

La química que entreteje a los seres vivos

La vida persiste y se desarrolla en medio de numerosas moléculas orgánicas que no tienen función aparente en el metabolismo primario de los organismos que las producen. Son los metabolitos secundarios: fenoles, flavonoides, taninos, cumarinas, terpenoides, esteroides, alcaloides y otros compuestos; tan ubicuos como el movimiento, los sonidos o los colores. No podría entenderse nuestro mundo sin las esencias y sabores de las especias, los olores de un mercado de plantas medicinales, la cicuta que mató a Sócrates o la aspirina, los perfumes, el opio, la belladona, el árnica y la cafeína. Todos, productos originados a través del metabolismo secundario. Algunos, como los saborizantes de las especias, se encuentran entre las causas que condujeron al descubrimiento de América, pues los europeos buscaban un nuevo camino hacia las Indias donde abundaban estos productos; muchos otros motivaron la creación de fortunas y desgracias, guerras y bienestar.

En virtud de su estructura, los metabolitos secundarios son químicamente reactivos; es decir, son aptos para ingresar en los sistemas vivos, interactuar y cambiar la es-

tructura de un receptor o blanco molecular, y penetrar en las células donde pueden afectar varios procesos fisiológicos. De allí deriva su actividad biológica o farmacológica, y si reconocemos la asombrosa diversidad de metabolitos secundarios no sólo en las plantas, sino en los microorganismos —bacterias, ascomicetos, hongos—, entenderíamos mejor la diversidad de usos que tienen, tanto los conocidos como los que están por descubrirse, y sus probables efectos sobre los sistemas biológicos.

Las plantas producen decenas de miles de metabolitos secundarios, algunos se consideran productos naturales o drogas —con sus derivados y análogos— y representan alrededor de 25% de los productos con uso medicinal. Su empleo puede ser directo o bien como precursores y modelos para la síntesis o semi-síntesis de drogas. Por ejemplo, los alcaloides del curare —nombre genérico de venenos para flechas que se extraen de plantas, generalmente trepadoras, de las familias Menispermaceae y Loganiaceae de América del Sur—, se emplean clínicamente como relajantes musculares; el alcaloide fisostigmina del haba de Calabar (*Physostigmatis semina*), se usa para contraer la pupila

Ana Luisa Anaya Lang y Francisco Javier Espinosa García



EXTRACELULAR	
Reducen la formación de mutágenos y carcinógenos durante la preparación de los alimentos, y reducen su biodisponibilidad, aceleran el tránsito intestinal y modifican la flora microbiana intestinal. También inhiben la penetración de mutágenos y carcinógenos en las células.	
INTRACELULAR	
Aumentan la actividad de enzimas involucradas en la neutralización de mutágenos y carcinógenos, e inhiben las actividades de las que participan en su formación, eliminan las especies reactivas de oxígeno e inhiben la activación metabólica. También promueven el sistema inmune, protegen al ADN de los carcinógenos e inhiben los efectos perjudiciales de los procarcinógenos sobre el ADN.	
Cuadro 1	Mecanismos de acción de los quimiopreventivos.

PRIMERA CLASIFICACIÓN	
Semioquímicos. Semion = marca o señal, están involucrados en las relaciones entre los organismos. Hay de dos tipos:	
En el primero, sin nombre genérico, están los intermediarios de relaciones químicas entre individuos de la misma especie, se dividen en tres categorías:	
<ul style="list-style-type: none"> • Autotoxinas, son tóxicos para la misma especie que las produce y se liberan al ambiente. • Autoinhibidores adaptativos, cuando controlan el número de individuos de la población. • Feromonas, cuando su papel es permitir la comunicación por medio de señales químicas entre organismos de la misma especie —conducta reproductora, regulación social, reconocimiento, control y diferenciación de castas, alarma y defensa, territorialidad y marcaje, o localización de la comida. 	
El segundo tipo, los Aleloquímicos, intervienen en interacciones de organismos de diferente especie, y se subdividen en tres grupos:	
<ul style="list-style-type: none"> • Alomonas, confieren ventajas al organismo que los produce. • Kairomonas, confieren ventajas al organismo receptor. • Depresores, sin proporcionar ventajas al organismo emisor, perjudican al receptor. 	
SEGUNDA CLASIFICACIÓN	
Semioquímico. Abarca dos tipos de compuestos: los que transmiten información a los receptores —infoquímicos— y los que funcionan como toxinas o nutrimentos.	
Los infoquímicos acarrear información en una relación entre dos individuos, despertando en el receptor una respuesta fisiológica o conductual con carácter adaptativo para uno de los organismos interactuantes o para ambos. Se dividen en dos grupos:	
<ul style="list-style-type: none"> • Feromonas. Pherein = acarrear, Horman = excitar. Compuestos que median una relación entre organismos de la misma especie, el beneficio puede ser para el productor, el receptor o para ambos. • Aleloquímicos. Allelon = mutuo. Compuestos que median la relación entre dos individuos de diferente especie, se dividen en tres grupos: <ul style="list-style-type: none"> • Alomonas. Allo = diferente. En este grupo están los que funcionan como defensa en las plantas, llamados fitoanticipinas por los fitopatólogos o defensas preformadas o constitutivas, cuando están presentes en su forma activa dentro de la planta. Los que se forman en respuesta al ataque de patógenos o herbívoros se llaman fitoalexinas o defensas inducidas. El beneficio, desde el punto de vista adaptativo, es para el productor. • Kairomonas. Kairos = Oportunista. El beneficio es para el receptor. • Sinomonas. Syn = conjuntamente. El beneficio es para ambos organismos. 	
Cuadro 2	Metabolitos secundarios que intervienen en las interacciones biológicas.

