

El impacto de la contaminación en los diálogos de la naturaleza

Mónica **González-Domínguez**
David **Alavez-Rosas**

Las plantas y los insectos juegan un papel importante en nuestro planeta, ya que ofrecen beneficios para los ecosistemas como la polinización, el reciclaje de nutrientes o el control de plagas. Adicionalmente, tienen una influencia enorme en la economía, la salud humana y los recursos naturales. Tanto los insectos como las plantas se comunican mediante un lenguaje invisible que utiliza sustancias químicas para transmitir información. A estas moléculas se les conoce como semioquímicos, entre las que se encuentran las feromonas y los aleloquímicos (Alavez-Rosas *et al.*, 2023). Las feromonas modifican el comportamiento en organismos de la misma especie, son intraespecíficas. Pueden clasificarse de acuerdo a la función que tienen; por ejemplo, feromonas sexuales, de agregación, de alarma, etcétera. Por otra parte, los aleloquímicos tienen efecto entre especies, son interespecíficos. Existen aquellos que benefician al emisor y al receptor (sinomonas), los que solo benefician al emisor (alomonas), y los que solo benefician al receptor (kairomonas).

Esta hermosa sinfonía química puede ser apreciada cuando vemos cómo las hormigas siguen el rastro de sus compañeras, ya que utilizan una feromona que les ayuda a no perder la pista de regreso al nido. Las plantas también se comunican, incluso con otras especies, utilizando aleloquímicos. Por ejemplo, cuando el gusano

cogollero del maíz ataca a una planta, esta libera ciertas moléculas que atraen a una avispa, la cual parasita al gusano, disminuyendo así el daño a la planta (Roque-Romero *et al.*, 2020). A esto se le conoce como una interacción tritrófica, ya que se refiere a la relación entre tres niveles tróficos que involucran a un productor (la planta de maíz), un herbívoro (el gusano) y un depredador (la avispa). Las interacciones tritróficas son esenciales para regular poblaciones, transferir energía, fomentar la biodiversidad, reciclar nutrientes y aumentar la resiliencia de los ecosistemas.

Muchos de los semioquímicos que permiten la comunicación química en la naturaleza son compuestos orgánicos volátiles (COVs) y se transmiten por el aire. Los COVs pueden recorrer cientos de metros desde su fuente y ser detectables en concentraciones de solo unas pocas partes por mil millones por las plantas e insectos. Estas señales desempeñan un papel crucial en las interacciones ecológicas, pero son susceptibles a las perturbaciones provocadas por la contaminación del aire. En masas de aire contaminadas, su capacidad de viaje se reduce, ya que las señales pueden descomponerse rápidamente debido a reacciones químicas con los contaminantes, lo que les hace perder su especificidad (McFrederick *et al.*, 2009). Las actividades humanas relacionadas con la producción de energía, transporte, agricultura e industria, han resultado en la emisión de numerosas sustancias químicas a la atmósfera, muchas de las cuales son tóxicas o producen compuestos nocivos al quedar expuestas a la radiación ultravioleta. Los contaminantes más comunes son ozono (O_3), dióxido de carbono (CO_2), radicales nitrato (NO_3) y otros aerosoles orgánicos. En el ambiente, estos compuestos reaccionan con los semioquímicos, formando nuevas sustancias que alteran la comunicación e interacción de insectos y plantas, lo cual representa un grave peligro ambiental debido a su impacto en los organismos y en el ecosistema. Los contaminantes del aire como el ozono (O_3) y los radicales nitrato (NO_3), son oxidantes que degradan

los dobles enlaces carbono-carbono presentes en los COVs responsables de los aromas florales, y en feromonas de muchas especies, haciendo que las moléculas se descompongan (Jiang *et al.*, 2023). Esto ocasiona que la señal química específica deje de funcionar, lo cual causa un impacto negativo en las redes tróficas y en la aptitud de la planta o insecto (Chan *et al.*, 2024).

EL OZONO DESTRUYE LOS MENSAJES QUÍMICOS

El ozono es un componente natural de la atmósfera, que forma una capa protectora que limita el ingreso de radiación ultravioleta proveniente del Sol. Sin embargo, a nivel de la superficie, el ozono se convierte en un contaminante del aire. Las actividades humanas, como el uso de combustibles fósiles en la industria y en el transporte, generan concentraciones elevadas de ozono. Esta molécula actúa como un oxidante para los compuestos volátiles. La adición de O_3 a los dobles enlaces carbono-carbono, presentes en muchos semioquímicos, resulta en la formación de moléculas inestables que se descomponen muy rápidamente (Madronich *et al.*, 2023). Esta reacción química se conoce como ozonólisis, y cuando ocurre, el O_3 ataca los dobles enlaces provocando una ruptura de la cadena de carbono que resulta en la formación de productos oxigenados, como aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos. En otras palabras, el ozono rompe los enlaces dobles y transforma la molécula en nuevos compuestos, cada uno con sus propias características químicas, diferentes a la molécula original.

