

# Elicidores: implicaciones bioéticas para la agricultura y la salud humana

Laura Helena Caicedo-López<sup>1</sup>, Ana Laura Villagómez Aranda<sup>1</sup>, Diana Sáenz de la O<sup>1</sup>, Carlos Eduardo Zavala Gómez<sup>1</sup>, Estefanía Espinoza Márquez<sup>1</sup>, Hilda Romero Zepeda<sup>1</sup>

1. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

## Resumen

Los compuestos agroquímicos se han utilizado en la agricultura en las últimas décadas para evitar pérdidas por plagas, nutrir la tierra, aumentar el rendimiento y la calidad de los cultivos. Sin embargo, el uso de estas sustancias en muchas ocasiones representa una fuente de contaminación ambiental y riesgos a la salud. Por ello, han surgido nuevas alternativas en la producción alimentaria, como el uso de elicidores, para consolidar una agricultura más sostenible y sin efectos adversos a la salud del consumidor. Los elicidores pueden estimular el metabolismo propio de las plantas para producir compuestos que resultarán en rasgos agronómicos deseados, como metabolitos secundarios de uso nutracéutico. En el presente artículo se muestra la perspectiva científica y ética de proyectos de investigación en los cuales se emplean diferentes elicidores para sustituir el uso de agroquímicos.

**Palabras clave:** Agroquímicos. Salud. Biotecnología. Agricultura sostenible.

## Resumo

### Elicidores: implicações bioéticas para a agricultura e a saúde humana

Nas últimas décadas, compostos agroquímicos têm sido utilizados na agricultura para evitar pragas, nutrir o solo e aumentar a produtividade e a qualidade das plantas. No entanto, o uso dessas substâncias muitas vezes contamina o meio ambiente e traz riscos à saúde. Por isso, novas alternativas, como os elicidores, surgiram na produção alimentar a fim de consolidar uma agricultura mais sustentável, sem efeitos adversos para a saúde do consumidor. Os elicidores podem estimular o próprio metabolismo das plantas para produzir compostos que resultarão em características agrônômicas desejadas, como metabólitos secundários para uso nutracêutico. Este artigo mostra a perspectiva científica e ética de projetos de pesquisa em que diferentes elicidores substituem agroquímicos.

**Palavras-chave:** Agroquímicos. Saúde. Biotecnologia. Agricultura sustentável.

## Abstract

### Elicitors: bioethical implications for agriculture and human health

In recent decades, agrochemicals have been used in agriculture to increase crop yields and quality and avoid losses due to pests. However, the use of these substances often imply environmental contamination and potential health risks. To move towards a more sustainable agriculture with less undesirable effects to human health, a novel line of research has recently emerged, proposing alternatives for the use of agrochemicals, such as elicitors. Elicitors, either biotic or abiotic, can stimulate plants biochemical mechanism to produce compounds that will result in desired agronomic traits, such as secondary metabolites to be used as nutraceuticals. This article shows the scientific and the ethic perspective of research projects evaluating the role of different elicitors in replacing the use of agrochemicals.

**Keywords:** Agrochemicals. Health. Biotechnology. Sustainable agriculture.

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses.

La agricultura ha sido uno de los grandes pilares de la sociedad desde la Antigüedad, y se ha transformado simultáneamente con las necesidades del hombre. Desde 1960, con la Revolución Verde, uno de los grandes cambios para incrementar la producción agrícola fue la introducción de los agroquímicos, como pesticidas, insecticidas, herbicidas, fertilizantes y otros agentes<sup>1</sup>. Su utilización ha permitido beneficios adicionales, como mayor ganancia para el agricultor, reducción de la mano de obra, ahorro de combustibles fósiles, aumento del rendimiento de los cultivos, reducción de los costos de los alimentos y mejora en la calidad de los productos<sup>2</sup>. A pesar de ello, en las regiones en vías de desarrollo los rendimientos agrícolas han disminuido o incluso se encuentran estancados<sup>2</sup>. Para ilustrar, en el 2010 la cifra de personas desnutridas en el mundo ascendía a 925 millones, con un 98% ubicado en países en desarrollo<sup>3</sup>.

Pese a sus ventajas, los agroquímicos son controversiales por el impacto negativo en el medioambiente<sup>1</sup>. La aplicación excesiva de pesticidas desarrolla resistencia de las plagas y como daño colateral perjudica a organismos benéficos para el ambiente<sup>3</sup>. Además, la permanencia de estas sustancias en el subsuelo y mantos acuíferos presenta riesgos para el ambiente y la salud humana<sup>4</sup>. Entonces, tienen una alta actividad carcinogénica y teratogénica; así como dosis elevadas y una alta exposición a compuestos organofosforados interfieren en la regulación hormonal<sup>3</sup> y se han asociado a diversos trastornos crónicos no transmisibles y no diagnosticados que afectan el sistema cardiovascular, hepático, renal, nervioso y reproductivo. Un ejemplo es la enfermedad renal crónica de etiología desconocida y el síndrome del intestino permeable, trastornos frecuentes en varios países de América Central, partes de Mesoamérica, el sur de Europa, en India y China<sup>4,5</sup>.

Los países en desarrollo y subdesarrollados manipulan agroquímicos de forma indiscriminada por una insuficiencia de normativas, y solo aplican la regulación de productos químicos a productos de exportación<sup>6</sup>. Contrariamente, en países desarrollados como en la Unión Europea (UE) y Estados Unidos (EE. UU.) se han prohibido más de 500 agroquímicos por sus efectos nocivos<sup>7</sup>.

En la UE la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, por su sigla en inglés), con base en el Reglamento UE 396/2005, verifica el cumplimiento

de los límites permisibles de pesticidas establecidos en la legislación alimentaria<sup>8</sup>. Por su parte, en EE. UU., la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por su sigla en inglés) evalúa los efectos potenciales de diferentes agroquímicos, tanto para el ambiente como para la salud humana, revisa y verifica las medidas de seguridad y cumplimiento de las normativas de acuerdo con la Ley Federal de Insecticidas, Fungicidas y Raticidas y la Ley Federal de Alimentos, Medicamentos y Cosméticos<sup>9-12</sup>.

