también se usa como jabón el residuo que queda después de obtener la fibra del agave lechuguilla. Otro ejemplo de saponina triterpénica es la que se obtiene de un árbol nativo de los andes chilenos, *Quillaja saponaria*. Su corteza se extrae con agua y se utiliza en las industrias de alimentos, bebidas, minería, agricultura, tratamiento de efluentes.

Se considera a las saponinas como parte del sistema de defensa (fitoprotectores). Algunos de estos metabolitos actúan como barreras químicas contra el ataque microbiano; a estas se les da el nombre de fitoanticipinas. Mientras que otras antimicrobianas inducibles se llaman fitoalexinas. Estos dos grupos de fitoquímicos son los antibióticos de las plantas.

La hiedra (*Hedera helix*) además de ser útil como jabón, tiene acción expectorante, es una de las acciones más clásicas de las (plantas) con saponinas. Su efecto es a través de la estimulación de la secreción traqueobronquial por un reflejo autonómico con origen en la mucosa gástrica. El extracto contiene hederacósido, con propiedades antiespasmódica y antitusiva, también se emplea como anticelulítico (Lutzenkoj, 2010).



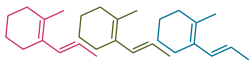
Phytolacca icosandra (Phytolaccaceae) también conocida como jaboncillo es útil para el tratamiento de edemas, reumatismo y artritis. Es un arbusto nativo de América, desde Estados Unidos a Perú. También sirve como molusquicida, antihelmíntico y herbicida. Los análisis fitoquímicos han mostrado su contenido de saponinas pentacíclicas triterpénicas ácido espergulagénico y ácido serjánico (Galárraga-Montes y Amaro, 2016). *Ruscus aculeatus* es un arbusto pequeño siempre verde de Europa, actualmente en la lista roja de plantas por el uso desmedido y las dificultades para su propagación. Su rizoma contiene dos saponinas esteroidales que presentan actividad protectora vascular y venotónica. Este hecho hace que la rucogenina y la neorucogenina sean importantes para el tratamiento de las venas varicosas y las hemorroides (Khojasteh y col. 2019 ; Moyano, E. y col 2019).

El rizoma de zarzaparrilla (*Smilax* sp.) que contiene sarsapogenina con efecto expectorante, diurético y depurativo. La zarzaparrilla también se utiliza como fuente de esteroides.

El regaliz u orozuz (*Glycyrrhiza glabra*) pertenece a la familia de las fabáceas, nativo de Europa y Asia Menor. Los saponósidos son, además de los flavonoides, sus principales principios activos. Se utiliza como coadyuvante en la gastritis y en la úlcera péptica. La glicirricina (saponina ácida) es el fitoquímico activo más importante de esta especie (2-15% en peso, según su origen). Además es un edulcorante. Incluso es más dulce que la sacarosa (30 a 50 veces) y tiene actividad expectorante, antiviral y es bacteriostático. También se usa como aromatizante. En la industria farmacéutica se utiliza como compuesto antiinflamatorio, antivírico contra el herpes y el sida, antialérgico y hepatoprotector. Sin embargo, su consumo a altas concentraciones incrementa la presión sanguínea y aumenta la retención de agua y de cloruro sódico. La hidrólisis ácida de su extracto libera ácido glucurónico y ácido glicirricínico.

La raíz de eleuterococo, *Eleutherococcus senticosus* (Rupr. and Maxim.) conocido como ginseng siberiano, contiene adaptógenos. Se cree que aumenta la resistencia a estresantes exógenos y que puede contribuir a la normalización de la respuesta inmune. Entre otros muchos principios activos, contiene saponósidos derivados del ácido oleanólico denominados eleuterósidos. El eleuterococo presenta acciones farmacológicas semejantes a las del ginseng (Jina y cols 2020).

Mientras que las saponinas son los fitoconstituyentes más abundantes en el fenogreco (*Trigonella foenum-graecum*). Yoshikawa y colaboradores encontraron seis saponinas en el fenogreco, la mayoría de ellas son de furostanol como la protodioscina y la dioscina. Esta última es un ejemplo de una saponina tipo espiroestanol. El fenogreco es de las pocas



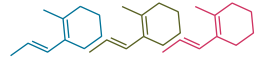
fuentes naturales de diosgenina, la cual se extrae normalmente de plantas del género *Dioscorea* de México y Asia. Este compuesto es un intermediario avanzado en la síntesis de anticonceptivos orales y otros medicamentos hormonales (Kalyan y cols., 2017). Sus semillas tienen un sabor amargo debido a la presencia de saponinas. Así que no es muy aceptado como alimento, aunque es posible eliminar el sabor amargo remojando las semillas en agua, por tostado y por germinación.

La alfalfa es rica en saponinas en hojas tallos, raíces y flores. Estas provocan una menor producción de huevos de gallinas, retrasa el crecimiento de los pollos, y también retrasa la germinación del algodón y la lechuga. Esta problemática ha llevado a algunos investigadores a buscar la reducción del contenido de saponinas en la alfalfa. ¿Por qué continuar el uso de este alimento? Es un forraje barato para animales, además de poseer un valor nutritivo importante por su buena calidad y cantidad de proteína para vacas productoras de leche (Olezeck y col. 1992) Kozłowska, 2019). Sin embargo se ha visto que el ganado vacuno produce metano y dióxido de carbono durante la fermentación de este alimento y la producción de gases es un factor importante que influye en el cambio climático (el metano 28 veces más que el CO₂). Además los investigadores consideran que la producción de metano resulta en una pérdida significativa de energía de la dieta.

Para resolver esa nueva problemática, entonces, se han utilizado antibióticos para modular la fermentación en el rumen; al disminuir la población de protozoarios, en consecuencia, baja la emisión de metano. Estudios recientes han obtenido buenos resultados en el uso de saponinas para romper la membrana celular de los protozoarios.

Los miembros del género *Avena*, sintetizan dos familias diferentes de saponinas, los avenacósidos esteroidales y las avenacinas triterpenoides. Su distribución es mutuamente exclusiva, los avenacósidos se acumulan en las hojas y las avenacinas en las raíces (Osbourne, 2003). Las avenacosinas A y B son fitoanticipinas. Las fitoanticipinas son antimicrobianos preformados en las plantas, son únicos en su forma de actuar porque son sintetizados antes del ataque del patógeno o de la infección; existen en las plantas sanas en su forma biológicamente activa (Laudenbach y Kesselmeier, 1982).

El género *Yucca* (familia Asparagaceae antes Liliaceae) es de los más representativos en las zonas áridas de México, pues crecen alrededor de 30 especies. Se usa en la construcción de viviendas, en la fabricación de ixtle; en la alimentación humana, se usan las flores y frutos; como combustible; así como en la obtención de celulosa para fabricar papel y como plantas de ornato. Sus semillas son ricas en aceite, el cual contiene



varias saponinas con la particularidad que cuando se les somete a la hidrólisis ácida, todas ellas producen sarsapogenina. Un ejemplo son las filiferinas a y b, dos saponinas esteroidales, por hidrólisis ácida, producen sarsapogenina, galactosa y glucosa. La sarsapogenina es ideal para la obtención de corticoides y hormonas sexuales a través de la obtención del pregnano.

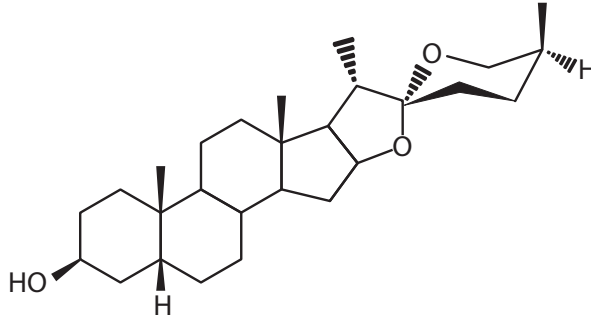


Figura 12. Sarsapogenina (aglicona esteroidal de *Yucca filifera*).

El barbasco, una *Dioscorea* de México y América Central es fuente de diosgenina. Se utilizaba como materia prima para la fabricación de esteroides por la industria farmacéutica. Debido a que la dioscina (glucósido esteroidal=saponina) se encuentra en el rizoma fue necesario encontrar otras fuentes de diosgenina (aglicona) (Romo de Vivar, 1985).

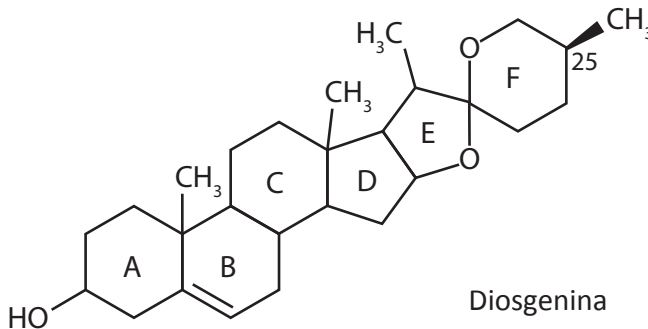
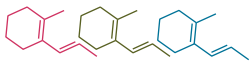


Figura 13. Dioscina y diosgenina, cardiotónicos.



◆ Damarano

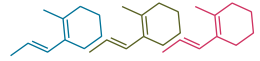
Es un triterpeno tetracíclico que se encuentra en las saponinas. Forman saponinas triterpenoides como las del ginseng. Compuestos de esta serie del damarano y sus productos de oxidación se aislaron por primera vez de la resina o goma de dammar, una resina tropical de árboles de la familia Dipterocarpaceae del Asia oriental (Shi y col. 2019). Algunos triterpenos (ácido masticadienoico y el ácido 3-hidroximasticadienoico) encontrados en la corteza del cuachalalate son del tipo de los esteroides tetracíclicos del subgrupo damarano. La corteza del cuachalalate es el remedio para las úlceras más importante en la medicina tradicional mexicana (Navarrete y cols., 2006).

En el ginseng (*Panax ginseng*) se han encontrado más de cien saponinas de esta serie de damarano, también llamadas ginsenósidos o saponósidos como el panaxatriol y el protopanaxadiol. La estructura básica de las saponinas más importantes del ginseng es un sistema hidrofóbico de cuatro anillos con una relación trans entre el sistema de anillos y los carbohidratos glucosa, ramnosa, xilosa y arabinosa unidos a los carbonos 3, 6 y 20. Cada ginsenósido se caracteriza por la posición de su azúcar en los anillos de damarano. Las del grupo damarano (triterpeno tetracíclico) son más abundantes que las del grupo oleanano (triterpeno pentacíclico), son menos frecuentes las del grupo ursano.

Desde la antigüedad se ha considerado que el ginseng puede proporcionar la eterna juventud, revitalizando el cuerpo y la mente, porque produce un aumento de energía y al estimular la formación de vasos sanguíneos mejora la circulación de la sangre; con ello aumenta la memoria y las actividades cognitivas (Shi y col. 2019).

Existen reportes en los que se encontró que las saponinas del ginseng refuerzan el sistema inmune, como efectos antiinflamatorios y antihepatotóxicos. Son responsables de propiedades inmunoestimulantes y de su capacidad antinociceptiva. Son antitumorales en algunos tipos de cáncer en los mamíferos. Tienen actividad cardioprotectora con diferentes mecanismos y son antivirales.

En general, todas las raíces de ginseng contienen saponósidos con importante acción expectorante y balsámica. Es capaz de modificar su respuesta al estrés. Esta capacidad de adaptación y supervivencia aumenta la resistencia del organismo. Así, se considera que es una planta adaptógena. Dicho de otra manera, a estas plantas se les considera reguladores metabólicos que aumentan la habilidad de un organismo a adaptarse a los factores ambientales e impedir el daño por estos factores. Parece ser que el ginseng tiene



una acción anabolizante con efecto tónico estimulante de la biosíntesis proteica y activa el metabolismo de glúcidos y lípidos (Panossian, 2017).

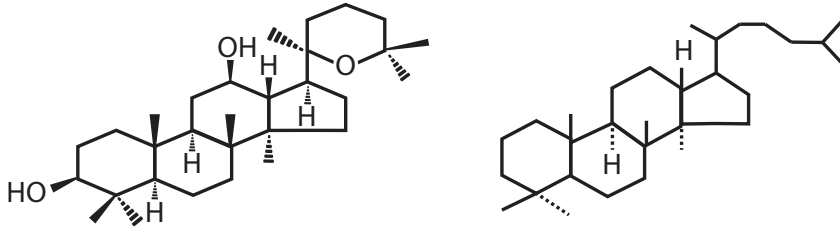
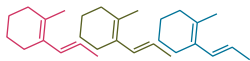


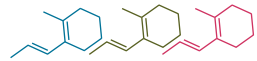
Figura 14. Estructuras del damarano y del panaxadiol

Por las propiedades arriba indicadas, en la industria farmacéutica, las saponinas se utilizan preferentemente como expectorantes, diuréticas y venotropas, así como detergentes y emulsionantes. Las saponinas esteroidales también se utilizan como materia prima para la síntesis de principios activos esteroideos que funcionan como antiinflamatorios, andrógenos, estrógenos, diuréticos y anticonceptivos,

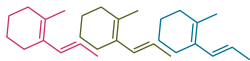


Bibliografía

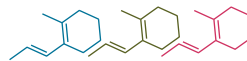
- Krishna A., Kumar H., Vinay M., Sharma K., Sharma, N. (2015) Plant Cardenolides in Therapeutics. *International Journal of Indigenous Medicinal Plants* 48: 1871 – 1896.
- Barket A. (2017) Practical applications of brassinosteroids in horticulture—Some field Perspectives. *Review. Scientia Horticulturae* 225: 15–21.
- Bracho Pérez, J., Rodríguez Best C. y Llanes F. (2009) Triterpenos pentacíclicos en propóleo. *Revista de la Sociedad Química del Perú* 75: 4
- Chen, J., Chiu, M., Nie, R., Cordell, G. y Qiuc, S. (2005) Cucurbitacins and cucurbitane glycosides: structures and biological activities. *Natural Product reports* 386 – 399.
- Cseke, L.J., Kirakosyan A. , Kaufman P., Warber, S, Duke J. y Brielmann H. (2006) *Natural Products from plants*. CRC Taylor and Francis Second Edition.
- Banerjee, D.; Chakraborty, D.; Pakhira, M. C.; Shrivastava, B.; Kuhad, R. C. Saponin: Role in Animal system. (2012) *Veterinary World* 5, 248-254.
- Dembitsky, V., Savidov, N., Poroikov, V. (2018) Naturally occurring aromatic steroids and their biological activities. *Appl Microbiol Biotechnol* **102**, 4663–4674 <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8968-7>
- Francis G, Kerem Z, Makkar H and Becker K. (2002) The biological action of saponins in animal systems: a review. *British Journal of Nutrition* 88, 587–605.
- Galarraga Montes E y Amaro-Luis J (2016) Cosandrin, a novel peltogynoid from the fruits of *Phytolacca icosandra* (Phytolaccaceae) *Natural Product Research* 30.
- García D. y López O. (2004) Los fitoestrógenos: ¿mito o amenaza para la alimentación animal en el trópico? *Pastos y Forrajes*, 27: 303.
- Graf B., Poulev A., Kuhn P., Grace M., Lila M., Raskin I. (2014) Quinoa seeds leach phytoecdysteroids and other compounds with anti-diabetic properties. *Food Chemistry* 163: 178-185.



- Haralampidis K., Trojanowska M., Osbourn A. (2002) Biosynthesis of Triterpenoid Saponins in Plants. In: Dutta N.N. et al. (eds) History and Trends in Bioprocessing and Biotransformation. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, vol 75. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Hernández Silva E y García-Martín I. (2016) Brassinosteroids in agriculture. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 7: 441-450.
- Jina L., Schmiecha M., El Gaafarya M., Zhangc X., Syrovetsa T., Simmeta T. (2020) A comparative study on root and bark extracts of *Eleutherococcus senticosus* and their effects on human macrophages Phytomedicine 68: 153181.
- Kalyan C. Nagulapalli V. Swaroop, Bagchi D. y Bishshaye A. (2017) A small plant with big benefits: Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* Linn.) for disease prevention and health promotion. Molecular Nutrition and Food Research 61: 6 1600670. DOI: 10.1002/mnfr.201600670
- Kozłowski, M., Cieślak, A., Jóźwik, A., El-Sherbiny, M., Stochmal, A., Oleszek, W., Kowalczyk, M., Filipiak, W., & Szumacher-Strabel, M. (2020). The effect of total and individual alfalfa saponins on rumen methane production. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(5), 1922-1930.
- Khojasteh, A., Sánchez-Muñoz R., Moyano, E. , Bonfill, M., Cusido, M. Palazon, J. (2019) Biotechnological production of ruscogenins in plant cell and organ cultures of *Ruscus aculeatus* Plant Physiology and Biochemistry 141:133-141.
- Laudenbach y Kesselmeier (1986) Some Observations on the Saponin Accumulation in Oat Seedlings and on the Transformation of the Avenacosides to the Antibiotic 26-Desgluco-avenacosides Zeitschrift für Naturforschung C 37:1095-1099.
- López-Luengo (2001) Sáponósidos. Fitoterapia 20:124-128.
- Lutsenkoi Y., Bylka W., Matlawska I., Darmohray R., (2010) *Hedera helix* as a medicinal plant. Herba Polonica 1: 83-96.
- Marino-Valente L. (2004) Cucurbitacinas e suas principais caeacterísticas estruturais. Quimica Nova, 27: 944-948.



