



APORTES DE LOS BIORREGULADORES EN EL MANEJO DE CULTIVOS CONTRIBUTIONS OF BIOREGULATORS IN CROP MANAGEMENT

**Rolando Corella*. Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Panamá.

rolando.corella@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-0122-0358>

Dayane Littig. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil.

dayanelittig@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0399-160X>

Fernando Gálvez. Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Panamá.

fernando.galvez@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0000-5138-1753>

Enrique Sánchez-Galán. Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Panamá.

enrique.sanchezg@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-9452-8177>

*Autor de Correspondencia: rolando.corella@up.ac.pa

Recibido: 07/10/2024

Aceptado: 27/01/2025

DOI <https://doi.org/10.48204/j.ia.v7n2.a7495>

RESUMEN. La producción de cultivos necesita tecnologías que potencialicen procesos intrínsecos de importancia para la productividad, o que representen soluciones para los problemas en el manejo de los cultivos; considerando que situaciones adversas pueden comprometer la viabilidad económica del mismo. El uso de biorreguladores vegetales (PGRs) es una alternativa altamente viable; ya que estos pueden promover, inhibir o modificar el comportamiento de los cultivos; beneficiando aspectos de importancia como el crecimiento, el desarrollo, el florecimiento, el cuajado y la calidad de los frutos, la tolerancia a factores estresantes, la eficiencia en el uso de los nutrientes, del carbono fijado y del agua. Los biorreguladores tienen diferentes efectos, los cuales dependen del tipo de cultivo, del comportamiento eco fisiológico según la fase fenológica y la dosis. Lo más importante es el objetivo de su utilización. La información aquí presentada propone un acceso a la información aplicada al manejo agronómico de cultivos, como referencia para la investigación, en la generación de nuevos conocimientos científicos y de tecnologías agrícolas aplicadas.

PALABRAS CLAVE: Auxinas, bioestimulantes, etileno, fitohormonas, manejo agronómico, productividad de cultivos.

ABSTRACT. Crop production requires technologies that enhance intrinsic processes of importance for productivity, or that represent solutions to problems in crop management, considering that adverse situations can affect the economic viability of the crop. The use of plant bioregulators (PGRs) is highly viable alternative, since they can promote, inhibit or modify the behavior of crops, benefiting important aspects such as growth, development, flowering, fruit set, quality, tolerance to stress factors, efficiency in the use of nutrients, fixed carbon, and water. PGRs have different effects, which depend on the type of crop, the ecophysiological behavior according to the phenological phase and the dose. The most important is the objective of use. The information presented here proposes access to information applied to the agronomic management of crops, as a reference for research, in the generation of new scientific knowledge and applied agricultural technologies. The most important is the objective of use.

KEYWORDS: Crop yield, agronomic management, biostimulants, phytohormones, auxins, ethylene.

INTRODUCCIÓN

En el manejo agronómico de los cultivos, los biorreguladores pueden promover beneficios cualitativos y cuantitativos en la productividad agrícola.

Los biorreguladores son compuestos orgánicos que en concentraciones bajas son capaces de inhibir o modificar procesos morfológicos y fisiológicos en plantas (Macedo y Castro, 2016). Pueden ser clasificados según varios criterios, a saber, según sus efectos inhibitorios o estimulantes, su estructura molecular, o su actividad a nivel vegetal (Cortes *et al.*, 2019). Tradicionalmente se han utilizado biorreguladores en el cultivo *in vitro* y en la propagación vegetativa para mejorar el desarrollo de las plántulas, entre otros variados efectos. Por lo tanto, la aplicación de biorreguladores en los cultivos puede ayudar en el desempeño agronómico de los cultivos.

Estos compuestos también mejoran el rendimiento de los cultivos y sus características cualitativas en la cosecha; mediante la alteración de los niveles hormonales internos o del efecto de hormonas específicas. La concentración, el equilibrio e interacción hormonal, las formas activas, el nivel de sensibilidad de la planta son factores de importancia para el crecimiento y el desarrollo vegetal, aunado a aspectos fisiológicos importantes y a factores externos, como el manejo agronómico y factores del ambiente (Ordoñez Trejo *et al.*, 2023).

Dado que cambios en la productividad de los cultivos, en el crecimiento, en la expresión genética y en el metabolismo celular son respuestas de las plantas afectadas por factores como el estrés, como lo afirman Lambers *et al.*, (2009), los efectos benéficos de los biorreguladores conllevaron a recomendar su uso en diversos cultivos. Estos son una buena alternativa cuando se trata de lidiar con situaciones adversas provocadas por factores bióticos, como la acción mediadora del ácido salicílico en las respuestas de defensa de las plantas ante la infección de fitopatógenos (Lefevere *et al.*, 2020), o al potencializar o inducir respuestas fisiológicas del crecimiento y desarrollo en la propagación vegetativa, en la mejora de la calidad de frutos de uva mediante la aplicación de citoquininas (Rojas *et al.*, 2021) o hasta en la inducción del florecimiento y mejora de la productividad en el cultivo del mango mediante el uso de paclobutrazol (Coelho *et al.*, 2014).

En general los biorreguladores son aplicados vía foliar usando agua como solvente; las formulaciones comerciales deben contener disolventes tensoactivos y coadyuvantes, con el propósito de promover una mejor penetración en la epidermis y demás membranas de la planta; además se debe atender debidamente el tratamiento al cultivo, adecuado a la fase fenológica, y prestar mucha atención a las condiciones ambientales antes y después de la aplicación del biorregulador (Rademacher, 2015).

Diversos biorreguladores son reconocidos por su influencia en el desarrollo y la capacidad de las plantas de tolerar situaciones adversas; como las citocininas, giberelinas, ácido abscísico, auxinas, poliaminas, estrigolactonas, ácido el ascórbico y brasinoesteroides (Zulfiqar y Ashraf, 2020).

El entendimiento sobre la utilización de los biorreguladores vegetales en el manejo agronómico de los cultivos, teniendo en cuenta la interacción cultivo – medio ambiente, es un importante aliado para que los productores los utilicen adecuadamente. Bajo ese contexto, esta revisión recopila

información sobre las propiedades de algunos biorreguladores comunes, su utilización en algunos cultivos, sus efectos y oportunidades para mejorar el desempeño agronómico de los cultivos agrícolas; así como servir de referencia en los campos de la enseñanza e investigación agrícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

Por medio de una revisión bibliográfica de la información disponible en los diversos medios de la literatura existente, se extrajeron aspectos de importancia sobre los biorreguladores. Conceptos, aportes en el manejo de cultivos, mecanismos de acción y potencialidades en los campos de producción, y en la investigación agronómica. La información fue seleccionada de obras de firmeza científica sobre conceptos fundamentales, agronómicos y agroecofisiológicos, como libros, revistas internacionales, bases de datos, periódicos y plataformas de interés.

La metodología de selección de la información incluyó la exploración, selección, análisis criterioso y la interpretación; por lo que se le atribuye a esta obra un carácter cualitativo. La información seleccionada incluyó artículos y otras fuentes que cumplieran con un enfoque pragmático y objetivo, en aporte para mejorar el desempeño, y en consecuencia, la productividad de los cultivos agrícolas.

Los aportes del material citado e interpretado en esta revisión comprenden oportunidades de aprovechamiento del potencial que tienen los biorreguladores, como tecnologías y alternativas, que bien pueden ser mayormente adecuadas y promovidas en beneficio de la productividad, las ciencias agrícolas, la sostenibilidad y la inocuidad en el manejo de cultivos.

Las fuentes de la literatura consultada comprendieron en mayor proporción el idioma inglés, seguido del portugués y el español.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Biorreguladores y su rol en cultivos agrícolas

1.1- Biorreguladores y su relación con los cultivos agrícolas

El concepto de biorreguladores hace referencia a compuestos con acción biológica reguladora en organismos vivos; cuyo efecto puede resultar favorables o desfavorable a los objetivos de una actividad agrícola o relacionada. Estos compuestos promueven, inhiben o modifican procesos morfológicos o fisiológicos en las plantas (Macedo y Castro, 2016; Castro *et al.*, 2017) son análogos a las fitohormonas, y con efectos semejantes, también llamados “Reguladores de Crecimiento” (Sampaio, 2010), o “Biorreguladores” (Castro *et al.*, 2017).

