

Artículo Revisión

Efecto de bioestimulantes naturales sobre la producción de tomate en invernadero

Effect of natural biostimulants on greenhouse tomato production

¹Alfonso Llanderal Quiroz  .

¹Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil-Ecuador

*Autor de correspondencia: Alfonso Llanderal Quiroz 

Recibido: 07-12-2026

Revisado: 14-12-2026

Aceptado: 21-12-2026

Publicado: 28-12-2026

Cómo citar este artículo: Llanderal Quiroz, A. (2026). Efecto de bioestimulantes naturales sobre la producción de tomate en invernadero. Viterra, 4(2), 1-65. <https://viterra.diginova.pro/index.php/viterra/article/view/41>

RESUMEN

La producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo condiciones de invernadero constituye una actividad agrícola de elevada importancia debido a la creciente demanda de frutos con características comerciales y nutricionales de calidad. Sin embargo, la intensificación de los sistemas productivos ha incrementado la utilización de fertilizantes y otros insumos agrícolas, generando la necesidad de desarrollar alternativas sostenibles capaces de mantener o incrementar la productividad. En este contexto, los bioestimulantes naturales representan una estrategia innovadora para favorecer el crecimiento vegetal, mejorar la absorción de nutrientes y fortalecer las respuestas de las plantas frente a condiciones adversas. El objetivo del presente artículo fue analizar mediante una revisión bibliográfica la evidencia disponible sobre el efecto de los bioestimulantes naturales en el crecimiento, desarrollo, rendimiento y calidad del tomate cultivado bajo condiciones de invernadero. La revisión comprendió 20 documentos académicos y científicos relacionados con extractos vegetales, bioestimulantes orgánicos, bacterias promotoras del crecimiento vegetal, quitosano, aminoácidos, vermicompost y formulaciones combinadas. Los resultados muestran que los bioestimulantes pueden favorecer la producción de biomasa, desarrollo radicular, crecimiento vegetativo, absorción de nutrientes, rendimiento y determinadas características de calidad de los frutos. Sin embargo, la magnitud de las respuestas presenta variaciones según el tipo de bioestimulante, concentración, frecuencia y método de aplicación, características del cultivo y condiciones ambientales. Se concluye que los bioestimulantes naturales presentan importantes posibilidades para fortalecer la sostenibilidad de la producción de tomate en invernadero, pero su utilización requiere protocolos específicos, evaluaciones de largo plazo y una mayor comprensión de las interacciones existentes entre los productos, las plantas, los microorganismos y las condiciones productivas.

Palabras clave: bioestimulantes naturales; tomate; invernadero; rendimiento; agricultura sostenible; crecimiento vegetal.

ABSTRACT

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) production under greenhouse conditions is an agricultural activity of considerable importance due to the growing demand for fruits with high commercial and nutritional quality. However, the intensification of production systems has increased the use of fertilisers and other agricultural inputs, creating the need to develop sustainable alternatives capable of maintaining or increasing productivity. In this context, natural biostimulants represent an innovative strategy to promote plant growth, improve nutrient uptake, and strengthen plant responses to adverse conditions. The objective of this article was to analyse, through a literature review, the available evidence on the effects of natural biostimulants on the growth, development, yield, and quality of tomatoes cultivated under greenhouse conditions. The review included 20 academic and scientific documents related to plant extracts, organic biostimulants, plant growth-promoting bacteria, chitosan, amino acids, vermicompost, and combined formulations. The results show that biostimulants can promote biomass production, root development, vegetative growth, nutrient uptake, yield, and certain fruit quality characteristics. However, the magnitude of the responses varies

according to the type of biostimulant, concentration, frequency and method of application, crop characteristics, and environmental conditions. It is concluded that natural biostimulants offer significant potential to strengthen the sustainability of greenhouse tomato production, although their use requires specific protocols, long-term evaluations, and a better understanding of the interactions between products, plants, microorganisms, and production conditions.

Keywords: natural biostimulants; tomato; greenhouse; yield; sustainable agriculture; plant growth.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura contemporánea enfrenta el desafío de incrementar la producción de alimentos y, al mismo tiempo, reducir los impactos ambientales asociados con el uso intensivo de fertilizantes, plaguicidas y otros insumos externos. Van Oosten et al. (2017) sostienen que la variabilidad climática, la degradación de los suelos y la disponibilidad limitada de agua han intensificado la necesidad de desarrollar sistemas productivos más eficientes, resilientes y sostenibles. En este escenario, la horticultura protegida adquiere una importancia estratégica, debido a que permite controlar parcialmente las condiciones ambientales, mejorar la utilización de los recursos y mantener una producción más estable durante diferentes períodos del año.

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) constituye uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia económica, alimentaria y comercial. Su amplia aceptación entre los consumidores, su valor nutricional y su utilización tanto en fresco como en productos procesados han impulsado la expansión de sistemas intensivos de producción. Según Colla y Roupheal (2015), el cultivo bajo invernadero permite regular variables como la temperatura, la humedad, el suministro de agua y la nutrición mineral, además de reducir la exposición directa a determinadas condiciones climáticas adversas. Estas ventajas favorecen el incremento del rendimiento y la calidad de los frutos, aunque también pueden generar una mayor dependencia de fertilizantes, productos fitosanitarios y tecnologías de manejo especializado.

La intensificación de la producción de tomate en ambientes protegidos puede aumentar la eficiencia productiva, pero también ocasionar efectos desfavorables cuando los insumos no se administran adecuadamente. Halpern et al. (2015) advierten que la aplicación excesiva de fertilizantes incrementa los costos de producción, puede alterar las propiedades del suelo o del sustrato y favorece la pérdida de nutrientes mediante lixiviación. Además, el manejo inadecuado de la nutrición vegetal puede generar desequilibrios fisiológicos, afectar el desarrollo de las plantas y disminuir la calidad comercial de los frutos. Por esta razón, la búsqueda de alternativas que mejoren la eficiencia en la utilización de nutrientes se ha convertido en una prioridad para la producción sostenible de tomate bajo invernadero. Entre las estrategias que han adquirido mayor relevancia se encuentra el uso de bioestimulantes naturales. Estos productos comprenden sustancias, compuestos y microorganismos capaces de estimular procesos fisiológicos y metabólicos de las plantas sin actuar exclusivamente como fuentes directas de nutrientes. Su aplicación puede favorecer el crecimiento radicular, mejorar la absorción y asimilación de elementos minerales, aumentar la actividad fotosintética y fortalecer las respuestas de las plantas frente a condiciones de estrés. Bulgari et al. (2019) señalan que los bioestimulantes orgánicos pueden influir sobre la producción de biomasa y sobre diferentes componentes relacionados con el rendimiento del tomate cultivado en ambientes protegidos.

La diversidad de bioestimulantes constituye una de las principales características de este campo de estudio. Dentro de esta categoría se incluyen extractos vegetales, sustancias húmicas, aminoácidos, proteínas hidrolizadas, algas, quitosano, vermicompost y microorganismos promotores del crecimiento vegetal. De acuerdo con du Jardin (2015), cada producto posee una composición particular y puede actuar mediante mecanismos diferentes. Los extractos vegetales, por ejemplo, pueden contener compuestos fenólicos, fitohormonas, antioxidantes y metabolitos secundarios capaces de intervenir en procesos relacionados con el crecimiento, la formación de raíces y la tolerancia al estrés. No obstante, Yakhin et al. (2017) advierten que su composición puede variar según la especie vegetal utilizada, las condiciones de cultivo de la materia prima y el método de extracción empleado.