del ojo, al contrario que los alcaloides de la belladona (*Atropa belladonna*) que la dilatan; los glucósidos cardíacos de las especies de *Strophantus*, utilizados en África como veneno para flechas, son muy efectivos como estimulantes del corazón. Entre los ejemplos sobresalientes de plantas útiles, por los metabolitos que producen, se encuentra *Rauwolfia serpentina*, originaria de las partes bajas de los Himalayas en Nepal; esta planta es usada como antídoto contra la mordedura de serpientes tan venenosas como la cobra, también se emplea contra la ansiedad, el insomnio y la demencia; es un sedante natural que no ocasiona somnolencia y además produce reserpina, un metabolito sumamente efectivo para tratar la hipertensión arterial. Una leyenda Hindi cuenta que en tiempos remotos las mangostas comían esta planta antes de combatir contra una cobra.

La aspirina, profusamente consumida como analgésico y para prevenir trombos e infartos, es un derivado simple del ácido salicílico que se encuentra naturalmente en las especies de sauce —género *Salix*. A diferencia de la aspirina, la meperidina (demerol), la pentazocina (talwin) y el propoxyfeno (darvón), son drogas analgésicas totalmente sintéticas fabricadas utilizando como modelos o precursores algunos de los alcaloides del opio, látex desecado de las cápsulas de la amapola (*Papaver somniferum*, Papaveraceae), que contiene aproximadamente veinticinco alcaloides —morfina, codeína, tebaína, papaverina y otros. Las apreciadas propiedades de la mayor parte de las especias, condimentos, infusiones y bebidas como el café, el té y el chocolate —aromas, sabores y efectos estimulantes—, provienen de metabolitos secundarios farmacológicamente activos, como los alcaloides cafeína, teofilina y teobromina. Recientemente, se descubrieron nuevos usos y se revaloraron algunos metabolitos secundarios como agentes quimiopreventivos o sustancias que pueden prevenir problemas fisiológicos y enfermedades humanas, entre las que se incluyen tanto metabolitos primarios como secundarios (cuadro 1).

Los metabolitos secundarios no sólo tienen propiedades farmacológicas, muchos también provocan que las plantas sean desagradables o tóxicas para numerosos herbívoros. Durante la evolución humana, la búsqueda y utilización de plantas alimenticias significó el encuentro con sus sistemas químicos de defensa. Nuestra especie fue asimilando esta pléyade de metabolitos secundarios, pudo metabolizar algunos, evitar otros y utilizar aquéllos que le reportaban ciertos beneficios. En este punto es donde se relacionan y

fusionan dos disciplinas científicas de primordial importancia: la etnobotánica y la ecología química.