En el caso de los reguladores del crecimiento vegetal (PGRs) (Bhatla y Lal, 2018) se refieren a estos como compuestos naturales o sintéticos que actúan principalmente en bajas concentraciones, afectan procesos metabólicos y de desarrollo en las plantas superiores; a su vez no poseen valor nutritivo, ni tienen efectos fitotóxicos en las dosis adecuadas. Estos autores en su obra separan a

los PGRs en dos categorías, a saber: “verdaderos” y “atípicos”, siendo los verdaderos, aquellos que actúan directamente sobre las acciones de los sistemas hormonales en plantas superiores, y los atípicos, aquellos que provocan un efecto fitotóxico local o transitorio; también citan a los "retardantes del crecimiento" sin especificar a cuál categoría pertenecen.

Entre los biorreguladores conocidos están las hormonas vegetales más comunes: auxinas, giberelinas, citoquininas, retardadores, inhibidores y el etileno, llamados fitohormonas de forma amplia; también se han incluido a este grupo de biorreguladores los brasinoesteroides, jasmonatos, ácido salicílico y poliaminas (Macedo y Castro, 2016; Castro *et al.*, 2017; Castro y Carvalho, 2019).

Para enriquecer mejor esta conceptualización, sugerimos revisar a Bhatla y Lal, (2018), en donde ofrecen una categorización interesante de los principales PGRs, según su ruta biosintética; la cual resumimos en la Tabla 1.

Tabla 1

Categorías de los algunos biorreguladores en plantas, según su ruta de biosíntesis.

Categoría	Ruta biosintética	PGRs
I	Vía de los isoprenoides, a partir del difosfato de isopentenilo	Citoquininas, giberelinas, brasinoesteroides, ácido abscísico y estrigolactonas
II	Derivados de aminoácidos	Ácido indol-3-acético (AIA); serotonina y melatonina derivadas del triptófano; etileno derivado de metionina y poliaminas derivadas de arginina u ornitina; óxido nítrico derivado de la arginina.
III	Derivados de lípidos	Ácido jasmónico derivado del ácido α -linolénico.

Fuente: Adaptado de Bhatla y Lal, (2018).

Los PGRs pueden actuar promoviendo, inhibiendo o modificando el crecimiento vegetal (Sampaio, 2010), que al señalar procesos fisiológicos o de desarrollo (Taiz *et al.*, 2017), producen efectos como el enraizamiento, formación de brotes laterales, crecimiento apical, cierre estomático, el florecimiento, fructificación, entre otros.

A nivel agronómico, la utilización de biorreguladores busca lograr resultados prácticos de interés en la solución de problemas agrícolas de campo, pues los cultivos en la actualidad son vulnerables a condiciones climáticas estresantes, lo que se acentúa cuando existen limitantes en la disponibilidad de tecnologías de manejo nutricional, hídrico y sanitario a un nivel tecnificado, dejando clara la necesidad de implementar estrategias de mitigación, como el uso de compuestos orgánicos compensadores que ayuden principalmente a mantener o mejorar la productividad.

Los biorreguladores ofrecen la oportunidad de ser usados de muchas formas, a fin de realizar un ajuste fino que varía de acuerdo con los intereses de la actividad agrícola, principalmente en las plantas cultivadas en ambientes abiertos, donde existe un alto riesgo debido factores no controlables (Rademacher, 2015).

Aunque el uso de los biorreguladores ha ido en aumento debido a su acción sobre el crecimiento y actividad bioquímica en las plantas, incluso más potente que sus correspondientes análogos naturales, es fundamental considerar factores de importancia como la sensibilidad del cultivar utilizado, su estado fenológico o condición general, dosis y oportunidad de aplicación (Cortes *et al.*, 2019). El mismo biorregulador puede expresar respuestas diferentes, dependiendo del estado de desarrollo de la planta (Raven, 2001).

Los biorreguladores generalmente vienen incluidos dentro de los bioestimulantes agrícolas comerciales, en forma de mezcla junto con nutrientes (Klahold *et al.*, 2006), estos bioestimulantes también incluyen aminoácidos. Su uso ha demostrado excelentes resultados con mejoras significativas en la producción de frutas, en cultivos anuales y perennes, cultivos olerícolas, e incluso en plantas ornamentales (Castro *et al.*, 2017).

1.2- Las fitohormonas y reguladores de crecimiento: una relación con los aminoácidos de las plantas

Existen muchas sustancias endógenas identificadas, capaces de regular el crecimiento vegetal, así como también, involucradas en la señalización de múltiples procesos fisiológicos en las plantas cultivadas; es decir la señalización involucra recepción, interpretación y respuestas a estas señales, que pueden ser de origen físico o químico. Entre las diferentes sustancias responsables de la regulación y señalización de procesos fisiológicos en las plantas, podemos mencionar moléculas orgánicas, compuestos volátiles, iones no orgánicos, péptidos y ácidos ribonucleicos (Smith *et al.*, 2017).

El término fitohormona (FH) u hormonas vegetales se refiere a compuestos sintetizados naturalmente en las células vegetales, pudiendo ser movilizados y utilizados para múltiples procesos fisiológicos específicos; sin embargo, comúnmente este término es utilizado como semejante a regulador de crecimiento vegetal. De acuerdo con la literatura, un regulador de crecimiento vegetal es una sustancia química de síntesis exógena a la planta, capaz de actuar produciendo efectos similares a los causados por las fitohormonas. Por otro lado, una fitohormona tiene origen endógeno en las plantas, es decir que todas las sustancias semejantes en estructura y efecto, sintetizadas por algún método exógeno (xenobiótico) a las plantas, forman parte del grupo de los reguladores de crecimiento vegetal (Cortes *et al.*, 2019; Agudelo-Morales *et al.*, 2021).

Luego del descubrimiento de la primera fitohormona en los años 30's cuando se identificó la auxina ácido indol acético (Davies, 2010), diferentes sustancias han sido reportadas como hormonas vegetales. Algunas son: giberelinas, citoquininas, ácido abscísico, ácido salicílico, poliaminas, ácido jasmónico, brasinoesteroides, estrigolactonas, etileno, óxido nítrico y péptidos (Davies, 2010; Li *et al.*, 2017; Cortes *et al.*, 2019; Agudelo-Morales *et al.*, 2021).

Varias fitohormonas han sido relacionadas con diferentes aminoácidos, pues estos ejercen el rol de precursores. A lo largo de los años, múltiples investigaciones en fisiología y metabolismo de plantas han demostrado que para la síntesis de diversas fitohormonas existe dependencia directa de algunos aminoácidos (Davies, 2010; Qadir *et al.*, 2011; Zhao, 2012; Agudelo-Morales *et al.*, 2021; Kumar y Ohri, 2023; Ullah *et al.*, 2023) (Tabla 2).

Tabla 2

Fitohormonas y sus aminoácidos precursores reportados en la literatura.

Fitohormona	Precursor	Autores
Auxinas	Triptófano	(Zhao, 2012); (Cortes <i>et al.</i> , 2019)
Etileno	Metionina	(Qadir <i>et al.</i> , 2011)
Ácido salicílico	L- Fenilalanina	(Ullah <i>et al.</i> , 2023)
Óxido nítrico	L- arginina	(Astier <i>et al.</i> , 2017)
Poliaminas	Arginina y ornitina	(Davies, 2010)
Péptidos	Aminoácidos aromáticos	(Song <i>et al.</i> , 2017); (Olsson <i>et al.</i> , 2019)

1.2.1- Auxinas

Las auxinas (AUX), ampliamente conocidas y utilizadas en la agricultura, son capaces de regular procesos fisiológicos y morfológicos, entre estos, el alargamiento de estructuras vegetales como el coleóptilo de las semillas en germinación, el crecimiento del tallo, la dominancia apical, la formación de raíces adventicias, la división celular, y también la inhibición de la raíz primaria de las plantas. El uso de las AUX ha demostrado mejorar la productividad de los cultivos al estar involucrada en la regulación de la floración de algunas especies como las bromeliáceas, además en el cuajado y crecimiento de frutos (Burg y Burg, 1966; Godoy *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021). Las auxinas en altas concentraciones han sido utilizadas como agentes para el control de plantas indeseables, donde se destacan el ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), el ácido 2-Metil-4-clorofenoxiacético (MCPA) y el ácido 4-amino-3,5,6-tricloropicolínico (Picloram), conocidos como herbicidas del grupo de las hormonales con acción selectiva (Horton y Fletcher, 1968; Grossmann, 2009).