- Moyano E., Bonfill M., Cusido R., Eibl R., Palazon J. (2019) Biotechnological production of ruscogenins in plant cell and organ cultures of *Ruscus aculeatus*. *Plant Physiology and Biochemistry* 141: 133–14.
- Navarrete A., Vaishalic B., Xiuhong J. 2006, Quantitative Determination of Triterpenes from *Amphipherygium adstringens* by Liquid Chromatography and Thin-Layer Chromatography and Morphological Analysis of Cuachalalate Preparations. *Journal of AOAC international* 89: No. 1.
- Oleszek W, Jurzysta M, Płoszyński M, Colquhoun I., Price KR, Fenwick GR (1992) Zanhic acid tridesmoside and other dominant saponins from alfalfa (*Medicago sativa* L.) aerial parts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 40:191–196.
- Osborn A. (2003) Molecules of Interest Saponins in cereals *Phytochemistry* 62: 1–4
- Panosian A, Understanding adaptogenic activity: specificity of the pharmacological action of adaptogens and other phytochemicals. *Annals of New York Academy of Sciences* 1401 (2017) 49–64.
- Pironi A., Rocha de Araújo P., Aires Fernandes M., Nunes Salgado H. y Marlus Chorilli (2018) Characteristics, Biological Properties and Analytical Methods of Ursolic Acid: A Review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry* <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=1040-8347> 1547-6510.
- Rodriguez-Rodriguez V, Ruiz-Gutierrez V. (2010) Olives and olive oil in Health and Disease Prevention en Functional Properties of Pentacyclic Triterpenes Contained in Pomace Olive Oil pags. 1431-1438 Academic Press.
- Romo de Vivar A. (1985) *Productos Naturales de la Flora Mexicana* México: Limusa.
- Snehal S. Patel, Jignasha K. Savjani (2015) Systematic review of plant steroids as potential anti-inflammatory agents: Current status and future perspectives. *The Journal of Phytopharmacology* 4: 121-125 Recuperado de: www.phytopharmajournal.com
- Steyn P. y van Heerden F. (1998) Bufadienolides of plant and animal origin. *Natural Product Reports* 397-413.
- Shi, Z, Zeng J. Tsai A. (2019) Chemical Structures and Pharmacological Profiles of Ginseng Saponins. *Molecules* 24(13):2443. doi: 10.3390/molecules24132443

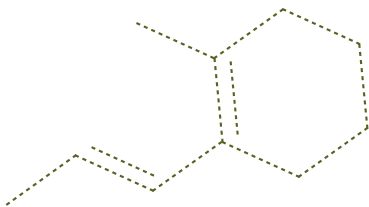


Sonawane P., Pollier J., Panda S., Szymanski J., Massalha H., Yona M, Unger T., Malitsky S., Philipp Arendt, Pauwels, L., Almekias-Siegl E., Rogachev I., Meir S., Cárdenas P., Masri A., Petrikov M., Schaller H., Schaffer A., Kamble A., Giri A., Goossensand A. (2016) Plant cholesterol biosynthetic pathway overlaps with phytosterol metabolism. *Biochemistry of Sterols, Cardiac Glycosides, Brassinosteroids, Phytoecdysteroids*. *Nature Plants* 3, 16205 | DOI: 10.1038/nplants.2016.205 | www.nature.com/natureplants

Tarkowská, Danuše (2019) Plants are Capable of Synthesizing Animal Steroid Hormones *Molecules* 24: 2585 doi:10.3390/molecules24142585

Cargnin T. y Gnoatto B. (2017) Ursolic acid from apple pomace and traditional plants: A valuable triterpenoid with functional properties *Food Chemistry* 220, 477-489.

Valitova J., Sulkarnayeva, A., Minibayeva F. (2016) Plant Sterols: Diversity, Biosynthesis, and Physiological Functions. *Biokhimiya, Biochemistry (Moscow)*, 81: 81.



Las plantas producen una gran variedad de fitoquímicos. Las sustancias que contienen uno o más grupos hidroxilo en un anillo aromático son los compuestos fenólicos, los metabolitos secundarios más abundantes en el reino vegetal. Los grupos hidroxilo unidos al anillo aromático dan origen a una gran diversidad de compuestos, dentro de los cuales se incluyen a los fenoles simples, estos son: los ácidos fenólicos, benzoicos y cinámicos; fenilpropanoides; flavonoides; cumarinas; cromonas; quinonas; pterocarpanos; naftoquinonas; xantonas; lignanos, ligninas y taninos.

Las ligninas y los flavonoides son los compuestos fenólicos más difundidos entre las plantas. Algunos de estos compuestos son solubles en disolventes orgánicos, otros son solubles en agua porque son glucósidos o ácidos carboxílicos y otros son polímeros muy grandes y son insolubles (Saxena, 2013).

En las plantas superiores, la biosíntesis de los compuestos fenólicos se asocia con dos rutas metabólicas: la del ácido shikímico y la del ácido malónico. Los principales compuestos sintetizados a partir de la L-fenilalanina y la L-tirosina son los ácidos cinámicos y sus ésteres, cumarinas, fenilpropanos, cromonas (C6-C3), estilbenos, antraquinonas (C6-C2-C6), chalconas, flavonoides, isoflavonoides, neoflavonoides (C6-C3-C6) y sus dímeros y trímeros respectivamente (C6-C3-C6)_{2,3}, lignanos, neolignanos (C6-C3)₂, ligninas (C6-C3)_n. Los ácidos hidroxibenzoicos y los aldehídos aromáticos (C6-C1) se biosintetizan por la vía del shikimato (Santos-Sánchez, 2019).

Una hipótesis sobre el origen de las plantas terrestres es que evolucionaron para la protegerse de los rayos UV del sol a través de la inducción de la producción de pigmentos flavonoides, principalmente flavonas y flavonoles desde sus ancestros. Estos pigmentos absorben eficazmente la luz ultravioleta (Stafford, 1991). Las plantas guardan a los flavonoides en vacuolas, paredes celulares y cutículas, solamente las producen bajo un estricto control regulatorio (Treutter, 2006).

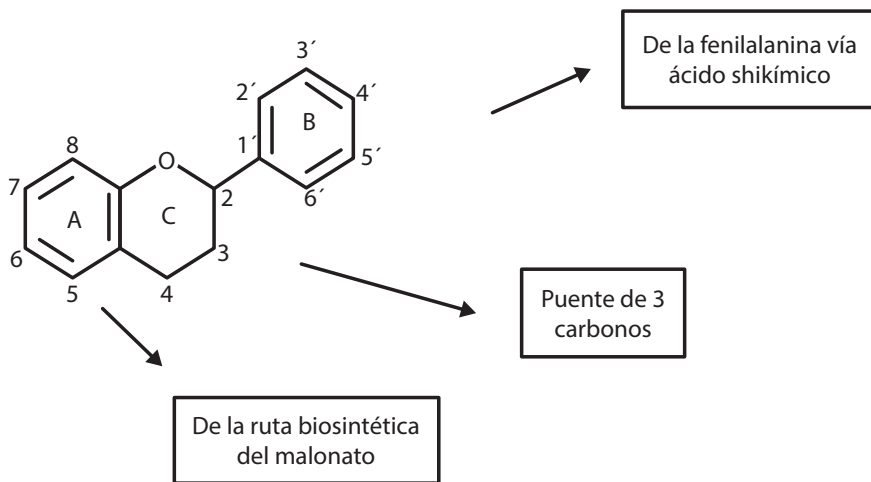
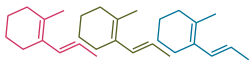


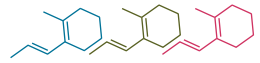
Figura 1. Origen biosintético del esqueleto de los flavonoides.

Existen dos grandes grupos de compuestos fenólicos. Por un lado están los ácidos fenólicos, benzoicos y cinámicos y; por el otro, los flavonoides (flavonoles, antocianos, flavanonas, flavonas y otros). Las diferencias de estructura entre ambos grupos consisten principalmente en que los ácidos fenólicos tienen un único anillo, mientras que los flavonoides están formados por dos anillos fenólicos unidos por una cadena de tres átomos de carbono.

Fenoles simples

Se caracterizan por tener un solo anillo de benceno, grupos carboxilo y uno o más grupos hidroxilo en sus moléculas, lo que les da propiedades antioxidantes para los alimentos y para el cuerpo humano, por lo que resultan adecuados para la prevención de un número de enfermedades, entre ellas el cáncer.

Casi todos los fenoles simples son las unidades monoméricas de los polifenoles y forman los tejidos de las plantas incluyendo a la lignina y la melanina. Esto incluye a los ácidos p-hidroxibenzoico, protocatecuico, vainílico, sirínico, salicílico y gálico, pueden obtenerse por hidrólisis ácida de estos tejidos. Los fenoles libres no requieren de la degradación de los polímeros de la pared celular y no es frecuente encontrarlos en las plantas.



◆ Ácido salicílico

El sauce llorón (perteneciente a la familia de las salicáceas y al género *Salix*, produce el ácido salicílico, un fenol simple, que es el principio activo que le da sus propiedades analgésicas, antipiréticas y antineurálgicas, por lo se usa contra la fiebre, dolores reumáticos y musculares. El ácido salicílico en algunas plantas reduce los niveles de etileno, aumenta el contenido de capsaicina en los chiles y la producción de antocianinas en las zanahorias.

Esta sustancia está relacionada con la señalización de resistencia de las plantas a los patógenos, en relación a la expresión de proteínas. Tiene un papel importante en el desarrollo, maduración y floración de la planta y en las respuestas al estrés abiótico.

La salicina, el glucósido del alcohol salicílico, se aisló por primera vez en 1826 de la corteza del sauce. La salicina por hidrólisis se transforma en un azúcar y un compuesto aromático, que después de oxidarse se convierte en ácido salicílico (ácido 2-hidroxibenzoico) que se usa ampliamente en síntesis química, incluyendo la obtención de la aspirina, las plantas contienen pocos microgramos por gramo de peso fresco (Miura y Tada 2014).

◆ Arbutina

El arbutósido o arbutina se aísla de la gayuba (*Arctostaphylos uva-ursi*). Por hidrólisis, origina glucosa e hidroquinona (un antiséptico de las vías urinarias). La arbutina por sus efectos astringentes y antibacterianos es útil en la industria floral, en la industria de cosméticos se utiliza como blanqueador de la piel (Parejo y col.2001).

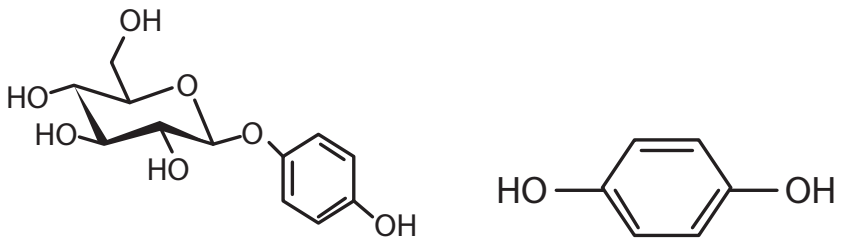
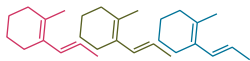


Figura 2. Arbutina e hidroquinona.



En el riñón, la arbutina se descompone en glucosa e hidroquinona. La hidroquinona se combina con ácido glucurónico para ser eliminada por la orina. Si la orina es alcalina (pH= 8) la hidroquinona se libera en el tracto urinario y actúa como antibiótico y si la orina no es alcalina, la hidroquinona no provoca ningún efecto.

◆ Vainillina

La glucovainillina se obtiene a partir de la planta de la vainilla, por la acción hidrolítica de la beta glucosidasa se transforma en vainillina (el compuesto fenólico responsable del aroma y sabor característicos de la vainilla). El proceso de hidrólisis es lo que se conoce como el curado de la vainilla. La usaban los pueblos prehispánicos y actualmente se utiliza en la fabricación de postres, bebidas, medicinas y aromatizantes.

En 1858 la vainillina se aisló de las vainas de *Vanilla planifolia*. En 1874 se obtuvo de los glicósidos de la savia del pino. Es posible sintetizarla a partir del guayacol (Gallage, 2015).

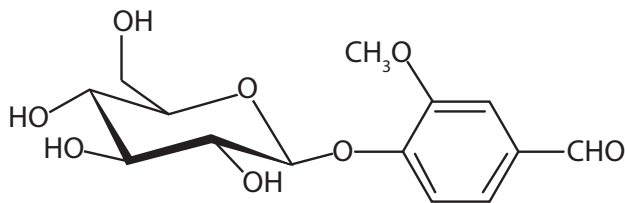
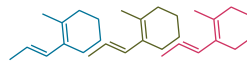


Figura 3. Estructura de la glucovainillina.

◆ Ácido benzoico y derivados.

El ácido benzoico, los benzoatos y los ésteres del ácido benzoico Se usan como conservadores en los productos alimenticios ácidos, ya que actúan contra las levaduras y las bacterias.

El ácido gálico (ácido 2,4,5-trihidroxibenzoico) se puede encontrar libre, esterificado, como derivados de catequina, y como taninos hidrolizables. Se encuentra en la mayoría de las frutas, especialmente en las bayas (arándanos), en las setas, canela, clavo, hojas de té, corteza de roble entre otros. Es uno de los compuestos fenólicos más activos de origen vegetal.



Se obtiene por la hidrólisis de ácido tánico con ácido sulfúrico. Tiene usos como precursor de fármacos (Trimetoprim), y para la producción de antioxidantes que se usan en alimentos, tintas y colorantes, así como en fotografía y la manufactura de papel. Este ácido es uno de los productos monoméricos derivados de la lignina con potencial para ser explotado a partir del agave tequilero. El ácido gálico se usa también para producir pirogalol, ésteres de ácido gálico y para la síntesis enzimática de propil galato. Existen estudios sobre la producción de ácido gálico con hongos para efectuar la biotransformación, usando residuos agrícolas como sustratos económicos como residuos (Karamaæ, 2006).

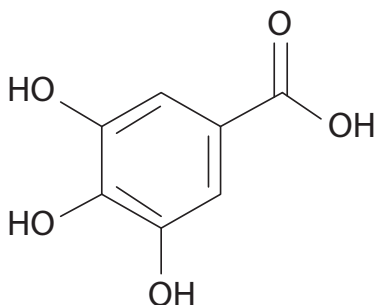
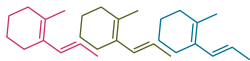


Figura 4. Estructura del ácido gálico.

El ácido gálico y sus derivados son antioxidantes, protegen a las células humanas del daño oxidativo; es fungicida y viricida, tiene actividad antimicrobiana contra patógenos del hombre como *Staphylococcus aureus*, *Corynebacterium accolans*, *Candida albicans* y patógeno de plantas *Erwinia carotovora*. Se usa como astringente en los casos de hemorragia interna, es útil para tratar la diabetes, la psoriasis y las hemorroides (Alencar y col. 2015).

◆ Guayacol

El guayacán o palo santo (*Guajacum sanctum* L.) es una especie con uso medicinal. Es poco abundante y de difícil proliferación. Se encuentra en peligro de extinción en algunas zonas por la explotación de su madera. Es una madera bastante dura y duradera debido a su resina que resiste a los ataques de insectos y le da propiedades autolubricantes que lo hacen apropiado para la construcción de barcos.



Además se le explota por las propiedades medicinales de su resina (se usa como estimulante, depurativo, diaforético y diurético también como tratamiento en resfriados, gripe asma, bronquitis, catarros crónicos, es decir en afecciones de vías respiratorias, en reumatismo, gota, afecciones en la piel, en la sífilis, y amenorrea.

El extracto de su madera es conocido como guayacol, el cual se obtiene de la destilación de la madera y la resina. La resina se obtiene por medio de heridas hechas a la corteza. Esta resina también se puede extraer del aserrín, hirviéndolo en agua (López Toledo y col. 2011).

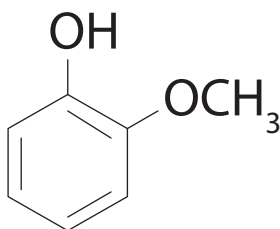


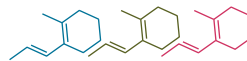
Figura 5. Estructura del guayacol.

Fenilpropanoides

Los más importantes son los ácidos cinámicos, tienen la estructura C_6C_3 , que es un anillo aromático unido a una cadena lateral de tres carbonos. Están presentes en la naturaleza en su forma libre, esterificada de amidas o glicosilados. Son los bloques que constituyen a la lignina. Están relacionados con la regulación del crecimiento vegetal y con la resistencia a las enfermedades. Los fenilpropanoides más comunes son los ácidos hidroxicinámicos, ubicuos en las plantas ejemplos de ellos son los ácidos: ferúlico, sinápico, cafeico y p-cumárico.

♦ Ácido cafeico

El ácido cafeico es el éster del ácido quínico y del ácido clorogénico, se le conocen algunos isómeros. Las formas diferentes del ácido cafeico son útiles en taxonomía. Los derivados del ácido cinámico se utilizan como antioxidantes y son en su mayoría derivados de



los ácidos p-cumárico, ferúlico y cafeico – el ácido sinápico se utiliza menos– . Estos compuestos son ubicuos en las plantas comestibles (frutas, vegetales, café) por lo que su consumo es habitual en nuestra dieta diaria, se han identificado estos ácidos y sus metabolitos en la orina (Natella y cols, 1999).

◆ Ácido ferúlico

El ácido ferúlico, ácido (E)-3-(4-hidroxi-3-metoxifenil) 2-propenoico, es el más común de los ácidos cinámicos. Se encuentra en espinacas, perejil, uvas, ruibarbo y semillas de cereales como trigo, avena, maíz y cebada.

Los ácidos cinámicos tienen actividad antioxidante, que depende de los grupos hidroxilo y metoxilo unidos al anillo de fenilo. El ácido ferúlico es fácilmente absorbido por el cuerpo y permanece en la sangre más que otros ácidos fenólicos por lo que se le considera un antioxidante superior. Además tiene una baja toxicidad y es antiinflamatorio, antimicrobiano, anti cancerígeno, antiarrítmico y antitrombótico.

Se han encontrado efectos antidiabéticos y propiedades inmuno estimulantes, reduce el daño de células nerviosas y puede ayudar a reparar células dañadas. Puede neutralizar los radicales libres en el tejido muscular por ello es un suplemento deportivo. También puede aplicarse en como un agente protector de la piel, retrasa el envejecimiento de la piel y proporciona brillo. Aunque su uso es limitado porque tiene tendencia a oxidarse rápidamente (Zdunska y col. 2018).