Los bioestimulantes derivados de materiales orgánicos también han mostrado posibilidades importantes para la producción de tomate. Canellas et al. (2015) explican que el vermicompost y sus extractos líquidos pueden aportar

sustancias húmicas, microorganismos benéficos y compuestos bioactivos que favorecen la actividad biológica del suelo o del sustrato. De manera semejante, los aminoácidos y las proteínas hidrolizadas pueden participar en procesos metabólicos relacionados con la síntesis de proteínas, la formación de tejidos y la recuperación de las plantas frente a situaciones de estrés, como señalan Colla et al. (2017). Sin embargo, la magnitud de estos efectos depende de la concentración, la frecuencia de aplicación y la etapa de desarrollo en la que se utilicen.

El desarrollo radicular representa uno de los principales indicadores empleados para evaluar la acción de los bioestimulantes. Halpern et al. (2015) explican que un sistema radicular vigoroso incrementa la capacidad de las plantas para explorar el suelo o el sustrato, absorber agua y aprovechar los nutrientes disponibles. La estimulación de las raíces puede mejorar el establecimiento inicial del cultivo y contribuir a una mayor estabilidad productiva durante las etapas de floración y fructificación. Sin embargo, Rouphael y Colla (2020) advierten que el aumento del crecimiento vegetativo no siempre se traduce automáticamente en mayores rendimientos, debido a que la planta necesita mantener un equilibrio adecuado entre el desarrollo de hojas, tallos, raíces y frutos.

Por esta razón, la evaluación de los bioestimulantes debe considerar conjuntamente las variables vegetativas, fisiológicas y productivas. Parađiković et al. (2019) señalan que el número de hojas, la altura de la planta, el diámetro del tallo y la producción de biomasa permiten valorar el crecimiento, mientras que el número de flores, el porcentaje de cuajado, la cantidad de frutos y su peso promedio proporcionan información sobre el rendimiento. También resulta necesario analizar características de calidad como firmeza, tamaño, contenido de sólidos solubles, acidez y composición nutricional. La respuesta favorable en una sola variable no permite establecer por sí misma la efectividad integral de un tratamiento.

La concentración y el método de aplicación constituyen factores determinantes en la eficacia de los bioestimulantes naturales. Du Jardin (2015) señala que una dosis baja puede resultar insuficiente para generar cambios fisiológicos significativos, mientras que una concentración excesiva puede ocasionar respuestas desfavorables o alteraciones en el crecimiento. Asimismo, los productos pueden aplicarse directamente sobre las hojas, incorporarse al suelo o sustrato, o suministrarse mediante los sistemas de riego. La aplicación foliar facilita el contacto inmediato con los tejidos vegetales, mientras que la aplicación radicular puede modificar las condiciones de la rizosfera y favorecer la interacción entre las raíces, los nutrientes y los microorganismos benéficos.

El momento de aplicación también influye sobre los resultados. Los tratamientos utilizados durante el establecimiento del cultivo pueden favorecer el desarrollo inicial y la formación de raíces, mientras que las aplicaciones realizadas durante la floración y fructificación pueden intervenir en el cuajado, crecimiento y calidad de los frutos. Van Oosten et al. (2017) indican que las respuestas pueden variar según el cultivar, las condiciones ambientales del invernadero y el tipo de sustrato. Las diferencias de temperatura, humedad, radiación y disponibilidad hídrica modifican el metabolismo de las plantas y pueden aumentar o disminuir la eficacia de los productos aplicados.

La utilización combinada de bioestimulantes representa una tendencia creciente dentro de la investigación agrícola. Rouphael et al. (2017) destacan el interés por evaluar aplicaciones conjuntas de sustancias y materiales biológicos que puedan generar efectos complementarios sobre el crecimiento y la producción. La combinación de extractos vegetales, aminoácidos, sustancias húmicas o microorganismos puede ampliar los mecanismos de acción y mejorar la respuesta de las plantas. Sin embargo, estas mezclas también pueden originar interacciones antagónicas, por lo que resulta indispensable comparar los tratamientos combinados con las aplicaciones individuales y con controles sin bioestimulación.

Los microorganismos promotores del crecimiento vegetal constituyen otro grupo de elevada importancia. Backer et al. (2018) señalan que algunas bacterias y hongos pueden mejorar la disponibilidad de nutrientes, estimular el desarrollo radicular, producir sustancias reguladoras del crecimiento y fortalecer la tolerancia frente al estrés. Estas interacciones adquieren especial relevancia en sistemas intensivos de producción, donde la salud biológica del suelo o del sustrato puede deteriorarse por el uso continuo de fertilizantes y productos químicos. La incorporación de microorganismos benéficos puede contribuir a mantener la fertilidad, favorecer el equilibrio de las comunidades microbianas y mejorar la sostenibilidad del cultivo.

A pesar de los resultados favorables reportados, la literatura muestra una elevada variabilidad en la respuesta del tomate a los bioestimulantes naturales. Yakhin et al. (2017) relacionan esta variabilidad con la composición de los productos, el origen de las materias primas, el método de elaboración, la dosis, la frecuencia de aplicación y las condiciones productivas. Los extractos elaborados directamente a partir de plantas pueden presentar diferencias entre lotes, mientras que los productos comerciales pueden contener formulaciones distintas aunque pertenezcan a una misma categoría. Esta situación dificulta la comparación entre investigaciones y limita la formulación de recomendaciones generales para los productores.

La estandarización constituye, por tanto, uno de los principales desafíos para el uso agronómico de los bioestimulantes. Du Jardin (2015) sostiene que los estudios deben describir detalladamente la composición de los productos, los procedimientos de preparación, las concentraciones empleadas y las condiciones bajo las cuales se realizaron las aplicaciones. La caracterización química y microbiológica puede contribuir a identificar los compuestos responsables de las respuestas observadas y facilitar la comprensión de sus mecanismos de acción. Asimismo, la integración de conocimientos procedentes de la agronomía, la fisiología vegetal, la microbiología y la química resulta necesaria para fortalecer la evidencia científica disponible.

Otro aspecto que requiere mayor atención corresponde a la evaluación económica de estas tecnologías. Rouphael y Colla (2020) plantean que el incremento del rendimiento debe analizarse conjuntamente con el costo del producto, la frecuencia de aplicación, la mano de obra requerida y el valor comercial de la producción obtenida. Los bioestimulantes elaborados localmente pueden representar alternativas accesibles para los productores, pero necesitan procedimientos que garanticen su estabilidad, seguridad y calidad. Del mismo modo, los productos comerciales deben demostrar beneficios suficientes para justificar su incorporación dentro de los programas de manejo del cultivo.

Los bioestimulantes naturales no deben considerarse sustitutos automáticos de la fertilización convencional. Halpern et al. (2015) explican que su principal contribución consiste en mejorar la eficiencia con la que las plantas absorben y utilizan los nutrientes disponibles. En consecuencia, su aplicación debe integrarse dentro de programas equilibrados de nutrición, riego y manejo fitosanitario. La combinación de fertilización racional y bioestimulación puede favorecer el rendimiento y disminuir las pérdidas de nutrientes, siempre que las dosis y los procedimientos se ajusten a las características del sistema productivo.

Aunque se han desarrollado numerosos estudios sobre productos específicos, todavía existen vacíos relacionados con sus efectos a largo plazo, sus mecanismos fisiológicos y su comportamiento bajo diferentes niveles tecnológicos de invernadero. Rouphael et al. (2018) destacan que muchas investigaciones se realizan durante un único ciclo productivo y en condiciones altamente controladas, lo que limita la extrapolación de los resultados hacia sistemas comerciales con menor grado de automatización. También se requiere ampliar los estudios sobre calidad de frutos, rentabilidad, salud del suelo y efectos acumulativos derivados del uso continuo de estos productos.