Se ha planteado que el ácido indolacético, auxina más importante en las plantas al regular la mayoría de los aspectos del crecimiento y desarrollo de las plantas (Tang *et al.*, 2023), es sintetizada principalmente a partir de precursores generados a través de la ruta metabólica del Shikimato, de la cual se derivan diferentes aminoácidos aromáticos (L- triptófano, L- Fenilalanina y L- Tirosina), compuestos alcaloides, ligninas, flavonoides y otros metabolitos aromáticos; siendo el triptófano, el principal precursor de las auxinas (Jiang *et al.*, 2017).

1.2.2- Etileno

La fitohormona etileno es considerada la hormona del estrés vegetal (Van de Poel y de Vries, 2023); relacionada a mecanismos de adaptación y supervivencia en las plantas (Chen *et al.*, 2022). Esta molécula está compuesta por dos átomos de carbono y cuatro de hidrógeno (C₂H₄) es un gas que está involucrado en múltiples eventos fisiológicos y de desarrollo ocurridos en las plantas, desde mecanismos de defensa frente a agentes bióticos, así como una señal ambiental para la

adaptación de las plantas frente a situaciones de estrés abiótico (Hao *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2022).

Esta fitohormona es liberada en respuesta al ataque de herbívoros, está involucrada en la acumulación de diversos compuestos de naturaleza proteica, y también de metabolitos secundarios (Lu *et al.*, 2014). Por otro lado, se ha descubierto su incremento frente a diversas condiciones como sequía, calor, frío, encharcamiento, alta salinidad, estrés por metales pesados, y estrés osmótico (Chen *et al.*, 2022).

El etileno en la agricultura tiene un rol importante tanto en la producción en campo, como en la etapa postcosecha (Iqbal *et al.*, 2017). La síntesis biológica del etileno ha sido extensamente estudiada, y es considerada una de las rutas metabólicas más sencillas. Esta fitohormona es considerada la hormona de la maduración de frutas, actuando por aplicación exógena o por autocatalisis, principalmente en frutas climatéricas (Pholoma, 2020), se sintetiza a partir de la forma activa del aminoácido metionina (S-adenosil metionina) a través de la acción de las enzimas ACC sintasa y ACC oxidasa (Wang *et al.*, 2002).

1.2.3- Ácido salicílico

El ácido salicílico (AS) es un compuesto fenólico (metabolito secundario) hoy en día considerado una biomolécula dentro del grupo de las fitohormonas en plantas; es capaz de regular muchos procesos fisiológicos.

El primer reporte de su presencia en la señalización de plantas fue emitido el 1974 (Maruri-López *et al.*, 2019). Además, está involucrado en la respuesta defensiva (expresión de genes de defensa) de las plantas ante estrés ambiental, o por agentes fitopatógenos; es decir, como inductor de resistencia sistémica local adquirida (Arif, 2015; Lefeverre *et al.*, 2020).

Se han dilucidado dos vías para la síntesis del AS en las plantas, que ocurren simultáneamente, la vía de la enzima isocorismato sintasa (más del 90% de la síntesis del AS) y la vía de la fenilalanina amoniaco-liasa (alrededor de un 10% de la síntesis de AS). En la primera ruta, ocurre la conversión de corismato en una molécula de isocorismato por medio de la enzima isocorismato sintasa (ICS), luego ocurre un proceso de conjugación de la ICS con el aminoácido L-glutamato para formar el compuesto isocorismato-9-glutamato, para después descomponerse y producirse el AS. En la ruta de la fenilalanina amoniaco-liasa (PAL) el aminoácido fenilalanina es transformado por la PAL en ácido trans-cinámico para luego generarse el ácido salicílico (Mishra y Baek, 2021; Kaya *et al.*, 2023).

1.2.4- Óxido nítrico

El óxido nítrico (ON) es una molécula gaseosa producida en respuesta a condiciones del ambiente, y está relacionado con la respuesta defensiva ante diferentes tipos de estrés de origen biótico, como infecciones por bacterias y hongos fitopatógenos, de esta forma es considerado un señalizador químico relacionado con la respuesta adaptativa ante fenómenos estresantes de tipo abiótico, como el déficit nutricional, hídrico, salinidad y exceso de radiación ultravioleta (Mur *et al.*, 2013; Domingos *et al.*, 2015; Simontacchi *et al.*, 2015).

Aunque la presencia de ON en las plantas ha sido bien sustentada, el proceso endógeno de biosíntesis y señalización no ha sido claramente definido; sobre lo cual se cree que las rutas metabólicas para su generación son por medio de la oxidación y reducción; en la primera ruta propuesta se asume que se da por medio de la oxidación del precursor L-arginina denominada vía síntesis L-arginina dependiente, a través de la enzima óxido nítrico sintasa NOS; y el segundo tipo es a través de la reducción no enzimática de nitratos y nitritos a ON (Graska *et al.*, 2023).

1.2.5- Poliaminas

Las poliaminas (PAs) son biomoléculas con actividad biológica significativa en las plantas; las caracteriza el tener un bajo peso molecular, las cuales en su estructura pueden estar conformadas por dos o más aminoácidos. Estas sustancias están presentes en organismos unicelulares y pluricelulares; en el caso de las plantas se han identificados tres formas libres de PAs, estas son la putrescina, espermidina y espermina (Chen *et al.*, 2019; Kapoor, 2023).

Diversos autores (Chen *et al.*, 2019; Walters, 2003), han reportado recientemente que estas biomoléculas están asociadas con múltiples procesos fisiológicos en diferentes etapas de la vida de las plantas (embriogénesis, organogénesis, reproducción, maduración y senescencia); además, se ha comprobado que tiene vinculación en la respuesta frente a agentes estresantes de origen ambiental (salinidad, sequía, exceso de agua, temperatura y otros) y bióticos (endógenos y exógenos), tales como infecciones por hongos y virus.

El primer eslabón en la biosíntesis de las PAs en las plantas inicia con la putrescina, dado que para su formación se han derivado al menos tres rutas metabólicas: la primera ocurre a través de la remoción de un carbono de la arginina, como principal ruta en plantas. La segunda ruta es por medio de la descarboxilación de la ornitina, proveniente de la arginina luego de la acción de la arginasa, y la tercera ruta ocurre debido la conversión de la arginina en citrulina para luego la enzima citrulina descarboxilasa, convertir finalmente la citrulina en putrescina; adicionalmente se cree que las poliaminas están involucradas en la síntesis de etileno y óxido nítrico (Kapoor, 2023).

1.2.6- Péptidos

Los péptidos actualmente han sido considerados como un nuevo tipo de fitohormonas, involucradas en el crecimiento y desarrollo vegetal, así como también en mecanismos de defensa de las plantas, habiéndose reportado al menos 30 familias diferentes de fitohormonas pépticas, estas son constituidas de entre dos a cien aminoácidos, unidos por enlaces peptídicos, existiendo extensa evidencia que asocian a los péptidos con actividad antibacteriana, antifúngica e incluso antiviral, nematocida, insecticida y herbicida (Zhang *et al.*, 2023). También existen reportes de que existen péptidos involucrados en la señalización para la respuesta de las plantas frente a situaciones hostiles de altas temperaturas, sequía, escasez de nutrientes y estrés por salinidad (Kim *et al.*, 2021).

Algunas especies de la familia solanácea como tomate, pimentón y papa tienen la capacidad de producir un péptido de 18 aminoácidos denominado sistemin; esta molécula actúa como señal para inducir la producción de inhibidores de proteasa que pueden suprimir la función de las proteasas endógenas de insectos. En este mismo sentido se ha comprobado que péptidos como las defensinas

vegetales en altas concentraciones, son capaces de inhibir enzimas digestivas de fitopatógenos, como la α -amilasa (Farrokhi *et al.*, 2008).

Respecto a su biosíntesis gran parte de los péptidos vegetales se originan de proteínas precursoras; y son producidos por síntesis no ribosomal, como el glutatión y las fitoquelatinas (Breiden y Simon, 2016).