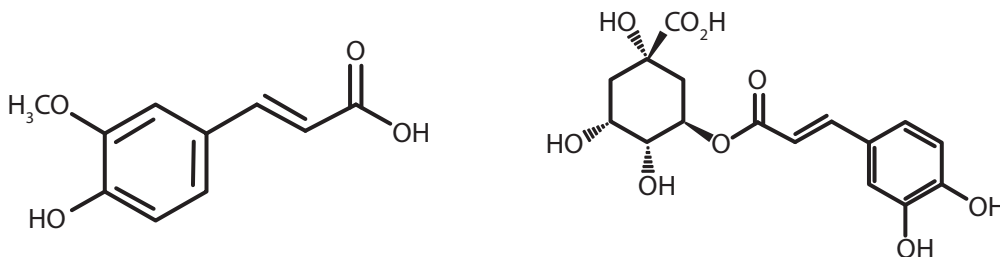
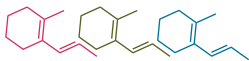


Figura 6. Estructuras del ácido ferúlico (Zdunska y col. 2018) y del ácido clorogénico (lineaysalud.com).



◆ Ácido clorogénico

Cuando un fruto, o una hoja se lastiman, el ácido clorogénico se encarga de reparar esas heridas. El café verde tiene una elevada cantidad de este compuesto (6-7%). Al tostar el ácido clorogénico se convierte en ácido cafeico y ácido quínico.

Este metabolito secundario tiene un amplio espectro de actividad anti herbivoría sobre todo en la familia Solanaceae como en papas y jitomates, además en té, cocoa, frutos cítricos, manzanas y peras. (Kundu y Vadassery, 2018). La alcachofa es una fuente importante del ácido clorogénico, contiene hasta un 15% (Clifford y col. 2017).

Flavonoides

Es la clase más numerosa de los compuestos fenólicos. La palabra flavonoide deriva del latín *flavus* que significa amarillo. Son los responsables del color de las hojas de otoño, de los colores de algunos frutos y de muchas flores. Se biosintetizan a partir de la fenilalanina y de 3-malonil-CoA.

Su producto es la estructura base y se cicla gracias a una enzima isomerasa. Se localizan principalmente en las partes aéreas de las plantas. Su distribución cuantitativa varía entre diferentes órganos y en diferentes poblaciones de una misma especie, esto se explica por la regulación de la expresión genética y la interacción con factores ambientales como clima, altitud, nutrición y prácticas agrícolas.

Los flavonoides comparten una estructura general de difenilpirano C6-C3-C6, formada por dos anillos de benceno (A y B) unidos a través de un anillo (C) de pirano y pueden tener un grupo carbonilo en la posición 4 formando así el anillo de pirona.

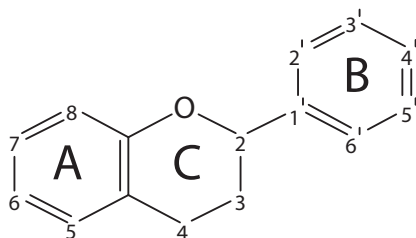
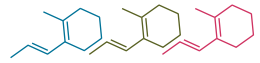


Figura 7. Estructura general de un flavonoide.



Al final del año 1989 se habían reportado más de 4000 estructuras. Para el 2014 se reportaron más de 8000 (Harborne, 1991; Lago y col. 2014). Las diferentes estructuras son resultado de modificaciones en el anillo C se les clasifica como se muestra en la figura 4.

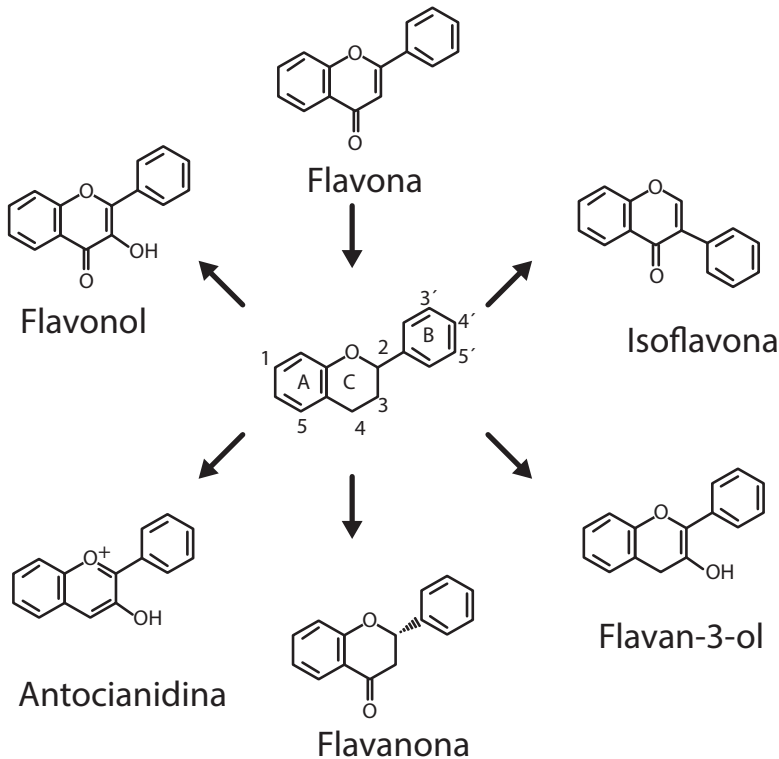
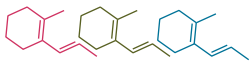


Figura 8. Cambios en el anillo C de la estructura general de los flavonoides (Nishiumi y col. 2011).

Todos los flavonoides tienen grupos hidroxilo en diferentes posiciones de su estructura y son polifenoles. Algunos tienen un carbonilo en la posición 4 y el anillo B puede estar en las posiciones 2 o 3. Entonces los diferentes flavonoides se distinguen por su grado de oxidación, la cantidad de los grupos hidroxilo y los azúcares ligados a su estructura.

Los estudios han demostrado que los flavonoides se pueden encontrar en las plantas en forma libre o unidas con azúcares. En la forma libre se denominan agliconas o geninas,



insolubles en agua. Cuando las agliconas se unen a uno o varios azúcares se les llama glicósidos o heterósidos y en esta forma son solubles en agua.

Los azúcares que se unen con más frecuencia a las geninas son D-glucosa, D-galactosa, L-ramnosa, L-arabinosa, D-glucosa y D-glucurónico. Pueden unirse como O-heterósidos o como C-heterósidos. Los flavonoides con frecuencia están en forma de biflavonoides unidos mediante enlaces 5 y 8.

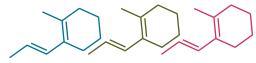
Sus principales efectos son a nivel de venas o capilares: disminuyen la permeabilidad y aumentan la resistencia. Algunos son diuréticos, antiespasmódicos, antiulcerosos. Antiinflamatorios, antialérgicos, antihepatotóxicos, antitromboticos, su acción antiviral y antialérgico, así como sus propiedades antitrombótica y antiinflamatoria. Los flavonoides tienen efectos terapéuticos en la cardiopatía isquémica, la úlcera estomacal, la aterosclerosis, la diabetes y el cáncer. También se les atribuyen propiedades antimicrobianas y antifúngicas. Algunos se utilizan como colorantes. En general son no tóxicos de buena tolerancia pero de acción lenta.

Los flavonoides son metabolitos secundarios de las plantas. Aunque también están presentes en el reino animal debido a su ingestión. Las flavonas y otros flavonoides actúan como protectores de los rayos UV en las plantas. Absorben en el rango entre 280-400 nm. Una respuesta muy común en las plantas al aumento de radiación ultravioleta es aumentar la fabricación de flavonoides. Otras respuestas a los estímulos ambientales es la protección contra el calor, sequía, salinidad, patógenos y herbívoros (Tripp 2018).

Promueven la colonización de las raíces por bacterias fijadoras de nitrógeno y por hongos micorrízicos. En las plantas, actúan como fitoalexinas como defensa contra ataques fúngicos o bacterianos. Contribuyen a la pigmentación de muchas partes de la planta (los antocianos son los responsables del color rojo, naranja, azul, púrpura o violeta que encontramos en las pieles de las frutas y hortalizas). Cuando los fenoles se oxidan, dan lugar a las quinonas que dan un color pardo.

Chalconas

Las chalconas no tienen la estructura general de los flavonoides, tienen dos anillos aromáticos y son cetonas α - β insaturadas. Por su estructura química son precursores para la síntesis química de pirazolinas, piridinas y diazepinas, útiles en la industria farmacéutica. Tienen actividades biológicas son variadas: fungicida, anticancerígena,



anticonvulsiva, antiviral, antioxidante, antiinflamatoria, antimalaria, antiprotozoario entre otras. Se ha visto que el doble enlace conjugado con el grupo carbonilo es el responsable de su actividad biológica.

Están presentes en la naturaleza en forma cis y trans, fácilmente se pueden ciclar para obtener flavanonas por medio de la adición de Michael. Inducen la polinización debido a la formación de colores del espectro visible y en el rango ultravioleta, atraen mariposas y abejas (Singh y col. 2014).

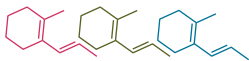
Flavonas

Las flavonas se encuentran en todos los órganos de las plantas, son diferentes estructuralmente de otros flavonoides porque tienen un doble enlace entre C2 y C3, en el esqueleto flavonoide no hay sustitución en la posición C3 y están oxidadas en el C4. Las flavonas existen en las plantas en forma más abundante conjugadas como 7-O-glicósidos y pueden tener también grupos acetilo o malonilo. Las flavonas glicosiladas en átomos de carbono (C-glicósidos) se encuentran en el carbono 6 y en el 8, como 6-C- y 8-C-glicósidos. Las flavonas glucosiladas en el oxígeno (O-glicósidos) pueden ser hidrolizadas con enzimas o ácidos antes del análisis. Las flavonas glucosiladas en el carbono son resistentes a ambos procesos y deben ser analizados en su forma nativa. Están presentes en espinacas, apio, perejil, melón, cítricos, chiles, lechugas, etc. (Hostetler y col. 2017).

Despliegan una gran variedad de funciones en las plantas, junto con los flavonoles son pigmentos primarios en las flores blancas y en las cremas y son co-pigmentos en las plantas azules junto con las antocianinas en las flores azules. En las flores de la primula, dan color a sus pétalos, en las uvas, son los compuestos responsables del color del vino blanco.

◆ Apigenina

La apigenina es una flavona que está en la manzanilla en una concentración elevada, la manzanilla en la medicina tradicional se ha utilizado durante miles de años para aliviar la indigestión o la gastritis, como enjuague bucal y ocular, en productos para el cuidado de la piel. Se ha identificado como ingrediente activo en castaña, marrubio, verdolaga, espino blanco y otras especies.



Tiene actividad antibacteriana, antiviral, antifúngica y antiparásitos. Sus efectos en las bacterias dependen de la cepa. En algunos casos cuando no es capaz de inhibir a las bacterias, puede disminuir la producción de toxina. La apigenina tiene baja toxicidad y es útil en la prevención del cáncer. Se ha encontrado que la apigenina que se consume en la dieta pasa al intestino delgado y llega al colon (Wang y col. 2019).

◆ Luteolina

La luteolina (3,4,5,7-tetrahidroxiflavona) es un flavonoide que se encuentra en muchas plantas como el apio, las flores de crisantemo, en los pimientos, zanahorias, hojas de cebolla, brócoli y perejil. En China las plantas ricas en luteolina se han utilizado para el tratamiento de enfermedades como la hipertensión, desórdenes inflamatorios y cáncer. En los laboratorios se han encontrado que es un antiinflamatorio, antialérgico y anticáncer (Imran y cols, 2019).

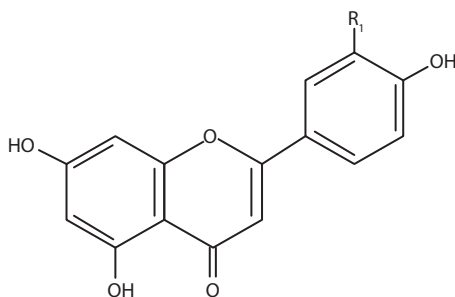
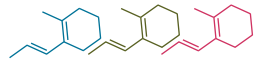


Figura 9. R1= H apigenina, R1 = OH luteolina

Flavonoles

Tienen un grupo funcional cetona en el carbono 4 (C4) y un doble enlace entre C2 y C3. Un grupo hidroxilo en C3. Estas sustancias están presentes en todos los órganos de las plantas, especialmente en las flores y las hojas. Los flavonoles son incoloros o amarillos. De tal manera que absorben la luz de onda larga (inferior a la visible para los humanos). Sin embargo, insectos como las abejas son receptivos a ese rango de luz UV, por lo que los atraen estas coloraciones (Aherne y O'Brien, 2002).



Tanto las Flavonas y flavonoles son importantes para las plantas, debido a su habilidad de protegerlas del daño que produce la luz ultravioleta en el rango de 280 a 320 nm, porque se encuentran en la epidermis de las hojas y tallos absorbiendo la luz a esta longitud de onda (Crozier, 2000).

◆ Quercetina

La quercetina (3,5,7-trihidroxy-2-(3,4-dihydroxyphenyl)-4Hchromen-4-one). El flavonol más conocido. Proporciona el color amarillo de las fagáceas (*Quercus* sp) y se ha incluido en la dieta humana por muchos años. Tiene numerosas propiedades terapéuticas como antiviral, anticancerígeno, antiinflamatorio, contra enfermedades cardiovasculares como hipertensión y colesterol. También es un poderoso antioxidante. Sin embargo por su escasa solubilidad en agua, su inestabilidad y baja disponibilidad sus aplicaciones son limitadas (Wang y col. 2016).

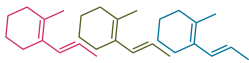
En México se utiliza la infusión de hojas de guayaba para la diarrea debido a sus propiedades antibióticas, por el efecto sinérgico de sus flavonoides derivados de la quercetina como guajaverina 3-O-β-D-glucosil-quercetina y otros derivados de morina y quercitrina que inhiben el crecimiento de *Salmonella enteridis* y *Bacillus cereus*, con la adición de rutina su efecto resulta positivo contra *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli* (Rivera-Arce y col, 2003).

◆ Kaempferol

Tiene un color amarillo, presenta bioactividad como antioxidante y anticancerígeno. Está presente en plantas comestibles como té, cítricos, calabaza, brocoli, frijoles, jitomate, fresas, uvas. A la fisetina que se encuentra en las fresas y se le atribuyen propiedades que favorecen a las neuronas.

Isoflavonas

Se encuentran de manera importante en las especies Fabaceae. Con 745 géneros y más de 19,500 especies, son la tercera familia más grande de plantas. Tienen un efecto



benéfico en el crecimiento inicial de *Trachinotus ovatus*, una especie de pescado de la familia Carangidae.

Investigaciones recientes incrementaron el interés en estos compuestos por su acción como fitoalexinas. Las isoflavonas están ausentes en plantas saludables y su síntesis se induce por las respuestas de las plantas a los factores bióticos, incluyendo infecciones por hongos y bacterias, o factores abióticos, como un daño físico. Los estudios mostraron que hay una posibilidad de aumentar la resistencia de las plantas a enfermedades basadas en una aplicación externa de fitoalexinas. Debido a su estructura, las isoflavonas se pueden unir a receptores de estrógenos. Se presentan como agliconas o glucosiladas con glucosa son termosensibles. Están presentes en leguminosas y la soya es su principal fuente (Reynaud y col. 2005).

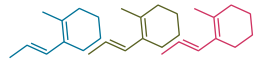
En un estudio en donde se evalúa la influencia de los factores ambientales con respecto a la síntesis de estas sustancias reveló que cuando las plantas se adaptan a ambientes metalíferos, su respuesta al estrés biótico (hongos) es más intensa y se produce un aumento en la producción de fitoalexinas. Este es un ejemplo de interacción positiva entre estímulos bióticos y abióticos aumenta el interés de los investigadores, particularmente con respecto a la producción de plantas con niveles más altos de fitoalexinas (Al-Tawaha y col. 2005).

Flavanoles

Catequina (flavan-3-ol) significa flavanol. Tiene actividad anticáncerígena, antiartrítica, antiinflamatoria, antiulcérica, inmunoestimulante, hepatoprotectiva y potentes antioxidantes.

El cacao (*Theobroma cacao*) presenta una mayor concentración de flavanoles, principalmente, catequina y epicatequina. El cacao puede contener entre 10 y hasta 50 mg de polifenoles totales/g, dependiendo de su origen y de la forma de procesamiento de sus granos frescos (fermentación, secado, tostado, alcalinización y conchado).

En la cocoa son abundantes la epicatequina y la catequina, están presentes en altas concentraciones en el té verde, el vino tinto, en la cáscara de la manzana, uvas, peras, moras azules, jitomates, soya, aceitunas. Se han realizado estudios en donde se ha visto que los flavonoides penetran en el cerebro, en las regiones que están involucradas con el aprendizaje y la memoria (Sokolov y col. 2013) y se continúan estudios sobre el efecto de las catequinas en la enfermedad de Alzheimer (Kazuki y col. 2018)



Flavanonas

El anillo C es saturado, están glucosiladas en la posición 7 con un disacárido, tienen un carbonilo en la posición 4 (flavan-4-ona). En 1994 las flavanonas se consideraban un grupo de menor tamaño como las chalconas, dihidrochalconas, dihidroflavonoles y auronas. El número se ha incrementado y actualmente se le considera grupo mayoritario junto flavonas, isoflavonas, flavanoles, flavonoles y antocianidinas (Veitch y Grayer, 2006).

Están en concentraciones altas en los cítricos, tomates y en especies aromáticas como la menta. Hasta el año 2000 se han identificado 350 agliconas de flavanonas y 100 glicósidos flavanonas en la naturaleza. Las flavanonas están distribuidas en 42 familias como Compositae, Leguminosae y Rutaceae. Dentro de ésta última familia están los cítricos y la naringenina y la hesperitina como agliconas y como sus glicósidos son de gran importancia por su alto contenido en los alimentos.

Flavandiol (leucoantocianina)

Leucocianidina presente en los plátanos y el muérdago criollo (*Lingaria cuneifolia*), leucopelargonidina en la alfalfa de secano (*Medicago truncatula*) y la leucodelphinidina principio activo del castaño de indias (*Aesculus hippocastanum*) Flavan-3,4-diol. Las leucoantocianinas son precursores de antocianinas, catequinas y taninos (Peñarrieta y col. 2014).