En este contexto, la revisión de la evidencia disponible permite organizar los principales conocimientos sobre los bioestimulantes naturales utilizados en tomate, comparar sus efectos y reconocer los factores que explican la variabilidad de las respuestas. De acuerdo con Snyder (2019), la revisión bibliográfica también facilita la identificación de limitaciones metodológicas y áreas prioritarias para investigaciones futuras. El análisis integrado de las variables agronómicas, fisiológicas, productivas y económicas puede contribuir a formular recomendaciones más precisas para la utilización de los bioestimulantes dentro de sistemas hortícolas sostenibles.

A partir de estas consideraciones, la pregunta que orienta el presente artículo es la siguiente: ¿cuáles son los principales efectos de los bioestimulantes naturales sobre el crecimiento, desarrollo, rendimiento y calidad del tomate cultivado bajo condiciones de invernadero, y qué factores influyen en la variabilidad de los resultados reportados en la literatura?

El objetivo del presente artículo es analizar, mediante una revisión bibliográfica, la evidencia disponible sobre el efecto de los bioestimulantes naturales en la producción de tomate bajo condiciones de invernadero, identificando los principales tipos de productos utilizados, sus efectos sobre las características agronómicas, fisiológicas y productivas,

los factores que condicionan las respuestas y las principales limitaciones y perspectivas para su incorporación en sistemas hortícolas sostenibles.

2. METODOLOGÍA

Diseño de la revisión bibliográfica

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión bibliográfica de carácter descriptivo, analítico y narrativo, orientada a identificar, organizar, analizar y sintetizar la evidencia científica relacionada con el efecto de los bioestimulantes naturales sobre la producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado bajo condiciones de invernadero. Este tipo de revisión resulta apropiado cuando el propósito consiste en integrar conocimientos provenientes de investigaciones con diferentes enfoques metodológicos, permitiendo comprender el estado actual del tema, reconocer tendencias y detectar vacíos de investigación. En este sentido, Snyder (2019) señalan que las revisiones narrativas facilitan la interpretación crítica de la literatura cuando los estudios presentan una elevada diversidad metodológica, mientras que Snyder (2019) destaca que este enfoque favorece la construcción de una visión integral sobre áreas de investigación emergentes.

La elección de esta metodología respondió a la amplia variedad de bioestimulantes evaluados en la literatura, entre los que se incluyen extractos vegetales, sustancias húmicas, aminoácidos, proteínas hidrolizadas, quitosano, vermicompost, bacterias promotoras del crecimiento vegetal y diferentes formulaciones biológicas. Debido a la heterogeneidad existente entre los diseños experimentales, los cultivares de tomate, las condiciones de cultivo y las variables agronómicas evaluadas, se consideró más apropiado desarrollar una síntesis narrativa que permitiera comparar los principales hallazgos e identificar los factores responsables de la variabilidad observada. De acuerdo con Snyder (2019), este tipo de integración favorece el desarrollo de interpretaciones conceptuales que trascienden la simple descripción individual de los estudios.

El procedimiento metodológico comprendió la delimitación del problema de investigación, la formulación de la pregunta orientadora, la identificación de las fuentes documentales, el establecimiento de criterios de inclusión y exclusión, la selección de la literatura, la extracción de la información y la síntesis crítica de los resultados. Según Page et al. (2021), la organización sistemática de estas etapas incrementa la transparencia y la reproducibilidad de las revisiones bibliográficas, permitiendo además evaluar la consistencia de la evidencia recopilada.

La revisión fue orientada por la siguiente pregunta de investigación: ¿cuáles son los principales efectos de los bioestimulantes naturales sobre el crecimiento, desarrollo, rendimiento y calidad del tomate cultivado bajo condiciones de invernadero, y qué factores explican la variabilidad de los resultados reportados por la literatura científica? A partir de esta interrogante, el análisis se concentró exclusivamente en investigaciones relacionadas con la aplicación de productos de origen natural o biológico en sistemas protegidos de producción de tomate.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La identificación de la evidencia científica se realizó mediante una búsqueda estructurada de literatura especializada sobre bioestimulantes naturales y producción de tomate bajo condiciones de invernadero. Page et al. (2021) señalan que una estrategia de búsqueda previamente planificada constituye uno de los elementos esenciales para garantizar la exhaustividad y reducir el riesgo de sesgo durante una revisión bibliográfica. En concordancia con este planteamiento, se consultaron artículos científicos, tesis universitarias, documentos institucionales y publicaciones académicas que abordaran aspectos agronómicos, fisiológicos y productivos relacionados con la bioestimulación vegetal.

Las principales fuentes documentales correspondieron a revistas científicas especializadas e instituciones académicas reconocidas por su producción investigativa en ciencias agrícolas. Se revisaron publicaciones disponibles en SciELO y revistas internacionales relacionadas con horticultura, fisiología vegetal y agricultura sostenible. Asimismo, se incorporaron investigaciones procedentes de repositorios institucionales de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, la Universidad Nacional de La Plata, la Universidad Estatal del Sur de Manabí y otras instituciones con trayectoria

en investigaciones sobre bioestimulantes y producción hortícola. Como señalan Snyder (2019), la utilización de múltiples fuentes documentales permite ampliar la cobertura temática y disminuir el riesgo de omitir estudios relevantes.

La estrategia de búsqueda se diseñó mediante la combinación de términos relacionados con el cultivo, el tipo de bioestimulante, el sistema de producción y las variables agronómicas evaluadas. En español se emplearon expresiones como bioestimulantes naturales en tomate, bioestimulantes y producción de tomate, tomate bajo invernadero, extractos vegetales como bioestimulantes, bioestimulantes orgánicos en tomate, bacterias promotoras del crecimiento vegetal en tomate, quitosano en tomate, aminoácidos como bioestimulantes, vermicompost y producción de tomate, bioestimulantes y rendimiento de tomate, bioestimulantes y calidad de frutos y producción sostenible de tomate en invernadero.

Con el propósito de incorporar literatura internacional, también se utilizaron los términos natural biostimulants in greenhouse tomato, plant biostimulants and tomato yield, plant extracts as biostimulants in tomato, plant growth-promoting bacteria and greenhouse tomato, chitosan biostimulant tomato, amino acid biostimulants tomato production y sustainable greenhouse tomato production. Estas expresiones fueron empleadas individualmente y mediante diferentes combinaciones utilizando los operadores booleanos AND y OR, procedimiento recomendado por Page et al. (2021) para optimizar la sensibilidad y especificidad de las búsquedas bibliográficas.

La recuperación de documentos estuvo orientada hacia investigaciones que describieran de forma suficiente el tipo de bioestimulante utilizado, las condiciones experimentales, el método de aplicación y los efectos observados sobre variables relacionadas con el crecimiento, desarrollo, rendimiento y calidad del tomate. Esta estrategia permitió seleccionar publicaciones comparables y metodológicamente consistentes para el desarrollo de la síntesis narrativa.

Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de elegibilidad fueron definidos antes del proceso de selección documental, con el propósito de garantizar coherencia entre la evidencia recopilada y los objetivos de la investigación. Según Page et al. (2021), la definición previa de criterios de inclusión y exclusión constituye un requisito fundamental para reducir el sesgo de selección y aumentar la transparencia de las revisiones científicas. Asimismo, Page et al. (2021) indican que estos criterios deben derivarse directamente de la pregunta de investigación y aplicarse de manera uniforme durante todo el proceso de revisión.

Se incluyeron investigaciones relacionadas directamente con la aplicación de bioestimulantes naturales, orgánicos o de origen biológico en la producción de tomate, especialmente aquellas desarrolladas bajo condiciones de invernadero, cultivos protegidos, sistemas hidropónicos o cultivos sin suelo. También fueron considerados estudios sobre extractos vegetales, sustancias húmicas, aminoácidos, proteínas hidrolizadas, quitosano, vermicompost, bacterias promotoras del crecimiento vegetal, biofertilizantes enriquecidos y formulaciones combinadas que evaluaran su influencia sobre variables agronómicas, fisiológicas o productivas.