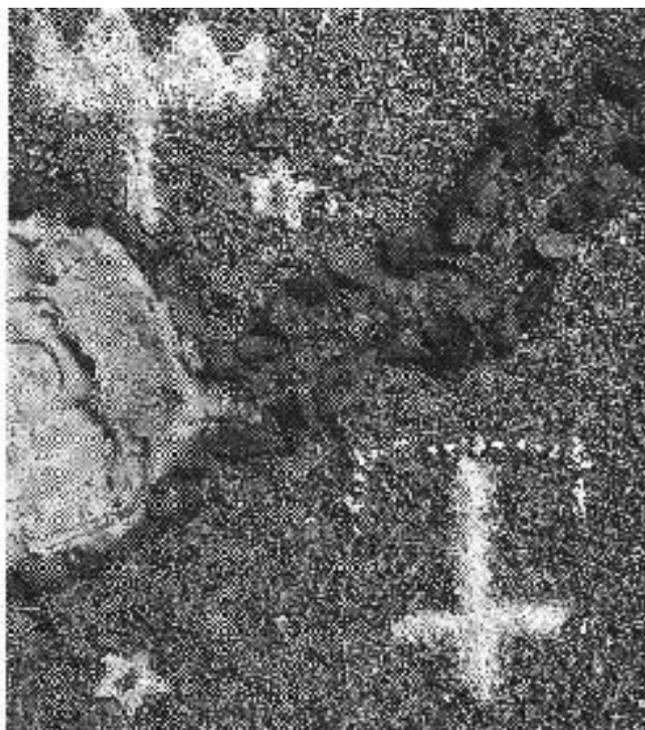
A pesar del amplio conocimiento que se tiene sobre las relaciones entre el ser humano y los metabolitos secundarios, los cuestionamientos sobre el origen, evolución y función ecológica de estas moléculas orgánicas no iniciaron sino hasta mediados del siglo xx, con la ecología química. En esta disciplina se han realizado grandes avances en el conocimiento de las relaciones químicas entre organismos, lo cual nos permite entender mejor la naturaleza y los procesos biológicos. En el cuadro 2 se muestra la terminología general sobre los metabolitos secundarios cuyo papel ecológico está plenamente reconocido. La clasificación está dividida en dos grupos. En el primero se incluyen los que intervienen en las relaciones químicas desde el punto de vista funcional y adaptativo, considerando las ventajas, desventajas y neutralidad adaptativa para cada uno de los participantes en la relación, el productor o emisor y el receptor. El segundo grupo corresponde a los involucrados en las interacciones bióticas, considerando, además de las ventajas adaptativas y el origen de los compuestos, un análisis de los costos y beneficios de la producción y liberación de las sustancias.

La diversidad así como las funciones de los metabolitos secundarios responden a una intrincada red de interaccio-

nes biológicas que va de un extremo al otro de un continuum, desde las relaciones negativas o perjudiciales para uno o ambos organismos interactuantes —depredación, parasitismo, competencia, patogénesis—, hasta las positivas o benéficas para uno o ambos —mutualismo, simbiosis, protocooperación—, en muchas ocasiones involucran a tres o más organismos. Otra característica de las interacciones biológicas es que son dinámicas; es decir, pueden cambiar por diversos factores —intrínsecos o extrínsecos—, lo que determina, en algunos casos, modificaciones significativas en las relaciones entre los organismos.

Defensas vegetales

El primer nivel trófico de los ecosistemas está constituido por las plantas, las cuales están expuestas al ataque de los herbívoros o consumidores primarios —el segundo nivel trófico, conformado por diversos grupos de organismos desde virus, bacterias, hongos y artrópodos, hasta vertebrados en general. La presión de selección ejercida por los herbívoros determinó la aparición de muchos mecanismos de defensa en las plantas. A su vez, los herbívoros evolucionaron de manera que adquirieron caracteres adaptativos —contradefensas— que les permitieron seguir consumiendo las plantas. En esta carrera evoluti-



va, los metabolitos secundarios tienen un papel fundamental.

Las defensas de las plantas tienen propiedades muy particulares que pueden dividirse en dos tipos básicos: las constitutivas y las inducidas. Las primeras se refieren al desarrollo de numerosas estructuras y compuestos químicos —espinas y tricomas, fibras, resinas, corteza gruesa, fenoles, lignina, terpenoides, alcaloides y otros metabolitos secundarios— que funcionan como defensas en los tejidos de las plantas. Las inducidas son respuestas activadas en un organismo después de un encuentro con un herbívoro, patógeno o parásito, las cuales le confieren inmunidad o cierto grado de resistencia frente a ataques subsecuentes, entre ellas se incluyen la formación de nuevas estructuras morfológicas y constituyentes químicos, así como los cambios en las estructuras o en la concentración de los compuestos ya existentes.

