

Del ataque a la defensa: el potencial oculto de los patógenos en la agricultura

María del Sol Cuéllar-Espejel¹ y Gabriel Rincón-Enríquez^{1*}

¹ Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco

* Dirección para correspondencia: grincon@ciatej.mx

En el mundo vegetal, la defensa contra patógenos y condiciones adversas no depende únicamente de la suerte o del uso de agroquímicos. En la actualidad, la agricultura enfrenta desafíos significativos debido a la sequía, las plagas y las enfermedades que afectan la producción y calidad de los alimentos. En particular, las enfermedades causadas por gérmenes de plantas representan una grave amenaza por su impacto económico y ambiental. Si bien, ante la controversia, el uso de pesticidas sigue siendo el método predominante para su control (Bonaterra *et al.*, 2022). En respuesta, la ciencia ha centrado sus esfuerzos en el desarrollo de alternativas sostenibles que reduzcan la dependencia de estos pesticidas, promoviendo así una producción agrícola más segura y respetuosa con los agroecosistemas.

Una de las aplicaciones más prometedoras del control biológico es el uso de biopesticidas, productos formulados a partir de microorganismos, sus derivados o componentes naturales de las plantas, que combaten plagas y enfermedades (Kumar *et al.*, 2024). Además de disminuir el impacto ambiental, estos productos también reducen la dependencia de los pesticidas químicos, lo cual los convierte en una opción eficaz y sostenible para la agricultura moderna (Ayilara *et al.*, 2023). Los

biopesticidas basados en microorganismos comprenden virus, bacterias, protozoos, algas y hongos. Se utilizan los microorganismos completos o alguno de sus componentes, como por ejemplo las proteínas; estas pueden contribuir a robustecer la defensa de las plantas o a detener directamente el desarrollo del germen. Dentro de estos biopesticidas, se puede hacer uso tanto de bacterias benéficas (*Bacillus*, *Streptomyces*, *Rhizobium*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Stenotrophomonas* y *Serratia*) así como bacterias que enferman a las plantas (bacterias patógenas: *Agrobacterium*, *Erwinia* y *Xanthomonas*). Las primeras pueden limitar el desarrollo de enfermedades al competir por espacio y nutrientes, producir compuestos antimicrobianos y secretar compuestos que atacan la pared celular de los gérmenes (Bonaterra *et al.*, 2022). Sin embargo, las bacterias patógenas curiosamente también poseen mecanismos similares, lo que puede engañar a la planta y permitir que estas causen la invasión e infección y produzcan una enfermedad.

A partir de este conocimiento surge una estrategia innovadora en la cual se aprovecha las herramientas que poseen las bacterias, en especial de las bacterias patógenas de plantas, en las cuales se detectan los arsenales de ataque que tienen estas bacterias y que podrían utilizarse para defensa de la planta. De este modo, los científicos han identificado proteínas y compuestos derivados de bacterias patógenas que, aplicados de forma controlada, pueden actuar como bioinductores o elicitores de las defensas naturales de la planta; y a pesar de su procedencia, no constituyen una amenaza para la salud humana, el medio ambiente o la planta. Estos derivados ayudan a fortalecer la resistencia de las plantas y a disminuir el

crecimiento de los patógenos, funcionando como una especie de “escudo” basado en las mismas armas que usan los microorganismos para atacar a la planta. Este fenómeno, resultado de la interacción entre microorganismos y plantas, ha despertado un gran interés en la investigación agrícola por su potencial para fortalecer la resistencia vegetal a los gérmenes que causan enfermedades.

Elicitores: defensas invisibles

Los elicitores constituyen una táctica prometedora para salvaguardar el cultivo de plantas. Estas sustancias, que pueden ser de origen químico o biológico, tienen la habilidad de activar los mecanismos naturales de defensa de las plantas y así aumentar su resistencia frente a los patógenos. Esto significa que, en lugar de depender exclusivamente de pesticidas químicos, es posible estimular a las propias plantas para que se defiendan de plagas, enfermedades o condiciones ambientales adversas. Cuando una planta entra en contacto con un elicitor, se pone en marcha una serie de respuestas internas: produce compuestos defensivos, refuerza su pared celular y activa genes relacionados con la inmunidad natural de la planta. Esta reacción no ocurre al azar, sino de forma muy específica, como si la planta tuviera un sistema de alarma y, cuando percibe que ha entrado un intruso, identificara la señal y se preparara para resistir el ataque y protegerse mejor frente a posibles amenazas.