2. Beneficios en el crecimiento, desarrollo y en la calidad de la producción agrícola

Cuando los biorreguladores se aplican a las plantas también pueden influir en diferentes mecanismos morfológicos y fisiológicos, como la inducción de enzimas y proteínas específicas capaces de preservar el vigor celular, incluso en condiciones de estrés, induciendo en consecuencia una mejor productividad agrícola (Castro y Carvalho, 2019).

Fue demostrado por El-Hady *et al.*, (2021) que la aplicación exógena de ácido salicílico en plantas de tomate, especialmente en los tratamientos de 0.50 mM y 1.00 mM, influyó positivamente en las características de crecimiento y contenido de antioxidantes, respectivamente.

Los productos con acción bioestimulante incluyen biorreguladores de gran interés como las giberelinas (GAs), que también pueden aplicarse para brindar a los procesos esenciales tolerancia bajo situaciones de estrés. Se descubrió que en el tomate el contenido de GAs aumenta en el ovario después de la polinización, así pues, existe dependencia de las GAs una vez se da este proceso; y también en el crecimiento inicial de la planta, específicamente GA₁ que es la forma activa de giberelinas utilizada para inducir el desarrollo de frutos (Serrani *et al.*, 2007), desempeñando un papel importante en el desarrollo de semillas, en el proceso de germinación y control del peso de frutos (Chen *et al.*, 2016).

La baja producción de tubérculos y el tamaño superior al rango óptimo requerido para el procesamiento de papa cultivar Bondi en la industria de papas congeladas, son dos limitantes para su cultivo; sin embargo, el tratamiento con GA₃ aplicado en las semillas previo al sembrado, disminuyó la dominancia apical, incrementó la formación de tubérculos por planta y redujo el tamaño medio de los tubérculos (Herman *et al.*, 2016).

En la industria citrícola el beneficiado de los frutos con GAs ayuda a mantener su coloración verde, retrasando la maduración hasta la entrega a los mercados de destino, y beneficia la vida postcosecha (Porat *et al.*, 2001; Jomori *et al.*, 2003; Corella *et al.*, 2020).

Las GAs muestran efectos de gran interés agrícola, principalmente por sus beneficios en la productividad, calidad y vida de almacenamiento en el periodo postcosecha de frutos en diferentes cultivares de pimiento (Bagnazari *et al.*, 2018; Pichardo-González *et al.*, 2018; Ahmed *et al.*, 2022; Singh y Singh, 2022), también en características de importancia como la masa seca de cultivares de pimiento (Maboko y Du Plooy, 2015).

En el cultivo del pimentón, la aplicación precosecha de GA₃ (0,05 g L⁻¹) y CaCl₂ (0,5%), reveló un aumento en la calidad postcosecha de los frutos durante el almacenamiento, mostrando menos daño por frío, mayores niveles de clorofila y mayor actividad antioxidante de la peroxidasa y catalasa, en comparación con el control (Bagnazari *et al.*, 2018).

Las GAs son conocidas como biorreguladores con un efecto promotor del crecimiento y el alargamiento celular. Por otro lado, existen otros reguladores del crecimiento vegetal, con efectos inhibidores, antagonistas de las giberelinas y las auxinas. Entre estos, el Paclobutrazol (PBZ) que actúa inhibiendo la biosíntesis de giberelinas y ha sido utilizado en agricultura para reducir la altura de las plantas, evitando el efecto de acame en los cultivos; para protección contra estreses abióticos relacionados con déficit hídrico, frío, salinidad, y también promueve mejoras en el rendimiento y en la calidad de los frutos (Desta y Amare, 2021).

El paclobutrazol, perteneciente al grupo químico de los triazoles, actúa bloqueando la biosíntesis de giberelina en la vía terpenoide, uniéndose a otras moléculas e inhibiendo enzimas que catalizan reacciones metabólicas, provocando la supresión del crecimiento de las plantas (Chaney, 2005). El bloqueo de la síntesis de giberelinas es el resultado de la inhibición de reacciones catalizadas por la enzima kaureno oxidasa, sin embargo, este efecto inhibitor resultante de la acción de los triazoles promueve una reducción del crecimiento vegetativo y puede inducir la floración (Taiz *et al.*, 2017). No obstante, las respuestas inhibitorias de la síntesis de GAs debido a la acción del paclobutrazol, también conducen a desviaciones de compuestos intermedios acumulados, lo que permite un aumento del ácido abscísico y otros componentes importantes capaces de promover muchos beneficios, incluyendo una mayor tolerancia al estrés abiótico y resistencia a enfermedades (Rademacher, 1997; Chaney, 2005).

En maní, la aplicación de paclobutrazol fue sugerida por Zhao *et al.*, (2023), como práctica con mayor potencial para la producción. En sus estudios se observó que la aplicación de PBZ a dosis de 100 mg L⁻¹ a una densidad de siembra de 2.85 × 10⁵ plantas ha⁻¹ incrementó el rendimiento de vainas de maní, redujo el porcentaje de acame, disminuyó la altura de las plantas y mejoró la capacidad fotosintética.

En el cultivo de papa, las aplicaciones foliares de paclobutrazol a dosis de 120 mg L⁻¹ en la fase previa a la tuberización, aumentaron el número de tubérculos y redujeron su tamaño sin disminuir la productividad, también disminuyó el crecimiento de las hojas. Estos resultados son interesantes ya que permiten la producción de tubérculos de tamaño mediano que satisfacen las demandas del mercado, especialmente cuando se trata de cultivares que generalmente producen tubérculos exageradamente grandes (Ellis *et al.*, 2020).

En otros estudios con papa, se observó que con la aplicación de paclobutrazol a los 28 días de la siembra, además de reducir la longitud del tallo y aumentar su diámetro, se observó un aumento significativo en la productividad (Mabvongwe *et al.*, 2016). Los autores indicaron que estos resultados se deben a que se distribuyeron más fotoasimilados para el crecimiento y desarrollo de los tubérculos, ya que el efecto de la aplicación redujo el crecimiento vegetativo, y la longitud del tallo en estos tratamientos.

Como inhibidor de la síntesis de GA, el paclobutrazol también es una gran referencia para inducir la floración en algunas especies de frutales. La eficiencia de los efectos del PBZ sobre la planta lo caracteriza como un producto esencial ampliamente utilizado en las regiones productoras de mango de países como Brasil, por ejemplo, donde permite una floración uniforme y un escalado de producción durante todo el año (Oliveira, 2020).



Fue demostrado por Oliveira *et al.* (2020), que con el uso de paclobutrazol para la inducción floral en mango cultivar Palmer se observó diferenciación floral en trece días posteriores, donde se formaron los ejes de las inflorescencias y se inició el desarrollo las primeras flores.

El efecto de diferentes dosis de paclobutrazol fue estudiado en mango irrigado cultivar Rosa de ocho años. Los resultados indicaron un aumento y anticipación de la floración y consecuentemente mayor productividad de frutos en plantas en las que se aplicó PBZ en drench, a una dosis de 0.80 g p.a.m⁻¹ (gramos por metro de dosel) (Cardoso *et al.*, 2007). Esta anticipación permite producir frutas fuera de temporada, lo que la hace interesante para el productor que busca una mayor rentabilidad, proporcionada por un mejor precio durante este período en el que hay mayor escasez de ofertas.

Por otro lado, con el uso de PBZ aplicado vía suelo en la dosis de 1.5 g por metro de diámetro de dosel en mango irrigado cultivar Tommy Atkins de 4 a 5 años, se obtuvo un porcentaje de floración del 88% (Coelho *et al.*, 2014). También Ferreira *et al.*, (2020) evaluando dosis, observo que 1.4 g a.i.m⁻¹ (gramos por metro lineal de dosel), fue la más eficiente en mango cultivar Tommy Atkins de ocho años, logrando mayor número de frutos y producción por planta cuando se aplicó mediante el sistema de riego.

Además de la dosis, se recalca la relevancia de tener en cuenta algunos factores importantes para la exitosa floración del cultivo, combinado con la alicación del producto, como los tipos de cultivares; edad y vigor de las plantas; nutrición mineral; manejo del riego y poda, ya que todos estos influyen en la respuesta de las plantas al uso de PBZ (Oliveira, 2020).