En la milpa

Como todos los años, Don Aristeo preparó de forma tradicional su parcela, sembró maíz, frijol, calabaza, haba, chile, alfalfa y carrizo, plantas que constituyen una parte muy importante de su subsistencia. Es una técnica de manejo multifuncional que generalmente sólo se observa en las milpas tradicionales y en las parcelas dedicadas a la agricultura orgánica. Cuanto mayor sea la variedad de cultivos, mayor será la riqueza de productos cosechados y crecerá la garantía de evitar la pérdida de toda la cosecha en caso de que alguna contingencia ambiental perjudique un cultivo. La diversificación proporciona otras ventajas, como mejorar el control de plagas y malezas e incrementar el aporte de materia orgánica al suelo. Asimismo, promueve una mayor diversidad de polinizadores, de depredadores de algunas plagas de los cultivos y de microorganismos en el suelo.

La milpa de Don Aristeo está enclavada en la zona de camellones —campo agrícola rodeado de zanjas con agua por uno, dos o tres de sus lados, y por diversos árboles en uno o todos sus lados— en el suroeste de Tlaxcala y tiene cierto parecido a una chinampa. Es un camellón rodeado de árboles y agua, siempre disponible, que puede cultivar dos veces al año, en primavera y en invierno. Los árboles que lo rodean —destacándose el aile (*Alnus acuminata*) entre ellos— funcionan como barreras contra el viento y su presencia modifica el microclima del camellón. En la capa superficial del suelo, los nutrimentos se concentran cerca

de los árboles y disminuyen conforme se alejan de ellos. Por otro lado, la abundancia de artrópodos, algunos potenciales plagas de los cultivos, varía según su grado de asociación con uno o más componentes del agroecosistema —sistema agrícola en el cual se ha modificado sensiblemente el ecosistema y cuya estabilidad depende de subsidios energéticos, un agroecosistema puede ser un policultivo, un sistema mixto o asociado, un sistema agroforestal, agrosilvopastoril, o de acuacultura, entre otros.

Bordeando el camellón, al pie de los árboles, crece un arbusto muy común, la jarilla (*Baccharis glutinosa*, Asteraceae). Árboles y arbustos funcionan como trampas para los insectos, protegiendo la milpa. Durante el verano, el aile atrae y retiene en sus hojas a una importante plaga del maíz, un insecto llamado frailecillo (*Macroductylus* sp.); por su parte, la jarilla atrae áfidos o pulgones, con lo que disminuye su ataque a los cultivos y la consecuente reducción de la productividad. Pero, ¿cómo los atraen? La respuesta de un insecto a una planta depende de lo que la última representa, puede ser alimento, microhábitat, escudo o madriguera. Sin embargo, la importancia primaria que tiene una planta para un insecto se refiere a su valor como alimento. En teoría, todas las hojas verdes representan una adecuada fuente de alimento para los insectos —y para otros herbívoros—, pero deben considerar diversos aspectos químicos de la planta: la superioridad nutritiva, las defensas químicas, los repelentes o los atrayentes. Todas pueden ser químicamente novedosas para un insecto, y aquí es donde son relevantes los metabolitos secundarios, pues en ellos se basa buena parte de la selección de los insectos. Para áfidos y frailecillos, las hojas de la jarilla y el aile son más atractivas que las de los cultivos. Las razones de esto son químicas, aunque también las plantas podrían ser más atractivas porque ahí los herbívoros escapan de sus depredadores. Sin duda, esto constituye una enorme ventaja para el agricultor pues cuenta con trampas que retienen a los insectos, los cuales, en otras circunstancias, podrían convertirse en plagas de los cultivos. Pero queda una pregunta en el aire, ¿acaso los cultivos no tienen defensas químicas?

Las defensas del maíz

En el camellón de Don Aristeo, poco después de la siembra de primavera, el maíz apenas ha germinado, pero en sus tejidos se sintetizan un grupo de metabolitos que no estaban en la semilla: los ácidos hidroxámicos cíclicos —el DIBOA



y el DIMBOA—, también conocidos como benzoxazinoides. Presentes en otros cereales como el trigo, se les ha implicado en la resistencia o inmunidad de las plantas a insectos y microbios; por ejemplo, una de sus funciones es repeler áfidos o pulgones, reduciendo con ello la transmisión de virus a las plantas. También el barrenador del tallo (*Ostrinia nubilalis*), larva de una mariposa-plaga de Asia introducida en los Estados Unidos y luego en México, es repelido por los ácidos hidroxámicos del maíz. *Agrobacterium tumefaciens*, la famosa bacteria patógena con la que inició la biotecnología de organismos transgénicos o genéticamente modificados, tampoco ataca al maíz por la presencia de los ácidos hidroxámicos; sin embargo, recientemente se encontraron cepas de la bacteria resistentes al DIMBOA, las cuales se han usado para producir maíz transgénico.

