

Elicitores para mejorar la producción vegetal: vacunas vegetales

María del Sol Cuellar-Espejel¹, Evangelina Esmeralda Quiñones-Aguilar¹, Rodolfo Hernández-Gutiérrez², Juan Carlos Mateos-Díaz³, Sergio David Valerio-Landa⁴, Gabriel Rincón-Enríquez^{1*}

¹Laboratorio de Fitopatología de Biotecnología Vegetal. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Zapopan Jalisco México.

²Biotecnología Médica y Farmacéutica. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Zapopan Jalisco México.

³Biotecnología Industrial. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Zapopan Jalisco México.

⁴COSMOCEL, Monterrey, Nuevo León, México.

*Autor de correspondencia: grincon@ciatej.mx

Resumen

Palabras clave:

biocontrol, elicitores, fitopatógenos, inductores, seguridad alimentaria

Los elicitores o inductores son moléculas clave en la respuesta de las plantas a su entorno y tienen un potencial significativo en la agricultura. Estas moléculas pueden ser de origen biótico o abiótico, capaces de desencadenar respuestas defensivas en las plantas, fortaleciendo su resistencia a patógenos y estimulando su crecimiento. Su uso puede reducir la dependencia de agroquímicos y fomentar prácticas agrícolas sostenibles. Identificar elicitores efectivos y comprender su formulación es fundamental para maximizar su eficacia en la agricultura. La aplicación de elicitores en la agricultura tiene el potencial de mejorar la producción vegetal y garantizar la seguridad alimentaria, por lo que los avances tecnológicos y de investigación en este campo pueden impulsar aún más su uso y contribuir a abordar los desafíos actuales en la agricultura como la crisis climática y la falta de legislación, además de la presión de los patógenos y los efectos del cambio climático.

Introducción

El calentamiento global y el cambio climático ocasionan que la frecuencia de condiciones de estrés abiótico y biótico en las plantas aumente día con día. El estrés biótico, causado por patógenos y plagas, genera pérdidas sustanciales en los cultivos del 20 al 30% (Ceulemans *et al.*, 2021). Esto amenaza la seguridad

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 2(2),
163-171. ISSN: 3061-709X.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.12773668>

Recibido: 23 abril 2024
Revisado: 28 de mayo 2024
Aceptado: 03 de julio 2024
Publicado: 18 de julio 2024



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



alimentaria mundial debido a que las condiciones del medio ambiente alteraran plagas y patógenos, lo que provoca la evolución de los mismos e impacta negativamente en las interacciones huésped-patógeno. Esta actividad provoca la aparición de nuevas cepas de patógenos más resistentes y, por ende, provoca mayor severidad en las enfermedades de las plantas (Singh *et al.*, 2023).

Estas nuevas interacciones entre patógenos y medio ambiente repercutirán en el manejo de enfermedades, ya que se requerirán de diferentes controles químicos, biológicos y culturales que tomen en cuenta las normativas para agroquímicos que se han vuelto más estrictas ante la afectación medioambiental necesitando de nuevos compuestos menos dañinos (Singh *et al.*, 2023).

Es conocido que los agroquímicos, como los pesticidas, herbicidas y fertilizantes, se utilizan comúnmente en la agricultura para proteger los cultivos de plagas, malezas y enfermedades. Sin embargo, el uso excesivo o incorrecto de estos productos pueden tener efectos negativos como la toxicidad directa en plantas y resistencia a los agroquímicos, lo cual puede llevar a la clorosis, necrosis y, en casos extremos, a la muerte de la planta. Además de que pueden interferir con los procesos metabólicos y fisiológicos, alterando su crecimiento y desarrollo. Por otro lado, las consecuencias en el medio ambiente por el uso de estos productos, como lo es la contaminación del suelo y el agua, impactan negativamente en la biodiversidad al reducir la diversificación de especies en los campos agrícolas. Por lo que todos estos efectos pueden reducir el rendimiento y la calidad de los cultivos, lo que a su vez puede afectar negativamente la economía de los agricultores y la seguridad alimentaria a nivel global.