2.1- Efectos en la asimilación de nutrientes y en el transporte de asimilados fotosintéticos

En cuanto a los biorreguladores, las citoquininas tienen especial importancia en la absorción y transporte de nutrientes, ya que este biorregulador al ser promotor del crecimiento, estimula la división celular. Por lo tanto, ejerce un importante rol en el crecimiento radicular (Izhar *et al.*, 2022) y en la translocación de fotoasimilados (Yang *et al.*, 2016).

La interacción entre citoquininas y auxinas regula la dominancia apical, siendo las citoquininas importantes en la movilización de nutrientes, en el desarrollo floral y en la regulación del mecanismo fuente-sumidero para la distribución de fotoasimilados en la planta (Bertolin *et al.*, 2010), además de las evidencias de que su biosíntesis promueve la respuesta del córtex de la raíz en el proceso de nodulación en fabáceas (Reid *et al.*, 2017).

El tratamiento con la citoquinina CPPU (forclorfenurón, N-(2-cloro-4-piridinil)-N'-fenilurea) en inflorescencias de uva cultivar Thompsons seedless en etapas pre-antesis produjeron frutos más grandes, de mejor calidad, y con mayor firmeza en la cosecha (Jáuregui-Riquelme *et al.*, 2017; Rojas *et al.*, 2021); lo cual sugiere que las citoquininas ejercen un rol importante en el transporte y contenido de calcio, actuando en el metabolismo de la pared celular de frutos en desarrollo, lo cual fue correlacionado con ovarios mayores observados en la antesis y un mayor número de células en el mesocarpio externo (Rojas *et al.*, 2021).

Es realmente interesante el efecto que promueven las citoquininas en la relación fuente-sumidero en plantas cultivadas. El tejido tratado con citoquininas se comporta como un fuerte sumidero, es decir, canaliza los fotoasimilados en su dirección; como sucede en las raíces de plantas con alta demanda de nutrientes, en donde se estimula el crecimiento radicular al aumentar el nivel de citoquininas en las mismas (Bhatla y Lal, 2018). En concordancia, con la aplicación exógena de citoquininas, fue observado por Yang *et al.*, (2016) un efecto de distribución acelerado de fotoasimilados hacia el sumidero en el cultivo del trigo, comprobado por la alta acumulación de carbohidratos en el llenado del grano.

2.2- Incrementando la tolerancia a factores abióticos estresantes, y las defensas ante factores bióticos.

Recientemente Siddiqui *et al.*, (2020) estudiaron el papel del óxido nítrico al aplicar vía foliar 100 μM de nitroprusiato de sodio (SNP) como donador de ON en plántulas de tomate bajo estrés nutricional por deficiencia de azufre, reduciendo la concentración de especies reactivas de oxígeno (ROS) en hojas y raíces, lo que alivió la peroxidación lipídica.

En otro estudio reciente, Badem y Söylemez, (2022) evaluaron el efecto del óxido nítrico y el silicio sobre pimentones dulces cultivar Mert F1 sometidos a estrés salino.; observando que la aplicación de óxido nítrico aumentó la materia seca en tallos, hojas y raíces, además de un aumento de la biomasa y del peso de los frutos; demostrando posibles sus beneficios en el rendimiento comercializable de hortalizas de fruto bajo estrés salino.

En relación al déficit hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum*), la aplicación foliar de ácido salicílico fue eficiente en reducir los efectos causados por el estrés, influyendo positivamente en los parámetros de asimilación de CO_2 , conductancia estomática, transpiración, eficiencia de carboxilación y producción de frutos de las plantas sometidas a déficit hídrico continuo (Aires *et al.*, 2022). En concordancia, recientemente Chen *et al.*, (2023) relataron que una excelente manera de promover la producción sostenible de cultivos agrícolas es el uso de ácido salicílico, el cual, en pequeñas dosis en el manejo de cultivos, aumenta la resistencia contra los impactos negativos del estrés abiótico en la planta.

Se observó que los tratamientos radiculares con aplicación exógena de glutamato indujeron resistencia a enfermedades sistémicas como el añublo del arroz, y los resultados proporcionaron evidencia de que esta inducción sistémica de la respuesta de defensa por aminoácidos depende parcialmente del ácido salicílico (Kadotani *et al.*, 2016).

También fue verificado por Li *et al.*, (2019) que la aplicación de ácido salicílico (AS) puede aumentar la resistencia de las plantas de tomate al TYLCV (Tomato yellow leaf curl virus), influyendo en la actividad de las enzimas e induciendo la expresión de genes que eliminan ROS. Los autores sugirieron que el AS puede utilizarse como factor inductor de resistencia en los métodos de control para prevenir y tratar la enfermedad.

La aplicación exógena de bajas concentraciones de ácido salicílico (1 y 3 mM) durante la postcosecha en melones cultivar Hami, mostro una mejor tolerancia de los frutos al daño por frío (Song *et al.*, 2022); indicando que esta fitohormona también está involucrada en la respuesta al

estrés por factores abióticos. En concordancia Zhang *et al.*, (2022), observaron efectos beneficiosos en la vida útil al reducir la pérdida de peso, evitando el deterioro y mejorando el brillo de frutos de fresa al evaluar la combinación de luz azul LED y ácido salicílico (2 mM) luego de la cosecha.

En el cultivo del arroz, Kantharaj *et al.*, (2022) evaluaron el efecto de la aplicación de ácido indol acético (AIA) como protector de semillas, frente a la hidroxiurea (HU), agente nocivo para el ADN vegetal al incrementar la producción de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) que se genera cuando existe algún estrés ambiental. Los resultados de este experimento mostraron que al aplicar HU (1 mM de) +AIA (0.3 mM) hubo una mejor tolerancia de las plántulas de arroz bajo estrés por hidroxiurea, reduciendo la acumulación de ROS.

Otros biorreguladores fueron aplicados junto a diferentes enmiendas de suelos frente al estrés salino en el cultivo de trigo. En un estudio realizado por Khedr *et al.*, (2022), al realizar la aplicación de la auxina ácido naftalenoacético en una dosis de 30 mg L^{-1} a los 30 y 45 días después de la siembra, fue observado un aumento de la actividad de la catalasa (CAT). Esta enzima está relacionada a la tolerancia al estrés en plantas mediante la eliminación de peróxido de hidrógeno (Barbosa *et al.*, 2014), el cual es una ROS con participación contribuyendo al estrés oxidativo en plantas proteínas, pudiendo afectar a componentes celulares importantes, lípidos de membrana e inducir la muerte celular programada (Habibi, 2014). Además, se encontró mayor rendimiento en grano, plantas más altas y un contenido de clorofila superior respecto al tratamiento control, indicando una buena respuesta del uso de esta auxina en la tolerancia a estrés.

CONCLUSIONES

La acción de los biorreguladores sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos puede generar un fenotipo con mejor desempeño agronómico e incrementar la productividad agrícola en general.

En el presente escenario de eventos climáticos adversos, que involucran factores estresantes para los cultivos agrícolas, la aplicación de biorreguladores representa una alternativa para que los productores potencialicen o mejoren el comportamiento de sus cultivos, mediante los diferentes efectos que estos ofrecen; con lo que consecuentemente podrán aumentar la productividad y los atributos de calidad de las cosechas.

La información sobre la acción de los biorreguladores en las plantas goza de una buena difusión; no obstante, existe necesidad de explorar aún más los efectos de diferentes biorreguladores en diferentes cultivos; lo que crea un interesante nicho de desarrollo para la investigación agrícola en términos de recomendaciones prácticas en el manejo agronómico de diferentes cultivos.