De igual manera, se incorporaron investigaciones que analizaran indicadores relacionados con germinación, desarrollo radicular, biomasa, crecimiento vegetativo, absorción de nutrientes, floración, fructificación, rendimiento, número y peso de frutos, calidad comercial o tolerancia frente a condiciones de estrés. Cuando los estudios correspondían a etapas tempranas del cultivo, fueron incluidos únicamente si aportaban información relevante para comprender los mecanismos fisiológicos asociados con la bioestimulación vegetal, criterio respaldado por Snyder (2019) para revisiones narrativas orientadas al análisis integral de un fenómeno.

Se excluyeron las publicaciones centradas exclusivamente en fertilización mineral convencional cuando no establecían comparaciones con bioestimulantes naturales o no analizaban mecanismos relacionados con la bioestimulación. Asimismo, fueron descartados los estudios realizados en especies diferentes al tomate cuando sus resultados no aportaban fundamentos conceptuales aplicables al cultivo objeto de la revisión.

También se excluyeron investigaciones enfocadas únicamente en el control químico de plagas y enfermedades, documentos duplicados y publicaciones que no describían adecuadamente el tipo de bioestimulante empleado, las condiciones experimentales o las variables evaluadas. La aplicación sistemática de estos criterios permitió conformar

un conjunto de estudios metodológicamente pertinentes y suficientemente homogéneos para desarrollar una síntesis crítica de la evidencia disponible, tal como recomiendan Page et al. (2021).

Selección y organización de la evidencia

La selección de la evidencia científica se desarrolló mediante un proceso secuencial orientado a garantizar que las publicaciones incorporadas respondieran de manera directa a la pregunta de investigación y a los objetivos del estudio. De acuerdo con Page et al. (2021), la aplicación de procedimientos sistemáticos para la identificación y selección de la literatura contribuye a reducir el riesgo de sesgo y fortalece la transparencia del proceso de revisión. En concordancia con este planteamiento, inicialmente se identificaron documentos relacionados con bioestimulantes naturales, producción de tomate, agricultura sostenible y cultivos protegidos.

Posteriormente, se realizó una revisión de los títulos, resúmenes y palabras clave con el propósito de determinar la pertinencia temática de cada publicación. Esta etapa permitió descartar aquellos trabajos cuya temática no guardaba relación directa con la aplicación de bioestimulantes en tomate o que abordaban exclusivamente aspectos ajenos al objetivo de la investigación. Según Page et al. (2021), la evaluación preliminar de la literatura constituye un mecanismo eficiente para optimizar el proceso de selección y concentrar el análisis en las investigaciones con mayor relevancia científica.

Los documentos considerados potencialmente elegibles fueron examinados mediante una lectura detallada de su contenido. Durante esta fase se analizaron aspectos relacionados con los objetivos de cada investigación, el tipo de bioestimulante utilizado, la composición del producto, las condiciones experimentales, el sistema de cultivo, la metodología de aplicación, las variables evaluadas y los principales resultados obtenidos. Como señalan Page et al. (2021), la revisión exhaustiva del contenido permite verificar la coherencia metodológica de los estudios y facilita la comparación entre investigaciones desarrolladas bajo diferentes condiciones experimentales.

Finalmente, los estudios que cumplieron los criterios de elegibilidad fueron incorporados a la síntesis bibliográfica y organizados según las principales categorías temáticas identificadas durante el proceso de revisión. Esta organización permitió establecer relaciones entre investigaciones con enfoques similares, comparar los resultados obtenidos para distintos tipos de bioestimulantes y reconocer las principales coincidencias y discrepancias existentes en la literatura. En este sentido, Snyder (2019) sostiene que la organización temática constituye una etapa esencial para construir una interpretación crítica del conocimiento disponible y generar nuevas perspectivas de análisis.

Extracción y categorización de la información

La información obtenida de las publicaciones seleccionadas fue organizada mediante una matriz de análisis diseñada para facilitar la comparación sistemática entre los diferentes estudios. Según Snyder (2019), la utilización de instrumentos estandarizados durante la extracción de información mejora la consistencia del proceso de revisión y disminuye la posibilidad de omitir elementos relevantes para el análisis posterior. En consecuencia, cada documento fue examinado considerando variables metodológicas y resultados relacionados con el objetivo de la investigación.

Para cada publicación se registró información correspondiente a la autoría, año de publicación, institución de procedencia, tipo de bioestimulante empleado, composición o fuente de obtención, cultivar de tomate utilizado, condiciones del sistema de producción, método y frecuencia de aplicación, variables evaluadas y principales resultados reportados. Asimismo, se recopilaron observaciones relacionadas con las condiciones ambientales, el tipo de sustrato, el manejo de la fertilización y las características experimentales que pudieran explicar diferencias entre los estudios. Page et al. (2021) destacan que la recopilación estructurada de estos elementos facilita la interpretación comparativa de investigaciones desarrolladas bajo diferentes contextos.

Posteriormente, la información fue agrupada mediante categorías temáticas que permitieron organizar la evidencia científica de manera lógica y coherente. Las categorías incluyeron extractos vegetales, sustancias húmicas, aminoácidos, proteínas hidrolizadas, quitosano, vermicompost, bacterias promotoras del crecimiento vegetal y formulaciones combinadas. De manera complementaria, se establecieron categorías relacionadas con germinación,

desarrollo radicular, crecimiento vegetativo, producción de biomasa, absorción de nutrientes, floración, fructificación, rendimiento, calidad de frutos y tolerancia frente a condiciones de estrés.

También se incorporaron categorías orientadas al análisis de la sostenibilidad de los sistemas productivos, la reducción del uso de fertilizantes, la variabilidad de las respuestas obtenidas, las limitaciones metodológicas y las perspectivas de investigación. Esta estructura permitió comparar los efectos generados por diferentes bioestimulantes sobre variables similares y reconocer las principales tendencias descritas en la literatura científica. Como señala Snyder (2019), la categorización temática favorece la integración conceptual de los hallazgos y facilita la construcción de interpretaciones más amplias que la simple descripción individual de los estudios.

Procedimiento de análisis y síntesis

La evidencia recopilada fue analizada mediante una síntesis narrativa y temática, considerando la diversidad metodológica existente entre las investigaciones seleccionadas. La elección de este procedimiento respondió a las diferencias observadas en cuanto al tipo de bioestimulante utilizado, dosis aplicadas, métodos de aplicación, variedades de tomate, condiciones ambientales, sistemas de producción y variables de respuesta evaluadas. Snyder (2019) señalan que la síntesis narrativa constituye una estrategia apropiada cuando la heterogeneidad metodológica impide realizar una integración estadística de los resultados, pero permite identificar patrones comunes y explicar las diferencias observadas entre los estudios.

En consecuencia, no se realizó un metaanálisis debido a que las investigaciones revisadas presentaban una elevada variabilidad en sus diseños experimentales, tratamientos, unidades de medida y condiciones de evaluación. Según Snyder (2019), cuando la evidencia disponible es metodológicamente heterogénea, el análisis narrativo ofrece una alternativa más adecuada para interpretar los resultados sin comprometer su validez científica. Asimismo, Snyder (2019) indica que este enfoque facilita la construcción de una visión integradora del conocimiento y la identificación de nuevas líneas de investigación.

El análisis comenzó con una caracterización general de los estudios seleccionados, considerando aspectos relacionados con el tipo de bioestimulante, las condiciones experimentales y las variables agronómicas evaluadas. Posteriormente, los resultados fueron organizados de acuerdo con las categorías temáticas previamente definidas, permitiendo comparar los efectos observados sobre el crecimiento vegetativo, el desarrollo radicular, la absorción de nutrientes, la floración, la fructificación, el rendimiento y la calidad del tomate. Este procedimiento favoreció la identificación de tendencias consistentes, así como de resultados divergentes asociados con diferencias en la composición de los productos, las dosis aplicadas o las condiciones de cultivo.