Antocianinas

Son pigmentos flavonoides de las plantas solubles en agua, producen los colores azules, violetas y rojos en las plantas. Las antocianinas son los glicósidos de las antocianidinas. Su papel como agentes medicinales es aceptado en todo el mundo. Por ejemplo las antocianinas del *Hibiscus sp* históricamente se han usado como remedio para la disfunción del hígado y la hipertensión; las antocianinas del arándano para los desórdenes de la visión, infecciones microbianas, diarrea y otros desórdenes.

La agudeza visual se puede mejorar a través de su administración a los animales y humanos. También se ha demostrado su utilidad para mejorar la visión nocturna. Tres

antocianinas de la grosella negra (*Ribes nigrum*) estimulan la regeneración de rodopsina que es un receptor de la retina del ojo.

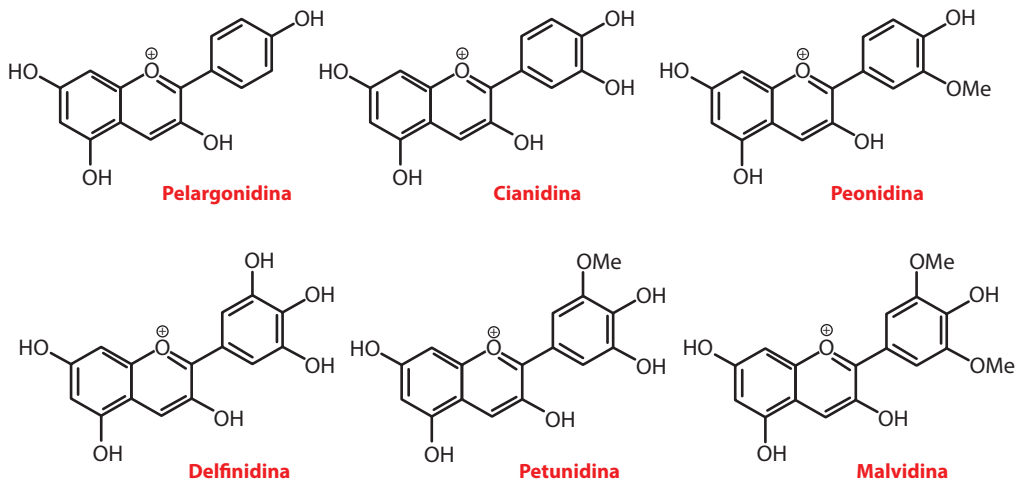


Figura 12. Antocianinas más importantes por sus propiedades medicinales.

El papel de las antocianinas en las enfermedades cardiovasculares está fuertemente relacionado con la protección al estrés oxidativo.

Pterocarpanos

Son el segundo grupo más importante de los isoflavonoides y tienen un papel importante como fitoalexinas se encuentran en subfamilias de las leguminosas Fabaceae (Al-Hazimi y Hamad, 2000). La medicarpina es un pterocarpano del género *Hedysarum* (Liu y col. 2019).

Su estructura tiene un sistema tetracíclico de anillos de benzofurano- en la naturaleza solo están presentes los que tienen una fusión cis de los anillos B/C por ser más favorecido energéticamente que el trans.

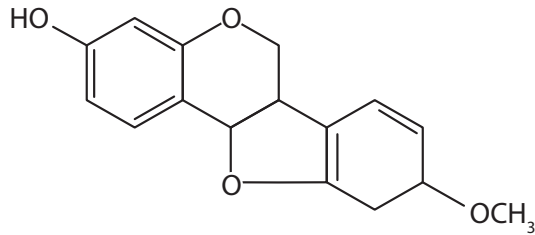
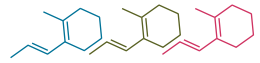


Figura 13. Estructura de la medicarpina.

Faseolina y faseolidina son fitoalexinas que se encuentran en los granos de maíz como respuesta a la infección por *Botrytis cinerea*, *Colletotrichum lindemuthianum*, *Fusarium solani*, *Rhizoctonia solani* o *Thielaviopsis basicola*. Se aisló a la medicarpina de la alfalfa (*Medicago sativa*) infectada por *Colletotrichum phomoides*, *Stemphylium loti*, *S. botryosum*, *Phoma herbarum* o *Leptosphaeria briossiana*, este pterocarpano también tiene actividad fungicida (Jiménez González y col. 2008).

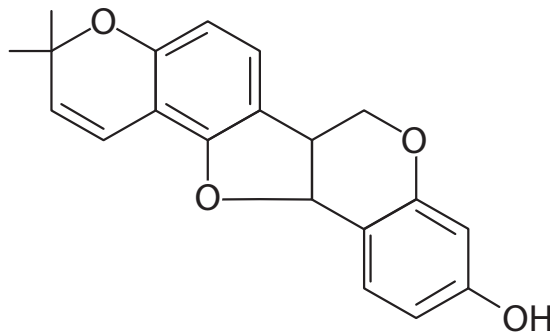
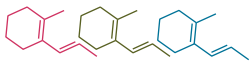


Figura 14. Faseolin, pterocarpano extraído del frijol europeo (libre).

Varios pterocarpanos que están presentes en las raíces de algunas plantas, pueden trabajar como agentes bactericidas o bacteriostáticos, hacia patógenos humanos. Son muy tóxicas para las bacterias Gram+ y ejercen su actividad a través de la degradación de la membrana celular del microorganismo (Jiménez-González y col., 2008).



Cumarinas

Las cumarinas son una familia de fitoquímicos que se biosintetizan en las plantas por la ruta fenilpropanoide. La primera cumarina fue aislada por Vogel en 1820 a partir de faba tonka también conocida en el Caribe como cumarú, una planta del norte de Brasil. Las cumarinas son sólidos cristalizables, blancos o amarillentos. Alrededor de 800 cumarinas se han aislado, se puede ver en su estructura química (figura 1) que tienen un anillo bencénico unido a una piran-2-ona. Al tener los dos anillos fusionados observamos que pertenecen al grupo de las benzopironas y tienen importancia terapéutica (Stringlis y col. 2019).

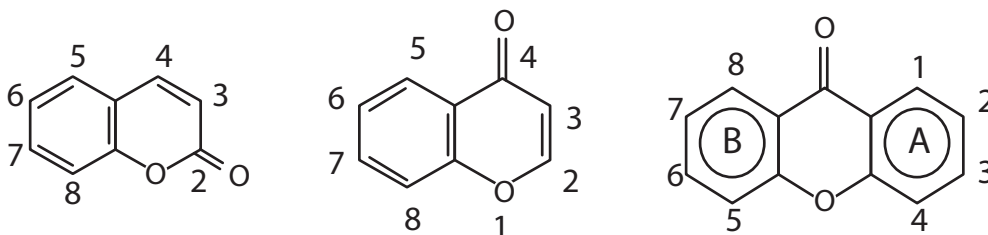
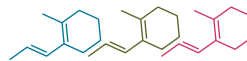


Figura 15. Estructura Básica de las cumarinas, cromonas y xantonas.

Las actividades biológicas registradas de las cumarinas, son entre otras, antitumoral, antiarrítmicos, antiinflamatorios, antisépticos, analgésicos, contra la hipertensión, la osteoporosis, en tratamientos contra el asma y el VIH. Presentan actividad antimicrobiana, captan la radiación UV e inhiben la germinación. Dependiendo de su configuración, tienen habilidad para regular rutas celulares que se pueden usar para la prevención de cáncer. Además tienen influencia en el sistema nervioso central. La cumarina tiene un sabor amargo y los animales la evitan siempre que pueden, pues produce hemorragias internas.

En el reino vegetal se las cumarinas se encuentran en plantas mono y dicotiledóneas distribuidas en todos sus órganos, por lo general en mayores concentraciones en frutos y flores. En mayor cantidad se encuentran en las familias Umbelliferae, Rutaceae, Compositae, Leguminosae, Oleaceae, Moraceae y Thymelaeaceae. Aunque también se han detectado en hongos y animales (Stringlis y col. 2019).



◆ Hidroxicumarinas

Las hidroxicumarinas simples son solubles en etanol, acetato de etilo y agua, presentan fluorescencia azul o verde con la luz ultravioleta. Se utilizan para prevenir las tromboembolias, por ejemplo: en caso de fibrilación auricular o después del reemplazo de las válvulas cardíacas. El efecto no deseado es la hemorragia. En esos casos puede contrarrestarse el efecto de las cumarinas mediante la administración de vitamina K.

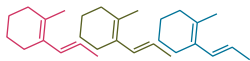
La umbeliferona (7-hidroxicumarina) absorbe la radiación ultravioleta de ahí su uso como un agente protector solar y un abrillantador óptico para los textiles. También se ha utilizado como un medio activo para los láseres de colorante. Es un compuesto fluorescente por lo que es útil como indicador de fluorescencia de iones metálicos tales como cobre y calcio. Actúa como un indicador de pH en el rango de 6.5 a 8.9. Los perfumes que contienen estos productos pueden producir fotodermatitis. Tiene capacidad de aumentar la sensibilidad de la piel a la luz ultravioleta (fotosensibilizantes), por lo que se utilizan con dicha luz (fototerapia) para tratar alteraciones de la piel tales como: psoriasis, eccemas, vitiligo, linfoma de células T cutáneo. Es antibacteriana, antifúngica y antioxidante. La umbeliferona está ampliamente distribuida en las familias Rutaceae y Umbelliferae, se encuentra en el apio, el regaliz, toronja, perejil y muchas otras especies (Matzimba, 2018).

La esculetina (6,7-dihidroxicumarina) es un antioxidante que modula el balance redox en diferentes células. Además tiene propiedades antiinflamatorias y antitumorales. Se ha estudiado el efecto antitumoral de esculetina en células de leucemia humana.

◆ Furanocumarinas

Desde la antigüedad en la India y China usaban a la planta *Psoralea corylifolia* hoy *Cullen corylifolium*, para curar diferentes afecciones en forma de cataplasmas en la piel de sus pacientes para después exponer esas áreas a la luz solar. Siglos después El-Mofty identificó a los psoralenos como los productos naturales responsables de estos efectos terapéuticos. Con los años los psoralenos se emplearon para tratar el vitiligo e injertos (Alam y col. 2017).

Poseen el núcleo benzo-2-pirona (cumarina), con un anillo furánico unido en las posiciones 6 y 7. Las furanocumarinas naturales como el psoraleno y la xantoxina en contacto con la piel y exposición al sol pueden causar dermatitis aguda por su fototoxicidad, incrementándose esta con la humedad.



Biosintéticamente las furanocumarinas tienen un origen mixto; el núcleo cumarínico se deriva de la ruta shikimato-corismato, pasando por el ácido trans-cinámico y finalizando con la umbeliferona. El anillo furánico proviene de la vía acetato-mevalonato, cuyo producto intermedio, el dimetilalilpirofosfato (DAP), se une a la umbeliferona para generar las furanocumarinas lineales (psoralenos) y las angulares (angelicinas).

El psoraleno es una furano cumarina que se intercala dentro de la cadena de DNA y forma aductos covalentes cuando se activa con la radiación ultravioleta. Esto es de utilidad en enfermedades como vitíligo, psoriasis, injertos y linfoma cutáneo (Buimschi y col. 2020).

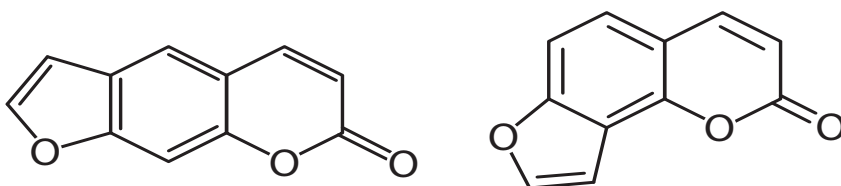
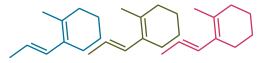


Figura 16. Estructura lineal de psoraleno y angular de angelicina.

La acción protectora de las plantas, se manifiesta en la variada toxicidad hacia otros organismos, como larvas, semillas y hongos, en la actividad antialimentaria hacia insectos.

♦ Angelicina

El psoraleno y la angelicina se encuentran en plantas de las familias Leguminosae (Fabaceae), Apiaceae (Umbelliferae) y Moracea. Sin embargo no todas las plantas producen las dos furanocumarinas. En la familia Rutaceae solo hay isómeros lineales, tiempo después se encontró que otras especies solamente producen la furanocumarina angular y más adelante se encontró que algunas plantas tienen ambos isómeros. Estos hallazgos sugieren que las furanocumarinas desde un punto de vista evolutivo surgieron después. La angelicina es un antiinflamatorio, proosteogénico, condrogénico, neuroprotector, tiene actividad antibacteriana, antiperiodontitis y anticancerígena (Mahendra y col. 2020).



◆ Dicumarina

La dicumarina se descubrió en 1930, porque cuando el ganado comía “clavel dulce” moría desangrándose. Este fitoquímico se encuentra en vegetales del género *Melilotus* (*Melilotus officinalis* o trébol de olor amarillo). Es un anticoagulante cuyo mecanismo de acción es el antagonismo con el de la vitamina K. Fue el primer anticoagulante oral aislado, y también, el primero en usarse en clínica, su nombre comercial es dicumarol (Esmail and Snafi, 2020).

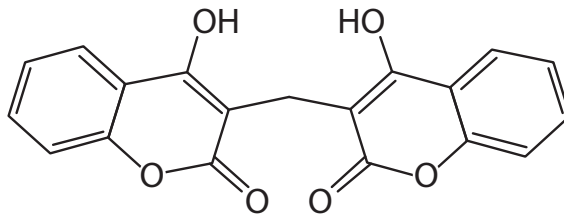


Figura 17. Estructura de la dicumarina

Ligninas

La palabra lignina deriva del latín y significa madera, es abundante en las plantas y forma parte de la pared celular junto con la celulosa y la hemicelulosa. Las ligninas son polímeros vegetales formado por unidades de fenilpropanoides (monolignoles) principalmente alcohol p-cumarílico, alcohol coniferílico y alcohol sinapílico, todos ellos están presentes formando mezclas racémicas. Los monolignoles son dirigidos (temporal y espacialmente) a diferentes tipos de regiones de la pared celular, en las que polimerizan formando biopolímeros con propiedades biofísicas características, los cuales en conjunto refuerzan la pared celular.

Las ligninas están presentes en todas las plantas vasculares, sobre todo en las partes aéreas de las plantas y en forma escasa en las raíces. La madera la contiene en una proporción que va de un 15-25 %, el resto de sus componentes son la celulosa y la hemicelulosa (Chávez-Sifontes, 2013).

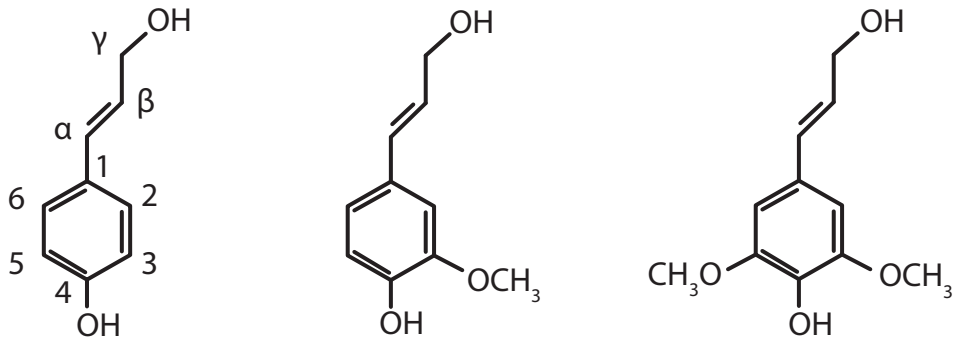


Figura 18. Monolignoles más comunes encontrados en los bloques de construcción de la lignina: a) alcohol p-cumarílico b) alcohol coniferílico, c) alcohol sinapílico.

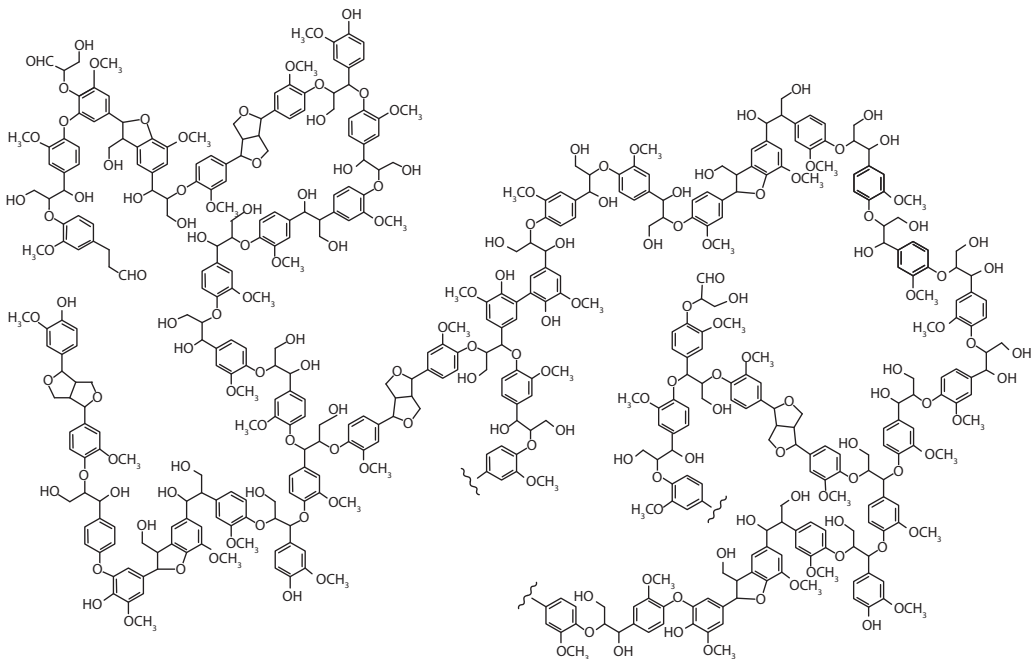
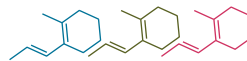


Figura 19. Estructura de la lignina (Chávez Sifontes y Domine, 2013).

Su importancia radica en que da rigidez a la pared celular, por su estructura, es una sustancia ambientalmente amigable con varios usos en la industria como en la



elaboración de moldes, refuerzos termoplásticos, en la industria papelera y la integración con fibras naturales para obtener los materiales más variados.