En el maíz, y en otras gramíneas, una característica de la estructura química de los ácidos cíclicos DIMBOA y DIBOA es que están presentes como glucósidos —una molécula de glucosa ligada a otra molécula, que generalmente es tóxica, llamada aglicona. Cuando el tejido del maíz es rasgado o mordido, los glucósidos hidroxámicos reaccionan con una enzima que se encuentra en el citoplasma de las células, la beta glucosidasa, y que divide las moléculas liberando glucosa y las agliconas tóxicas DIMBOA y DIBOA, las cuales se descomponen rápidamente formando benzoxazolinonas MBOA y BOA, respectivamente, también tóxicas. Algunos hongos patógenos de los cereales, como *Gaeumannomyces gra-*

minis, y diferentes especies de *Fusarium* son capaces de degradar el MBOA y el BOA, y formar ácidos menos tóxicos.

Los ácidos hidroxámicos cíclicos también son tóxicos para el maíz, por lo que la enzima y el glucósido se almacenan por separado. Este es un patrón común en las plantas que producen metabolitos tóxicos que podrían dañarlas. Poco después de la germinación del maíz se puede encontrar DIMBOA, tanto libre como en su forma de glucósido, el cual comienza a desaparecer, y se reduce la concentración del glucósido, después de treinta y seis horas. Se cree que el DIMBOA libre es una protección para la plántula, porque la más mínima pérdida de su tejido puede ser mortal.

Mientras se desarrolla, el maíz está expuesto a numerosas enfermedades y plagas. Una de las más destructivas, el gusano de las raíces (*Diatrea grandiosella*), causa grandes pérdidas en ciertas variedades de maíz. En las raíces de las que resisten se ha encontrado altas concentraciones de glucósidos de DIMBOA, el cual afecta poco a otras plagas, como el barrenador del tallo del maíz (*Diabrotica virgifera*). Es posible que en ello influyan los siete glucósidos relacionados con el DIMBOA, presentes en maíz sano. A Don Aristeo también le preocupa el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), un insecto voraz que ataca a los cogollos de la planta del maíz.

Para luchar contra sus numerosos enemigos y competidores o enfrentar las condiciones adversas del medio, el maíz tiene diversos mecanismos de defensa. En ocasiones,

sorprenden por su sofisticación y complejidad; por ejemplo, al ser atacadas por las orugas de *Spodoptera frugiperda*, las plantas de maíz emiten una mezcla específica de compuestos volátiles, y pequeñas cantidades de acetato de fenilo y β -humuleno, que resulta altamente atractiva para las avispas parasitoides como *Microplitis rufiventris*, que buscan a las orugas, sus presas, para depositar sus huevecillos en su interior. La liberación de las señales por el maíz es promovida por un metabolito inductor específico que se encuentra en la saliva de las orugas, la volicitina. Algunos estudios sugieren que las plantas responden de manera diferencial a las distintas especies de herbívoros, incluso en sus diferentes etapas de desarrollo, proporcionando señales químicas específicas a los parasitoides depredadores de los herbívoros. En el caso de *Spodoptera exigua*, prima hermana de *S. frugiperda*, la avispa hembra parasitoide (*Cotesia marginiventris*) que la ataca, también es atraída por los volátiles emitidos por las plantas de maíz, cuyos tejidos sufren el ataque de esta oruga. Con el tiempo, el daño por las orugas induce la producción de terpenoides e indol en el maíz, que actúan como atrayentes sobre el parasitoide. La duración del tiempo de consumo por el herbívoro determina el tipo de compuestos que produce la planta y, de este modo, qué tan atractiva puede resultar para *Cotesia*. Los compuestos emitidos durante una hora de consumo

por las orugas, tienden a ser volátiles derivados de la lipoxigenasa —volátiles de hojas verdes— y de ácidos grasos como aldehídos de seis carbonos y alcoholes, mientras que las sustancias emitidas después de seis horas de consumo, son terpenoides. El olor de una planta puede estar determinado por cientos de compuestos químicos exclusivos o comunes en varias plantas.