Desde la perspectiva biotecnológica, el campo de desarrollo de productos y tratamientos como una alternativa al uso de agroquímicos integran varias áreas del conocimiento, como la química, la biología y la ingeniería. De esta forma, la definición de biotecnología se ha transformado de diversas formas en el último siglo<sup>13</sup>. No obstante, la biotecnología de las plantas en este texto se entiende como el conjunto de fenómenos biológicos y los factores involucrados en el mejoramiento de la agricultura, la alimentación y otras industrias derivadas. De igual manera, la bioética en la agricultura debe ofrecer una solución prometedora para enfrentar desafíos que corresponden a la demanda alimentaria, abordando las preocupaciones éticas y socioculturales para asegurar la confianza y aceptación generalizada del productor y el consumidor<sup>14</sup>.

Dado que la producción de alimentos deberá duplicarse para el 2050 a causa del exorbitante crecimiento poblacional, el uso de compuestos agroquímicos se incrementará en las próximas décadas<sup>1</sup>. El riesgo a la salud de la población que esto implica demanda nuevas herramientas biotecnológicas para disminuir o reemplazar el uso de estos compuestos. Entre los varios enfoques y/o estrategias existentes actualmente se destacan los elicidores, que son estímulos de estrés en las plantas que, aplicados en pequeñas cantidades, pueden activar su respuesta de defensa y capacidad de adaptación mediante la producción de metabolitos secundarios, reconocidos por su función nutraceutica en la alimentación. Las plantas están expuestas de forma permanente a estrés, por lo que han desarrollado estrategias de tolerancia para hacer frente a un entorno desfavorable y permanecer bajo un estado particular sin sufrir alteraciones morfológicas significativas<sup>15,16</sup>.

Los factores de estímulo de estrés pueden clasificarse como bióticos y abióticos según su fuente de origen y su efecto en la planta. Se denomina euestresor a un estímulo positivo, capaz de inducir

el sistema inmune de la planta; y distresor a un estímulo con consecuencias negativas para esta, como la muerte<sup>17</sup>. En este sentido, todo euestresor se considera un elicitor. Los elicidores se clasifican de igual forma que los factores de estímulo de estrés, en bióticos y abióticos.

Los elicidores bióticos son todas aquellas sustancias generadas por organismos vivos, como proteínas, carbohidratos, bacterias, hongos y fitohormonas (hormonas vegetales). En particular, las fitohormonas han sido ampliamente estudiadas por su interacción con varias respuestas fisiológicas y metabólicas en la planta<sup>18</sup>. También, se han denominado como bioestimulantes, considerando que existe una gran diversidad de compuestos y cada uno tiene una función biológica específica<sup>19</sup>.

Por su parte, los elicidores abióticos son todos los estímulos físicos a los que son susceptibles las plantas, como la luz, la temperatura, señales eléctricas de larga distancia, ondas electromagnéticas, ondas de radiofrecuencia, percepción de estímulos mecánicos y emisiones acústicas, entre otros<sup>20,21</sup>. Cabe destacar que las plantas han desarrollado una ingeniería extensa de señalización como resultado de su aprendizaje asociativo de adaptación para responder a las condiciones ambientales<sup>22</sup>. Por ello, los elicidores activan señales de respuesta que incrementan la producción de metabolitos secundarios, originando una respuesta de defensa en la planta<sup>18</sup>.

Una de las inquietudes con respecto al uso de estos factores, una vez que se conviertan en herramientas efectivas, podría representar el interés de los sectores industriales en comercializar los avances científicos como un producto o paquete tecnológico. Con el desarrollo de la ingeniería genética, el sistema de patentes se amplió para incluir la biología y la biotecnología, generando así una discusión importante, puesto que las patentes biotecnológicas plantean problemas únicos en el caso de que el objetivo de las grandes empresas biotecnológicas radique únicamente en la obtención de beneficios comerciales<sup>23</sup>.

No obstante, la evaluación bioética de los estudios asociados a este tipo de bioestimulantes se limita al sector académico. Así las nuevas alternativas buscan satisfacer la urgente necesidad de métodos con base en nuevas sustancias biológicamente activas, inocuas para el medio ambiente y seguras. Por tal razón, los bioestimulantes se definen como factores que intervienen en los

procesos de nutrición natural de las plantas y que podrían mejorar la eficiencia del uso de nutrientes, el mecanismo de que involucra la tolerancia al estrés abiótico, la mejora de los rasgos de calidad y el aumento de la disponibilidad de nutrientes<sup>24</sup>.

En general, el propósito de la elicitación es interactuar con las rutas bioquímicas para producir metabolitos secundarios. Si bien existe información sobre este aspecto, el efecto de estas estrategias no se puede generalizar, ya que se ha observado que la respuesta del metabolismo de las plantas depende del modelo de estudio, la concentración y tiempo de uso del estímulo, así como su naturaleza<sup>25,26</sup>.

Además, es necesario conocer qué tipo y cuál dosis de factores de estrés pueden inducir una respuesta epigenética en la planta para el reconocimiento rápido del estrés y la activación de respuestas de defensa, que pueden ser críticas en la activación oportuna del sistema de defensa y, por consecuencia, en la adaptación fisiológica al estrés<sup>27</sup>.

## Elicidores potenciales

Los elicidores representan una alternativa de una agricultura sostenible al uso de agroquímicos en la producción de alimentos y otros productos de uso humano. Sin embargo, el concepto es relativamente nuevo y sigue en proceso de investigación. Existen diferentes tipos de elicidores, todos influyen en el crecimiento, desarrollo y expresión genética de las plantas, aunque su uso en la agricultura varía dependiendo del mecanismo de acción.