En este contexto y frente a la creciente demanda de prácticas agrícolas eficientes y sostenibles para combatir las enfermedades patógenas, existen moléculas que actúan como mensajeros, desencadenando respuestas específicas en las plantas. Estos mensajeros, conocidos como inductores o elicitores (proveniente del inglés, traducido como "elicitador" o como "inductor" o "elicitador de respuesta"), representan una alternativa prometedora ya que pueden activar las defensas de las plantas, además de mejorar el rendimiento de los cultivos, tanto en cantidad como en calidad de los alimentos y a su vez reducir su susceptibilidad a las plagas y enfermedades. Al utilizar inductores de resistencia vegetal, los agricultores pueden reducir su dependencia a los agroquímicos y promover prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente (Todd *et al.*, 2023). Por lo que la aplicación de elicitores en la agricultura ofrece importantes ventajas (Figura 1), tales como:

- Fortificación de cultivos durante su temporada de crecimiento, además de mejorar el desarrollo de las raíces aumentando la microflora del suelo, por lo que no tienen efectos tóxicos siendo así seguros para el medio ambiente.



- La producción de agentes de biocontrol, como los elicitores, suelen ser fáciles de elaborar y se puede lograr producir a gran escala para una mejora agrícola generalizada. Además de tener buena rentabilidad, ya que son relativamente económicos comparados con otros métodos.
- La especificidad que tienen con determinadas plantas provee la precisión con la que una planta puede reconocer y responder a un estímulo particular, brindando así eficacia en la defensa y adaptación al entorno, lo que reduce la probabilidad de desencadenar respuestas inapropiadas o dañinas en la planta y evita efectos secundarios como la inhibición del crecimiento o inducir un estrés extra a la planta.

Por lo anterior, la importancia de la aplicación de elicitores en la agricultura para abordar la resistencia ante patógenos, así como la reducción de los efectos del cambio climático en la seguridad alimentaria, es fundamental para prosperar en diversos entornos y garantizar que las plantas puedan defenderse de manera efectiva contra amenazas específicas (Kumar *et al.*, 2024).

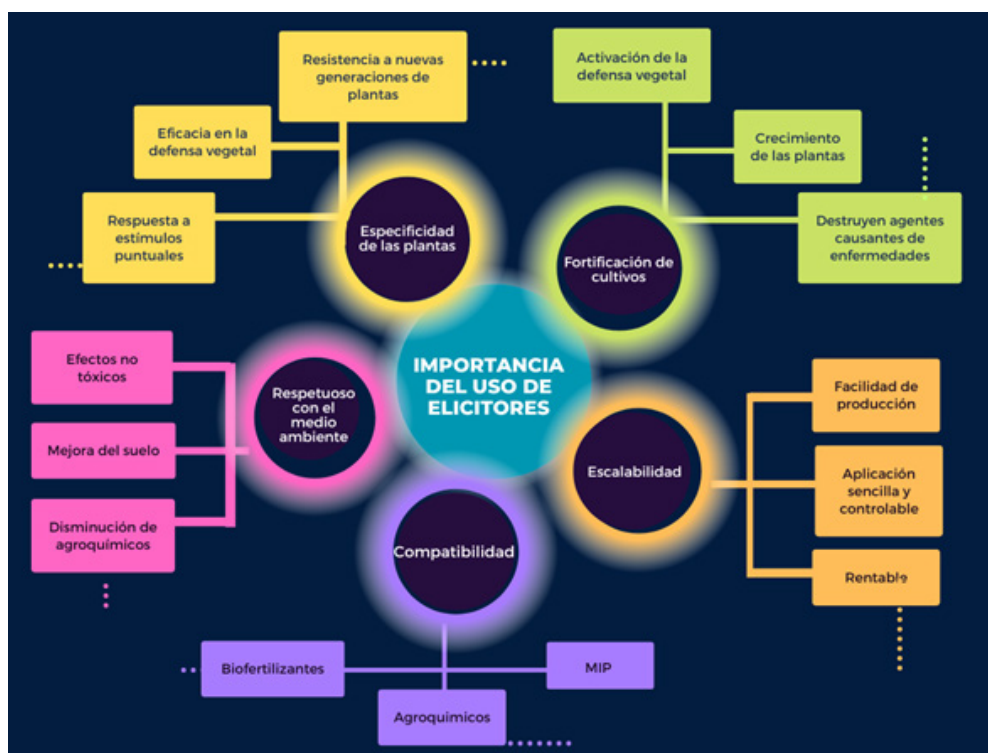


Figura 1. Importancia del uso de elicitores en la agricultura

¿Qué son los elicitores?

Los elicitores son moléculas, generalmente de origen microbiano o vegetal, que activan cualquier tipo de defensa en las plantas. Estos compuestos pueden ser reconocidos por los receptores de la superficie celular de las plantas, desencadenando



una cascada de señales que culmina en la activación de genes relacionados con la defensa y con una actividad inhibidora de fitopatógenos (Zehra *et al.*, 2021).