Generalmente, las feromonas de insectos contienen dobles enlaces en su estructura química, lo cual las hace susceptibles al ozono. Si una feromona se descompone debido al ozono, genera cambios negativos en la comunicación y el éxito reproductivo de muchos insectos. Por ejemplo, las palomillas hembras que emiten una feromona sexual para atraer a los machos; o los machos de las mariposas monarca que emiten una feromona para atraer a las hembras (Figura 1). Además, se ha reportado que los terpenos y terpenoides (semioquímicos de las plantas) también sufren cambios



Figura 1. Representación ilustrativa de cómo afectan las moléculas contaminantes a la comunicación en insectos. La mariposa monarca (*Danaus plexippus*) macho emite su feromona sexual para atraer a la hembra, sin embargo, en el medio ambiente la feromona interactúa con O_3 y el radical NO_3 , por lo que ocurre la ruptura de la estructura química de la feromona y da como resultado otros compuestos químicos que alteran el lenguaje de los insectos. Ilustración de Carlos Dafunk.

en su estructura química al entrar en contacto con el O_3 , lo cual genera un impacto negativo en la comunicación de las plantas con otras plantas o con insectos. Adicionalmente, el O_3 tiene la capacidad de bloquear las neuronas receptoras olfativas que se encuentran en las antenas de los insectos (Mc-Frederick *et al.*, 2009), lo cual complica la detección de los semioquímicos por el propio insecto e interfiere en la localización de alimento, pareja, sitios de oviposición, refugio, etcétera. En resumen, el ozono, al destruir los semioquímicos, produce la alteración de las interacciones entre plantas y polinizadores, herbívoros y sus enemigos naturales (interrumpiendo las cadenas tróficas), causa perturbaciones en el sistema planta-insecto y amenaza funciones clave en los ecosistemas. Por ejemplo, la disminución en la polinización puede llevar a una menor producción de semillas y frutos, lo que afectaría la disponibilidad de alimento para otros organismos, como aves y mamíferos.

EL CO_2 AFECTA LA PRODUCCIÓN, EMISIÓN Y PERCEPCIÓN DE LOS SEMIOQUÍMICOS

De forma natural, el CO_2 es un gas presente en el ambiente, aunque también se libera por la quema de compuestos que contienen carbono (petróleo, carbón, gas natural, entre otros). Debido a diversas actividades humanas, la cantidad de

este compuesto en la atmósfera ha aumentado a niveles que la naturaleza no puede procesar, lo que ha llevado a su acumulación. Las concentraciones elevadas de CO_2 , afectan la producción, emisión y percepción de los semioquímicos y, como consecuencia, alteran las interacciones dinámicas entre plantas e insectos, perjudicando el desarrollo de las plantas y modificando la distribución espacial de los insectos.

El CO_2 tiene una estrecha relación con las plantas, ya que estas lo utilizan para llevar a cabo la fotosíntesis. Sin embargo, a altas concentraciones, este compuesto disminuye las defensas químicas de las plantas. Un aumento en los niveles de CO_2 estimula la síntesis de ciertos metabolitos secundarios en las plantas, incrementando su producción de compuestos defensivos como flavonoides y terpenos; también altera la composición y concentración de los aleloquímicos, lo que modifica su efectividad contra herbívoros (Zavala *et al.*, 2008).

Para los insectos, el CO_2 actúa como una señal sensorial que les ayuda a orientarse en muchos comportamientos biológicos. Se sabe que el CO_2 es percibido bioquímicamente en receptores especializados, llamados receptores olfativos, ubicados en las antenas de los insectos. Los receptores olfativos son proteínas cuya función es detectar moléculas