Finalmente, la síntesis integró los principales hallazgos mediante un análisis comparativo orientado a reconocer los efectos más consistentes de los bioestimulantes naturales, los factores responsables de la variabilidad reportada en la literatura y los vacíos científicos que requieren mayor investigación. Además, se examinaron aspectos relacionados con la sostenibilidad de los sistemas de producción, la reducción del uso de fertilizantes convencionales y la viabilidad de incorporar estas tecnologías dentro de programas de manejo integrado del cultivo. En concordancia con lo planteado por Page et al. (2021), esta integración crítica permitió transformar la información recopilada en conocimiento organizado, útil para orientar futuras investigaciones y apoyar la toma de decisiones en la producción sostenible de tomate bajo condiciones de invernadero.

3. RESULTADOS

Características generales de la evidencia sobre bioestimulantes y tomate

La revisión de la literatura evidencia un crecimiento sostenido del interés científico por la utilización de bioestimulantes naturales en la producción de tomate durante las dos últimas décadas, impulsado principalmente por la necesidad de desarrollar sistemas agrícolas más sostenibles y eficientes. Según du Jardin (2015), este incremento responde a la búsqueda de tecnologías capaces de mejorar el crecimiento y la productividad de los cultivos mediante mecanismos fisiológicos distintos al suministro directo de nutrientes. En la misma línea, Rouphael y Colla (2020) señalan que el

desarrollo de bioestimulantes constituye una de las estrategias más prometedoras para incrementar la eficiencia en el uso de los recursos naturales y reducir progresivamente la dependencia de fertilizantes convencionales dentro de la agricultura intensiva.

La evidencia recopilada muestra que los estudios no se concentran en un único tipo de bioestimulante, sino que abarcan una amplia diversidad de productos de origen biológico. Entre los más investigados destacan los extractos vegetales, las sustancias húmicas, los aminoácidos, las proteínas hidrolizadas, el quitosano, el vermicompost y los microorganismos promotores del crecimiento vegetal. Yakhin et al. (2017) indican que esta diversidad refleja la complejidad de los mecanismos fisiológicos involucrados en la bioestimulación, ya que cada producto posee compuestos bioactivos con diferentes modos de acción sobre el metabolismo vegetal. Asimismo, Bulgari et al. (2019) destacan que las formulaciones combinadas representan una tendencia emergente, debido a que buscan aprovechar los efectos complementarios de diferentes sustancias para potenciar el crecimiento y la productividad de los cultivos. Los trabajos revisados también evidencian una considerable variabilidad en cuanto a los objetivos experimentales. Mientras algunas investigaciones evalúan el efecto de los bioestimulantes durante la germinación y el establecimiento inicial de las plántulas, otras se concentran en el desarrollo vegetativo, la producción de biomasa, la floración, el cuajado, el rendimiento o la calidad de los frutos. du Jardin (2015) sostienen que esta diversidad metodológica responde a la naturaleza multifuncional de los bioestimulantes, cuyos efectos pueden manifestarse en diferentes etapas del ciclo fisiológico de la planta. En consecuencia, la comparación entre estudios requiere considerar simultáneamente el momento de aplicación, el estado fenológico del cultivo y las variables agronómicas utilizadas para evaluar la respuesta.

Otro aspecto recurrente identificado en la literatura corresponde a la elevada heterogeneidad de los diseños experimentales. Las investigaciones difieren en el origen de los bioestimulantes, las concentraciones empleadas, la frecuencia de aplicación, el método de suministro, el cultivar de tomate utilizado y las condiciones ambientales del invernadero. De acuerdo con Rouphael y Colla (2020), estas diferencias explican buena parte de la variabilidad observada entre los resultados publicados y limitan la posibilidad de establecer recomendaciones universales para todos los sistemas de producción. De manera similar, Van Oosten et al. (2017) señalan que la eficacia de un bioestimulante depende de la interacción entre el producto, el estado fisiológico de la planta y las condiciones ambientales predominantes, por lo que los efectos obtenidos en un contexto específico no siempre pueden extrapolarse a otros escenarios productivos.

A pesar de esta heterogeneidad, la evidencia científica muestra coincidencias importantes respecto a los principales beneficios asociados con el uso de bioestimulantes naturales. La mayoría de las investigaciones reporta mejoras en el desarrollo radicular, una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes, incrementos en la producción de biomasa y respuestas favorables sobre el rendimiento cuando las aplicaciones se realizan bajo condiciones adecuadas de manejo. Colla y Rouphael (2015) indican que estos efectos se relacionan con la capacidad de los bioestimulantes para modular procesos fisiológicos y bioquímicos involucrados en el crecimiento vegetal, mientras que du Jardin (2015) destaca que la respuesta final depende de la interacción entre el bioestimulante, el ambiente y el programa de manejo agronómico implementado.

En conjunto, los estudios analizados permiten concluir que los bioestimulantes naturales representan una alternativa con elevado potencial para fortalecer la sostenibilidad de la producción de tomate bajo condiciones de invernadero. Sin embargo, la revisión también evidencia la necesidad de avanzar hacia protocolos experimentales más estandarizados, caracterizaciones químicas más precisas y evaluaciones de largo plazo que permitan comprender con mayor profundidad los mecanismos de acción de estos productos y establecer recomendaciones técnicamente más consistentes para su aplicación en sistemas hortícolas comerciales. Rouphael y Colla (2020) consideran que la consolidación de estas líneas de investigación será determinante para favorecer la adopción de bioestimulantes dentro de los modelos de agricultura sostenible del futuro.

Extractos vegetales como bioestimulantes naturales

Los extractos vegetales constituyen uno de los grupos de bioestimulantes naturales más ampliamente investigados en la producción de tomate bajo condiciones de invernadero, debido a la diversidad de compuestos bioactivos que contienen y a su capacidad para modular diferentes procesos fisiológicos de las plantas. De acuerdo con du Jardin (2015), estos productos pueden actuar estimulando el crecimiento vegetal mediante mecanismos distintos al aporte directo de nutrientes, favoreciendo respuestas relacionadas con el desarrollo radicular, la eficiencia fotosintética y la absorción de elementos minerales. En este contexto, Rouphael y Colla (2020) señalan que el interés por los extractos vegetales ha aumentado considerablemente como consecuencia de la necesidad de desarrollar estrategias de producción más sostenibles y compatibles con la reducción del uso de insumos químicos.

La literatura revisada muestra que los extractos pueden obtenerse a partir de una amplia variedad de especies vegetales, entre ellas sauge, cola de caballo, canela, algas marinas y numerosas plantas medicinales o aromáticas. La composición química de estos productos depende de la especie utilizada, del estado fisiológico del material vegetal y del procedimiento de extracción empleado, factores que condicionan su actividad biológica. Según Yakhin et al. (2017), las diferencias en la concentración de compuestos fenólicos, flavonoides, aminoácidos, polisacáridos y sustancias con actividad similar a las fitohormonas explican gran parte de la variabilidad observada entre los resultados publicados por diferentes investigadores.

Diversos estudios coinciden en señalar que la aplicación de extractos vegetales favorece el crecimiento del tomate mediante la estimulación de procesos metabólicos asociados con la división y elongación celular, el incremento de la actividad fotosintética y una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes. du Jardin (2015) indican que estos efectos suelen manifestarse en un mayor desarrollo radicular, incremento del área foliar y aumento de la biomasa, mientras que Bulgari et al. (2019) destacan que algunos extractos también mejoran la eficiencia fisiológica de las plantas cuando son sometidas a condiciones de estrés ambiental. Estas respuestas permiten que el cultivo mantenga un crecimiento más estable frente a limitaciones relacionadas con temperatura, disponibilidad de agua o salinidad.