Los elicitores son estímulos que provocan estrés y pueden activar respuestas defensivas y adaptativas en las plantas cuando se administran en cantidades reducidas, estimulando la producción de metabolitos secundarios. Las plantas, al estar en constante exposición a situaciones estresantes, han desarrollado mecanismos de tolerancia para enfrentar entornos adversos y experimentar cambios mínimos en su estructura física (Caicedo *et al.*, 2021). Los elementos estresantes para las plantas se dividen en dos categorías, dependiendo de su origen y su efecto en las plantas, siendo estos bióticos o abióticos (Figura 2).



Figura 2. Factores de estrés en las plantas

Origen y naturaleza de los elicitores

Los elicitores son diferentes entre sí, en función de su origen, características y composición molecular, los cuales ofrecen una variedad de estímulos que pueden desencadenar respuestas específicas (Zehra *et al.*, 2021). Por lo que pueden ser de origen biótico (provenientes de organismos vivos) o abiótico (no biológico). Los elicitores pueden ser formulados de compuestos externos a la planta (apoplásticos) como células completas y extractos de microorganismos, como lo son los patrones moleculares asociados a patógenos (PAMP), patrones moleculares asociados a microorganismos (MAMP) y patrones moleculares asociados a nematodos (NAMP), los cuales generan una variedad de respuesta de defensa. En algunos casos los patrones



moleculares asociados a herbívoros (HAMP) también provocan bioestimulación al crecimiento, a la resistencia, al estrés y a la calidad de los cultivos. Además, los compuestos internos de la planta, como son los patrones moleculares asociados a daños (DAMP), pudiendo ser extractos de plantas o algún grupo de compuestos específicos, también son considerados como elicitores (González *et al.*, 2020). Los efectores identificados actualmente pueden incluir metabolitos secundarios, ARN pequeños, pero la mayoría son de naturaleza proteica, con una extensión máxima de 400 aminoácidos. Estos elicitores pueden desempeñar varias funciones, expresarse en diferentes momentos y, en su mayoría, interfieren con las señales de la planta, la síntesis de fitohormonas o los mecanismos de defensa (Todd *et al.*, 2023).

Por otro lado, los elicitores abióticos como lo es la luz, además de ser esencial para la fotosíntesis, influyen en el crecimiento, desarrollo y morfogénesis de las plantas además de regular la producción de metabolitos secundarios (SM). El desarrollo y los procesos fisiológicos de las plantas están condicionados por un intervalo específico de temperatura, y su respuesta al estrés térmico varía según la especie, la intensidad y duración del estrés, así como la etapa de desarrollo, por lo que la temperatura y la luz son poderosos elicitores en las plantas. Estudios han demostrado que el estrés térmico puede inducir la biosíntesis de SM, como compuestos fenólicos, flavonoides, alcaloides y terpenoides los cuales pueden inducir respuestas de defensa en las plantas que actúan como señales de alerta (Humbal y Pathak, 2023).

Sistema inmune de las plantas y la detección de elicitores

Las plantas son susceptibles al ataque o infección por bacterias, hongos, insectos y herbívoros, por lo que el sistema inmunológico de estas es una red compleja de respuestas de defensa que les permiten resistir y adaptarse a los desafíos ambientales. A pesar de que su sistema inmunológico no es tan sofisticado como el de los animales, las plantas pueden resistir a las enfermedades y los daños causados por estos organismos a través de la inmunidad celular innata y la señalización sistémica en el lugar de la infección (Abdul *et al.*, 2020). Este sistema de defensa vegetal tiene dos componentes principales: la inmunidad innata y la inmunidad adquirida. La inmunidad innata es la primera línea de defensa y es activada por receptores de reconocimiento de patrones (RRP), los cuales detectan PAMP o daño celular (Zehra *et al.*, 2021). La inmunidad innata de las plantas consta de dos partes, la inmunidad activada por PAMP, llamada inmunidad desencadenada por patógenos (PTI) y la inmunidad activada por efectores (ETI), donde producen proteínas de resistencia (R) que reconocen y obstaculizan la actividad de los efectores (Ceulemans *et al.*, 2021).