Es un recurso renovable de uso industrial como el papel, su producción anual se ha estimado en el intervalo de 5-36 x 108 toneladas (Chávez Sifontes, 2013).

Taninos

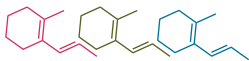
Los taninos junto con las ligninas son los grupos más importantes de metabolitos secundarios en la defensa de las plantas, debido principalmente a sus propiedades derivadas de la estructura química que poseen.

La conversión de las pieles de animales, susceptibles al ataque microbiano, en cuero útil para el hombre, es una tecnología muy antigua que se realiza con los metabolitos secundarios que se extraen de las plantas con agua o con una mezcla de agua y alcohol, que luego se decanta y se deja evaporar a baja temperatura hasta obtener el producto final, alto en taninos.

El término tanino se deriva del inglés, tanning, que en español significa curtido y se aplica a los metabolitos secundarios capaces de evitar la pudrición de las pieles. El curtido con vegetales usa taninos, de ahí procede el término, tenería, que al igual que la palabra curtiduría, designan al lugar o fábrica donde se curten las pieles.

Los taninos tienen un ligero olor característico, sabor amargo y astringente, su color va desde el amarillo hasta el castaño oscuro. Expuestos al aire se tornan oscuros y pierden su eficacia para el curtido. Los taninos se utilizan en el curtido porque reaccionan con las proteínas de colágeno presentes en las pieles de los animales, uniéndolas entre sí, de esta forma aumenta la resistencia de la piel al calor, a la putrefacción por agua, y al ataque por microbios, la piel se convierte en cuero (Covington, 1997).

Existen dos clases de taninos: 1) taninos condensados también conocidos como proantocianidinas (flavan-3-ols) son polímeros de un flavonoide llamado antocianidina. Es común encontrarlos en la madera de las plantas leñosas. Son parte importante de los flavonoides en los alimentos, se ha estudiado por su posible papel como antinutrientes, están formados por la adición de constituyentes flavonoides de plantas leñosas y 2) Los taninos hidrolizables son polímeros heterogéneos formados por ácidos fenólicos, en particular ácido gálico y azúcares simples. Son más pequeños que los taninos condensados



y son hidrolizados con más facilidad, con ácido diluido. Los taninos útiles para curtir deben tener una masa molecular entre 600 y 3000.

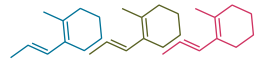
Los taninos poliméricos se unen directamente con proteínas y carbohidratos, reduciendo su biodisponibilidad y de manera indirecta reducen la digestión de nutrientes y el transporte por la inhibición de enzimas digestivas y proteínas transportadoras de membrana, por lo que se consideran para combatir la obesidad. Los taninos también pueden ser agentes quelantes de minerales al reducir su absorción. Los taninos condensados son antioxidantes poderosos con potencial para promover la salud (Awika y Doudu, 2017).

Los herbívoros como el ganado, venados, changos y pájaros evitan las plantas o partes de ellas con altos niveles de taninos. La interacción de los taninos con las proteínas, determina la selectividad de algunos herbívoros en su alimentación. Los taninos condensados se caracterizan porque se unen a la proteína por puentes de hidrógeno y de esta manera se convierten en un factor antinutricional ya que aumentan la cantidad de proteína excretada por las heces.

Los estudios con *Medinilla magnifica*, nativa de las Filipinas reveló que las células que sintetizan taninos tienen patrones de distribución definidos en órganos con una preferencia de acumulación alrededor o cerca de los tejidos vasculares. En las hojas se acumulan en la región del mesófilo, con la concentración más alta en la región apical. Las raíces y los tallos tienen menos concentración de estas sustancias. La concentración de taninos en estructuras reproductivas y frutas fue relativamente alta y disminuyó con la madurez. Esta distribución espacial y temporal indica la protección de las estructuras vitales de la planta y también la adaptación para hacerla más apetecible cuando tiene madurez fisiológica y presenta semillas viables llevando al éxito la expansión de la especie (Robil y Tolentino, 2015).

Los taninos tienen actividad antimicrobiana contra bacterias, hongos y levaduras y también muestran actividad contra parásitos como nemátodos gastrointestinales y helmintos. Además los taninos según su estructura muestran actividad contra diferentes virus.

De la flor del algodón mexicano *Gossypium hirsutum* se aisló un tanino condensado con actividad antibiótica que representa el 3.4% del peso seco de la flor. Se usó en la dieta de *Heliothis virescens*, la oruga del tabaco y retardó el crecimiento de la larva en un 84%. Existen pocos estudios que revelan como el ambiente proporciona cambios en la síntesis de estos compuestos, pero se ha mostrado que los taninos pueden influenciar



significativamente los cambios en los suelos. La adición de estas sustancias disminuye la mineralización del carbono y la nitrificación del nitrógeno significativamente afectando la complejación de los compuestos de nitrógeno y consecuentemente la disponibilidad del nitrógeno (Huang, 2018).

Es interesante el dato de que los humanos usualmente prefieren un cierto nivel de astringencia en las comidas que contienen taninos, como las manzanas, las zarzamoras, y el vino tinto. Recientemente se encontró que los taninos del vino tinto bloquean la formación de endotelina-1, una molécula señal que produce la constricción de los vasos sanguíneos, por ello disminuye el riesgo de enfermedades cardíacas a las personas que consumen vino tinto en forma moderada (Draijer y col. 2015).

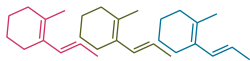
La infusión de juanilama (*Lippia alba*) que es una hierba medicinal que crece desde el sur de Texas hasta América del Sur, funciona como un antidiarreico, hemostático local y cicatrizante, favorece la coagulación y curación de heridas por la astringencia de los taninos (Pansera y col. 2003).

Las infusiones de diversas plantas ricas en taninos como la salicaria se utilizan para el lavado y curado de heridas, es un antiséptico local por su capacidad de precipitar proteínas posee propiedades antibacterianas, aportando valor en el tratamiento de heridas y llagas en la piel y las mucosas. Por ejemplo, el uso de ratania (*Krameria lappacea*) originaria de los Andes peruanos y bolivianos es para la higiene y cuidado bucofaríngeo.

Los extractos orales o tópicos de plantas ricas en taninos como Hammamelis y castaño de Indias de Indias (*Aesculus hippocastanum*) por su capacidad antiinflamatoria y favorecedora del retorno venoso son útiles en el tratamiento de problemas vasculares, como varices y hemorroides. Algunas proantocianidinas inhiben a mediadores de la inflamación, de ahí su efectividad.

Capacidad antioxidante porque tienen capacidad de estabilizar especies reactivas al oxígeno. Esto proporciona un campo de acción terapéutica muy extenso: daño oxidativo, procesos inflamatorios y procesos degenerativos. La granada es una fruta cargada de antioxidantes, que debe parte de su fama terapéutica a los taninos.

Los taninos han demostrado tener cierta toxicidad en dosis muy elevadas (cuando los alimentos contienen aproximadamente un 5% de taninos). En las personas los problemas son muy raros, aunque pueden provocar alguna alteración digestiva, en parte porque los taninos afectan al crecimiento de la flora intestinal normal.



Los taninos pueden interferir en la absorción de ciertos elementos, especialmente metales como el cobre, el calcio y el hierro. No es conveniente, pues, que las personas con anemia ferropénica, por falta de hierro, abusen de las bebidas y alimentos ricos en taninos, como es el caso del café, el té y el chocolate. Los taninos pueden ocasionar estreñimiento, así como dificultad para la digestión de proteínas, minerales, fibra y carbohidrato

Los taninos condensados son polímeros de unidades flavánicas, la mayoría de las veces ligadas entre ellas por enlaces C4-C8, son resistentes a la hidrólisis. • Forman parte de los pigmentos de gran cantidad de semillas, de la madera de las plantas leñosas, del exocarpo de las uvas, del arándano, etc. Su peso oscila entre 1000-5000 daltons aproximadamente. Los taninos condensados son una clase de flavonoides (sintetizados por las plantas por la “vía biosintética de los flavonoides”) que son los pigmentos principales de muchas semillas, y también están presentes en los tejidos vegetativos de algunas plantas forrajeras. Son polímeros formados por unidades de antocianidina (un flavonoide). Como pueden ser hidrolizados en sus antocianidinas constituyentes si se los trata con ácidos fuertes, a veces son conocidos como proantocianidinas.

Quinonas

Las quinonas son muy comunes entre las plantas, en vegetales superiores o inferiores, en hongos, bacterias y en el reino animal como artrópodos y equinodermos. Funcionan como componentes de las cadenas de transporte de electrones que están involucrados en la fotosíntesis y la respiración celular. La exposición de los humanos a las quinonas es por la dieta o por los contaminantes del aire. Se clasifican en benzoquinonas, naftoquinonas o antraquinonas dependiendo de los anillos aromáticos que contengan.

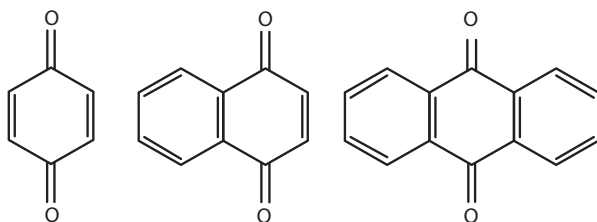
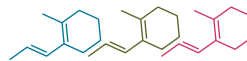


Figura 20. Quinona, naftoquinona y antraquinona



En el antiguo Egipto las quinonas se utilizaban como colorantes. Su coloración va de un amarillo pálido, hasta un color casi negro. La lawsona (2-hidroxi-1,4-naftoquinona) es un tinte marrón, que se ha utilizado más de 4000 años que se extrae de las hojas de Henna (*Lawsonia inermis*).

Alkaninina se extrae de *Alkanna tinctoria* tiene actividad antimicrobiana. Shikonina tiene actividad anticancer, antimicrobiana y antitrombótica. Estos dos metabolitos secundarios son naftoquinonas y son enantiómeros, se encuentran en plantas de la familia Boraginaceae. Se usan comercialmente como colorantes rojos naturales en las industrias farmacéuticas, textiles y de cosméticos. Se encuentran en la corteza, en la raíz y algunos casos en las flores de las plantas. Las quinonas proporcionan el color al hongo sangrante *Hydnellum peckii*. La juglona es una quinona que el nogal utiliza para eliminar el crecimiento de otras plantas y así evitar la competencia, también tiene aplicaciones como colorante (Lemos, y cols., 2007).

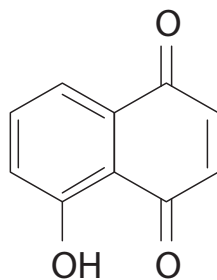
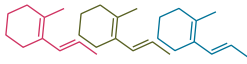


Figura 21. Estructura química de la juglona

Las quinonas están presentes como agentes oxidantes en el espray de los escarabajos bombarderos que las liberan con violencia. Se utilizan como antioxidantes, antiinflamatorios, anticancerígenos, antimicrobianos, antitumorales y en el tratamiento de enfermedades cardiovasculares.

En la industria se aplican para la fabricación de colorantes, cosméticos, gelatinas, peróxido de hidrógeno, síntesis de compuestos orgánicos.

Las fuentes principales son: el hongo *Hydnellum peckii*, los artrópodos *Julus terrestris* y entre las plantas superiores el narciso amarillo. La aloína que produce



la sábila es un fitoquímico que, por ser glicósido polar, se absorbe poco. Una vez que traspasa la pared intestinal esta sustancia excita las terminaciones nerviosas del sistema nervioso autónomo, induciendo una acción neuroperistáltica. Por lo que es un compuesto capaz de acelerar el proceso de defecación, a la vez que estimula el intestino y ablanda las heces.

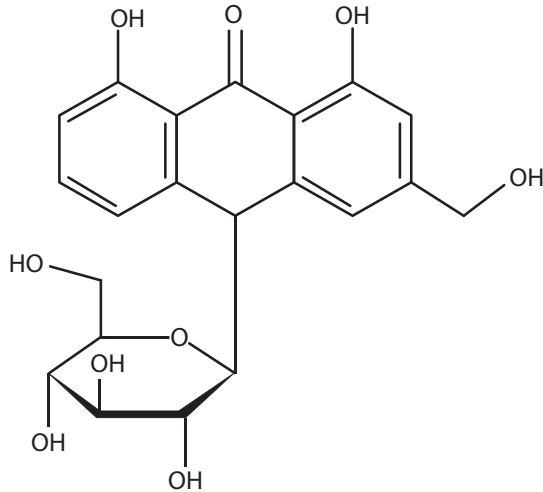
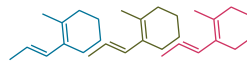
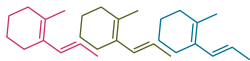


Figura 22. Estructura de la aloína.



Bibliografía

- Aherne A., O'Brien N. (2002) Dietary Flavonols: Chemistry, Food Content, and Metabolism. *Nutrition* 18: 75-81.
- Fiaz A., Nawaz G., Hassham M. (2018) *Psoralea corylifolia* L: Ethnobotanical, biological, and chemical aspects: A review. *Phytotherapy Research* 32(4):597-615.
- Alencar F. and Nunes H. (2016) Gallic Acid: Review of the Methods of Determination and Quantification. *Critical Reviews in Analytical Chemistry* 46: 257– 265.
- Al-Tawaha A., Seguin P., Smith D., Bealei C. (2005) Biotic elicitors as a means of increasing isoflavone concentration of soybean seeds *Annals of Applied Biology* 146: 303– 310.
- Awika, J. M. y Kwaku (2016) Bioactive polyphenols and peptides in cowpea (*Vigna unguiculata*) and their health promoting properties: A review. *Journal of functional Foods* <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.12.002>
- Alexandru D. Buhimschi, David M. Gooden, Hongwu Jing, Diane R. Fels, Katherine S. Hansen, Wayne F. Beyer, Mark W. Dewhirst, Harold Walder, Francis P. Gasparro (2020) Psoralen Derivatives with Enhanced Potency *Photochemistry and Photobiology*. DOI 10.1111/php.13263
- Chávez-Sifontes D. (2013) Lignina, estructura y aplicaciones: Métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial . Lignin structure and applications: depolymerization methods for obtaining aromatic derivatives of industrial interest. *Avances en Ciencias e Ingeniería* 4: 15-46.
- Chen L, Zhang X, Hao T, Liang R, Bonnie Man S, Huang G, Tang S (2016) Recent progress on antioxidant activity of natural products. *European Journal of Biomedical Research* 2: 36-40.
- Clifford M., Jaganath I., Ludwig I. and Alan Crozier (2017) Chlorogenic acids and the acylquinic acids: discovery, biosynthesis, bioavailability and bioactivity. *Natural Products Reports* 34: 1391-1421.
- Crozier A., Burns J., Aziz A. Stewart, A., Rabiasz H., Jenkins G., Edwards C., j Lean M. (2000) Antioxidant flavonols from fruits, vegetables and beverages: measurements



and bioavailability. *Biol. Res.* 33: 2 <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-97602000000200007>

Covington A. (1997) Modern tanning chemistry. *Chemical Society Reviews* 26: 11-126.

Draijer R., De Graaf Y., Slettenaar M., De Groot E. and Wright C. Consumption of a Polyphenol-Rich Grape-Wine Extract Lowers Ambulatory Blood Pressure in Mildly Hypertensive Subjects *Nutrients* 2015, 7(5), 3138-3153 <https://doi.org/10.3390/nu7053138>

Esmail, A. and Snafi E. (2020) Chemical Constituents and Pharmacological Effects of *Melilotus Officinalis*. A Review *Journal Of Pharmacy* 10: 26-36.

Gallage J. and Lindberg B. (2015) Vanillin—Bioconversion and Bioengineering of the Most Popular Plant Flavor and Its De Novo Biosynthesis in the Vanilla Orchid *Nethaj. Molecular Plant* 8: 40–57

Gómez-Juaristi M., González-Torres L., Bravo L., Vaquero M., Bastida S., Sánchez-Muniz F. (2011) Beneficial effects of chocolate on cardiovascular health. *Nutr Hosp.* 26:289-92.

Hazimi H. and Hamad Z. (2000) Naturally Occurring Pterocarpanoids and Related Compounds *Journal of King Saudi University* 12 (2): 93-122.

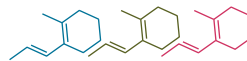
Karamaæ M., Kosińska A., Pegg R. (2006) Content of gallic acid in selected plant extracts. *Polish Journal of Food Nutrition Science* 56:55–58-

Kundu A., Vadassery J. (2019) Chlorogenic acid-mediated chemical defense of plants against insect herbivores. *Plant Biology* 21: 185-189.

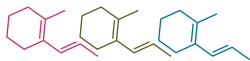
Harborne J (1991) *Phytochemical Methods*. A guide to modern techniques of plant analysis. Chapman and Hall.

Hostetler G., Ralston R. and Schwartz S. (2017) Flavones: Food Sources, Bioavailability, Metabolism, and Bioactivity 8: 423–435, <https://doi.org/10.3945/an.116.012948>

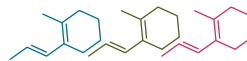
Huang Q., Liu X., Zhao, G. Hu T. and Wang Y. (2018) Potential and challenges of tannins as an alternative to in-feed antibiotics for farm animal production. *Animal Nutrition.* 4:137-150.