Considerando la necesidad de comunicar los nuevos desarrollos científicos, a continuación se mencionan elicidores bióticos (ácido salicílico y peróxido de hidrógeno) y abióticos (emisiones acústicas y luz UV) con potencial aplicación en la agricultura.

## Emisiones acústicas

En las plantas el sonido actúa como un mediador de señales en procesos ecológicos y de adaptación. Esto ha generado interés en los mecanismos involucrados en la detección y emisión de vibraciones acústicas, en particular bajo condiciones ambientales específicas, ya que se ha demostrado que las emisiones acústicas (EA) pueden ser

indicadores de la reacción de las plantas a cambios ambientales que afectan su estado hídrico.

Las plantas son sensibles a frecuencias específicas, dado que pueden crecer y direccionarse hacia una fuente de propagación de sonido de 200-300 Hertz (Hz), demostrando una gran selectividad a las señales acústicas<sup>28</sup>. Además, tienen mecanismos específicos para detectar frecuencias; por ejemplo, aquellas emitidas por insectos (500 a 2.000Hz) provocan un incremento del contenido de glucosinolatos en la planta<sup>29</sup>.

Aunque esta información permanece en discusión, se ha propuesto que una elicitación con EA puede generar diversos mecanismos de respuesta, destacándose entre ellos la inducción de tolerancia a sequía<sup>30</sup> y la producción de compuestos bioactivos con actividad antioxidante, como carotenoides, fenoles y péptidos bioactivos<sup>31</sup>. Adicionalmente, el propósito de las EA en la agricultura consiste en intensificar la absorción de sustancias o nutrientes que permitirán la disminución de aplicaciones químicas y costos en la producción, siendo una de las alternativas amigables con el medio ambiente para la producción agrícola<sup>32</sup>.

### Luz ultravioleta

La radiación ultravioleta (RUV) es un tipo de radiación solar con longitudes de onda entre 100 y 400nm, cuyo espectro se divide en tres regiones: UV-C (<280nm), que es absorbida por la atmósfera; UV-B (280-315nm), que llega en forma parcial; y UV-A (315-400nm), que es transmitida en su mayor parte a la Tierra<sup>33</sup>. La RUV representa entre el 7% y el 9% de la radiación solar total que llega a la biosfera, pero es una radiación altamente energética<sup>34</sup>, por lo que causa reacciones en las moléculas que son incididas por ella. Por ello, la concepción general de la RUV es negativa al asociarse con quemaduras solares y cáncer de piel<sup>33</sup>.

Sin embargo, la RUV tiene una función positiva y vital en las plantas en su energía, fotosíntesis y desarrollo, desde la germinación hasta la floración. Así las plantas han evolucionado para percibir la RUV y explotarla eficientemente sin sufrir daño en sus biomoléculas. Entre los mecanismos de defensa están los procesos de fotoreparación y capacidad antioxidante, que conjuntamente proporcionan protección a UV y a otros tipos de estrés<sup>35</sup>.

De hecho, se ha sugerido que la radiación UV-B actúa como modulador positivo para mejorar la supervivencia de las plantas a condiciones de estrés biótico y abiótico. Por ejemplo, una baja dosis de UV-B puede inducir respuestas de defensa en plantas a infección por patógenos, como el hongo *B. cinérea*, estrés fotooxidativo, tolerancia a calor y protección a bajas temperaturas en condiciones de laboratorio y de campo<sup>36</sup>. Por ello, el uso de la luz UV para optimizar la productividad y la calidad de los cultivos está ganando cada vez más interés, mediante la alteración en el metabolismo secundario y la regulación positiva de la respuesta antioxidante propia de la planta<sup>37</sup>.

### Ácido salicílico

El ácido salicílico (AS) es un compuesto fenólico que sintetizan las plantas, considerado una fitohormona por tener un papel clave como regulador del crecimiento y desarrollo de la planta<sup>38</sup>. La aplicación por aspersión de AS en las plantas tiene diversos efectos, como el incremento de la floración y una alta efectividad contra el ataque de hongos<sup>39</sup>. Este compuesto se acumula rápidamente en el sitio de infección durante el ataque de patógenos y se propaga a otras partes de la planta para inducir la resistencia sistemática adquirida de las plantas en la interacción planta-patógeno<sup>38</sup>.

La literatura existente muestra varios ejemplos del uso exitoso de elicidores físicos y sintéticos como inmunoestimulantes en la agricultura e ilustra que lo más deseable es encontrar elicidores cuya capacidad de inducción de defensa sea lo suficientemente potente para ofrecer alternativas atractivas a los agroquímicos convencionales<sup>40</sup>. En el caso de los elicidores a partir de moléculas sintéticas inductoras de respuestas de defensa de las plantas, la gran mayoría pertenece al gran grupo de análogos del AS. Estos elicidores pueden proteger los cultivos de enfermedades sin la necesidad de ser directamente tóxicos para los organismos patógenos<sup>40</sup>.

Además, el AS participa en varios procesos fisiológicos y bioquímicos, como la fotosíntesis, el balance osmótico, la producción de metabolitos secundarios, la inducción del sistema de defensa antioxidante y la expresión de genes relacionados a defensa de estrés a una amplia gama de estrés biótico y abiótico<sup>41</sup>.

### Peróxido de hidrógeno

El peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) es un compuesto producido durante el metabolismo aerobio y pertenece a las especies reactivas de oxígeno (ROS). Por mucho tiempo se consideró dañino por su actividad oxidante; sin embargo, funciona como molécula de señalización en el control de la fisiología de la planta<sup>42</sup>, por lo que puede incrementar los parámetros de crecimiento y mejorar las características anatómicas de la planta<sup>43</sup>.