Otro aspecto recurrente en la literatura corresponde a la capacidad de determinados extractos vegetales para fortalecer los mecanismos naturales de defensa de las plantas. Van Oosten et al. (2017) explican que algunos compuestos bioactivos pueden inducir respuestas fisiológicas relacionadas con la resistencia sistémica, reduciendo indirectamente los efectos ocasionados por diferentes factores bióticos y abióticos. Esta doble función, como bioestimulantes y como inductores de tolerancia al estrés, incrementa el interés por su incorporación dentro de programas de manejo integrado del cultivo, especialmente en sistemas de producción protegida donde la sostenibilidad constituye un objetivo prioritario.

No obstante, la revisión también evidencia importantes limitaciones relacionadas con la estandarización de estos productos. Investigaciones desarrolladas por Rouphael y Colla (2020) muestran que extractos obtenidos a partir de una misma especie vegetal pueden presentar diferencias significativas en su composición química debido al origen del material vegetal, las condiciones ambientales de crecimiento, el momento de cosecha y el método de extracción utilizado. Como consecuencia, la reproducibilidad de los resultados entre investigaciones continúa siendo limitada y dificulta la formulación de recomendaciones técnicas generalizadas para los productores.

Asimismo, la concentración aplicada representa uno de los factores que mayor influencia ejerce sobre la eficacia de los extractos vegetales. Mientras determinadas dosis estimulan el crecimiento y mejoran el rendimiento, concentraciones superiores pueden generar respuestas menos favorables o incluso efectos inhibitorios sobre algunos procesos fisiológicos. Esta relación dosis-respuesta ha sido señalada por du Jardin (2015) como uno de los principales desafíos para la utilización eficiente de bioestimulantes, ya que cada formulación requiere protocolos específicos de aplicación adaptados tanto al cultivo como a las condiciones ambientales.

En conjunto, la evidencia científica confirma que los extractos vegetales representan una alternativa prometedora para mejorar el crecimiento, el rendimiento y la sostenibilidad de la producción de tomate bajo invernadero. Sin embargo, también pone de manifiesto la necesidad de profundizar en la caracterización química de estos productos, comprender con mayor precisión sus mecanismos de acción y establecer protocolos estandarizados de producción y aplicación que

permitan obtener respuestas consistentes en diferentes sistemas de cultivo, tal como recomiendan Yakhin et al. (2017) y Rouphael y Colla (2020).

Bioestimulantes orgánicos y producción de biomasa vegetal

Los bioestimulantes orgánicos constituyen una de las categorías más estudiadas dentro de la agricultura sostenible debido a su capacidad para estimular el crecimiento vegetal mediante mecanismos fisiológicos y bioquímicos que trascienden el simple aporte de nutrientes. Según du Jardin (2015), estos productos incluyen sustancias húmicas, proteínas hidrolizadas, aminoácidos, extractos orgánicos y diversos compuestos naturales capaces de activar procesos relacionados con la absorción de nutrientes, el metabolismo celular y la regulación del crecimiento. En el cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero, la literatura muestra que su aplicación ha despertado un creciente interés como estrategia para incrementar la productividad sin aumentar la dependencia de fertilizantes minerales.

La evidencia científica indica que uno de los principales efectos asociados con los bioestimulantes orgánicos corresponde al incremento de la biomasa vegetal. Diversas investigaciones reportan aumentos en el desarrollo del sistema radicular, la longitud del tallo, el número de hojas y el área foliar, variables que repercuten directamente sobre la capacidad fotosintética y el crecimiento general de las plantas. Rouphael y Colla (2020) sostienen que estas respuestas están estrechamente relacionadas con la activación de procesos fisiológicos que favorecen una utilización más eficiente del agua y de los nutrientes disponibles en el medio de cultivo. De manera similar, Bulgari et al. (2019) señalan que muchos bioestimulantes orgánicos incrementan la actividad metabólica de la planta, favoreciendo una mayor acumulación de biomasa incluso bajo condiciones ambientales menos favorables.

No obstante, la literatura también evidencia que el incremento de biomasa no siempre se traduce en un aumento proporcional del rendimiento comercial. Diversos estudios muestran que un crecimiento vegetativo excesivo puede generar una mayor competencia por fotoasimilados entre los órganos vegetativos y reproductivos, reduciendo el desarrollo de flores y frutos cuando el manejo agronómico no mantiene un equilibrio adecuado. En este sentido, du Jardin (2015) destacan que la respuesta positiva de los bioestimulantes debe evaluarse considerando simultáneamente variables relacionadas con el crecimiento y con la productividad, ya que ambos componentes no evolucionan necesariamente de forma paralela.

Otro aspecto ampliamente documentado corresponde a la influencia de los bioestimulantes sobre el desarrollo del sistema radicular. Investigaciones revisadas por Van Oosten et al. (2017) muestran que una mayor longitud y ramificación de las raíces incrementan la capacidad de exploración del sustrato, favoreciendo la absorción de agua y nutrientes esenciales para el crecimiento del tomate. Como consecuencia, las plantas presentan una mayor eficiencia fisiológica y una mejor adaptación frente a fluctuaciones ambientales propias de los sistemas de producción protegida. La composición de los bioestimulantes orgánicos constituye otro factor determinante para explicar las diferencias observadas entre investigaciones. Rouphael y Colla (2020) indican que productos elaborados a partir de distintas materias primas presentan concentraciones variables de sustancias húmicas, péptidos, aminoácidos, carbohidratos y otros compuestos bioactivos capaces de modificar la respuesta fisiológica de las plantas. Esta variabilidad explica que algunos estudios reporten incrementos significativos en biomasa, mientras otros describen respuestas más moderadas o estadísticamente no significativas bajo condiciones experimentales similares.

Asimismo, diversos autores coinciden en que la eficacia de estos productos depende del momento fenológico en que son aplicados. Durante las primeras etapas del desarrollo del cultivo, los bioestimulantes orgánicos suelen favorecer el establecimiento de las plántulas y la formación del sistema radicular, mientras que aplicaciones realizadas durante el crecimiento vegetativo pueden potenciar la expansión foliar y la producción de biomasa aérea. Sin embargo, Yakhin et al. (2017) advierten que la frecuencia de aplicación y las dosis utilizadas deben ajustarse cuidadosamente para evitar desequilibrios fisiológicos que puedan afectar posteriormente el desarrollo reproductivo del cultivo.

En conjunto, los resultados publicados demuestran que los bioestimulantes orgánicos representan una herramienta eficaz para estimular la producción de biomasa en tomate cultivado bajo invernadero. No obstante, la evidencia también pone de manifiesto que sus efectos dependen de la composición del producto, las dosis aplicadas, las

condiciones ambientales y el manejo agronómico del cultivo. En consecuencia, futuras investigaciones deberán orientar sus esfuerzos hacia la estandarización de protocolos de aplicación y la identificación de las combinaciones más eficientes entre bioestimulación, nutrición y manejo fisiológico de las plantas, con el propósito de maximizar simultáneamente el crecimiento vegetativo y el rendimiento comercial.

Bacterias promotoras del crecimiento vegetal en la producción de tomate

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, PGPR) representan una de las estrategias biológicas con mayor potencial para fortalecer la productividad y sostenibilidad de los sistemas de producción de tomate bajo condiciones de invernadero. Estos microorganismos establecen relaciones benéficas con la rizosfera y favorecen el desarrollo de las plantas mediante diversos mecanismos fisiológicos y bioquímicos que incrementan la eficiencia en el uso de nutrientes y mejoran la capacidad de adaptación frente a condiciones ambientales adversas. Según Backer et al. (2018), las PGPR constituyen uno de los grupos de bioestimulantes con mayor respaldo científico debido a la diversidad de procesos que regulan dentro del metabolismo vegetal.