REFERENCIAS

- Agudelo-Morales, C., Lerma, T., Martínez, J., Palencia, M., y Combatt, E. (2021). Phytohormones and Plant Growth Regulators - A Review. *Journal of Science with Technological Applications*, 10, 27–65. <https://doi.org/10.34294/j.jsta.21.10.66>
- Ahmed, I. H. M., Ali, E. F., Gad, A. A., Bardisi, A., El-Tahan, A. M., Abd Esadek, O. A., El-Saadony, M. T., y Gendy, A. S. (2022). Impact of plant growth regulators spray on fruit quantity and quality of pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars grown under plastic tunnels. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(4), 2291–2298. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.11.062>
- Aires, E. S., Ferraz, A. K. L., Carvalho, B. L., Teixeira, F. P., Putti, F. F., de Souza, E. P., Rodrigues, J. D., y Ono, E. O. (2022). Foliar Application of Salicylic Acid to Mitigate Water Stress in Tomato. *Plants*, 11(13), 1775. <https://doi.org/10.3390/plants11131775>
- Arif, T. (2015). Salicylic acid as a peeling agent: A comprehensive review. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology*, 8, 455–461. <https://doi.org/10.2147/CCID.S84765>
- Astier, J., Gross, I., y Durner, J. (2017). Nitric oxide production in plants: An update. *Journal of Experimental Botany*, 69(14), 3401–3411. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx420>
- Badem, A., y Söylemez, S. (2022). Effects of nitric oxide and silicon application on growth and productivity of pepper under salinity stress. *Journal of King Saud University - Science*, 34(6), 102189. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102189>
- Bagnazari, M., Saidi, M., Mohammadi, M., Khademi, O., y Nagaraja, G. (2018). Pre-harvest CaCl₂ and GA₃ treatments improve postharvest quality of green bell peppers (*Capsicum annuum* L.) during storage period. *Scientia Horticulturae*, 240(5), 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.043>
- Barbosa, M. R., Silva, M. M. de A., Willadino, L., Ulisses, C., y Camara, T. R. (2014). Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. *Ciencia Rural*, 44(3), 453–460. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000300011>
- Bertolin, D. C., de Sa, M. E., Arf, O., Furlani, E. J., Colombo, A. de S., y de Carvalho, F. L. B. M. (2010). Increase of the productivity of the soybean crop with the application of biostimulants. *Bragantia*, 69(2), 339–347. <https://doi.org/10.1590/s0006-87052010000200011>
- Bhatla, S. C., y A. Lal, M. (2018). Plant Physiology, Development and Metabolism. In Springer (Ed.), *Plant Physiology, Development and Metabolism*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1_32
- Breiden, M., y Simon, R. (2016). QyA: How does peptide signaling direct plant development? *BMC Biology*, 14(1), 1–7. <https://doi.org/10.1186/s12915-016-0280-3>



- Burg, S. P., y Burg, E. A. (1966). Auxin-Induced Ethylene Formation: Its Relation to Flowering in the Pineapple. *Science*, 152(3726), 1269. <https://doi.org/10.1126/science.152.3726.1269>
- Cardoso, M. G. S., São José, A. R., Viana, A. E. S., Matsumoto, S. N., y Rebouças, T. N. H. (2007). Florescimento e frutificação de manga (Mangifera indica L.) Cv. Rosa promovidos por diferentes doses de paclobutrazol. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 29(2), 209–212. <https://doi.org/10.1590/s0100-29452007000200004>
- Castro, P., y Carvalho, M. (2019). Biorreguladores e bioestimulantes agrícolas. In *Produtor Rural* 71(1).
- Castro, P., Carvalho, M., Mendes, A. C., y Angelini, B. (2017). *Manual de estimulantes vegetais: nutrientes, biorreguladores, bioestimulantes, bioativadores, fosfitos e biofertilizantes na agricultura tropical* (A. Ceres, Ed.). Agronômica Ceres.
- Chaney, W. R. (2005). Growth retardants : A promising tool for managing urban trees. In *Purdue Extension*, 1–5.
- Chen, S., Wang, X., Zhang, L., Lin, S., Liu, D., Wang, Q., Cai, S., El-Tanbouly, R., Gan, L., Wu, H., y Li, Y. (2016). Identification and characterization of tomato gibberellin 2-oxidases (GA2oxs) and effects of fruit-specific SIGA2ox1 overexpression on fruit and seed growth and development. *Horticulture Research*, 3(10), 1–9. <https://doi.org/10.1038/hortres.2016.59>
- Chen, D., Shao, Q., Yin, L., Younis, A., y Zheng, B. (2019). Polyamine function in plants: Metabolism, regulation on development, and roles in abiotic stress responses. *Frontiers in Plant Science*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01945>
- Chen, H., Bullock, D. A., Alonso, J. M., y Stepanova, A. N. (2022). To fight or to grow: The balancing role of ethylene in plant abiotic stress responses. *Plants*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/plants11010033>
- Chen, S., Zhao, C. B., Ren, R. M., y Jiang, J. H. (2023). Salicylic acid had the potential to enhance tolerance in horticultural crops against abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 14(2), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1141918>
- Coelho, E. F., Batista, L. dos S., y Alves, A. A. C. (2014a). Flowering and Fruit Set of Mango in Different Doses of Paclobutrazol (PBZ). *Enciclopedia Biosfera*, 10(19), 1117–1123.
- Corella, R. I. C., De Figueiredo, A. C., Arrieta, R. G., y Jacomino, A. P. (2020). Ácido giberélico y cera de carnauba prolongan la calidad del limón persa (Citrus latifolia Tanaka) durante el almacenamiento. *Revista Científica Semilla Del Este*, 1(1), 7.
- Cortes, J., Acero, J., Cortés, J., y Mora, R. (2019a). Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *Nova*, 17(32), 109–129.



- Davies, P. J. (2010). The Plant Hormones: Their Nature, Occurrence, and Functions. In P. J. Davies (Ed.), *The Plant Hormones: Their Nature, Occurrence, and Functions*, 1–15. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2686-7_1
- Desta, B., y Amare, G. (2021). Paclobutrazol as a plant growth regulator. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00199-z>
- Domingos, P., Prado, A. M., Wong, A., Gehring, C., y Feijo, J. A. (2015). Nitric oxide: A multitasked signaling gas in plants. *Molecular Plant*, 8(4), 506–520. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2014.12.010>
- El-Hady, N. A. A. A., ElSayed, A. I., El-saadany, S. S., Deligios, P. A., y Ledda, L. (2021). Exogenous application of foliar salicylic acid and propolis enhances antioxidant defenses and growth parameters in tomato plants. *Plants*, 10(1), 74. <https://doi.org/10.3390/plants10010074>
- Ellis, G. D., Knowles, L. O., y Knowles, N. R. (2020). Increasing the Production Efficiency of Potato with Plant Growth Retardants. *American Journal of Potato Research*, 97(1), 88–101. <https://doi.org/10.1007/s12230-019-09759-y>
- Farrokhi, N., Whitelegge, J. P., y Brusslan, J. A. (2008). Plant peptides and peptidomics. *Plant Biotechnology Journal*, 6(2), 105–134. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2007.00315.x>
- Ferreira, K. M., Simões, W. L., Mouco, M. A. do C., Silva, J. L. da, Silva, J. S. da, y Mesquita, A. C. (2020). Manejo da aplicação do paclobutrazol na produção e qualidade de mangas ‘Tommy Atkins.’ *Research, Society and Development*, 9(8), e348984894. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i8.4894> Manejo
- Godoy, F., Kühn, N., Muñoz, M., Marchandon, G., Gouthu, S., Deluc, L., Delrot, S., Lauvergeat, V., y Arce-Johnson, P. (2021). The role of auxin during early berry development in grapevine as revealed by transcript profiling from pollination to fruit set. *Horticulture Research*, 8(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00568-1>
- Graska, J., Fidler, J., Gietler, M., Prabucka, B., Nykiel, M., y Labudda, M. (2023). Nitric Oxide in Plant Functioning: Metabolism, Signaling, and Responses to Infestation with Ecdysozoa Parasites. *Biology*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/biology12070927>
- Grossmann, K. (2009). Auxin herbicides: Current status of mechanism and mode of action. *Pest Management Science*, 66(2), 113–120. <https://doi.org/10.1002/ps.1860>
- Habibi, G. (2014). Chapter 19 - Hydrogen Peroxide (H₂O₂) Generation, Scavenging and Signaling in Plants. In P. Ahmad (Ed.), *Oxidative Damage to Plants*, 557–584. Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799963-0.00019-8>
- Hao, D., Sun, X., Ma, B., Zhang, J.-S., y Guo, H. (2017). Ethylene. In J. Li, C. Li, y S. M. B. T.-H. M. and S. in P. Smith (Eds.), *Hormone Metabolism and Signaling in Plants*, 203–241. Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811562-6.00006-2>