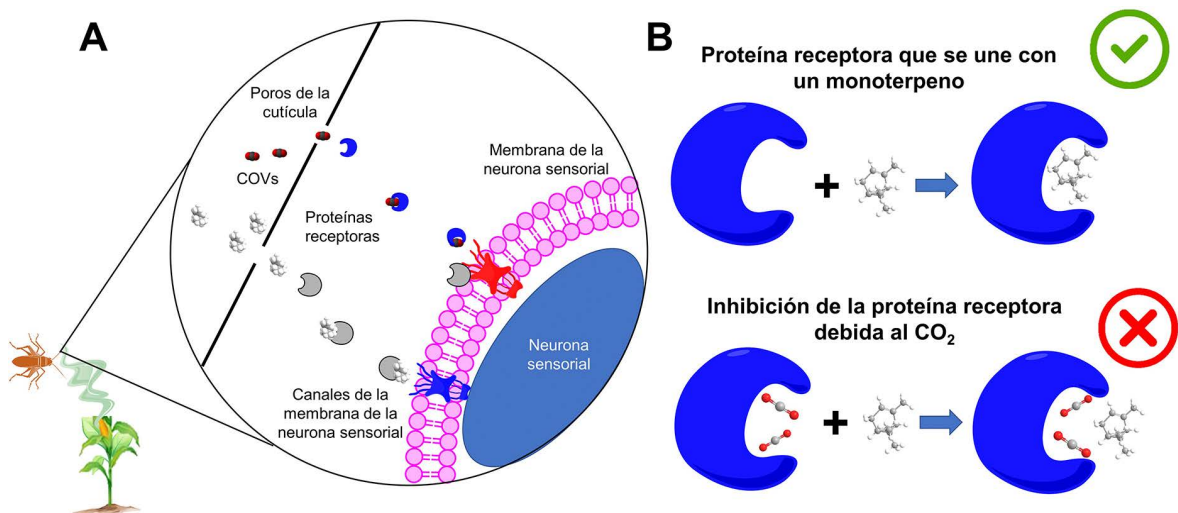


Figura 2. A) Representación esquemática de la percepción de los COVs en las antenas de los insectos; B) Una proteína receptora que se une al monoterpreno α -pineno, y cuando se encuentra bloqueada por moléculas de CO_2 , no se puede unir al compuesto. Imagen de creación propia.

presentes en el aire y llevarlas hacia las neuronas sensoriales dentro de las antenas; en el proceso se generan señales eléctricas que se envían al cerebro, donde se procesan para identificar el olor y desencadenar respuestas conductuales (Figura 2A). Los receptores olfativos tienen un sitio activo, que es la región donde se unen los semioquímicos (Schmidt y Benton, 2020). Ante concentraciones elevadas del CO_2 , estos sitios activos de las proteínas receptoras pueden bloquearse (Figura 2B), afectando así todas las interacciones de los insectos guiadas por semioquímicos, lo que puede provocar deficiencias en la búsqueda de alimento o en la oviposición, así como comportamientos erráticos en la búsqueda de pareja (Karthik *et al.*, 2021).

Se han realizado experimentos en los que se expuso a plantas y a insectos a cantidades elevadas de CO_2 , y se ha comprobado que los polinizadores o dispersores de semillas se confunden con las fragancias emitidas por las flores, lo cual reduce la reproducción y aptitud de las plantas. Por otro lado, los insectos plaga han desarrollado cierta adaptabilidad y han aumentado su tasa de supervivencia y potencial de daño, intensificando así el impacto en los cultivos de importancia económica (Johnson *et al.*, 2020).

LOS RADICALES NITRATO DEGRADAN LOS MENSAJES QUÍMICOS DE LAS PLANTAS

Estos contaminantes se forman debido a la oxidación del nitrógeno atmosférico (principal componente del aire) como resultado de procesos de combustión en el tráfico vehicular, la aplicación de fertilizantes y la quema de materia orgánica.

Los radicales nitrato son oxidantes muy fuertes que reaccionan rápidamente con los COVs emitidos por las flores, comúnmente con terpenos. Usualmente, los terpenos tienen en su estructura química enlaces dobles carbono-carbono, lo cual los hace susceptibles a ser oxidados por radicales NO_3 .

En este proceso, los radicales nitrato atacan a los enlaces dobles carbono-carbono de los terpenos, lo que da lugar a una serie de reacciones que conducen a la ruptura de enlaces y a la formación de nuevos compuestos. Este tipo de reacción es característica de los procesos de oxidación vía radicales libres, los cuales son altamente reactivos y generan una amplia variedad de productos químicos como aldehídos, cetonas o ácidos carboxílicos. Esto hace que los polinizadores pierdan el rastro de las plantas e interrumpa la polinización.

Asimismo, los radicales NO_3 destruyen los semioquímicos que muchas especies de plantas utilizan para comunicarse con otras plantas, lo que causa



Figura 3. Gusanos de las harinas (*Tenebrio molitor*) expuestos a diferentes concentraciones de CO_2 : A) estado de pupa del insecto; B) estado larval; C) estado adulto. Fotos de Dayana Galván (UATx).

un desequilibrio en las interacciones químicas entre plantas. Esto genera una pérdida de biodiversidad que modifica la dinámica de la comunidad y provoca la ruptura de los diferentes niveles tróficos presentes en los ecosistemas (Chan *et al.*, 2024).

En nuestro grupo de trabajo hemos comenzado a investigar cómo los niveles elevados de ozono y dióxido de carbono afectan la producción y la emisión de las feromonas sexuales del gusano de la harina (*Tenebrio molitor*). Este insecto, es considerado una plaga de los granos almacenados y de las harinas (Figura 3).