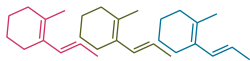
- Imrana M., Rauf A., Abu-Izneid T., Nadeemd M., Ali M., Imtiaz S., Khanf A., Imrang A., Erdogan I., Muhammad O. Muhammadh R., Gondalk A., Mubarakl S. (2019) Luteolin, a flavonoid, as an anticancer agent: A review *Biomedicine & Pharmacotherapy* 112: April 2019, 108612 <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2019.108612>
- Jimenez González L, Alvarez Corral M, Muños Dorado M, Rodriguez (2008) Pterocarpanos. *Phytochemical Reviews* 2008 7: 125-164.
- Kazuki I., Matsuoka O. Yamada H., Furushima D., and Kawakami K. (2018) Effects of Tea Catechins on Alzheimer's Disease: Recent Updates and Perspectives *Molecules* 2018, 23(9), 2357 <https://doi.org/10.3390/molecules23092357>
- Kamran M., Zill K., Olivier H. (2014) A comprehensive review on flavanones, the major citrus polyphenols *Journal of Food Composition and Analysis* 33, Pages 85-104.
- Krenek K., Barnes R., Talcott, S. (2014) Phytochemical Composition and Effects of Commercial Enzymes on the Hydrolysis of Gallic Acid Glycosides in Mango (*Mangifera indica* L. cv. 'Keitt') Pulp. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 62: 9515–9521.
- Katergaris N., Dufficy L., Roach P. and Naumovski N. (2015) Green Tea Catechins as Neuroprotective Agents: Systematic Review of the Literature in Animal Pre-Clinical Trials *Advances in Food Technology and Nutritional Sciences*. <http://dx.doi.org/10.17140/AFTNSOJ-1-108>
- Lago J., Toledo-Arruda A., Mernak M., Barrosa K., Martins M., Tibério I. and Prado C. (2014) Structure-Activity Association of Flavonoids in Lung Diseases. *Molecules* 19: 3570-3595 doi:10.3390/molecules19033570 1420-3049
- Lemos T., Monte F., Kellen A., Fonseca A., Santos, H., Oliveira M., Costa S., Pessoa O., and Braz-Filho R. (2007) Structural diversity, chemical transformations, NMR data and biological activities. *Natural Product Research* 21: 529-550, <https://doi.org/10.1080/14786410601130604>
- Liu Y., Yanga H., Wanga W., Zhaoa Y., Chend H., Lianga H., Zhanga Q. (2019) Chemotaxonomy studies on the genus *Hedysarum*. *Biochemical Systematics and Ecology* Volume 86, October 2019, 103902.



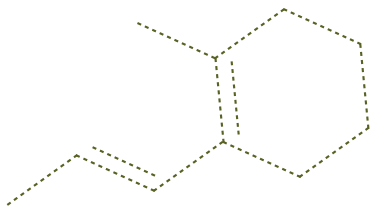
- Lila M. (2004) Anthocyanins and Human Health: An In Vitro Investigative Approach *Journal of Biomedical Biotechnology* 5: 306–313.
- López-Toledo L., Murillo-García A., Martínez-Ramos M., Pérez-Salicrup D. (2011) Demographic effects of legal timber harvesting on *Guaiacum sanctum* L., an endangered neotropical tree: implications for conservation *Interciencia* 36: 650–656.
- Mahendra C., Hern L., Leng W., Hsum W. , Priyia Low. , Ee L., Ying S., Gan K., Han L. (2020) Angelicin—A Furocoumarin Compound With Vast Biological Potential. *Frontiers in Pharmacology* 1-34 <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fphar.2020.00366>
- Matzimba O. (2017) Umbelliferone: Sources, chemistry and bioactivities review *Bulletin of Pharmacy*, 55 (2017) 223–232.
- Miura K., Tada Y. (2014) Regulation of water salinity *Frontiers in Plant Science* 23:5:4 doi: 10.3389/fpls.2014.00004.
- Natella F., Nardini M., Di Felice M. and Scaccini C. (1999) Benzoic and Cinnamic Acid Derivatives as Antioxidants: Structure-Activity Relation. *Agricultural Food Chemistry* 47: 1453-1459.
- Nishiumi S., Miyamoto, S., Kawabata, K., Ohnishi K., Mukai R. Murakami A., Ashida H., Terao J. (2011) Dietary flavonoids as cancer-preventive and therapeutic biofactors. *Frontiers in bioscience (Scholar edition)* 3: 1332 - 62 doi: 10.2741/229
- Pansera M., Santos A., Paese K., Wasum R., Rosato M., Rota L., Pauffetti G. and Serafini L. (2003) Análise de taninos totais em plantas. Análise de taninos totais em plantas aromáticas e medicinais cultivadas no Nordeste do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Farmacognosia* 13: 17-22.
- Parejo I., Viladomat, J., and Codina C. (2001) A Single Extraction Step in the Quantitative Analysis of Arbutin in Bearberry (*Arctostaphylos uva-ursi*) Leaves by High-Performance Liquid Chromatography. *Phytochemical Analysis* 12: 336–339.
- Singh P., Anand A. and Kumarc V. (1999) Recent developments in biological activities of chalcones: A minireview. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 47:1453–1459.



- Pandeya R., Parajulia P., Koffas. A., Sohnga K. (2016) Microbial production of natural and non-natural flavonoids: Pathway engineering, directed evolution and systems/synthetic biology. *Biotechnology Advances* 34: 634–662.
- Peñarrieta, J., Tejada, L., Mollinedo P., Vila J., Bravo J. (2014) Compuestos fenólicos y su presencia en alimentos. *Revista Boliviana de Química*, 31: 68-81.
- Reynaud J., Guilet D., Terreux R., Lussignol M., Walchshofer N. (2005) Isoflavonoids in non leguminous families: an update *Natural Products Report* 22: 504-515.
- Rivera Arce E., Chávez Soto M., Chávez Soto M., Lozoya Gatuso, X. La hoja de guayabo en el tratamiento de afecciones gastrointestinales. *Revista de Fitoterapia* (2003) 3 (2): 101-111.
- Robil J. and Tolentino V, (2015) Histological localization of tannins at different developmental stages of vegetative and reproductive organs in *Medinilla magnifica* (Melastomataceae). *Flora* 217: 82–89.
- Saxena, M., Saxena J., Nema, R., Singh, D., Gupta, A. (2013) Phytochemistry of medicinal plants. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 1: 168-182.
- Santos-Sánchez N., Salas-Coronado R., Hernández-Carlos B. and Villanueva-Cañongo C. (2019) Shikimic Acid Pathway in Biosynthesis of Phenolic Compounds DOI: 10.5772/intechopen.83815
- Stafford, H. (1991) Flavonoid Evolution: An Enzymic Approach. *Plant Physiology* 96: 680.
- Sokolov A., Pavlova M., Klosterhalfen, Enck P. (2013) Chocolate and the brain: Neurobiological impact of cocoa flavanols on cognition and behavior *Neuroscience and Behavioral Reviews* 37: 2445-2453 <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.06.013>
- Treutter D. (2006) Significance of flavonoids in plant resistance: a review. *Environmental Chemistry Letters* 4:147–157.
- Tripp E., Zhuang Y., Schreiber M., Stone H. and Berar A. (2018) Evolutionary and Ecological Drivers of Plant Flavonoids Across A Large Latitudinal Gradient. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 128: 147–161.



- Vasantrao P., Balaraman M. (2015) Catehins: Sources, extraction and encapsulation: A review. *Food and Bioproducts Processing* 93: 122-138.
- Veitch N., Grayer R. (2006) Chalcones, dihydrochalcones, and aurones Andersen O., Markham K. (Eds.), *Flavonoids: Chemistry, Biochemistry and Applications*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL pp. 1003-1100.
- Wang M., Firrman, L., Yam K. (2019) A review on flavonoid apigenin: Dietary intake, ADME, antimicrobial effects, and interactions with human gut microbiota. *Biomed research international* <https://doi.org/10.1155/2019/7010467>
- Wang W., Sun C., Mao L., Ma P., Liu P., Yang J., Gao Y. (2016) The biological activities, chemical stability, metabolism and delivery systems of quercetin: A review *Trends in Food Science & Technology* 56: 21-38 <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.07.004>
- Zduńska K., Dana A., Kolodziejczak A., Rotsztejn H. (2018) Antioxidant Properties of Ferulic Acid and Its Possible Application *Skin Pharmacol Physiol* 31:332–336.



Existe un numeroso grupo de compuestos nitrogenados no proteicos. Estos son: alcaloides, aminas, glicósidos cianogénicos, glucosinolatos, cofactores, fitohormonas o metabolitos primarios como bases púricas y pirimídicas. Las plantas producen muchos tipos de metabolitos secundarios con nitrógeno en sus moléculas y los principales, por su abundancia, sus efectos y sus aplicaciones son los alcaloides.

Hormonas vegetales

Las hormonas vegetales actúan en bajas concentraciones, específicamente para regular el crecimiento y el desarrollo de las plantas (Asami y Nakagawa, 2018).

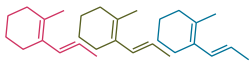
♦ Auxinas

Estas desempeñan un papel regulador que afecta diferentes aspectos del desarrollo.

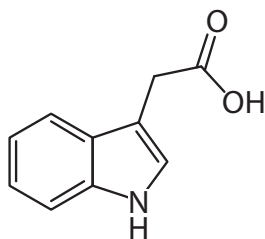
El ácido indolacético (AIA) es una auxina natural predominante en las plantas. La auxina actúa en la mitosis y en el alargamiento celular, forma raíces adventicias y actúa en la dominancia apical, por lo mismo, en la lengua griega, su nombre significa crecer.

♦ Citocininas

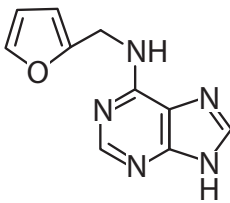
Las citocininas son derivados de la base pirimídica adenina, la cual es una base nitrogenada que está presente en los ácidos nucleicos. Su nombre citocininas se debe a que promueve la división celular o citocinesis. En las plantas favorecen la formación



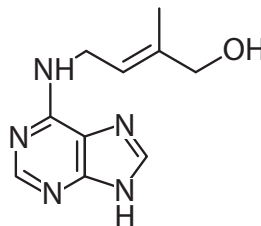
de brotes, promueven la división celular en tejidos cultivados, ayudan a la germinación, inhiben el alargamiento del tallo, estimulan el crecimiento de los brotes laterales y retardan el envejecimiento foliar. En 1941, Van Overveek informó de la presencia de un factor que estimula el crecimiento de los embriones en cultivo de tejidos; después, en 1955 se comprobó su estructura por síntesis y se le dio el nombre de cinetina. En 1963, Letham aisló una citocinina de las mazorcas de maíz y le dio el nombre de zeatina.



Ácido indol acético



Cinetina



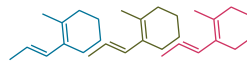
Zeatina

Figura 1. Auxina y citocininas nitrogenadas.

Alcaloides

Los alcaloides son compuestos básicos porque contienen nitrógeno con frecuencia formando heterociclos. Son una clase muy heterogénea y presentan actividad biológica intensa en humanos y en animales. Algunos pueden ser muy tóxicos en pequeñas dosis y están presentes principalmente en las plantas. El átomo de nitrógeno de los alcaloides, en su mayor parte, proviene del metabolismo de los aminoácidos, los alcaloides que proceden del mismo aminoácido muestran características estructurales similares y se pueden clasificar por su origen biosintético (Aniszewski, 2015).

Como metabolitos secundarios se encuentran aproximadamente en el 20% de las especies de plantas. Su papel es la defensa de las especies vegetales contra herbívoros y patógenos. Por su actividad biológica, muchos de los 12,000 alcaloides conocidos hasta el año 2015 se han usado como fármacos, estimulantes y narcóticos. Para el año 2017 el número de alcaloides aumentó a 15,000 (Olivoto y col. 2017).



El término alcaloides fue acuñado por el químico alemán Carl Meissner en 1819 y la palabra se deriva del nombre árabe al-qali. Los alcaloides como su nombre lo dice, son, en su mayoría, sustancias alcalinas que, a valores de pH citosólico (pH: 7.2), o vacuolar (pH: 5-6), protonan al átomo de nitrógeno, por lo que casi todos estos compuestos están cargados positivamente y generalmente forman sales solubles en agua como citratos, malatos, tartratos y benzoatos.

Los alcaloides son estructuras con un bajo peso molecular. Están ligados a la historia de la humanidad debido al amplio rango de sus efectos fisiológicos en animales y a sus propiedades farmacológicas antibióticas.

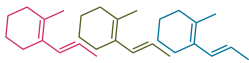
Además de por las rutas biosintéticas por las que se producen en las plantas, los alcaloides también se pueden clasificar de otras maneras: por su actividad biológica, por su estructura química (tipo de nitrógeno heterocíclico o no heterocíclico y tipo de anillo) y por su origen taxonómico.

De acuerdo a su estructura química, se reconocen dos divisiones:

1. Alcaloides atípicos o no heterocíclicos que son los protoalcaloides o aminas biológicas.
2. Alcaloides heterocíclicos que se subclasifican de acuerdo a la estructura de su anillo.

El estudio de los alcaloides es interesante e importante desde los puntos de vista científico y económico, por sus aplicaciones en la industria farmacéutica y en la medicina, ya que muchas de estas sustancias funcionan como medicamento y proporcionan estructuras para sintetizar nuevos fármacos.

Aunque el contenido de alcaloides fluctúa de un individuo a otro, son componentes característicos de las especies (algunas veces también de un taxón más grande) y pueden considerarse como un factor de identificación, porque una especie con una habilidad genética para sintetizar alcaloides no puede existir sin alcaloides en su organismo (Aniszewski T. (2015).



Aminas

Las aminas pueden tener dos orígenes:

1. Pueden formarse como productos de descarboxilación de los aminoácidos.
2. Se crean a partir de la transaminación de los aldehídos correspondientes.

Las aminas que más se encuentran en las plantas se pueden dividir en: monoaminas, poliaminas alifáticas y aminas aromáticas.

Las monoaminas más pequeñas de C1-C6 se encuentran en flores, su propósito principal es atraer insectos simulando el olor de la carroña.

Mientras que las monoaminas de tamaño medio se encuentran en plantas y hongos, con un distintivo olor desagradable a pescado.

Las poliaminas también tienen malos olores, entre ellas encontramos a la putrescina (1,4-diamino butano), espermidina (1,8-diamino-4-azaoctano) y la cadaverina (1,5-diaminopentano). Las poliaminas que son ubicuas en los materiales biológicos son putrescina, espermidina, y espermina (1,12-diamino-4,9-diazadodecana) y sus cantidades relativas son muy diferentes en las células (White, 1976).

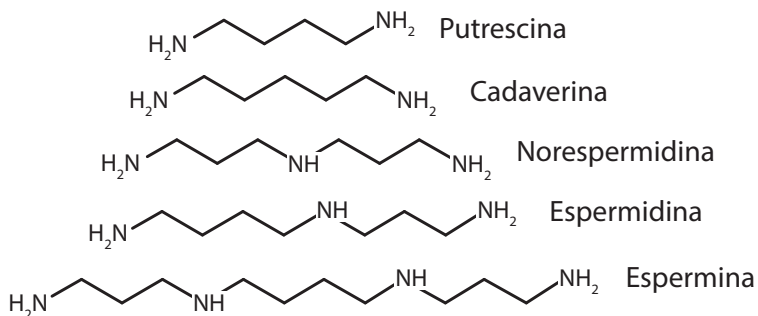
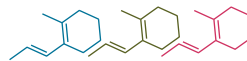


Figura 2. Estructuras de algunas poliaminas.

Los procariones tienen una concentración alta de 1, 4-diaminobutano mayor que la espermidina y carecen de espermina. Los eucariotes generalmente tienen poco 1,4-diaminobutano, y tienen espermina así como espermidina (Tabor, 1976).



En varias plantas deficientes en potasio, se encontró que la concentración de la putrescina aumentó 16.6 veces, la espermidina 1.9 veces y la espermina 1.2 veces. Estos resultados son compatibles con la ruta metabólica en la cual espermidina y espermina derivan consecutivamente de la putrescina (Smith,1970).

La histamina (figura 3) es otra amina de origen vegetal y tiene en su estructura un anillo de imidazol. Las plantas que la contienen en cantidades significativas son la berenjena, espinacas, jitomates y aguacates con gran variabilidad en su contenido. En el 1% de la población de la tercera edad, produce histaminosis, esta es un desorden asociado con el aumento de la histamina en sangre y sus síntomas son similares a los de una alergia.

La putrescina se ha encontrado en prácticamente todos los alimentos de origen vegetal. Los altos contenidos de putrescina se pueden relacionar con la activación de la sintomatología por competición con histamina. Por lo antes mencionado, se recomienda consumir alimentos de origen vegetal que hayan sido hervidos o con un máximo de frescura para reducir el consumo de aminas biogénicas y la intolerancia a la histamina. La presencia de estas aminas se ha descrito en alimentos en bajas concentraciones que no exceden 8 mg/kg (Sánchez Pérez y col. 2018).

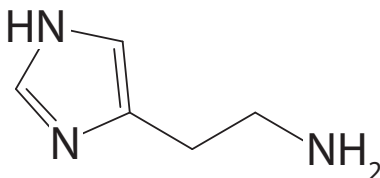
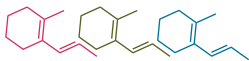


Figura 3. Estructura de la histamina.

Otros ejemplos aminas en plantas son: la noradrenalina (aumenta el ritmo cardíaco y la presión, es un neurotransmisor) que se encuentra en plátano y papa, la serotonina (neurotransmisor) en el arroz. Probablemente la amina aromática más esparcida es la tiramina que es vasoactiva y produce migraña, se encuentra en varios alimentos, entre ellos las nueces.

Una amina secundaria detectada en plantas es la dimetilamina y entre las terciarias está la hordenina (N,N-dimetiltiramina) en los germinados de cebada y en la naranja agria.

En las plantas, la serotonina (5-hidroxitriptamina) tiene varios papeles como la floración, la morfogénesis y la adaptación a los cambios ambientales, se encuentra en arroz, maíz



y jengibre entre otros. Es un neurotransmisor en los mamíferos y regula el estado de ánimo, el sueño y la ansiedad (Badria F., 2002).

La mescalina es un alcaloide cuya estructura es la de una amina aromática, además, es un poderoso alucinógeno producido por el peyote *Lophophora williamsii* en México y Texas y en Perú por las especies conocidas como wachuma (*Trichocereus pachanoi*, *T. peruvianus* y *T. bridgesii*) existen evidencias arqueológicas de su uso en América de hace 6000 años.

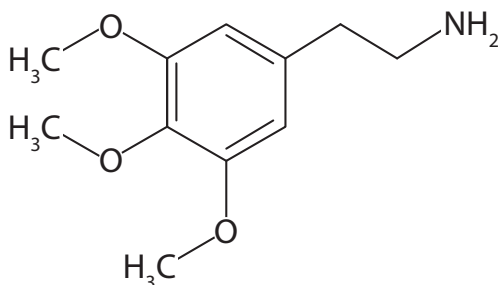


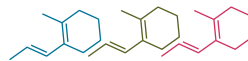
Figura 4. Estructura química de la mescalina.