Cuando las plantas activan su inmunidad innata, lo hacen utilizando receptores de reconocimiento de patrones (PRR) que son capaces de detectar y percibir específicamente MAMP o PAMP. Este proceso crucial se logra mediante la resistencia



no huésped, que se refiere a la capacidad de la planta para defenderse contra una amplia gama de patógenos o mediante el reconocimiento de las proteínas R que contrarresta eficazmente las moléculas efectoras de patógenos específicas de la raza u especie (Abdul *et al.*, 2020). Esto da como resultado una serie de respuestas que incluyen el cierre de estomas, la producción de fitoalexinas y la liberación de especies reactivas de oxígeno extracelulares (ROS) para así prevenir la propagación y crecimiento del patógeno (Ceulemans *et al.*, 2021).

Por otro lado, la inmunidad adquirida es activada por el reconocimiento específico de patógenos y está mediada por las proteínas R, siendo una respuesta más lenta que la inmunidad innata, pero que proporciona una defensa más específica y duradera contra los patógenos (Zehra *et al.*, 2021) (Fig. 3). Los compuestos de origen biológico que secretan las plantas en beneficio del fitopatógeno y a menudo inducen susceptibilidad a la enfermedad.



Figura 3. Interacción patógeno-huésped. Los patógenos son capaces de secretar efectores hacia el hospedero para impedir su reconocimiento por la planta y favorecer su propio desarrollo. Mientras que la planta activa sus línea de defensa, lo que induce la respuesta del sistema inmune

En general, cuando un elicitador activa el sistema inmune de una planta, desencadena una cascada de eventos que culminan en la expresión de genes relacionados con la defensa, como la producción de fitoalexinas, péptidos antimicrobianos y enzimas que degradan la pared celular de los patógenos, lo que significa que las plantas pueden activar defensas en partes distantes del organismo después de la exposición a un elicitador. Además de la activación de respuestas defensivas, los elicitadores también pueden inducir respuestas de bioestimulación en las plantas, lo que significa que pueden estimular el crecimiento y el desarrollo de las plantas. Estas respuestas incluyen la promoción del crecimiento de las raíces, la mejora de la absorción de



nutrientes y la estimulación de la producción de metabolitos secundarios benéficos. Por lo tanto, los elicitores pueden tener un doble efecto positivo en las plantas, ya que no sólo las protegen de los patógenos, sino que también pueden mejorar su salud y rendimiento. Es por ello que para el uso de elicitores es crucial identificar aquellos que son capaces de activar respuestas de defensa y bioestimulación en las plantas, así como tomar en consideración la formulación adecuada de estos para su aplicación y maximizar su eficacia según sea su origen y naturaleza.

Además, para garantizar una detección rápida del estrés y el desencadenamiento de respuestas defensivas en la planta es necesario comprender qué tipos y cantidades de factores estresantes o bioestimulantes pueden provocar cambios epigenéticos en la planta. Estas consideraciones son fundamentales para activar adecuadamente el sistema de defensa y, por ende, para la adaptación fisiológica frente al estrés (Caicedo *et al.*, 2021).

Desafíos y futuro del uso de elicitores

El interés en el uso de elicitores y su relevancia en la agrobiotecnología han experimentado un aumento en la última década, convirtiéndose a nivel mundial en un área de investigación prioritaria en el estudio de las interacciones entre fitopatógenos y sus hospederos. Por lo que podrían emplearse los efectores para el control biológico por su gran potencial en el futuro; pero todavía enfrentan varios desafíos (Todd *et al.*, 2023).

Uno de los mayores desafíos es abordar una pronta respuesta ante la crisis climática, ya que el progreso tecnológico se ve limitado en su capacidad para adaptarse a la crisis climática, así como sus efectos que enfrenta la agricultura en un mundo cambiante. A pesar de las extensas investigaciones a lo largo de los años, la importancia del control biológico en el manejo de la salud vegetal sigue siendo relativamente insignificante en comparación con la creciente necesidad de alternativas a los métodos de control basados en químicos. Por lo que, el desarrollo de productos ecológicamente amigables al inicio es costoso y requiere de más tiempo para su desarrollo (Singh *et al.*, 2023 & Lahlali, *et al.*, 2022).

Otro desafío que presentan es la identificación de elicitores específicos para cada planta y patógeno, lo que requerirá una mayor comprensión de los mecanismos de acción de los elicitores para desarrollar productos de biocontrol que sean altamente eficientes contra patógenos vegetales en la agricultura (Lahlali, *et al.*, 2022).

El objetivo principal de la estimulación generada por los elicitores es influir en las vías bioquímicas para generar metabolitos secundarios, pero no se puede generalizar el efecto de estas estrategias dado que la respuesta del metabolismo vegetal depende no sólo del modelo de estudio, sino también por la naturaleza, concentración y duración de los estímulos aplicados (Caicedo *et al.*, 2021).