Es importante prever los escenarios en los que estos insectos podrían encontrarse en el futuro, para predecir el comportamiento de las plagas en un mundo con niveles elevados de O_3 , CO_2 y radicales NO_3 . Con estos datos podremos tomar medidas para el manejo de plagas y el aprovechamiento de especies benéficas, ya que se estima que, para el año 2050, la producción de contaminantes se duplicará.

CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

El planeta está experimentando cambios significativos en los niveles de contaminantes debido a la urbanización, la agricultura y la agroindustrialización. Como resultado de estas actividades humanas se han alterado aspectos fundamentales en insectos y plantas.

La contaminación del aire altera las funciones de los ecosistemas al interferir con los COVs que median las interacciones ecológicas y conductuales de los organismos.

En aire contaminado, estas señales recorren distancias más cortas ya que son destruidas por reacciones químicas con gases como O_3 y NO_3 . Estas reacciones afectan interacciones clave donde son cruciales las señales de larga distancia, como la polinización, la atracción de enemigos naturales de plagas, y feromonas que atraigan parejas.

Es necesario comprender los efectos que tienen los contaminantes sobre las interacciones entre los organismos para tomar medidas y evitar impactos ecológicos catastróficos.

Las condiciones climáticas futuras pueden fortalecer o debilitar el desempeño de ciertos insectos y las emisiones de compuestos por las plantas. Se espera un aumento en los niveles de O_3 , CO_2 y NO_3 y, por tanto, grandes impactos en las interacciones entre organismos.

Hacemos un llamado a hacer conciencia con respecto a esta situación, ya que las actividades humanas siempre tienen un efecto sobre los ecosistemas. Para intentar minimizar la huella humana en el lenguaje químico de los organismos, proponemos hacer estudios de impacto ambiental que

combinen herramientas de la ciencia atmosférica, la biología evolutiva y la ecología.

Con esto, podremos entender y minimizar las implicaciones del cambio que la contaminación provocada por los seres humanos genera en los ecosistemas modernos.

REFERENCIAS

Alavez-Rosas D, Córdoba-Aguilar A y Cruz-López L (2023). Semioquímicos, ¿compuestos clave para monitorear y controlar a las chinches chagásicas? *Elementos* 130:57-62. <https://elementos.buap.mx/post.php?id=787>.

Chan J, Parasumara S, Atlas R, Xu R, Jongleboed U, Alexander B, Langenhan J, Thorton J and Riffel A (2024). Olfaction in the Anthropocene: NO₃ negatively affects floral scent and nocturnal pollination. *Science* 383:607-611. <https://doi.org/10.1126/science.adi0858>.

Jiang N, Chang H, Weißflog J, Eberl F, Veit D, Weniger K, Hansson B and Knaden M (2023). Ozone exposure disrupts insect sexual communication. *Nat Commun* 14:1186. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36534-9>.

Johnson S, Waterman J and Hall C (2020). Increased insect herbivore performance under elevated CO₂ is associated with lower plant defence signalling and minimal declines in nutritional quality. *Sci Rep* 10:14553. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70823-3>.

Karthik S, Sai M and Yashaswini G (2022). Climate Change and Its Potential Impacts on Insect-Plant Interactions. *IntechOpen*. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.98203>.

Madronich S, Sulzberger B, Longstreth J, Schikowski T, Andersen M, Solomon K and Wilson S (2023). Changes in tropospheric air quality related to the protection of stratospheric ozone in a changing climate. *Photochem Photobiol Sci* 22:1129-1176. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00369-6>.

McFrederick Q, Fuentes J, Roulston T, Kathilankal J and Lerdau M (2009). Effects of air pollution on biogenic volatiles and ecological interactions. *Oecologia* 160:411-420. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1318-9>.

Roque-Romero L, Cisneros J, Rojas J, Ortiz-Carreón F and Malo E (2020). Attraction of *Chelonus insularis* to host and host habitat volatiles during the search of *Spodoptera frugiperda* eggs. *Biol Control* 140:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104100>.

Schmidt H and Benton R (2020). Molecular mechanisms of olfactory detection in insects: beyond receptors. *Open Biol*. 10:200252. <http://doi.org/10.1098/rsob.200252>.

Zavala J, Casteel C, DeLucia E and Berenbaum M (2008). Anthropogenic increase in carbon dioxide compromises plant defense against invasive insects. *PNAS* 105(13):5129-5133. <https://doi.org/10.1073/pnas.0800568105>.



© Honorio Cruz. *El guardián del Cosmo 1*. Cerámica de alta temperatura, 201 × 82 × 31 cm, base: 15 × 70 × 40 cm.

Mónica González-Domínguez
Departamento de Ecología de Artrópodos
y Manejo de Plagas
El Colegio de la Frontera Sur unidad Tapachula
David Alavez-Rosas
Instituto de Ecología
Universidad Nacional Autónoma de México
alavezd@yahoo.com