Según estudios recientes (Gowtham *et al.*, 2024), incluso ciertos estímulos físicos bien controlados (como sequía, salinidad, radiación UV, estrés osmótico y térmico) pueden desencadenar esta activación. Los elicitores son muy diversos; algunos de ellos son fragmentos minúsculos de ARN, una molécula similar al ADN que actúa como un tipo de instrucción rápida dentro de las células. Algunos son compuestos químicos generados por los microorganismos, mientras que muchos otros son proteínas específicas que interaccionan con las plantas actuando como mensajeros especializados.

La mancha bacteriana: el enemigo del chile y el tomate

En el mundo agrícola, una de las amenazas más persistentes para la producción de chile y tomate es una enfermedad conocida como mancha bacteriana. Este mal, que afecta tanto el rendimiento como la calidad de los cultivos, es causado por bacterias del género *Xanthomonas*, expertas en invadir tejidos vegetales y debilitar sus defensas naturales.

¿Cómo atacan las bacterias? Imaginemos que las hojas son como una fortaleza con pequeñas puertas que tienden a estar abiertas (son los estomas, hidatodos o, en otros casos, diminutas heridas casi invisibles). Para la bacteria esta es la oportunidad perfecta para colarse. Una vez en contacto con la superficie, liberan herramientas químicas muy potentes (enzimas como pectinasas y celulasas) capaces de debilitar y romper poco a poco la pared celular de la planta. De esta

manera consiguen abrirse camino hacia el espacio entre las células, un lugar donde circulan agua, nutrientes y otras moléculas fundamentales para la planta. Una vez dentro, las bacterias no permanecen desprotegidas, y producen una especie de capa viscosa que funciona como escudo que bloquea pequeños canales por donde normalmente circulan los nutrientes, lo que genera un desequilibrio en la planta. Al mismo tiempo, liberan un arsenal de proteínas diseñadas para apagar las alarmas internas de defensa e incluso provocar la muerte de algunas células, lo cual facilita su proliferación.

Conforme la infección progresa, las acciones descritas arriba debilitan los tejidos, principalmente las hojas, en las cuales aparecen zonas amarillentas alrededor de las lesiones (clorosis) y, con el tiempo, manchas oscuras y secas que marcan un daño irreversible (necrosis). Cuando las hojas alcanzan este grado de lesión, su capacidad fotosintética se ve severamente comprometida, por lo que la planta comienza a apagarse desde adentro. A ello se suma la acumulación interna de la capa viscosa que la bacteria continúa produciendo; es como si sus venas se obstruyeran lentamente hasta dejarla sin oxígeno ni alimento. Al final, el resultado es inevitable: en la mayoría de los casos, provoca la muerte de la planta por un colapso total de su sistema. Cada paso está finamente calculado; las bacterias deben usar la estrategia adecuada en el momento justo para lograr invadir con éxito y debilitar a toda la planta. Lo curioso es que este modo de entrada es compartido por distintos “familiares” de la bacteria del género *Xanthomonas*.

Según investigaciones recientes (Osdaghi, 2021), existen al menos cuatro linajes distintos de *Xanthomonas* responsables de esta enfermedad: *X. euvesicatoria* pv. *euvesicatoria*, *X. euvesicatoria* pv. *perforans*, *X. hortorum* pv. *gardneri* y *X. vesicatoria*. Estos patógenos no solo afectan al chile (*Capsicum* spp.) y al tomate (*Solanum lycopersicum*), sino que también pueden infectar a otras plantas silvestres y cultivadas, lo que complica aún más su control. A pesar de que todas ingresan de manera parecida, no todas poseen la misma potencia de ataque; algunas son más agresivas que otras. En otras palabras, la planta tiene que lidiar con un grupo de intrusas, cada una con su propio modo de provocar problemas, lo cual dificulta aún más la defensa y el control de la enfermedad.