- Herman, D. J., Knowles, L. O., y Knowles, N. R. (2016). Differential Sensitivity of Genetically Related Potato Cultivars to Treatments Designed to Alter Apical Dominance, Tuber Set and Size Distribution. *American Journal of Potato Research*, 93(4), 331–349. <https://doi.org/10.1007/s12230-016-9507-7>
- Horton, R. F., y Fletcher, R. A. (1968). Transport of the Auxin, Picloram, Through Petioles of Bean and Coleus and Stem Sections of Pea. *Plant Physiology*, 43(12), 2045–2048. <https://doi.org/10.1104/pp.43.12.2045>
- Iqbal, N., Khan, N. A., Ferrante, A., Trivellini, A., Francini, A., y Khan, M. I. R. (2017). Ethylene role in plant growth, development and senescence: interaction with other phytohormones. *Frontiers in Plant Science*, 8(4), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00475>
- Izhar, S., Rizvi, S., Sahab, A., y Afaq, U. (2022). *Plant growth regulators-Physiological role and agricultural uses*.
- Jáuregui-Riquelme, F., Kremer-Morales, M. S., Alcalde, J. A., y Pérez-Donoso, A. G. (2017). Pre-anthesis CPPU Treatment Modifies Quality and Susceptibility to Post-harvest Berry Cracking of *Vitis vinifera* cv. ‘Thompson Seedless.’ *Journal of Plant Growth Regulation*, 36(2), 413–423. <https://doi.org/10.1007/s00344-016-9649-3>
- Jiang, Z., Li, J., y Qu, L.-J. (2017). Auxins. In J. Li, C. Li, y S. M. B. T.-H. M. and S. in P. Smith (Eds.), *Hormone Metabolism and Signaling in Plants* (pp. 39–76). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811562-6.00002-5>
- Jomori, M. L., Kluge, R. A., Jacomino, A. P., y Tavares, S. (2003). Conservação refrigerada de lima ácida “tahiti”: uso de 1-metilciclopropeno, ácido giberélico e cera. *Rev. Bras. Frutic*, 25(3), 406–409.
- Kadotani, N., Akagi, A., Takatsuji, H., Miwa, T., y Igarashi, D. (2016). Exogenous proteinogenic amino acids induce systemic resistance in rice. *BMC Plant Biology*, 16(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0748-x>
- Kantharaj, V., Ramasamy, N. K., Yoon, Y. E., Cheong, M. S., Kim, Y. N., Lee, K. A., Kumar, V., Choe, H., Kim, S. Y., Chohra, H., y Lee, Y. B. (2022). Auxin-Glucose Conjugation Protects the Rice (*Oryza sativa* L.) Seedlings Against Hydroxyurea-Induced Phytotoxicity by Activating UDP-Glucosyltransferase Enzyme. *Frontiers in Plant Science*, 12(2), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.767044>
- Kapoor, R. T. (2023). *Chapter 13 - Role of polyamines in plants under abiotic stresses: regulation of biochemical interactions* (M. Ghorbanpour y M. B. T.-P. S. M. Adnan Shahid, Eds.; pp. 209–220). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89871-3.00023-9>
- Kaya, C., Ugurlar, F., Ashraf, M., y Ahmad, P. (2023). Salicylic acid interacts with other plant growth regulators and signal molecules in response to stressful environments in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 196(11), 431–443. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.02.006>



- Khedr, R. A., Sorour, S. G. R., Aboukhadrah, S. H., El Shafey, N. M., Abd Elsalam, H. E., El-Sharnouby, M. E., y El-Tahan, A. M. (2022). Alleviation of salinity stress effects on agro-physiological traits of wheat by auxin, glycine betaine, and soil additives. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(1), 534–540. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.09.027>
- Kim, J. S., Jeon, B. W., y Kim, J. (2021). Signaling Peptides Regulating Abiotic Stress Responses in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 12(11), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.704490>
- Klahold, C. A., Guimarães, V. F., Echer, M. D. M., Klahold, A., Contiero, R. L., y Becker, A. (2006). Resposta da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) à ação de bioestimulante. *Acta Scientiarum. Agronomy*.
- Kumar, D., y Ohri, P. (2023). Say “NO” to plant stresses: Unravelling the role of nitric oxide under abiotic and biotic stress. *Nitric Oxide - Biology and Chemistry*, 130(11), 36–57. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2022.11.004>
- Lambers, H., Chapin III, F. S., y Pons, T. L. (2009). Plant physiological ecology. In *Choice Reviews Online* 46(8). <https://doi.org/10.5860/choice.46-4432>
- Lefevre, H., Bauters, L., y Gheysen, G. (2020b). Salicylic Acid Biosynthesis in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 11(4), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00338>
- Li, J., Li, C., y Smith, S. (2017). *Hormone Metabolism and Signaling in Plants* (J. Li, C. Li, y S. M. B. T.-H. M. and S. in P. Smith, Eds.). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811562-6.01001-X>
- Li, T., Huang, Y., Xu, Z. S., Wang, F., y Xiong, A. S. (2019). Salicylic acid-induced differential resistance to the Tomato yellow leaf curl virus among resistant and susceptible tomato cultivars. *BMC Plant Biology*, 19(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1784-0>
- Lu, J., Li, J., Ju, H., Liu, X., Erb, M., Wang, X., y Lou, Y. (2014). Contrasting effects of ethylene biosynthesis on induced plant resistance against a chewing and a piercing-sucking herbivore in rice. *Molecular Plant*, 7(11), 1670–1682. <https://doi.org/10.1093/mp/ssu085>
- Maboko, M. M., y Du Plooy, C. P. (2015). Effect of plant growth regulators on growth, yield, and quality of sweet pepper plants grown hydroponically. *HortScience*, 50(3), 383–386. <https://doi.org/10.21273/hortsci.50.3.383>
- Mabvongwe, O., Manenji, B. T., Gwazane, M., y Chandiposha, M. (2016). The Effect of Paclobutrazol Application Time and Variety on Growth, Yield, and Quality of Potato (*Solanum tuberosum* L.). *Advances in Agriculture*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/1585463>
- Macedo, W. R., y Castro, P. R. de C. e. (2016). Biorreguladores, bioestimulantes e bioativadores na agricultura tropical. *Avanços Tecnológicos Aplicados à Pesquisa Na Produção Vegetal*, November 2015, 530.



- Maruri-López, I., Aviles-Baltazar, N. Y., Buchala, A., y Serrano, M. (2019). Intra and extracellular journey of the phytohormone salicylic acid. *Frontiers in Plant Science*, 10(4), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00423>
- Mishra, A. K., y Baek, K. H. (2021). Salicylic acid biosynthesis and metabolism: A divergent pathway for plants and bacteria. *Biomolecules*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/biom11050705>
- Mur, L. A. J., Mandon, J., Persijn, S., Cristescu, S. M., Moshkov, I. E., Novikova, G. V., Hall, M. A., Harren, F. J. M., Hebelstrup, K. H., y Gupta, K. J. (2013). Nitric oxide in plants: An assessment of the current state of knowledge. *AoB PLANTS*, 5, 1–17. <https://doi.org/10.1093/aobpla/pls052>
- Oliveira, G. P. (2020). Uso do paclobutrazol na produção de manga. *Research, Society and Development*, 9(7), e939975183. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.5183>
- Oliveira, M. B., Figueiredo, M. G. F., Pereira, M. C. T., Mouco, M. A. do C., Ribeiro, L. M., y Mercadante-Simões, M. O. (2020). Structural and cytological aspects of mango floral induction using paclobutrazol. *Scientia Horticulturae*, 262(11), 109057. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109057>
- Olsson, V., Joos, L., Zhu, S., Gevaert, K., Butenko, M. A., y De Smet, I. (2019). Look Closely, the Beautiful May Be Small: Precursor-Derived Peptides in Plants. *Annual Review of Plant Biology*, 70, 153–186. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040413>
- Ordoñez Trejo, E. J., Brizzolara, S., Cardillo, V., Ruperti, B., Bonghi, C., y Tonutti, P. (2023). The impact of PGRs applied in the field on the postharvest behavior of fruit crops. *Scientia Horticulturae*, 318(1). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112103>
- Pholoma, S. B. (2020). Is Ethylene the Ripening Hormone. *Journal of Experimental Agriculture International*, 42(5), 1–7. <https://doi.org/10.9734/jeai/2020/v42i530510>
- Pichardo-González, J. M., Guevara-Olvera, L., Couoh-Uicab, Y. L., González-Cruz, L., Bernardino-Nicanor, A., Medina, H. R., González-Chavira, M. M., y Acosta-García, G. (2018). Efecto de las giberelinas en el rendimiento de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(5), 925–934. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i5.1502>
- Porat, R., Feng, X., Huberman, M., Galili, D., Gore, R., y Goldschmidt, E. (2001). Gibberellic acid slows postharvest degreening of “Oroblanco” citrus fruits. *HortScience*, 36(5), 937–940.
- Qadir, A., Hewett, E. W., Long, P. G., y Dille, D. R. (2011). A non-ACC pathway for ethylene biosynthesis in *Botrytis cinerea*. *Postharvest Biology and Technology*, 62(3), 314–318. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.06.003>
- Rademacher, W. (1997). Bioregulation in crop plants with inhibitors of gibberellin biosynthesis. *Proceedings Plant Growth Regulation Society Of America Annual Meeting*, 24, 27–31.