Recientemente, se han intensificado las investigaciones sobre las relaciones entre los tres niveles alimentarios —tritróficas: planta-herbívoro-carnívoro— para aumentar las alternativas de control biológico en los agroecosistemas, incorporando aquellas que se basan en el manejo de los mecanismos de atracción que tienen las plantas sobre depredadores y parasitoides.

Una planta es capaz de asegurar la fuerza y claridad de una señal dosificando la cantidad de volátiles que libera. El maíz dañado por un herbívoro emite algunos microgramos de compuestos por hora, cantidad considerablemente grande comparada con la comunicación por feromonas que generalmente efectúan los insectos, que sólo producen unos cuantos nanogramos —la milésima parte de un microgramo— por hora.

Sobre cómo ocurrió exactamente el desarrollo evolutivo de todas estas señales químicas, aún existen muchas interrogantes. En la planta, la capacidad de liberar volátiles



que atraen a los enemigos naturales de los herbívoros, y en los insectos carnívoros —depredadores de otros insectos—, la de detectar los sistemas químicos que han desarrollado las plantas contra los herbívoros. La clave de la atracción de depredadores, hacia los herbívoros que atacan a una planta, radica en diversas señales que provienen tanto de la planta y del herbívoro, como de la interacción de ambos. Por su parte, el depredador puede distinguir las diferencias cualitativas entre los olores emitidos por diferentes especies de plantas y los de los herbívoros. Por ejemplo, los frijoles Lima infestados con el ácaro *Tetranychus urticae* producen terpenoides y salicilato de metilo que atraen al ácaro carnívoro *Phytoseiulus persimilis*, depredador de *Tetranychus*.

Relaciones entre plantas

En la milpa, el maíz, el frijol y la calabaza conviven con una diversidad de malezas que aprovechan las mejoras al suelo, que realiza Don Aristeo mediante el riego y el abono, para establecerse y desarrollarse junto con los cultivos hasta completar sus ciclos de vida. Cultivos y malezas, al crecer juntos, establecen diversas relaciones; por ejemplo, compiten por el espacio, la luz, el agua y los elementos nutritivos del suelo, desplegando muchos de los mecanismos adquiridos durante la evolución que les confieren ventajas en su lucha competitiva. Uno es la liberación de metabolitos con diversas propiedades; por ejemplo, la de inhibir o estimular el crecimiento de otras plantas competidoras o de microorganismos, fenómeno que recibe el nombre de alelopatía. La liberación de los metabolitos que la planta produce se realiza por diversas vías: volatilización, lixiviación de las hojas, exudación por las raíces y descomposición de la materia orgánica. Antes de sembrar, Don Aristeo suele añadir al suelo abono orgánico, una mezcla de rastrojo de maíz, malezas que corta durante los deshierbes, hojas de los árboles que rodean el camellón o bien el lodo y las plantas acuáticas de los canales que lo rodean —abonos vegetales—, y el estiércol de sus animales domésticos: vacas, cerdos, gallinas y burros —abonos animales.

Estudios en el campo demostraron que durante la descomposición de algunos abonos verdes que utiliza Don Aristeo —particularmente las hojas del aile y las de algunas plantas acuáticas que viven en las zanjas de agua— se logra reducir el número de malezas que crecen en las parcelas de cultivo; la descomposición de este material modifica químicamente al suelo y actúa como herbicida natural que

afecta el crecimiento de algunas arvenses y de microorganismos del suelo, sin perjudicar los cultivos.

Algunas malezas, y cultivos como el maíz, son capaces de liberar al medio metabolitos secundarios con efectos alelopáticos —algunos también considerados como herbicidas naturales. Por ejemplo, el polen del maíz es particularmente alelopático o fitotóxico, inhibe la germinación y el crecimiento de muchas malezas al caer sobre el suelo de la milpa. Contiene gran cantidad de ácido fenilacético, que es un regulador del crecimiento vegetal producido por las plantas y una de las causas por las que el polen de maíz es alelopático. Se sabe que la calabaza —de la familia Cucurbitaceae— también libera sustancias inhibitorias del crecimiento de otras plantas. Las cucurbitáceas forman una cubierta continua sobre el suelo que elimina las malezas y aporta materia orgánica —entre ocho y diez toneladas por hectárea. Una maleza de la misma familia y cuyas propiedades alelopáticas están más acentuadas, el chayotillo (*Sicyos deppei*), crece en el camellón de Don Aristeo de forma rastrera, es muy agresiva y cubre el suelo, puede trepar encima de otras plantas y de los árboles, y si no se elimina a tiempo, interfiere con el crecimiento de los cultivos y otras malezas hasta desaparecerlos. También, algunas variedades de frijol pueden tener propiedades alelopáticas. El efecto de este tipo de compuestos sobre la germinación y crecimiento de otras plantas, depende de la sensibilidad de las últimas, de su edad, su estado fenológico y su vitalidad, entre otros factores.