Durante años, el método más común para enfrentar a la mancha bacteriana ha sido el uso intensivo de pesticidas químicos. No obstante, esta estrategia tiene importantes desventajas, ya que representa un alto costo económico; además, su uso prolongado puede tener consecuencias negativas tanto para la salud humana como para el medio ambiente.

Actualmente, la mancha bacteriana sigue siendo un reto, pero también una oportunidad para transformar la forma en que protegemos nuestros cultivos de interés económico usando estrategias basadas en el fortalecimiento de las defensas naturales de las plantas, que podrían cambiar el rumbo de esta batalla.

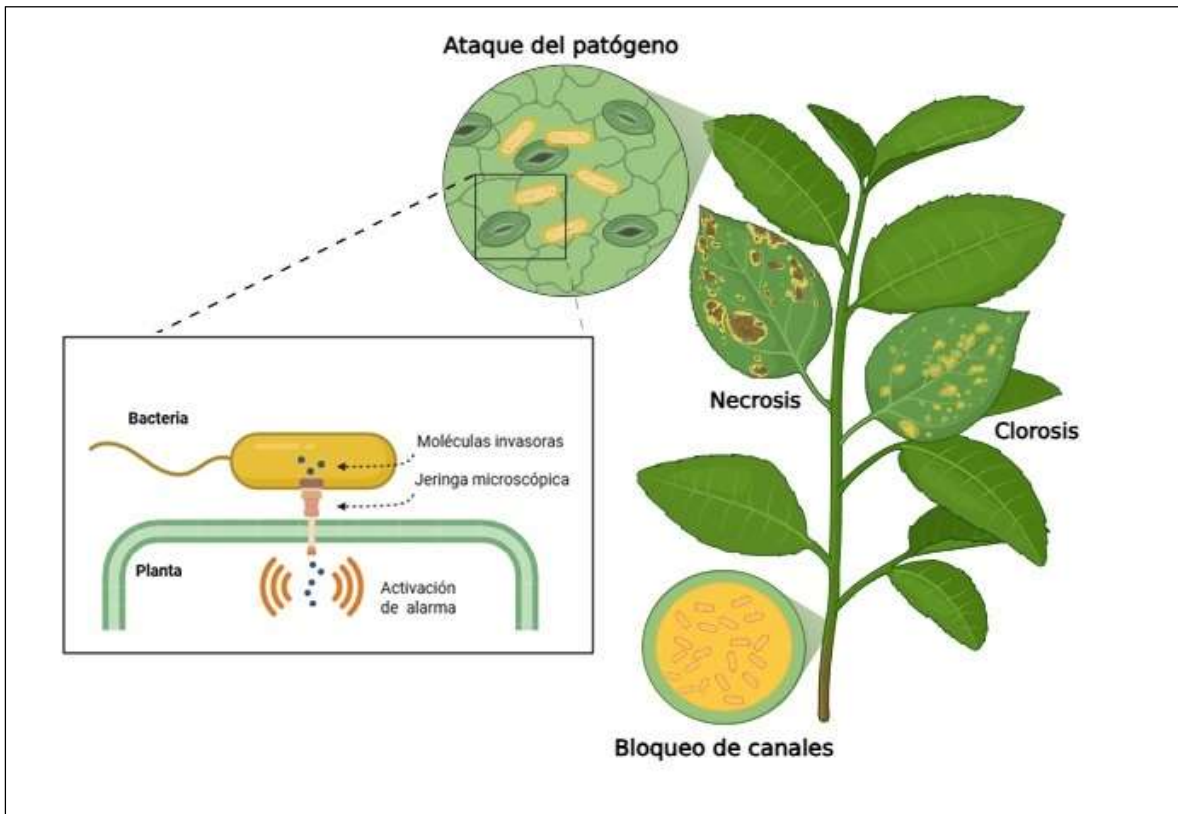


Figura 1. Esquema del proceso de infección por *Xanthomonas* spp. Las bacterias aprovechan pequeñas aberturas naturales o heridas para entrar en la planta, donde se establecen y comienzan a bloquear los mecanismos de defensa. Con el tiempo, esta invasión se manifiesta en las hojas como manchas amarillas y oscuras, típicas de la enfermedad.