- Rademacher, W. (2015). Plant Growth Regulators: Backgrounds and Uses in Plant Production. *Journal of Plant Growth Regulation*, 34(4), 845–872. <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9541-6>
- Raven, P. H. (2001). *Biología vegetal*. (R. F. Evert, S. E. Eichhorn, A. P. P. Costa, y A. Salatino, Eds.; 6th ed.). Guanabara Koogan.
- Reid, D., Nadzieja, M., Novák, O., Heckmann, A. B., Sandal, N., y Stougaard, J. (2017). Cytokinin biosynthesis promotes cortical cell responses during nodule development. *Plant Physiology*, 175(1), 361–375. <https://doi.org/10.1104/pp.17.00832>
- Rojas, B., Suárez-Vega, F., Saez-Aguayo, S., Olmedo, P., Zepeda, B., Delgado-Rioseco, J., Defilippi, B. G., Pedreschi, R., Meneses, C., Pérez-Donoso, A. G., y Campos-Vargas, R. (2021a). Pre-anthesis cytokinin applications increase table grape berry firmness by modulating cell wall polysaccharides. *Plants*, 10(12), 1–19. <https://doi.org/10.3390/plants10122642>
- Sampaio, E. (2010). *Fisiología vegetal teoría e experimentos*. Editora UEPG.
- Serrani, J. C., Sanjuán, R., Ruiz-Rivero, O., Fos, M., y García-Martínez, J. L. (2007). Gibberellin regulation of fruit set and growth in tomato. *Plant Physiology*, 145(1), 246–257. <https://doi.org/10.1104/pp.107.098335>
- Siddiqui, M. H., Alamri, S., Alsubaie, Q. D., Ali, H. M., Khan, M. N., Al-Ghamdi, A., Ibrahim, A. A., y Alsadon, A. (2020). Exogenous nitric oxide alleviates sulfur deficiency-induced oxidative damage in tomato seedlings. *Nitric Oxide - Biology and Chemistry*, 94(7), 95–107. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2019.11.002>
- Simontacchi, M., Galatro, A., Ramos-Artuso, F., y Santa-María, G. E. (2015). Plant survival in a changing environment: The role of nitric oxide in plant responses to abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 6(11), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00977>
- Singh, S., y Singh, T. (2022). Effect of Gibberellic Acid and Naphthalene Acetic Acid on Growth, Yield and Quality of Chilli (*Capsicum annum* L.). *International Journal of Environment and Climate Change*, 8(2), 1239–1244. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2022/v12i1131100>
- Smith, S. M., Li, C., y Li, J. (2017). Hormone function in plants. In J. Li, C. Li, y S. M. B. T.-H. M. and S. in P. Smith (Eds.), *Hormone Metabolism and Signaling in Plants* (1–38). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811562-6.00001-3>
- Song, X.-F., Ren, S.-C., y Liu, C.-M. (2017). Peptide hormones. In J. Li, C. Li, y S. M. B. T.-H. M. and S. in P. Smith (Eds.), *Hormone Metabolism and Signaling in Plants* (pp. 361–404). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811562-6.00011-6>
- Song, W., Zhang, P., Zhang, H., Xue, Y., Zhang, Q., Ning, M., Zhao, X., Cai, W., Liu, X., Zhang, X., Tang, F., y Shan, C. (2022). A low concentration of exogenous salicylic acid enhances cold tolerance in Hami melons (*Cucumis melo* var. *saccharinus*) by modulating salicylic



- acid-response CmGST genes. *Postharvest Biology and Technology*, 193(7), 112034. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112034>
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., y Murphy, A. (2017). *Fisiología e desenvolvimento vegetal*. (L. Taiz, E. Zeiger, I. M. Moller, A. Murphy, A. A. Mastroberti, y P. L. de Oliveira, Eds.). Artmed Editora LTDA.
- Tang, J., Li, Y., Zhang, L., Mu, J., Jiang, Y., Fu, H., Zhang, Y., Cui, H., Yu, X., y Ye, Z. (2023). Biosynthetic Pathways and Functions of Indole-3-Acetic Acid in Microorganisms. In *Microorganisms* (Vol. 11, Issue 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/microorganisms11082077>
- Ullah, C., Chen, Y. H., Ortega, M. A., y Tsai, C. J. (2023). The diversity of salicylic acid biosynthesis and defense signaling in plants: Knowledge gaps and future opportunities. *Current Opinion in Plant Biology*, 72, 102349. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2023.102349>
- Van de Poel, B., y de Vries, J. (2023). Evolution of ethylene as an abiotic stress hormone in streptophytes. *Environmental and Experimental Botany*, 214(7), 105456. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105456>
- Walters, D. R. (2003). Polyamines and plant disease. *Phytochemistry*, 64(1), 97–107. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(03\)00329-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(03)00329-7)
- Wang, K. L. C., Li, H., y Ecker, J. R. (2002). Ethylene biosynthesis and signaling networks. *Plant Cell*, 14(SUPPL.), 131–151. <https://doi.org/10.1105/tpc.001768>
- Yang, D., Li, Y., Shi, Y., Cui, Z., Luo, Y., Zheng, M., Chen, J., Li, Y., Yin, Y., y Wang, Z. (2016). Exogenous Cytokinins Increase Grain Yield of Winter Wheat Cultivars by Improving Stay-Green Characteristics under Heat Stress. *PLoS ONE*, 11(5), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155437>
- Zhang, S., Gu, X., Shao, J., Hu, Z., Yang, W., Wang, L., Su, H., y Zhu, L. (2021). Auxin Metabolism Is Involved in Fruit Set and Early Fruit Development in the Parthenocarpic Tomato “R35-P.” *Frontiers in Plant Science*, 12(8), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.671713>
- Zhang, Y., Li, S., Deng, M., Gui, R., Liu, Y., Chen, X., Lin, Y., Li, M., Wang, Y., He, W., Chen, Q., Zhang, Y., Luo, Y., Wang, X., y Tang, H. (2022). Blue light combined with salicylic acid treatment maintained the postharvest quality of strawberry fruit during refrigerated storage. *Food Chemistry: X*, 15(6), 100384. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100384>
- Zhang, Y. M., Ye, D. X., Liu, Y., Zhang, X. Y., Zhou, Y. L., Zhang, L., y Yang, X. L. (2023). Peptides, new tools for plant protection in eco-agriculture. *Advanced Agrochem*, 2(1), 58–78. <https://doi.org/10.1016/j.aac.2023.01.003>
- Zhao, J., Lai, H., Bi, C., Zhao, M., Liu, Y., Li, X., y Yang, D. (2023). Effects of paclobutrazol application on plant architecture, lodging resistance, photosynthetic characteristics, and



- peanut yield at different single-seed precise sowing densities. *Crop Journal*, 11(1), 301–310. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.05.012>
- Zhao, Y. (2012). Auxin biosynthesis: A simple two-step pathway converts tryptophan to indole-3-Acetic acid in plants. *Molecular Plant*, 5(2), 334–338. <https://doi.org/10.1093/mp/ssr104>
- Zulfiqar, F., y Ashraf, M. (2020). Bioregulators : unlocking their potential role in regulation of the plant oxidative defense system. In *Plant Molecular Biology* 0123456789). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11103-020-01077-w>