Uno de los mecanismos más ampliamente documentados corresponde a la mejora de la disponibilidad y absorción de nutrientes. Diversas especies bacterianas poseen la capacidad de solubilizar fósforo insoluble, fijar nitrógeno atmosférico y movilizar micronutrientes presentes en el suelo o en los sustratos utilizados en cultivos protegidos. De acuerdo con Backer et al. (2018), estos procesos incrementan la eficiencia nutricional de las plantas y permiten un mejor aprovechamiento de los fertilizantes aplicados, favoreciendo un crecimiento más equilibrado durante las diferentes etapas del desarrollo del tomate.

Además de mejorar la nutrición vegetal, las bacterias promotoras del crecimiento sintetizan compuestos bioactivos capaces de estimular directamente el desarrollo de las plantas. Entre estos compuestos destacan auxinas, giberelinas, citoquininas y otras sustancias reguladoras del crecimiento que favorecen la formación de raíces laterales, incrementan la longitud del sistema radicular y estimulan la división celular. Según Rouphael y Colla (2020), estas modificaciones fisiológicas permiten que las plantas exploren un mayor volumen de sustrato, aumentando su capacidad para absorber agua y nutrientes, especialmente bajo condiciones de estrés hídrico o nutricional.

La literatura revisada también evidencia que la utilización de biofertilizantes enriquecidos con bacterias promotoras del crecimiento puede incrementar el rendimiento del tomate cuando las condiciones de aplicación son adecuadas. Backer et al. (2018) señalan que los beneficios observados no dependen exclusivamente de la actividad de un microorganismo en particular, sino de la interacción entre la cepa bacteriana, el genotipo del cultivo y las características físicas, químicas y biológicas del suelo o del sustrato. En consecuencia, un mismo inoculante puede presentar niveles de eficacia diferentes cuando es aplicado en distintos sistemas de producción o bajo condiciones ambientales variables.

Otro aspecto relevante identificado en la literatura corresponde a la contribución de las PGPR al mantenimiento de la salud del suelo y de la rizosfera. Backer et al. (2018) explica que estos microorganismos favorecen el equilibrio biológico del ecosistema radicular mediante interacciones con otras poblaciones microbianas, mejorando procesos relacionados con el reciclaje de nutrientes y la estabilidad microbiológica del suelo. En sistemas intensivos de producción de tomate, donde la presión sobre el suelo suele ser elevada, esta función adquiere especial importancia dentro de las estrategias orientadas hacia una agricultura más sostenible.

Sin embargo, los estudios también muestran que la eficacia de las bacterias promotoras del crecimiento depende de múltiples factores que pueden limitar su desempeño. La temperatura, el pH, la humedad del sustrato, la disponibilidad de materia orgánica y la composición de la microbiota nativa influyen significativamente sobre la capacidad de los microorganismos para colonizar la rizosfera y ejercer sus efectos bioestimulantes. Según Backer et al. (2018), la competencia con microorganismos autóctonos constituye uno de los principales desafíos para lograr una colonización estable y prolongada de las raíces en condiciones comerciales de producción.

Asimismo, la calidad de las formulaciones comerciales representa un aspecto determinante para garantizar resultados consistentes. La viabilidad celular durante el almacenamiento, el transporte y la aplicación influye directamente sobre

la eficacia de los inoculantes bacterianos. Backer et al. (2018) destacan que el desarrollo de tecnologías de formulación más estables constituye una prioridad para incrementar la adopción de estos productos por parte de los productores agrícolas y asegurar una respuesta biológica reproducible en diferentes condiciones de cultivo.

En conjunto, la evidencia científica confirma que las bacterias promotoras del crecimiento vegetal constituyen una herramienta de gran potencial para mejorar la nutrición, el crecimiento y el rendimiento del tomate bajo condiciones de invernadero. No obstante, los resultados también ponen de manifiesto la necesidad de profundizar en el conocimiento de las interacciones entre microorganismos, plantas y ambiente, así como de desarrollar formulaciones más estables y protocolos de aplicación específicos que permitan maximizar los beneficios de esta tecnología dentro de programas integrados de producción sostenible (Pichyangkura y Chadchawan, 2015; Malerba y Cerana, 2016).

Quitosano como bioestimulante en sistemas de tomate protegido

El quitosano se ha consolidado como uno de los bioestimulantes naturales de mayor interés en la producción hortícola debido a sus propiedades biológicas y a su capacidad para estimular múltiples procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento y la adaptación de las plantas frente a condiciones de estrés. Este biopolímero, obtenido principalmente por desacetilación de la quitina presente en los exoesqueletos de crustáceos y en las paredes celulares de algunos hongos, ha demostrado efectos positivos sobre el desarrollo del tomate cultivado bajo condiciones de invernadero. Según Malerba y Cerana (2016), el quitosano actúa como un elicitador natural capaz de activar respuestas fisiológicas y metabólicas que fortalecen el desarrollo vegetal y mejoran el desempeño productivo del cultivo.

La literatura revisada evidencia que la aplicación de quitosano favorece el crecimiento vegetativo mediante el incremento de la altura de las plantas, el desarrollo foliar y la expansión del sistema radicular. Estas respuestas se atribuyen, en gran medida, a la capacidad del compuesto para estimular la actividad enzimática, favorecer la división celular y mejorar la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes. Pichyangkura y Chadchawan (2015) señalan que estos efectos permiten optimizar el metabolismo vegetal durante diferentes etapas fenológicas, contribuyendo al establecimiento de plantas más vigorosas y con mayor capacidad para sostener elevados niveles de producción.

Uno de los aspectos más destacados en la evidencia científica corresponde a la influencia del quitosano sobre los mecanismos naturales de defensa de las plantas. A diferencia de otros bioestimulantes cuya acción se limita principalmente al crecimiento vegetal, este compuesto posee la capacidad de inducir respuestas relacionadas con la resistencia sistémica adquirida, estimulando la producción de proteínas de defensa, compuestos antioxidantes y enzimas involucradas en la protección frente a factores bióticos y abióticos. Según Malerba y Cerana (2016), esta característica convierte al quitosano en una herramienta de gran interés para programas de manejo sostenible, ya que contribuye simultáneamente al fortalecimiento fisiológico del cultivo y a la reducción de los efectos ocasionados por diversos agentes estresantes.

Los estudios desarrollados en sistemas de cultivo protegido muestran además que el quitosano puede ejercer efectos favorables sobre variables directamente relacionadas con el rendimiento y la calidad de los frutos. Diversas investigaciones reportan incrementos en el número de frutos, el peso promedio, la firmeza, el contenido de sólidos solubles y la vida útil poscosecha cuando las aplicaciones se realizan en dosis adecuadas y durante etapas fenológicas estratégicas. Rouphael y Colla (2020) destacan que estos beneficios responden a la interacción entre mejoras fisiológicas, mayor eficiencia nutricional y una regulación más eficiente del metabolismo de la planta durante el desarrollo reproductivo.

No obstante, la literatura también evidencia que la eficacia del quitosano depende significativamente de la concentración utilizada y del método de aplicación. Pichyangkura y Chadchawan (2015) indican que concentraciones moderadas suelen generar respuestas positivas sobre el crecimiento y la productividad, mientras que dosis excesivas pueden alterar determinados procesos fisiológicos y reducir la respuesta esperada. De igual manera, la frecuencia de aplicación y el momento fenológico del cultivo constituyen variables que deben ajustarse cuidadosamente para maximizar la eficiencia del tratamiento.

Otro factor que explica la variabilidad observada entre investigaciones corresponde a las diferencias existentes entre cultivares y condiciones de producción. Malerba y Cerana (2016) señalan que la respuesta al quitosano depende tanto de las características genéticas del tomate como de factores ambientales relacionados con temperatura, humedad, radiación y disponibilidad de nutrientes. En consecuencia, los resultados obtenidos bajo determinadas condiciones experimentales no siempre pueden extrapolarse directamente a otros sistemas de producción protegida.