De enemigo a aliado

Actualmente, los avances en biotecnología han abierto la posibilidad de transformar a uno de los patógenos más temidos de los cultivos en una herramienta para fortalecer la inmunidad de las plantas. Las bacterias como *Xanthomonas* secretan una variedad de proteínas que les permiten infectar a sus hospederos. Entre ellas se encuentran las harpinas (Hrp), que en condiciones naturales cumplen un papel

negativo, debido a que las bacterias las liberan mediante un mecanismo especializado que opera como una especie de jeringa microscópica para introducir moléculas invasoras y dar inicio al ataque contra la planta.

Sin embargo, lo que resulta dañino bajo el control del patógeno, en pequeñas dosis puede convertirse en un aliado.

Cuando las harpinas se aplican de manera controlada actúan como elicitores. Al ser detectadas, la planta responde reforzando sus tejidos, activando genes defensivos y, en muchos casos, logra resistir la infección sin necesidad de aplicación de pesticidas químicos. En otras palabras, las harpinas funcionan como una especie de “vacuna para plantas”, es decir una señal que, sin causar enfermedad, prepara a la planta para defenderse con mayor eficacia frente a futuros ataques. Esta dualidad hace de las harpinas un ejemplo fascinante de cómo algo perjudicial puede volverse benéfico. Cuando son usadas por el patógeno, son una herramienta de ataque; aplicadas por el ser humano en forma controlada, se transforman en una estrategia natural, segura y efectiva para proteger los cultivos contra gérmenes.

Lo más interesante es que esta protección puede lograrse de manera sencilla mediante aspersión de las harpinas sobre las plantas, o de forma más especializada, expresándolas directamente en las células vegetales mediante ingeniería genética. A diferencia de otros métodos más agresivos, las harpinas activan la respuesta inmune sin matar las células.

Casos de éxito en el uso de harpinas

Diversos estudios, tanto en México como en el extranjero, han demostrado la eficacia las harpinas bajo condiciones reales de cultivo, posicionándolas como aliadas clave en el manejo de enfermedades vegetales.

Dentro del campo mexicano, en el municipio de Tlapa de Comonfort, Guerrero, investigadores del Departamento de Parasitología Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo evaluaron distintos elicitores bacterianos para combatir el virus del mosaico del tabaco (TMV) en cultivos de tomate. Uno de los tratamientos más efectivos fue el uso del inductor Messenger Gold®, basado en proteínas harpinas, el cual logró reducir significativamente la concentración del virus y mejorar la calidad de los frutos (Hernández *et al.*, 2020).

En otro esfuerzo destacado, el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), con sede en Guadalajara, desarrolló un bioinsumo llamado BioFensa, formulado a partir de proteínas harpinas. En ensayos realizados en invernadero, este producto consiguió disminuir aproximadamente el 53 % de las manchas bacterianas en tomate causadas por *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* y resguardar alrededor del 60 % de los cultivos de chile contra *Xanthomonas euvesicatoria*. Además de BioFensa, lograron reducir el impacto de la enfermedad con otros productos como Actigard®, que activa las defensas naturales de la planta a través de un proceso sistémico, y Messenger Gold®, que también provoca reacciones protectoras. Estos hallazgos indican que

distintas estrategias basadas en activadores y elicitores de defensa tienen el potencial de robustecer la protección natural de las plantas de forma eficaz y segura (Cuellar *et al.*, 2025), pero los resultados son propios de situaciones controladas y pueden fluctuar dependiendo del manejo del cultivo y de factores ambientales.

Más allá de México, el potencial de las proteínas harpinas también ha sido validado en otros países. En China, investigadores demostraron que la proteína PopW, producida por *Ralstonia solanacearum*, puede activar defensas en plantas de tabaco sin dañar el tejido vegetal, un hallazgo clave para su uso como bioestimulante (Li *et al.*, 2010).