Dependiendo de su origen biosintético y de su anillo heterocíclico, los alcaloides se clasifican en categorías diferentes: indol, tropano, piperidina, purina, imidazol, pirrolizidina, pirrolidina, quinolizidina e isoquinolina.

Los alcaloides indólicos se caracterizan por la presencia de serotonina, conocida químicamente como 5-hidroxitriptamina o 5-HT. Alrededor de 2,000 compuestos son indólicos, los más conocidos por sus propiedades biológicas y farmacológicas son la vincamina, vincristina, vinblastina, estriquina, ajmalicina y ajmalina. Los dos primeros son conocidos por su actividad contra el cáncer.

Alcaloides del tropano

Pertencen a las familias Erythroxylaceae, Convolvulaceae y Solanaceae. Estos alcaloides se derivan del aminoácido ornitina y tienen un núcleo nitrogenado bicíclico. Algunos ejemplos de este grupo, con usos medicinales y propiedades anticolinérgicas son: escopolamina, hiosciamina, cocaína y atropina.



La escopolamina o hioscina (burundanga) se usa para tratar la hiperactividad gastrointestinal, la úlcera duodenal y el mareo de viajes. Esta se encuentra en Solanáceas como la mandrágora, la brugmansia y la escopolia.

La atropina se extrae de la belladona y de otras Solanáceas. Se emplea como colirio para tratar la miopía y como midriático (para la dilatación de la pupila) y también sirve para aumentar el ritmo cardíaco (O'Hagan D. 2000, Griffin y Lin, 2000).

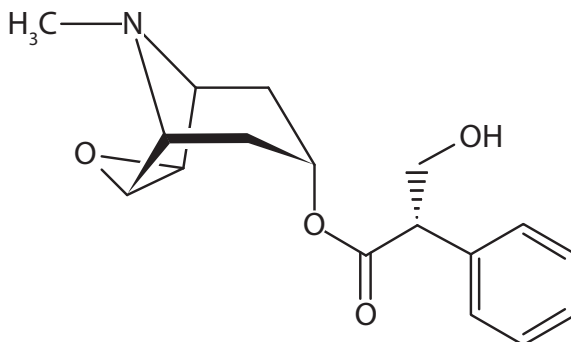


Figura 5. Estructura química de la escopolamina.

Alcaloides de quinolina e isoquinolina

La quinolina y la isoquinolina son moléculas heterocíclicas aromáticas con un anillo de benceno unido a un anillo de piridina, por lo que se les conoce como benzopiridinas.

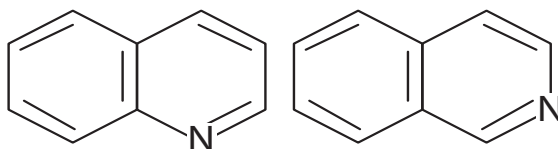


Figura 6. Estructuras químicas de quinolina e isoquinolina.

La quinina es un alcaloide quinolínico que se obtiene de la corteza de *Cinchona ledgeriana* y *C. officinalis*. Un análisis más detallado del extracto de la *Cinchona* permitió

a los químicos identificar más de 20 alcaloides, de los cuales la quinina, la cinchonidina, la quinidina y la cinconina son las sustancias de mayor actividad biológica. La quinina es venenosa para *Plasmodium vivax*, el parásito que produce la malaria. La camptotecina se utiliza para combatir el cáncer y la quinidina es un agente antiarrítmico (Meléndez Gómez y col. 2005).

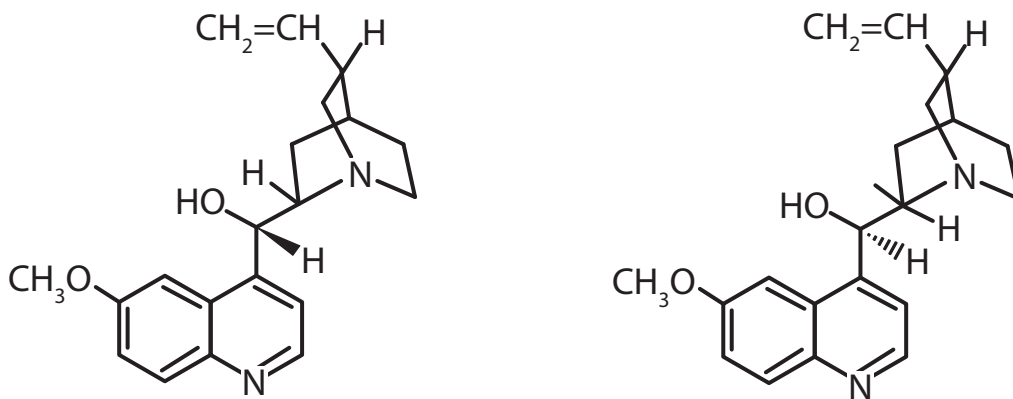
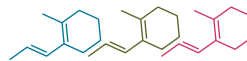


Figura 7. Estructuras químicas de quinina y quinidina.

Los alcaloides isoquinolínicos son isómeros estructurales de los alcaloides de la quinolina y se usan como principios activos medicinales. Ejemplos de plantas que los contienen son *Argemone mexicana* (chicalote amarillo) y *Papaver somniferum* (amapola).

La *Argemone mexicana* produce varios alcaloides de bencilisoquinolina, derivados de la tirosina. Algunos de estos alcaloides son muy tóxicos por sus efectos en el sistema nervioso central, y provocan pérdida de la coordinación, somnolencia y convulsiones. Sin embargo, los mismos alcaloides pueden tener propiedades médicas valiosas: el chicalote amarillo o cardo santo, actualmente se utiliza en la medicina tradicional como analgésico, expectorante, purgante y sedante (Rubio y Vázquez. 2013).

La morfina se obtiene de la amapola o adormidera. Su nombre deriva de Morfeo, dios del sueño por el efecto que produce. También se le conoce como opio y se utiliza para aliviar dolores intensos de cáncer y de infartos. Un farmacéutico, Freidrich Wilhelm Adam Sertürner (1783-1841, Alemania) aisló el principio activo mayoritario, responsable de las propiedades presente en el opio. En mayo de 1805, tras una serie de 57 experimentos, cristalizó un alcaloide de la resina secretada por *Papaver Somniferum*, la amapola del



opio, al que llamó morfina. Además, fue el primero en aislar un alcaloide de su fuente natural, iniciando así la química de los alcaloides, y debido a las propiedades analgésicas de la morfina, se inició la industria farmacéutica moderna.

El Premio Nobel de Química en 1947 fue asignado a Sir Robert Robinson por identificar la estructura de la morfina. Hasta el año de 1955, 150 años después de su aislamiento, Gates y Tschudi confirmaron definitivamente, mediante síntesis total, la estructura del fármaco propuesta por Robinson en 1925 (Gómez-Aspe, 2006).

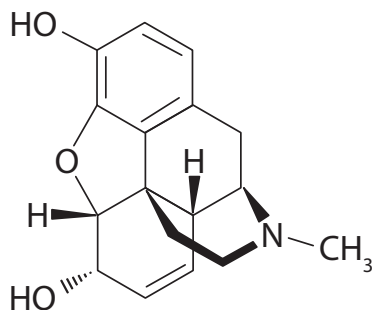


Figura 8. Estructura química de la morfina.

La codeína es un alcaloide de la amapola que se ha utilizado para la tos durante al menos 5000 años. Esta molécula es un opioide que en el hígado se transforma en morfina.

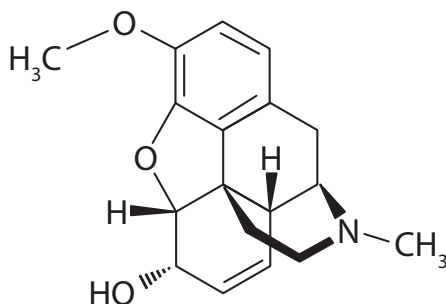
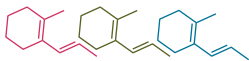


Figura 9. Estructura química de la codeína.

Ambos alcaloides actúan como analgésicos y narcóticos, además, son relajantes musculares, tienen actividad antitumoral y actividad antimicrobiana (Zenk, 2007).



Alcaloides purínicos

Los alcaloides purínicos se obtienen de las purinas adenina y guanina y se les conoce como xantinas. La xantina es la base de la cafeína, teobromina y teofilina. Estos alcaloides son antioxidantes y antiinflamatorios. Debido a esto, son eficientes en el tratamiento del asma porque son broncodilatadores, es decir que evitan la broncoconstricción. Cabe destacar que en las dosis utilizadas para la bronco dilatación, tienen efectos hipotensivos.

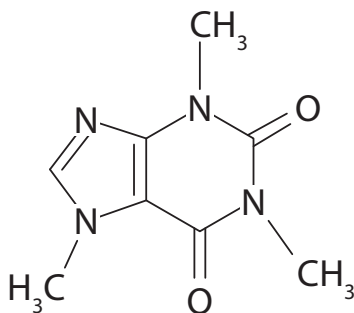


Figura 10. Estructura química de la cafeína.

Los alcaloides pirrolizidínicos se encuentran también en forma de N-óxidos y pueden ser hepatotóxicos. También son tóxicos para insectos herbívoros, por lo que las plantas los usan como protección.

Su molécula está formada por un heterociclo pirrolizidínico, con un grupo metilo y un sustituyente hidroxilo (necina).

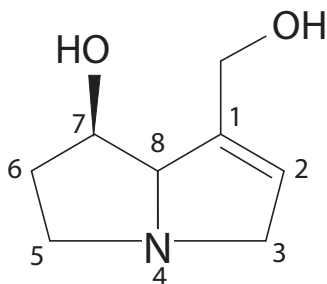
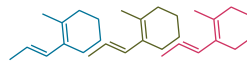


Figura 11. Estructura básica de una necina



Dadas todas las combinaciones químicas posibles de estas estructuras, podría haber más de 600 moléculas diferentes de alcaloides pirrolizidínicos.

Estas sustancias se encuentran principalmente en varios géneros de la familia Boraginaceae, en las Asteraceae (tribus Senecioneae y Eupatorieae), en Orchidaceae (nueve géneros) y Fabaceae (género Crotalaria). El género Senecio, representa más de 3,000 especies distribuidas en todo el globo.

Más de 6,000 especies de plantas producen alcaloides pirrolizidínicos, pero son pocas las familias botánicas que los producen. Los alcaloides libres se acumulan más en las semillas y los N-óxidos en las partes verdes.

Los alcaloides pirrolizidínicos son tóxicos a través de sus productos metabólicos, ya que las enzimas hepáticas los transforman en pirroles, causando daño a nivel cromosómico (Mazen y Sakka, 2010).

Alcaloides de la piperidina

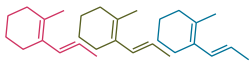
Son alcaloides derivados de la lisina. Algunos ejemplos son los alcaloides de *Prosopis juliflora* como la juliflotrina, julifloridina, N-metil julifloridina, juliprosopina y otros. Se extraen de las vainas y hojas del mezquite (arbusto de zonas áridas), y por su elevado valor nutricional, se usan en la alimentación de animales y humanos como una alternativa viable para los problemas de nutrición derivados de la sequía.

Las estructuras químicas de los alcaloides del mezquite se caracterizan por un anillo indolizínico con dos cadenas alifáticas que culminan en los anillos piperidínicos.

Estos alcaloides producen una enfermedad en el ganado, que se caracteriza por alteraciones neuromusculares como la atrofia muscular (Diógenes y col. 2018).

Aminoácidos no proteicos

Existen alrededor de 250, todos ellos tóxicos, y tienen propiedades antimetabólicas. Ejemplos de ellos son albiziina, hipoglicina A, L-canavanina, 3,4-metanoprolina, azetidina 2-ácido carboxílico (Zenk y Juenger, 2007).



Glucósidos

Al igual que los alcaloides, los glucósidos también protegen a las plantas. Estos compuestos se pueden dividir en dos tipos: glucósidos cianogénicos y glucosinolatos.

Glucósidos cianogénicos

Estos compuestos están constituidos por una aglicona de α -hidroxinitrilo y un azúcar, con mayor frecuencia glucosa. Su distribución en el reino vegetal es amplia y se encuentra en las familias Fabaceae, Rosaceae, Linaceae, Compositae, entre otras.

Los glucósidos cianogénicos no son tóxicos en su estado natural porque se almacenan en las vacuolas de las células de la epidermis, mientras que las enzimas responsables de producir el gas (HCN) están en el mesófilo.

Se aislaron por primera vez de las semillas de durazno, pero también los contienen las semillas de almendras, manzanas, chabacanos, papaya y nectarinas. Muchos de estos metabolitos secundarios provienen del mandelonitrilo.

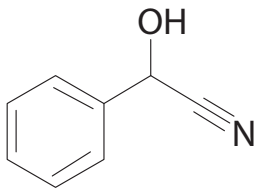
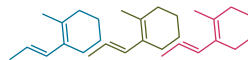


Figura 12. Estructura química del mandelonitrilo.

Cuando la planta sufre un daño físico, los glucósidos cianogénicos se mezclan con las enzimas hidrolíticas, produciendo el cianuro de hidrógeno.

La manzana (*Malus domestica*) pertenece a la familia Rosaceae que también incluye a los duraznos, cerezas, chabacanos, peras y ciruelas. La manzana tiene compuestos buenos para la salud, pero en sus semillas contiene amigdalina que es potencialmente tóxica. Los jugos de fabricación industrial se preparan utilizando la manzana con las semillas, por lo que se evaluó la cantidad del glucósido cianogénico presente en jugos comerciales, la



conclusión es que los niveles de amigdalina son muy bajos y no presentan riesgos para la salud de los consumidores (Bolarinwa y cols. 2015).

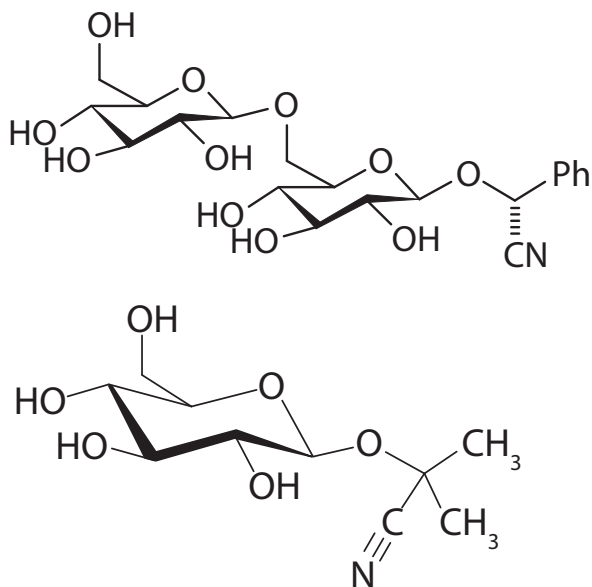


Figura 13. Amigdalina de las semillas de manzana y productos que se originan a través de la ruptura del glucósido cianogénico.

En la yuca también conocida como cassava, la linamarina (glucósido cianogénico) es la responsable de su toxicidad. Por métodos biotecnológicos, la biosíntesis de linamarina se ha reducido de un 60-94% en las hojas y en un 99% en las raíces (Vetter, 2000).

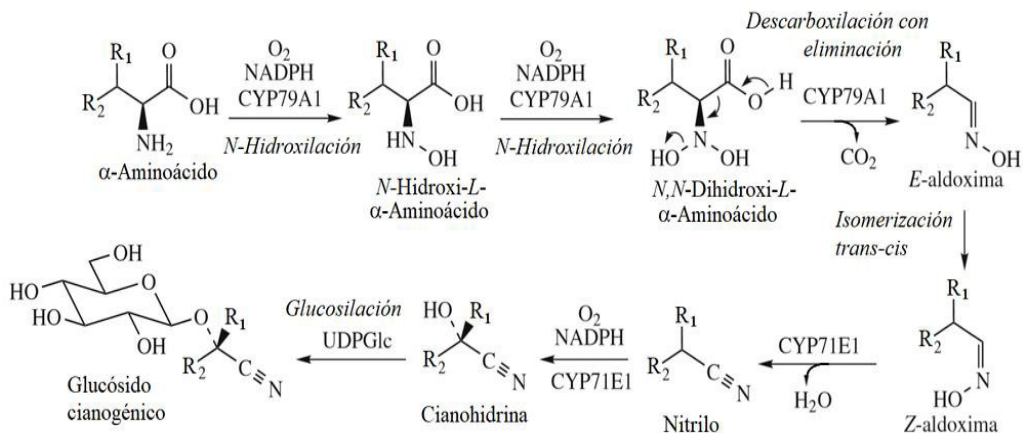
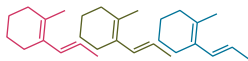


Figura 14. Biosíntesis de los glucósidos cianogénicos (Wikipedia).

Glucosinolatos

Las primeras estructuras de glucosinolatos dilucidadas fueron las de la sinigrina y la sinalbina en 1956, mientras que el término glucosinato apareció en 1961. Los glucosinolatos son metabolitos característicos del orden Brassicales.

En las plantas los glucosinolatos y los glucósidos cianogénicos son parte de un sistema de defensa bioactivable, conocido como la bomba de mostaza. Cuando las enzimas tioglucosidasas hidrolizan la unión glicosídica, bioactivan los productos de hidrólisis en donde se forman isotiocyanatos, en el caso de los glucosinolatos y nitrilos cuando se trata de glucósidos cianogénicos.

La presencia de glucosinolatos en los vegetales crucíferos, particularmente el brócoli, está asociada con propiedades que promueven la salud. Sin embargo, los glucosinolatos de las semillas del aceite de Brassicaceae tienen factores antinutricionales y muchos funcionan como inhibitorios del crecimiento.

Los glucosinolatos son aniones orgánicos con una cadena lateral derivada de aminoácido y un grupo funcional oxima con una tioglucosa unida a azufre y un grupo sulfato unido a oxígeno.