En este tipo de sistemas agrícolas tradicionales, que existen con diversas variantes en muchos lugares de México, el manejo de las malezas durante el ciclo de cultivo juega un papel decisivo. Don Aristeo las conoce por su efecto benéfico o perjudicial y las selecciona cuidadosamente, corta algunas que son comestibles, como los quelites, otras las usa como forraje y las que no interfieren con sus cultivos, las deja crecer pues sabe que le benefician produciendo materia orgánica que enriquece el suelo, favoreciendo la retención de humedad, contrarrestando la salinidad, protegiendo al suelo de la erosión y ayudando al combate de otras malezas, insectos dañinos y enfermedades. Cuando cultiva brócoli (*Brassica oleracea*) y lo combina con flor de nabo (*Brassica rapa var. campestris*), la última tiene un efecto inhibitor sobre las malezas y aumenta la producción del brócoli. Esto indica que la asociación de una planta cultivada con una especie no cultivada puede ofrecer alternativas para el control alelopático de arvenses y para disminuir el excesivo uso de herbicidas.



Las aplicaciones prácticas de la alelopatía para el control de malezas en la agricultura incluyen la identificación de nuevos herbicidas, el uso de coberturas alelopáticas, la rotación de cultivos, el desarrollo de cultivos alelopáticos, la disminución de enfermedades del suelo y los problemas de replantación asociados con la autotoxicidad.

Se ha relacionado la alelopatía con problemas de interferencia entre cultivos y malezas, entre cultivos, así como de toxicidad de los residuos de cultivos y malezas, y exudados de ambos. Muchos problemas de autotoxicidad, o de fracasos en la reforestación y restauración ecológica, están relacionados con la alelopatía, la cual tiene una fuerte correspondencia con otros tipos de estrés ambiental. Resulta complicado establecer el papel ecológico de los alelopáticos, una pléyade de factores interactuando entre sí, y con los agentes alelopáticos, hacen muy difícil evidenciar el fenómeno en condiciones naturales. Sin embargo, la alelopatía puede convertirse en una herramienta potencial para el control biorracional de las malezas o patógenos del suelo por medio del manejo de los aleloquímicos que se producen y liberan al ambiente. Por eso es indispensable que las nuevas metodologías de manejo de los recursos bióticos consideren la alelopatía, y la ecología química en general, como parte de sus tácticas básicas.

Disfraces adquiridos

El lenguaje químico por medio de diversas señales suele ser la forma dominante de comunicación entre los organismos vivos. Los insectos, por ejemplo, han desarrollado señales químicas altamente complejas y específicas con las que se comunican con los individuos de su propia especie

—feromonas—, y resulta sorprendente que otros organismos, como las plantas, hayan adquirido la habilidad de explotar estos sistemas con el fin de satisfacer sus propias necesidades.

En el camellón de Don Aristeo, los frijoles, las calabazas, las habas, los girasoles, los chícharos y muchas malezas, tienen la capacidad de producir las mismas, o muy parecidas, señales químicas usadas por los insectos para comunicarse —mimetismo químico. Así, un compuesto o una mezcla producida por un organismo —la planta— provoca una respuesta específica de conducta en otro de diferente especie.

Para la mayoría de las plantas con flores, la interacción con animales polinizadores es fundamental. Sobre todo para aquéllas cuyas flores son unisexuales y para las que tienen flores autoincompatibles —que no pueden autopolinizarse—, como algunos chícharos que no podrían reproducirse sexualmente sin la presencia del polinizador debido a la morfología especial de la flor. Este tipo de plantas depende de la polinización cruzada que efectúan los insectos.

Gran parte de los sistemas de polinización han evolucionado como relaciones mutualistas en las que ambos organismos son recompensados, el insecto obtiene polen, néctar, ceras o esencias de la flor y la planta logra reproducirse por medio de la transferencia de su polen por el insecto.