En Finlandia, la proteína harpina de *Pseudomonas syringae* mostró su capacidad para inducir respuestas inmunitarias en varias especies vegetales como frijol, tomate, perejil y *Arabidopsis thaliana*, aunque no en tabaco, lo que sugiere una especificidad según la especie (Li *et al.*, 2005). Se ha observado que esta harpinas se une a proteínas específicas en la célula vegetal, lo que probablemente explica su efecto protector.

En Estados Unidos, se descubrió que la bacteria que causa el tizón de fuego en manzanos y perales tiene una proteína harpina llamada HrpN, que interactúa con un receptor de la planta. Al bloquear este receptor, las plantas se volvieron mucho más resistentes a la enfermedad, una muestra más de cómo los estudios sobre estas proteínas pueden ayudar a proteger los cultivos (Yuan *et al.*, 2021).

Las proteínas harpinas y otros elicitores, según los casos de estudio mencionados previamente, muestran que incluso aquellos agentes que antes

veíamos como amenazas pueden transformarse en aliados fuertes para la agricultura. Su habilidad para activar defensas naturales en las plantas sin provocar enfermedad permite que se implementen prácticas más sostenibles, que dependen menos de pesticidas químicos convencionales. Sin embargo, su empleo tiene limitaciones y precauciones. Dado que la dosis, el momento de aplicación, las condiciones climáticas y el tipo de cultivo determinan su eficacia, su uso debe hacerse con responsabilidad. A eso se le añade un reto social: el temor y la desconfianza que sienten algunos agricultores al saber que provienen de bacterias patógenas. Superar esta barrera requiere educación, apoyo técnico y una comunicación clara que contribuya a convertir la percepción negativa en confianza hacia estas herramientas.

Si se aplican bajo protocolos científicos rigurosos, los elicitores no solo ofrecen protección frente a patógenos, sino que también contribuyen a la construcción de una agricultura más resiliente, con menor impacto ambiental y mayor capacidad de adaptación frente al cambio climático. Así, lo que alguna vez fue un enemigo se transforma en una herramienta de control, marcando un cambio de paradigma en la forma en que entendemos y manejamos la salud de los cultivos.

Referencias

Ayilara MS, Adeleke BS, Akinola SA *et al.* (2023). Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides. *Frontiers in Microbiology* 14:1040901. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1040901>.

Bonaterre A, Badosa E, Daranas N *et al.* (2022). Bacteria as biological control agents of plant diseases. *Microorganisms* 10(9):1759. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091759>.

Cuellar-Espejel MDS, Quiñones-Aguilar EE, Rincón-Enríquez G *et al.* (2025). Proteínas Hrp como bioinductores para el control biológico de enfermedades bacterianas en plantas de jitomate y chile bajo invernadero. *Revista Mexicana de Fitopatología* 43(4):54. DOI: <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2024-25>.

Gowtham HG, Murali M, Shilpa N *et al.* (2024). Harnessing abiotic elicitors to bolster plant's resistance against bacterial pathogens. *Plant Stress*, 11:100371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100371>.

Hernández-Santiago R, Vargas-Hernández M y Zamora-Macorra EJ (2020). Evaluación de inductores de resistencia al TMV en tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11(2). <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i2.2072>.

Kumar A, Bilal M, Santoyo G and Panwar JS (Eds.) (2024). *Biocontrol agents for improved agriculture*. Academic Press.

Li CM, Haapalainen M, Lee J *et al.* (2005) Harpin of *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola* harbors a protein binding site. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 18(1):60-6. DOI: <https://doi.org/10.1094/mpmi-18-0060>.

Li JG, Liu HX, Cao J *et al.* (2010) PopW of *Ralstonia solanacearum*, a new two-domain harpin targeting the plant cell wall. *Molecular Plant Pathology* 11(3):371-81. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2010.00610.x>.

Osdaghi E, Jones JB, Sharma A *et al.* (2021). A centenary for bacterial spot of tomato and pepper. *Molecular Plant Pathology* 22(12):1500. DOI: <https://doi.org/10.1111/mpp.13125>.

Yuan X, Hulin MT and Sundin GW (2021) Effectors, chaperones, and harpins of the Type III secretion system in the fire blight pathogen *Erwinia amylovora*: a review. *Journal of Plant Pathology* 103(Suppl. 1):25–39. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42161-020-00623-1>.