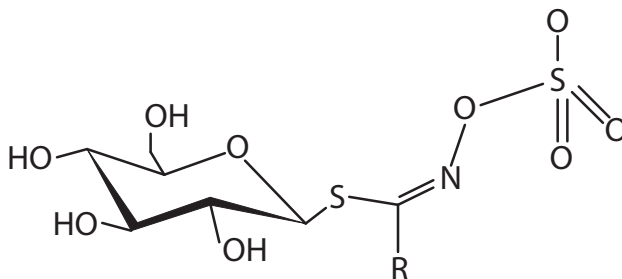
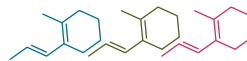


Figura 15. Estructura química de los glucosinolatos.

Los glucosinolatos evolucionaron de los glucósidos cianogénicos. Los glucósidos cianogénicos están presentes en todo el reino vegetal, desde los helechos a las gimnospermas y las angiospermas, mientras que los glucosinolatos más recientes, están limitados al orden Brassicales y al género *Drypetes*.

Los aminoácidos valina, isoleucina, fenilalanina y tirosina son precursores de los glucósidos cianogénicos. Mientras que los glucosinolatos han evolucionado y se originan de más aminoácidos como alanina, valina, leucina, isoleucina, metionina, tirosina, fenilalanina y triptófano, así como derivados de alargamiento de cadena de metionina (más de nueve metilenos adicionales) y homofenilalanina.

Curiosamente, los glucósidos cianogénicos y los glucosinolatos no coexisten en las plantas, excepto en la *Carica papaya*, la cual produce ambos: glucósidos cianogénicos y glucosinolatos derivados de la fenilalanina (Zenk y Junger, 2007).

Los glucósidos cianogénicos y los glucosinolatos están presentes como precursores inactivos almacenados en tejidos sanos y se activan en respuesta al daño tisular, por esto se denominan fitoanticipinas. De manera más clara, los glucosinolatos al ser hidrolizados por la mirosinasa producen diferentes compuestos tóxicos, según el valor del pH (Figura 16).

Los isotiocianatos son biopesticidas naturales cuando se lixivian en el suelo en la agricultura rotacional o cuando las plantas productoras de glucosinolatos se utilizan para biofumigar.

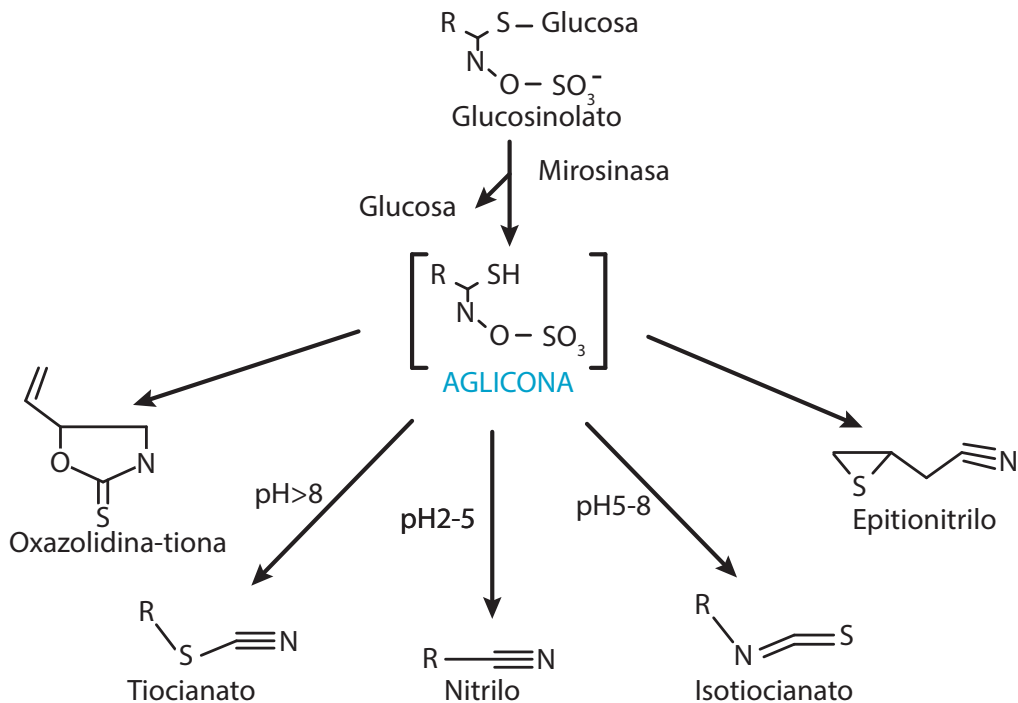
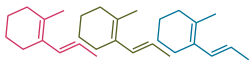


Figura 16. Hidrólisis de los glucosinolatos con diferentes valores de pH (Poveda y Velasco 2020).

Betalainas

Son pigmentos vacuolares compuestos de un núcleo de nitrógeno que es el ácido betalámico.

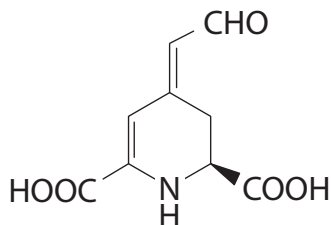
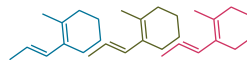


Figura 17. Estructura química del núcleo betalámico.



El ácido betalámico se condensa y forma imino compuestos con el ciclo DOPA y sus derivados glicosilados, formando betacianinas violetas. También puede condensarse con amino ácidos y sus derivados para formar betaxantinas amarillas.

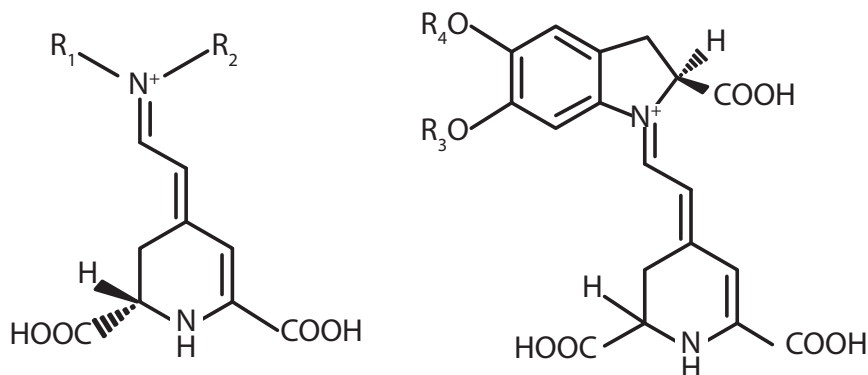


Figura 18. Estructuras de betaxantina y betacianina (Gengatharan y col. 2015).

Las betalaínas son solubles en agua y su importancia comercial radica en sus propiedades colorantes, antioxidantes y como promotoras de la salud. Se han identificado alrededor de 78 betalaínas en plantas de 17 familias y se encuentran disueltas en la savia vacuolar. Las betalaínas se utilizan como colorantes de alimentos y como suplementos dietéticos.

Las betalaínas se encuentran en las Caryophyllales y, al parecer, han evolucionado recientemente (Osbourn, 2017). Además, se consideran como marcadores quimiosistemáticos del suborden Chenopodiales, dentro de los Caryophyllales (excepto Caryophyllaceae y Molluginaceae), los cuales acumulan antocianinas en su lugar. Las Caryophyllales conforman un orden muy heterogéneo que incluye cactus, ciertas plantas carnívoras, amarantos, acelga, espinaca, bugambilias, entre los taxones y especies más representativos. La mayoría de sus familias (excepto Caryophyllaceae y Molluginaceae) producen betalaínas.

Estos pigmentos se encuentran únicamente en plantas del orden Caryophyllales y se sintetizan a partir del amino ácido L-tyrosina (Tyr), reemplazando a las antocianinas derivadas de la fenilalanina.

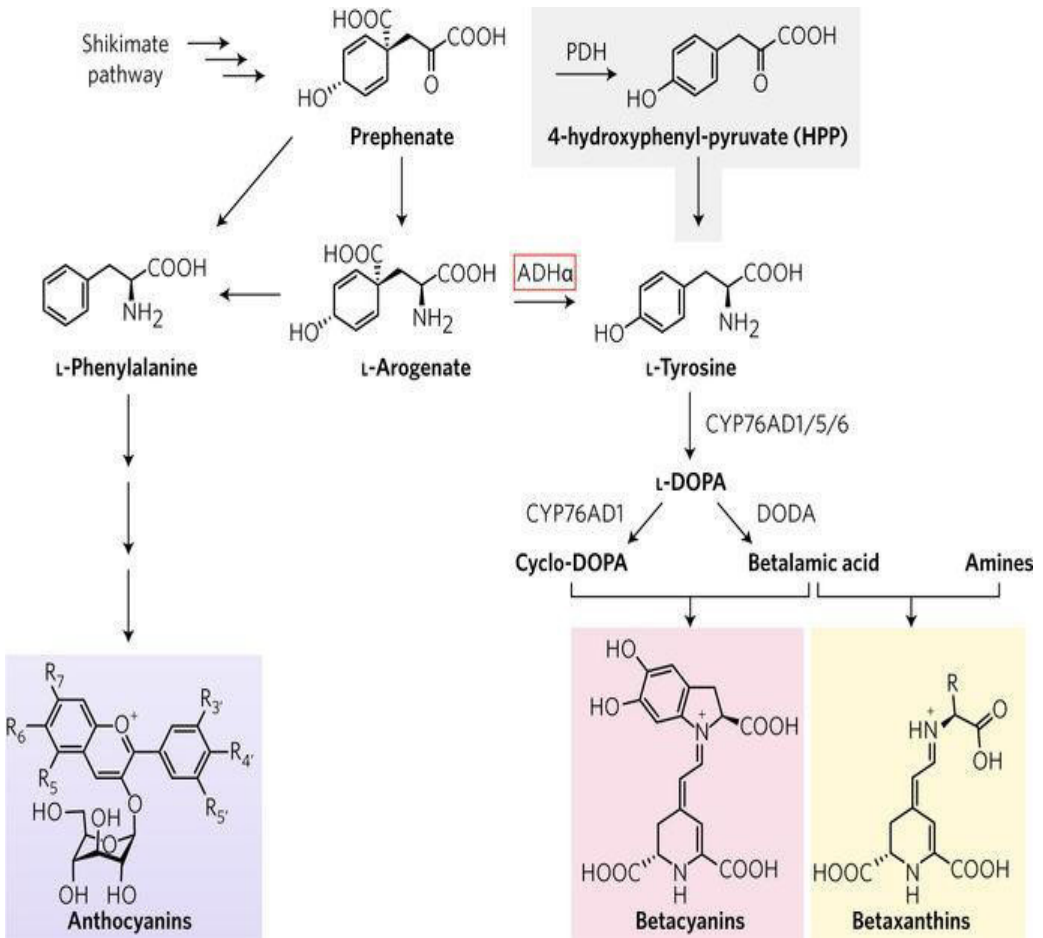
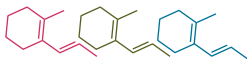
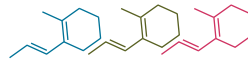


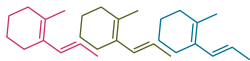
Figura 19. Comparativa entre las rutas biosintéticas de las antocianinas y betalainas (Osborn, 2017).

La primera betalaina identificada fue la betacianina del betabel. La cual se conoce como aditivo alimentario E162 betanina. Las betalainas del betabel cubren el 10% de la demanda de colorantes alimenticios del mundo.

La indicaxantina se identificó en la tuna amarillo-naranja, fue la primera en caracterizarse estructuralmente. Como las especies de Opuntia crecen en zonas áridas y en tierras secas es fácil su cultivo y esto implica un bajo costo de producción.

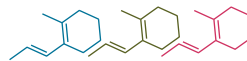


La bugambilia, el amaranto, el clavel, acelgas, champiñones y tunas, entre otras especies, contienen betalainas. Las betalainas son estables en pH 3 -7 y por su naturaleza hidrofílica se pueden extraer con agua fría o metanol acuoso. Los factores que las degradan son: pH, actividad acuosa, luz, oxígeno iones metálicos, temperatura y reacciones enzimáticas.



Bibliografía

- Aniszewski T. (2015) Alkaloids: Chemistry, Biology, Ecology, and Applications Second Edition: Elsevier Science.
- Asami T., y Nakagawa Y. (2018) Brief review of plant hormones and their utilization in agriculture. *Journal of Pesticide Science* 43: 154–158 DOI: 10.1584/jpestics.M18-02
- Badria F. (2002) Melatonin, Serotonin, and Tryptamine in Some Egyptian Food. *Journal of Medicinal Food* 5:153 *Journal of Medicinal Food* doi: 10.1089/10966200260398189
- Bolarinwa I., Orfilaa C., Morgan M. (2015) Determination of Amygdalin in Apple Seeds, Fresh Apples and Processed Apple Juices. *Food Chemistry* 170: 437–442.
- Cassels B. and Sáez-Briones P. (2018) Dark Classics in Chemical Neuroscience: Mescaline. *ACS Chemical Neuroscience* 9: 2448–2458 DOI: 10.1021/acscchemneuro.8b00215
- Diogenes V., da Silva A., Mendes M. Castro J. y Lima S. (2018) Neurotoxicity of *Prosopis juliflora*: from Natural Poisoning to Mechanism of Action of Its Piperidine Alkaloids. *Neurotoxicity Research* 34:878–888 doi.org/10.1007/s12640-017-9862-2
- Gengatharan A. Dykes G. & Choo, W. (2015) Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. *LWT- Food Science and Technology*. 64, 645-649.
- Gómez Aspe (2006) Aislamiento de la morfina. 200 años de un descubrimiento fundamental para la química moderna. *Anales de la Real Sociedad Española de Química* 102: 45–53.
- Griffin W. and Lin D. (2000) Chemotaxonomy and geographical distribution of tropane alkaloids. *Phytochemistry* 53: 623-637.
- Kang S., Kang E., Back L. (2007) Characterization of tryptamine 5-hydroxylase and serotonin synthesis in rice plants. *Plant Cell Reports* 26:2009–2015.
- Mazen A. and Sakka E. (2010) *Phytochemistry alkaloids* Third Edition. Recuperado de Manual *Phytochemistry Alkaloids.pdf*



- Meléndez-Gómez, C.; Kouznetsov, V. (2005) Alcaloides quinolínicos: importancia biológica y esfuerzos sintéticos. *Universitas Scientiarum* 10: 5-18 .
- Rubio-Piña J. and Vázquez-Flota F. 13: 00 00 (2013) Applications of the Benzylisoquinoline Alkaloids from *Argemone mexicana* L. *Current Topics in Medicinal Chemistry*.
- O'Hagan D. (2000) Pyrrole, pyrrolidine, pyridine, piperidine and tropane alkaloids *Natural Products Reports* **17**: 435-446.
- Olivoto T., Nardino M., Carvalho, I., Follman D., Jardel-Szareski V., Ferrari M., Pelegrin A., Queiróz de Souza V. (2017) Plant secondary metabolites and its dynamical systems of induction in response to environmental factors: A review. *African Journal of Agricultural Research* 12: 71-84.
- Osbourn A. (2017) Plant pigment evolution. Painting with betalains. *Nature Plants* 3, 852–853.
- Poveda, J., Eugui, D. & Velasco, P. Natural control of plant pathogens through glucosinolates: an effective strategy against fungi and oomycetes. *Phytochemical Review* (2020). <https://doi.org/10.1007/s11101-020-09699-0>
- Sánchez-Pérez, Comas-Basté O., Rabell-González J., Veciana-Nogués M., Latorre-Moratalla M. and Carmen Vidal-Carou M. (2018) Review Biogenic Amines in Plant-Origin Foods: Are they Frequently Underestimated in Low-Histamine Diets? *Foods* 7: 205. doi: 10.3390/foods7120205
- Smith T. (1970) Putrescine, spermidine and spermine in higher plants. *Phytochemistry* 9: 1479-1486.
- Vetter, J. (2000) Plant cyanogenic glycosides. *Toxicon* 38 (2000) 11-36.
- White C. (1976) 1,4-diaminobutane (putrescine) spermidine and spermine. Tabor C. and Tabor H. *Annual review of biochemistry*, 45:285-306.
- Zenk M., Juenger M. (2007) Evolution and current status of the phytochemistry of nitrogenous compounds. *Phytochemistry* 68: 2757–2772.

Fitoquímica

Francisca Leonora Sánchez y García Figueroa



Este libro permite conocer los metabolitos secundarios, es decir, aquellos compuestos fitoquímicos que producen las plantas para su protección y reproducción. Es importante revisar a detalle estos compuestos porque son de valor en el mundo actual; ya sea que se usen para crear nuevos fármacos y medicamentos o estudiarlos por su contribución como alimentos funcionales. No obstante, también actúan en el control de plagas, funcionan como colorantes, fibras de textiles, fragancias, saborizantes, materiales de construcción.

Por sus estructuras químicas los metabolitos secundarios se pueden agrupar en diferentes tipos y a partir de ellas surgen sus propiedades físicas, químicas y su actividad biológica. De manera que se revisan en este libro, algunos detalles del origen biosintético de los metabolitos secundarios. Además de las razones por las que las plantas producen dichas sustancias, su descubrimiento, sus propiedades y un recorrido histórico del uso que se les ha dado desde su hallazgo hasta el presente a través del mundo.

El material de este libro es valioso, porque reúne en un solo espacio toda la información dispersa en revistas de investigación y libros especializados (los cuales podrían ser de poco acceso porque se encuentran escritos en idiomas extranjeros sin traducción). Además se dan las referencias para profundizar esta información.

Esta obra está destinada principalmente para los estudiantes de biología, química, medicina, enfermería, agronomía y a todos aquellos interesados por los productos naturales de las especies vegetales.



Facultad de Estudios Superiores Zaragoza,
Campus I. Av. Guelatao No. 66 Col. Ejército de Oriente,
Campus II. Batalla 5 de Mayo s/n Esq. Fuerte de Loreto.
Col. Ejército de Oriente.
Iztapalapa, C.P. 09230 Ciudad de México.
Campus III. Ex fábrica de San Manuel s/n,
Col. San Manuel entre Corregidora y Camino a Zautla,
San Miguel Contla, Santa Cruz Tlaxcala.

<http://www.zaragoza.unam.mx>