Finalmente, la falta de legislación sobre la gestión de agroquímicos, así como el registro de nuevos controles biológicos, puede ser un desafío ya que se basan en una versión modificada a los productos químicos convencionales. Es necesario identificar a los bioestimulantes con estándares de seguridad y aceptables para su comercialización que cumplan con los protocolos tradicionales en evaluaciones de toxicología y ecotoxicología aun cuando gran mayoría de estas herramientas ecológicas no lo requieran (Caicedo *et al.*, 2021).

Conclusión

Los elicitores o inductores son moléculas fundamentales para entender cómo las plantas responden a su entorno y cómo pueden ser utilizadas en la agricultura, por lo que tienen un gran potencial para su uso práctico y es probable que jueguen un papel cada vez más importante en el futuro a pesar de los desafíos que enfrentan. Su capacidad para activar respuestas defensivas en las plantas, fortalecer su resistencia a patógenos y estimular su crecimiento los convierte en herramientas valiosas para mejorar la producción vegetal y garantizar la seguridad alimentaria. La identificación de elicitores efectivos y la comprensión de su formulación son aspectos cruciales para maximizar su eficacia en la agricultura. Reducir la dependencia de agroquímicos y fomentar prácticas agrícolas sostenibles son beneficios adicionales que los elicitores pueden ofrecer. Avances tecnológicos y de investigación en este campo pueden impulsar aún más su uso y contribuir a abordar los desafíos actuales en la agricultura.

Con una mayor comprensión de los mecanismos de acción de los elicitores y los avances en la tecnología y la investigación es probable que se vea una mayor aplicación de estos en la agricultura: como la presión de los patógenos y los efectos del cambio climático en los próximos años. En resumen, los elicitores representan una prometedora herramienta biotecnológica para mejorar la productividad agrícola y la seguridad alimentaria en un contexto de cambio climático y demandas crecientes de alimentos.

Referencias

- Abdul Malik, N. A., Kumar, I. S., & Nadarajah, K. (2020). Elicitor and Receptor Molecules: Orchestrators of Plant Defense and Immunity. *International journal of molecular sciences*, 21(3), 963. <https://doi.org/10.3390/ijms21030963>
- Anna Todd, J. N., Gisel Carreón-Anguiano, K., Jhosimar Couoh-Dzul, O., de los Santos-Briones, C., & Canto-Canché, B. (2023). Effectors: key actors in phytopathology. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 41(2), 203-228. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2210-4>
- Caicedo-López, L. H., Aranda, A. L., Sáenz de la O, D., Gómez, C. E., Márquez, E. E., & Zepeda, H. R. (2021). Elicitores: implicaciones bioéticas para la



- agricultura y la salud humana. *Revista Bioética*, 29(1), 76-86. <https://doi.org/10.1590/1983-80422021291448>
- Ceulemans, E., Ibrahim, H. M. M., De Coninck, B., & Goossens, A. (2021). Pathogen Effectors: Exploiting the Promiscuity of Plant Signaling Hubs. *Trends in plant science*, 26(8), 780–795. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.01.005>
- González, R. G. G., Aranda, A. L. V., Jiménez, N. I. F., & Roséndiz, M. M. (2020). *Elicidores en la agricultura. Bases teóricas y algunas aplicaciones* (Vol. 2). Editorial Universidad Almería.
- Humbal, A. & Pathak, B. (2022). Influence of exogenous elicitors on the production of secondary metabolite in plants: a review (VSI: Secondary Metabolites). *Plant Stress*, 8. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4290260>
- Kumar, A., Bilal, M., Santoyo, G., & Singh, J. (eds.). (2024). *Biocontrol Agents for Improved Agriculture*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2022-0-01735-9>
- Lahlali, R., Ezrari, S., Radouane, N., Kenfaoui, J., Esmael, Q., El Hamss, H., Belabess, Z., & Barka, E.A. (2022). Biological Control of Plant Pathogens: A Global Perspective. *Microorganisms*, 10(3), 596. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030596>
- Singh, B., Delgado-Baquerizo, M., Egidi, E., Guirado, E., Leach, J., Liu, H. & Trivedi, P. (2023). Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nature Reviews Microbiology*, 21, 640–656. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>
- Zehra, A., Raytekar, N. A., Meena, M., & Swapnil, P. (2021). Efficiency of microbial bio-agents as elicitors in plant defense mechanism under biotic stress: A review. *Current research in microbial sciences*, 2, 100054. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100054>