Además, es esencial en los mecanismos de respuesta a estrés por ser uno de los primeros compuestos producidos ante diferentes tipos de estímulos y por participar en los mecanismos de tolerancia. Este activa diversas vías de regulación, como las señales dependientes de calcio, la biosíntesis de moléculas protectoras y vías asociadas a fitohormonas como el AS y el ácido abscísico, además de algunas cascadas de MAP-quinasas, síntesis y regulación de la vía de ROS<sup>42,44</sup>. Estos actúan sobre factores de transcripción y regulan la expresión genética, por ejemplo activando la expresión de genes que en conjunto pueden dar origen a la respuesta de resistencia a condiciones de estrés ambiental<sup>42</sup>. Por mencionar algunos ejemplos, el  $H_2O_2$  tiene un efecto positivo en la tolerancia a estrés salino<sup>45</sup>, sequía, anegamiento<sup>46</sup>, altas temperaturas y condiciones de poca iluminación. De forma similar, una aplicación exógena puede generar tolerancia a la infección de virus y otros patógenos<sup>47</sup>.

### Discusión ética

El conocimiento científico sobre los elicidores indica que son una opción viable para la resolución de problemas en la agricultura. Sin embargo, debido a que el conocimiento tiende a ser valorado desde su utilidad para el hombre, diversas tecnologías implementadas en la sociedad han traído consigo efectos adversos. En el caso de los agroquímicos, su permanencia en el suelo y aguas subterráneas ha afectado negativamente la salud humana y del ambiente. Por eso, se discutirá la aplicación de los mencionados elicidores desde la ética de principios para tener en consideración su impacto en la sociedad.

Por lo tanto, comprender la forma en la que los elicidores provocan la biosíntesis de metabolitos secundarios implica un estudio profundo de las

complejas vías y redes de señalización de defensa de las plantas. Dado que cada tipo de elicitación –ya sea química o física– genera efectos diferentes en la fisiología del estrés de las plantas, el estudio de cada uno de ellos representa una herramienta poderosa que abre ampliamente el conocimiento sobre la inmunidad en plantas<sup>40,48</sup>. En ese sentido, los recursos científicos y tecnológicos deben ser éticamente responsables, relevantes para personas de diferentes orígenes culturales y sociales y de fácil comunicación.

### Principio de beneficio

El uso de elicidores produce un amplio espectro de beneficios directos en la productividad agrícola, como la reducción del daño causado por hongos, algunos patógenos<sup>41</sup>, plagas, insectos, herbívoros, así como la disminución de lesiones por factores ambientales<sup>49</sup>. Además, los elicidores como el AS y el  $H_2O_2$  pueden ser aplicados de forma sencilla a los diferentes sistemas de cultivo, siendo el método más común la aspersion<sup>49</sup>. Los elicidores físicos como la EA y la RUV se pueden combinar fácilmente con otros métodos de tratamiento, ya sean químicos o biológicos<sup>50</sup>.

El estrés generado en la planta por los elicidores generalmente lleva a la acumulación de compuestos bioactivos, los cuales se utilizan como nutraceuticos en el ser humano, teniendo un efecto positivo en la salud. Finalmente, y no menos importante, el uso de elicidores y activadores de inmunidad en plantas no presentan riesgo de seleccionar cepas de patógenos resistentes a los agroquímicos debido a su mecanismo de acción, el cual es dirigido al sistema innato de defensa en la interacción planta-huésped. En este sentido, se destaca que la resistencia a los agroquímicos, tal como fungicidas, insecticidas y herbicidas, representa una de las principales amenazas para la salud y la seguridad alimentaria mundial<sup>51</sup>.

### Principio de no maleficencia

Respecto al principio de no maleficencia, hasta el momento no se ha reportado que el uso de elicidores, ya sean bióticos o abióticos, causen algún daño colateral en las plantas, en los seres humanos o en el ambiente<sup>39,41</sup>. Incluso, los tratamientos de elicidores pueden ser una alternativa al uso de las plantas modificadas genéticamente con menos riesgos ecológicos<sup>49</sup>.



El uso de elicidores abióticos, como EA y RUV, solo pueden ser aplicados a la producción agrícola en ambientes controlados, debido a que requieren de equipo especializado como bocinas, amplificadores, lámparas de UV y recubrimientos fotoselectivos. Asimismo, la manipulación de la luz en invernaderos es una técnica frecuente para optimizar la productividad, por lo que, al aplicarse dentro de un espacio controlado, se minimizan posibles riesgos colaterales tanto al humano como a otros organismos silvestres.

Además, la elicitación aplicada a las plantas tiene una muy baja probabilidad de causar daño al ser humano por su misma forma de aplicación. Por ejemplo, en el caso de la elicitación abiótica por UV-B o UV-C, aunque consiste en el suministro de grandes cantidades de energía, son durante un período de tiempo corto que estimula a la planta sin causar mutaciones a su composición física o nutricional<sup>50</sup>. Tampoco es peligrosa para humanos y otros organismos.

En el caso de los elicidores bióticos, las dosis utilizadas son demasiado bajas como para generar alguna alteración en el medio ambiente o en los organismos vivos. El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, por ejemplo, no es carcinógeno; si bien es cierto que es un corrosivo fuerte y se considera peligroso para la salud, las concentraciones y cantidades para provocar efectos como irritación son muy altas, es decir, a partir de una concentración superior al 5%, con una dosis letal media o LD50 de 376mg/kg (oral) y 4,06g/kg (piel). Sin embargo, se usa comúnmente como antiséptico a concentraciones del 3%, mientras que para estimular a la planta se usan concentraciones nanomolares, que son de 10 a 100 veces menores. De forma similar, el AS tampoco es carcinogénico, y se considera poco peligroso para la salud. Tiene una LD50 de 891mg/kg (oral) y 10g/kg (piel), y en sangre es dañino a niveles mayores de 35mg/dL<sup>52</sup>. Se utiliza en tratamientos tópicos para la piel a concentraciones alrededor del 1%. Sin embargo, para estimular a la planta se usan concentraciones menores. Además, cabe mencionar que tanto el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> como el AS se degradan fotoquímicamente de forma rápida, por lo que su permanencia en el ambiente es efímera.