Los diversos metabolitos bioactivos —aleloquímicos, feromonas, alelopáticos— ejercen su influencia sobre otros sistemas biológicos mediante su estructura química original, o bien son precursores de diversos compuestos bioactivos, como los producidos durante la descomposición microbiana. La alelopatía puede ocasionar un efecto indirecto cuando una planta inhibe el crecimiento de microorganismos benéficos en el suelo —bacterias fijadoras de nitrógeno y micorrizas— y, por medio de ese efecto, perjudicar el desarrollo de otros organismos dentro de la comunidad. Los diversos tipos de aleloquímicos que se conocen pueden afectar distintos procesos metabólicos, de ahí la multiplicidad de sus mecanismos de acción fisiológica.

Así, en el camellón de Don Aristeo, el cultivo de varias plantas se traduce en un complejo manejo del ecosistema conformado por una gran diversidad de elementos bióticos y abióticos. La estructura y función de este sistema muestra una dinámica de energía y materia que gobierna su existencia, y cómo cada uno de los organismos establece una multiplicidad de interacciones con otros, al tiempo que se

relacionan con los factores físicos y químicos del ambiente. Allí, los metabolitos secundarios tienen un papel multifuncional.

Por todo lo anterior, es lógico pensar que diferentes tipos de productos naturales útiles para el ser humano pueden surgir de los estudios de ecología química —plaguicidas o fármacos— o mediante el uso de estrategias de bioprospección etnobotánicas o ecológicas. La destrucción de los recursos bióticos en el planeta, particularmente en los trópicos, además del empobrecimiento de las comunidades humanas locales, significa la pérdida de la biodiversidad, lo cual se traduce en la desaparición de productos naturales potencialmente útiles. Así, los estudios de ecología química pueden contribuir a la conservación de la biodiversidad, demostrando lo valiosa que ésta puede ser en muchos sentidos. 🌱



Ana Luisa Anaya Lang

Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México

Francisco Javier Espinosa García

Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México.

Instituto de Ecología, UNAM, Plaza y Valdés Editores, México.

Bergström, G. 1978. "Role of volatile chemicals in Ophrys-pollinator interactions", en *Biochemical aspects of plant and animal coevolution*. J. B. Harborne (ed.). Academic Press, Londres.

Borg Karlson, A. K. 1990. "Chemical and ethological studies of pollination in the genus *Ophrys* (Orchidaceae)", en *Phytochemistry*, núm. 29, pp. 1359-1387.

Espinosa García, F. J. y G. Delgado. 1998. "Relationship between ecology of plant defense and the prospect of secondary metabolites with potential medicinal or agricultural application", en *Revista Latinoamericana de Química*, núm. 26, pp. 13-29.

IMÁGENES

P. 5: Mariana Yampolsky, *Muro de espinas*. P. 6: Carlos Lamothe, *Díptico Laberinto y encrucijada*. P. 9: Héctor García, *Cargadores de la Merced/Aquelarre*, 1969. P. 10: Tuna Ciner, *Sin título*, 1980. P. 12: Manuel Álvarez Bravo, *Y por las noches gemía*, 1945. P. 13: Toni Kuhn, *El otro nido I, III, V*, 1988, 1989, 1992.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anaya, A. L., Espinosa García, F. J. y Cruz Ortega, R. (Coord.). 2001. *Relaciones químicas entre organismos: aspectos básicos y perspectivas de su aplicación*.

Palabras clave: ecología química; interacciones químicas entre organismos; metabolitos secundarios

Key words: chemical ecology, chemical interaction between organisms, secondary metabolites.

Resumen: Se expone la gran importancia de los metabolitos secundarios en las interacciones biológicas. Se mencionan algunas de las interacciones de las plantas y sus consumidores en la milpa para ilustrar el papel que juegan los metabolitos secundarios y entender mejor las múltiples funciones que desempeñan.

Abstract: We show the great importance of secondary metabolites within biological interactions. We mention some of the interactions between plants and their consumers in corn fields in order to illustrate the role of secondary metabolites and understand the multiple functions they have.

Ana Luisa Anaya Lang es Bióloga y Doctora en Ciencias (Biología) de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Actualmente es Investigadora Titular C en el Instituto de Ecología de la UNAM e Investigadora Nacional nivel III.

Francisco Javier Espinosa García es Biólogo y Maestro en Ciencias de la Facultad de Ciencias de la UNAM y Doctor en Biología de la Universidad de California, Santa Cruz. Actualmente es Investigador Titular "B" en el Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la UNAM.

Recepción: 19 de mayo de 2005, aceptado el 30 de mayo de 2005