### Principio de justicia

La oportunidad de utilizar estas alternativas sostenibles en la producción agroalimentaria se encuentra al alcance de todos. Definir un

tratamiento de elicitación que logre ser recomendado a los productores aún presenta limitaciones relacionadas al tipo de planta, su estado fisiológico y genético, y a los factores ambientales y sus interacciones<sup>50</sup>. Por ello, es necesario generar información que pueda alcanzar niveles de precisión que comprendan la complejidad de diversos fenómenos y condiciones, a partir de un mayor desarrollo de este tipo de investigación. En este sentido, la elicitación no implica la dependencia de paquetes tecnológicos patentados y manipulados por grandes empresas.

Sin embargo, para utilizarla de forma segura y responsable en el campo deben establecerse procedimientos de evaluación de productos químicos y fitosanitarios, como los que establece la EFSA, entre otras legislaciones afines. Esto para implementar estándares y técnicas que permitan asegurar que sus aplicaciones no representen riesgos secundarios, como presencia de residuos tóxicos o impurezas relevantes; por ende, no representan riesgos a la cadena alimentaria, a los productores o al ambiente.

### Principio de autonomía

La actividad agrícola consiste por sí misma en una práctica autónoma, desde la selección del cultivo hasta el sistema de producción, con la aplicación de productos y prácticas específicas. De esta forma, los agricultores pueden elegir nuevos métodos de producción más amigables con el medio ambiente, como sería el uso de los elicidores. A su vez los consumidores tienen la libre elección de escoger los productos que quieren consumir según su forma de producción.

Sin embargo, para que la aplicación de elicidores sea una práctica completamente autónoma, se requiere una mayor divulgación de información de tecnologías alternativas para mejorar los cultivos con pleno conocimiento de sus ventajas, desventajas y limitaciones.

### Principio de precaución

Si bien no se sugieren consecuencias adversas, es necesario comprender diversos tipos de estímulo y cómo actúan en el mecanismo de defensa de los cultivos. Este avance permitirá mejorar la protección y la gestión de cultivos sostenibles. El mecanismo de acción de las EA en las plantas

aún no se conoce con certeza, se requiere más información sobre la interacción entre las ondas de sonido y las funciones biológicas de mecanismos de percepción de UV, sus vías de señalización, regulación y vías metabólicas involucradas en la respuesta biológica<sup>50</sup>. Por otro lado, carece de estudios en campo abierto sobre el efecto de los elicidores bióticos AS y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en el ambiente y su interacción con otros organismos del área a largo plazo.

Dado lo anterior, el objetivo de la agricultura sostenible es optimizar la salud y la productividad de comunidades interdependientes de vida del suelo, plantas, animales y grupos diversos de la sociedad en general<sup>53</sup>, es decir, agricultores, productores, procesadores y consumidor final. Considerando los nuevos problemas en el campo de la protección vegetal, existe una necesidad urgente de desarrollar sistemas más eficaces, sostenibles y herramientas ecológicas. Por eso, la disponibilidad de aplicaciones innovadoras y técnicas moleculares abre nuevas posibilidades en la protección vegetal para la agricultura orgánica y sostenible. Las nuevas estrategias protegen directamente plantas contra patógenos y pueden inducir una mayor inmunidad contra cepas patógenas<sup>53</sup>.

### Principio de responsabilidad social

Una cuestión importante que considerar es que tenemos la necesidad de continuar incrementando la producción de alimentos para satisfacer las necesidades de la población a partir de sistemas agroalimentarios sostenibles. Debido a las dificultades que esto implica, es necesario usar productos que permitan mejorar la productividad agrícola. En este caso los elicidores son una alternativa que nos permite cumplir nuestros requerimientos de una forma menos perjudicial con el ambiente en comparación con los agroquímicos, al mismo tiempo no compromete los recursos naturales de los que dependerán las generaciones futuras.

En este análisis, cabe resaltar los esfuerzos que se están realizando para mejorar las perspectivas en la comunidad agrícola, y en la sociedad en general, hacia el uso de métodos alternativos a los insumos químicos. Por otro lado, también se considera pertinente mencionar que la literatura es clara en que los bioestimulantes, elicidores y los semioquímicos no deben usarse como métodos de

gestión agroecológica exclusiva, pero sí pueden ser integrados en estrategias de fertilización y control de enfermedades y plagas para complementar los insumos químicos y contribuir a una reducción de sus dosis, aplicación y frecuencia.

### Consideraciones finales

Aunque las herramientas mencionadas han sido ampliamente avaladas por sus ventajas, los agricultores y productores todavía no están completamente seguros de usarlos de forma masiva, principalmente debido a su rendimiento de campo fluctuante. En este sentido, los agricultores necesitan más información sobre cómo utilizar estas herramientas en sus prácticas de campo.

Los elicidores presentan un gran interés para la protección de cultivos y el manejo de plagas. El desarrollo de técnicas de estimulación de defensas de plantas basadas en elicitación se encuentra todavía en las primeras etapas para llegar a su uso agrícola a gran escala. Además, los organismos reguladores, inversores, productores y consumidores también necesitan estar bien informados sobre las ventajas de estos métodos alternativos y su potencial para promover la agricultura sostenible<sup>54</sup>.

No obstante, a pesar de su gran potencial, se necesita más estudios para comprender los parámetros ambientales que afectan la eficiencia de estos productos, particularmente para cultivos extensivos. Además, desde la ética de principios, los elicidores cumplen con el principio de beneficio al promover la presencia de compuestos bioactivos beneficiosos para la salud humana; con el principio de no maleficencia, al no ser peligrosos ni dañinos al ser humano o al ambiente; y de justicia y autonomía al ser una opción de libre acceso y aplicación para los cultivos.

Por ello, los elicidores son prometedores para justificar su estudio e implementación por parte de la comunidad científica y agropecuaria para lograr mayor conocimiento de las posibles interacciones de estos productos con el entorno vegetal. Todo lo anterior permitirá establecer con claridad el papel que pueda implicar la decisión de su uso a gran escala a partir de políticas gubernamentales que favorezcan sistemas de producción alternativos y seguros.

Los autores Laura Helena Caicedo-López, Diana Sáenz de la O, Ana Laura Villagómez Aranda, Carlos Eduardo Zavala Gómez y Estefanía Espinoza Márquez expresan sus agradecimientos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por las becas otorgadas.

## Referencias

1. Liu Y, Pan X, Li J. A 1961-2010 record of fertilizer use, pesticide application and cereal yields: a review. *Agron Sustain Dev* [Internet]. 2015 [acceso 8 abr 2020];35(1):83-93. DOI: 10.1007/s13593-014-0259-9
2. Copping LG. Review of major agrochemical classes and uses. In: Knowles DA, editor. *Chemistry and technology of agrochemical formulations*. Berlin: Springer; 1998. p. 8-40.
3. Pickett JA. Food security: intensification of agriculture is essential, for which current tools must be defended and new sustainable technologies invented. *Food Energy Secur* [Internet]. 2013 [acceso 8 abr 2020];2(3):167-73. DOI: 10.1002/fes3.32
4. Wimalawansa SA, Wimalawansa SJ. Agrochemical-related environmental pollution: effects on human health. *GJBAHS* [Internet]. 2014 [acceso 8 abr 2020];3(3):72-83. Disponible: <https://bit.ly/3skJTPc>
5. Köck Schulmeyer MA. Plaguicidas polares en el medio ambiente: análisis, presencia y evaluación de riesgo [tese] [Internet]. Barcelona: Universitat de Barcelona; 2014 [acceso 1º jan 2021]. Disponible: <https://bit.ly/3qUUKbL>
6. Almeida Filho N, Rouquayrol MZ, Martinovich V. *Introducción a la epidemiología*. Buenos Aires: Lugar; 2008.
7. Pelaez V, Mizukawa G. Diversification strategies in the pesticide industry: from seeds to biopesticides. *Ciênc Rural* [Internet]. 2017 [acceso 8 abr 2020];47(2):e20160007. DOI: 10.1590/0103-8478cr20160007
8. Cuenca MR, Cuenca PR, González PR, Mata NC. Residuos peligrosos para la salud en alimentos: la toma de muestras como garantía de control. In: Linares JJG, Jurado MMM, Pérez-Fuentes MC, Martínez ÁM, Márquez MMS, Martín ABB, Sisto M, organizadores. *La convivencia escolar: un acercamiento multidisciplinar*. Almería: Asociación Universitaria de Educación y Psicología; 2018. p. 307-12.
9. Erzinger GS, Häder D-P. Regulations, political and societal aspects, toxicity limits. In: Häder D-P, Erzinger GS, editores. *Bioassays: advanced methods and applications* [Internet]. Amsterdam: Elsevier; 2018 [acceso 8 abr 2020]. p. 51-67. DOI: 10.1016/B978-0-12-811861-0.00004-8
10. Spadotto CA, Mingoti R. Exposure characterization tools for ecological risk assessment of pesticides in water. In: Vaz S Jr, editor. *Sustainable agrochemistry: a compendium of technologies*. Berlin: Springer; 2019. p. 321-60.
11. Arora NK, Verma M, Prakash J, Mishra J. Regulation of biopesticides: global concerns and policies. In: Arora NK, Mehnaz S, Balesrini R, editores. *Bioformulations: for sustainable agriculture*. Berlin: Springer; 2016. p. 283-99.
12. Cruse C. Food fraud and the Food, Drug, and Cosmetic Act: bridging a disconnect. *Food Drug Law J* [Internet]. 2019 [acceso 8 abr 2020];74(2):322-47. Disponible: <https://bit.ly/3qXns23>
13. Thompson PB. Biotechnology, controversy and the philosophy of technology. In: Thompson PB. *Food and agricultural biotechnology in ethical perspective*. Cham: Springer; 2020. p. 375-400.
14. Harfouche AL, Petousi V, Meilan R, Sweet J, Twardowski T, Altman A. Promoting ethically responsible use of agricultural biotechnology. *Trends Plant Sci* [Internet]. 2021 [acceso 1º mar 2021]. No prelo. DOI: 10.1016/j.tplants.2020.12.015
15. Acevedo FE, Peiffer M, Ray S, Meagher R, Luthe DS, Felton GW. Intraspecific differences in plant defense induction by fall armyworm strains. *New Phytol* [Internet]. 2018 [acceso 8 abr 2020];218(1):310-21. DOI: 10.1111/nph.14981
16. Narayani M, Srivastava S. Elicitation: a stimulation of stress in in vitro plant cell/tissue cultures for enhancement of secondary metabolite production. *Phytochem Rev* [Internet]. 2017 [acceso 8 abr 2020];16(6):1227-52. DOI: 10.1007/s11101-017-9534-0



17. Vázquez-Hernández MC, Parola-Contreras I, Montoya-Gómez LM, Torres-Pacheco I, Schwarz D, Guevara-González RG. Eustressors: chemical and physical stress factors used to enhance vegetables production. *Sci Hortic* [Internet]. 2019 [acesso 8 abr 2020];250:223-9. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.02.053
18. Naik PM, Al-Khayri JM. Abiotic and biotic elicitors: role in secondary metabolites production through in vitro culture of medicinal plants. In: Shanker AK, Shanker C, editores. *Abiotic and biotic stress in plants: recent advances and future perspectives*. London: InTech; 2016. p. 247-77. DOI: 10.5772/61442
19. Yakhin OI, Lubyantsov AA, Yakhin IA, Brown PH. Biostimulants in plant science: a global perspective. *Front Plant Sci* [Internet]. 2017 [acesso 8 abr 2020];7:2049. DOI: 10.3389/fpls.2016.02049
20. Dannehl D. Effects of electricity on plant responses. *Sci Hortic* [Internet]. 2018 [acesso 8 abr 2020];234:382-92. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.02.007
21. Jung J, Kim S-K, Kim JY, Jeong M-J, Ryu C-M. Beyond chemical triggers: evidence for sound-evoked physiological reactions in plants. *Front Plant Sci* [Internet]. 2018 [acesso 8 abr 2020];9:25. DOI: 10.3389/fpls.2018.00025
22. Gagliano M, Vyazovskiy VV, Borbély AA, Grimonprez M, Depczynski M. Learning by association in plants. *Sci Rep* [Internet]. 2016 [acesso 8 abr 2020];6:38427. DOI: 10.1038/srep38427
23. Nambisan P. Relevance of intellectual property rights in biotechnology. In: Nambisan P. *An introduction to ethical, safety and intellectual property rights issues in biotechnology*. Cambridge: Academic Press; 2017. p. 291-309.
24. Kocira S, Szparaga A, Hara P, Treder K, Findura P, Bartoš P, Filip M. Biochemical and economical effect of application biostimulants containing seaweed extracts and amino acids as an element of agroecological management of bean cultivation. *Sci Rep* [Internet]. 2020 [acesso 1º jan 2021];10:17759. DOI: 10.1038/s41598-020-74959-0
25. Aguirre-Becerra H, Vázquez-Hernández MC, Saenz de la O D, Alvarado-Mariana A, Guevara-Gonzalez RG, Garcia-Trejo JF, Feregrino-Perez AA. Role of stress and defense in plant secondary metabolites production. In: Pal D, Nayak AK, editores. *Bioactive natural products for pharmaceutical applications* [Internet]. Cham: Springer; 2021 [acesso 1º jan 2021]. p. 151-95. Disponível: <https://bit.ly/3stQnLK>
26. Alvarado AM, Aguirre-Becerra H, Vázquez-Hernández MC, Magaña-Lopez E, Parola-Contreras I, Caicedo-Lopez LH *et al.* Influence of elicitors and eustressors on the production of plant secondary metabolites. In: Akhtar MS, Swamy MK, Sinniah UR, editores. *Natural bio-active compounds* [Internet]. Singapore: Springer; 2019 [acesso 1º jan 2021]. v. 1, p. 333-88. Disponível: <https://bit.ly/3koIRQm>
27. Villagómez-Aranda AL, García-Ortega LF, Torres-Pacheco I, Guevara-González RG. Whole-Genome DNA methylation analysis in hydrogen peroxide overproducing transgenic tobacco resistant to biotic and abiotic stresses. *Plants* [Internet]. 2021 [acesso 1º jan 2021];10(1):178. DOI: 10.3390/plants10010178
28. Vicent CM. The effect of frequency-specific sound signals on the germination of maize seeds. *BMC Res Notes* [Internet]. 2017 [acesso 8 abr 2020];10:323. DOI: 10.1186/s13104-017-2643-4
29. Appel HM, Cocroft RB. Plants respond to leaf vibrations caused by insect herbivore chewing. *Oecologia* [Internet]. 2014 [acesso 8 abr 2020];175(4):1257-66. DOI: 10.1007/s00442-014-2995-6
30. López-Ribera I, Vicent CM. Drought tolerance induced by sound in *Arabidopsis* plants. *Plant Signal Behav* [Internet]. 2017 [acesso 8 abr 2020];12(10):e1368938. DOI: 10.1080/15592324.2017.1368938
31. Fernandez-Jaramillo AA, Duarte-Galvan C, Garcia-Mier L, Jimenez-Garcia SN, Contreras-Medina LM. Effects of acoustic waves on plants: an agricultural, ecological, molecular and biochemical perspective. *Sci Hortic* [Internet]. 2018 [acesso 8 abr 2020];235:340-8. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.02.060
32. Zakariya FH, Rivai M, Aini N. Effect of automatic plant acoustic frequency technology (PAFT) on mustard pakcoy (*Brassica rapa* var. *parachinensis*) plant using temperature and humidity parameters [Internet]. In: *Proceedings of the 2017 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications*; 28-29 ago 2017; Surabaya. New York: IEEE; 2017 [acesso 8 abr 2020]. DOI: 10.1109/ISITIA.2017.8124105
33. Bornman JF, Barnes PW, Robinson SA, Ballaré CL, Flint SD, Caldwell MM. Solar ultraviolet radiation and ozone depletion-driven climate change: effects on terrestrial ecosystems. *Photochem Photobiol Sci* [Internet]. 2015 [acesso 8 abr 2020];14(1):88-107. DOI: 10.1039/c4pp90034k

34. Searles PS, Flint SD, Caldwell MM. A meta-analysis of plant field studies simulating stratospheric ozone depletion. *Oecologia* [Internet]. 2001 [acceso 8 abr 2020];127:1-10. DOI: 10.1007/s004420000592
35. Robson TM, Klem K, Urban O, Jansen MAK. Re-interpreting plant morphological responses to UV-B radiation. *Plant Cell Environ* [Internet]. 2015 [acceso 8 abr 2020];38:856-66. DOI: 10.1111/pce.12374
36. Neugart S, Schreiner M. UVB and UVA as eustressors in horticultural and agricultural crops. *Sci Hortic* [Internet]. 2018 [acceso 8 abr 2020];234:370-81. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.02.021
37. Wargent JJ, Jordan BR. From ozone depletion to agriculture: understanding the role of UV radiation in sustainable crop production. *New Phytol* [Internet]. 2013 [acceso 8 abr 2020];197(4):1058-76. DOI: 10.1111/nph.12132
38. Ho T-T, Lee J-D, Jeong C-S, Paek K-Y, Park S-Y. Improvement of biosynthesis and accumulation of bioactive compounds by elicitation in adventitious root cultures of *Polygonum multiflorum*. *Appl Microbiol Biotechnol* [Internet]. 2018 [acceso 8 abr 2020];102(1):199-209. DOI: 10.1007/s00253-017-8629-2
39. Arenas-Castro H, Muñoz-Gomez SA, Uribe-Acosta M, Castano-Castano L, Lizarazo-Medina PX. Richness, cellulolytic activity, and fungicide susceptibility of fungi from a bird biological collection. *Acta Biol Colomb* [Internet]. 2016 [acceso 8 abr 2020];21(1):167-73. DOI: 10.15446/abc.v21n1.49240
40. Bektas Y, Eulgem T. Synthetic plant defense elicitors. *Front Plant Sci* [Internet]. 2015 [acceso 1º mar 2021];5:804. DOI: 10.3389/fpls.2014.00804
41. Papadopoulou GV, Maedicke A, Grosser K, Van Dam NM, Martínez-Medina A. Defence signalling marker gene responses to hormonal elicitation differ between roots and shoots. *AoB Plants* [Internet]. 2018 [acceso 8 abr 2020];10(3):ply031. DOI: 10.1093/aobpla/ply031
42. Czarnocka W, Karpiński S. Friend or foe? Reactive oxygen species production, scavenging and signaling in plant response to environmental stresses. *Free Radic Biol Med* [Internet]. 2018 [acceso 8 abr 2020];122:4-20. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2018.01.011
43. Farouk S, Abdul Qados AMS. Enhancing seed quality and productivity as well as physio-anatomical responses of pea plants by folic acid and/or hydrogen peroxide application. *Sci Hortic* [Internet]. 2018 [acceso 8 abr 2020];240:29-37. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.05.049
44. Smirnoff N, Arnaud D. Hydrogen peroxide metabolism and functions in plants. *New Phytol* [Internet]. 2019 [acceso 8 abr 2020];221(3):1197-214. DOI: 10.1111/nph.15488
45. Bagheri M, Gholami M, Baninasab B. Hydrogen peroxide-induced salt tolerance in relation to antioxidant systems in pistachio seedlings. *Sci Hortic* [Internet]. 2019 [acceso 8 abr 2020];243:207-13. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.08.026
46. Andrade CA, Souza KR, Santos MO, Silva DM, Alves JD. Hydrogen peroxide promotes the tolerance of soybeans to waterlogging. *Sci Hortic* [Internet]. 2018 [acceso 8 abr 2020];232:40-5. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.12.048
47. Mejía-Teniente L, Torres-Pacheco I, González-Chavira MM, Ocampo-Velazquez RV, Herrera-Ruiz G, Chapa-Oliver AM, Guevara-González RG. Use of elicitors as an approach for sustainable agriculture. *Afr J Biotechnol* [Internet]. 2010 [acceso 8 abr 2020];9(54):9155-62. Disponível: <https://bit.ly/3dO6qQu>
48. Jacobo-Velázquez DA, Cuéllar-Villarreal MR, Welti-Chanes J, Cisneros-Zevallos L, Ramos-Parra PA, Hernández-Brenes C. Nonthermal processing technologies as elicitors to induce the biosynthesis and accumulation of nutraceuticals in plant foods. *Trends Food Sci Technol* [Internet]. 2017 [acceso 8 abr 2020];60:80-7. DOI: 10.1016/j.tifs.2016.10.021
49. Thakur M, Sohal BS. Role of elicitors in inducing resistance in plants against pathogen infection: a review. *ISRN Biochem* [Internet]. 2013 [acceso 8 abr 2020];2013:62412. DOI: 10.1155/2013/762412
50. Urban L, Chabane Sari D, Orsal B, Lopes M, Miranda R, Aarouf J. UV-C light and pulsed light as alternatives to chemical and biological elicitors for stimulating plant natural defenses against fungal diseases. *Sci Hortic* [Internet]. 2018 [acceso 8 abr 2020];235:452-9. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.02.057
51. Iriti M, Vitalini S. Sustainable crop protection, global climate change, food security and safety: plant immunity at the crossroads. *Vaccines* [Internet]. 2020 [acceso 8 abr 2020];8(1):42. DOI: 10.3390/vaccines8010042

52. Madan RK, Levitt J. A review of toxicity from topical salicylic acid preparations. *JAAD* [Internet]. 2014 [acceso 8 abr 2020];70(4):788-92. DOI: 10.1016/j.jaad.2013.12.005
53. Jamiołkowska A. Natural compounds as elicitors of plant resistance against diseases and new biocontrol strategies. *Agronomy* [Internet]. 2020 [acceso 8 abr 2020];10(2):173. DOI: 10.3390/agronomy10020173
54. Le Mire G, Nguyen ML, Fassotte B, Du Jardin P, Verheggen F, Delaplace P, Jijakli MH. Review: implementing plant biostimulants and biocontrol strategies in the agroecological management of cultivated ecosystems. *Base* [Internet]. 2016 [acceso 8 abr 2020];20(n esp 1):299-313. DOI: 10.25518/1780-4507.12717

Laura Helena Caicedo-López – Magíster – [inglauraclo23@gmail.com](mailto:inglauraclo23@gmail.com)

 0000-0001-5184-0112

Ana Laura Villagómez Aranda – Magíster – [annvillaranda@gmail.com](mailto:annvillaranda@gmail.com)

 0000-0002-6886-7116


Diana Sáenz de la O – Magíster – [sadedi\\_13@hotmail.com](mailto:sadedi_13@hotmail.com)

 0000-0001-5115-6513

Carlos Eduardo Zavala Gómez – Magíster – [ezavala2@gmail.com](mailto:ezavala2@gmail.com)

 0000-0002-9416-0608

Estefanía Espinoza Márquez – Magíster – [e\\_espinozam@hotmail.com](mailto:e_espinozam@hotmail.com)

 0000-0002-3910-8137

Hilda Romero Zepeda – Doctora – [phd.hromero@gmail.com](mailto:phd.hromero@gmail.com)

 0000-0002-5553-8962

#### Correspondencia

Hilda Romero Zepeda – Universidad Autónoma de Querétaro. Av. Hidalgo, s/n, Colonia Las Campanas CP 76010. Querétaro, México.

#### Participación de los autores

Los autores contribuyeron igualmente a este trabajo.

**Recibido:** 6.8.2019

**Revisado:** 2.2.2021

**Aprobado:** 9.2.2021