La revisión también pone de manifiesto el creciente interés por evaluar el quitosano en combinación con otros bioestimulantes naturales. Diversos estudios sugieren que la integración de este compuesto con microorganismos benéficos, extractos vegetales o sustancias húmicas podría generar respuestas fisiológicas complementarias que incrementen la eficiencia del manejo agronómico. Sin embargo, Rouphael y Colla (2020) advierten que estas posibles interacciones aún requieren mayor respaldo experimental para establecer protocolos técnicamente confiables y económicamente viables para su aplicación comercial.

En conjunto, la evidencia científica confirma que el quitosano constituye uno de los bioestimulantes con mayor potencial para fortalecer el crecimiento, el rendimiento y la calidad del tomate bajo condiciones de invernadero. No obstante, la magnitud de sus beneficios depende de factores relacionados con la formulación del producto, las dosis empleadas, el momento de aplicación y las condiciones específicas del sistema de cultivo. Por ello, futuras investigaciones deberán profundizar en la estandarización de protocolos de manejo y en la comprensión de los mecanismos fisiológicos responsables de las respuestas observadas, con el propósito de optimizar su incorporación dentro de programas de producción hortícola sostenible.

Aminoácidos y respuestas fisiológicas del cultivo

Los aminoácidos constituyen uno de los componentes más utilizados en la formulación de bioestimulantes debido a su participación directa en numerosos procesos metabólicos relacionados con el crecimiento, el desarrollo y la respuesta de las plantas frente a condiciones ambientales adversas. A diferencia de los fertilizantes convencionales, estos compuestos no actúan principalmente como fuente de nutrientes, sino como reguladores fisiológicos capaces de optimizar diversas rutas metabólicas involucradas en la síntesis de proteínas, la actividad enzimática y el equilibrio hormonal. Según du Jardin (2015), los bioestimulantes formulados a base de aminoácidos ejercen su efecto mediante la modulación del metabolismo vegetal, favoreciendo una utilización más eficiente de los recursos disponibles y mejorando la capacidad adaptativa de los cultivos.

La literatura revisada muestra que la aplicación exógena de aminoácidos puede estimular el crecimiento vegetativo del tomate mediante el fortalecimiento de procesos relacionados con la división celular, la formación de tejidos y el desarrollo radicular. Rouphael y Colla (2020) indican que muchos de estos compuestos actúan como precursores metabólicos indispensables para la síntesis de proteínas estructurales y funcionales, permitiendo que las plantas mantengan una mayor actividad fisiológica durante las diferentes etapas de desarrollo. Como consecuencia, diversos estudios reportan incrementos en la biomasa, el área foliar y la capacidad fotosintética cuando estos productos son incorporados dentro de programas adecuados de manejo nutricional.

Uno de los aspectos más destacados en la evidencia científica corresponde a la influencia de los aminoácidos sobre la respuesta fisiológica de las plantas sometidas a condiciones de estrés. Bulgari et al. (2019) señalan que estos compuestos participan activamente en la regulación osmótica, la neutralización de especies reactivas de oxígeno y la estabilización de membranas celulares, procesos fundamentales para mantener la actividad metabólica cuando el cultivo enfrenta limitaciones relacionadas con altas temperaturas, déficit hídrico o salinidad. En este contexto, determinados aminoácidos como la prolina desempeñan un papel esencial en los mecanismos de protección celular, favoreciendo la recuperación fisiológica después de períodos de estrés.

Los estudios también evidencian que la eficacia de los bioestimulantes basados en aminoácidos depende significativamente de la naturaleza de las materias primas utilizadas para su obtención. Los hidrolizados de proteínas de origen vegetal y animal presentan composiciones diferentes en cuanto al tipo y concentración de aminoácidos libres, péptidos y otros compuestos bioactivos. Según Colla y Rouphael (2015), estas diferencias influyen directamente

sobre la intensidad de las respuestas fisiológicas observadas en las plantas, explicando parte de la variabilidad existente entre investigaciones desarrolladas bajo condiciones experimentales aparentemente similares.

No obstante, la revisión muestra que los efectos de los aminoácidos no son uniformes en todos los sistemas de producción. Diversos autores coinciden en señalar que la respuesta del cultivo depende del estado nutricional inicial de las plantas, de las condiciones ambientales y del manejo agronómico implementado. Rouphael y Colla (2020) explican que cultivos sometidos a limitaciones nutricionales o condiciones moderadas de estrés suelen presentar respuestas más evidentes que aquellos desarrollados bajo condiciones óptimas de crecimiento, donde los beneficios fisiológicos pueden ser menos pronunciados.

Asimismo, la literatura advierte que los aminoácidos no deben considerarse sustitutos de la fertilización convencional. Aunque estos compuestos favorecen la eficiencia metabólica y optimizan la utilización de nutrientes, las plantas continúan requiriendo un suministro adecuado de macro y micronutrientes para completar su ciclo productivo. En este sentido, du Jardin (2015) sostiene que los bioestimulantes deben integrarse dentro de programas de fertilización equilibrada, donde actúen como complementos capaces de potenciar la eficiencia fisiológica del cultivo y no como reemplazos de la nutrición mineral.

La revisión también identifica la necesidad de profundizar en el conocimiento de los mecanismos moleculares responsables de las respuestas observadas tras la aplicación de aminoácidos. Bulgari et al. (2019) destacan que, aunque numerosos estudios reportan efectos positivos sobre el crecimiento y la productividad, todavía existen importantes vacíos relacionados con la regulación genética, la expresión diferencial de proteínas y las rutas metabólicas específicas involucradas en estos procesos. El avance de herramientas transcriptómicas, proteómicas y metabolómicas representa una oportunidad para comprender con mayor precisión la interacción entre estos bioestimulantes y el metabolismo vegetal.

En conjunto, la evidencia científica confirma que los aminoácidos constituyen una alternativa eficaz para mejorar el crecimiento, la eficiencia fisiológica y la capacidad de adaptación del tomate cultivado bajo condiciones de invernadero. Sin embargo, la magnitud de sus beneficios depende de la composición de las formulaciones, las dosis aplicadas, el estado fisiológico del cultivo y las condiciones ambientales predominantes. Por ello, futuras investigaciones deberán orientar sus esfuerzos hacia la estandarización de los productos, la optimización de los protocolos de aplicación y la comprensión de los mecanismos bioquímicos que sustentan su actividad bioestimulante, con el fin de fortalecer su utilización dentro de sistemas de producción hortícola sostenibles.

Vermicompost y bioestimulación del tomate

El vermicompost constituye uno de los bioestimulantes orgánicos más ampliamente utilizados en la agricultura sostenible debido a su capacidad para mejorar simultáneamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y de los sustratos empleados en cultivos protegidos. Este producto se obtiene mediante la transformación biológica de residuos orgánicos por acción de lombrices y microorganismos, proceso que origina un material rico en sustancias húmicas, nutrientes disponibles, microorganismos benéficos y diversos compuestos bioactivos capaces de estimular el crecimiento vegetal. Según Canellas et al. (2015), el vermicompost no solo aporta nutrientes esenciales para las plantas, sino que también modifica favorablemente el ambiente radicular, favoreciendo el desarrollo fisiológico del cultivo.

La literatura revisada muestra que la incorporación de vermicompost en la producción de tomate bajo condiciones de invernadero favorece el crecimiento vegetativo y el desarrollo del sistema radicular. Diversas investigaciones reportan incrementos en la biomasa aérea y subterránea, así como mejoras en la capacidad de absorción de agua y nutrientes cuando este material se incorpora al sustrato o se utiliza como componente de mezclas para la producción de plántulas. Backer et al. (2018) señalan que estos efectos responden a la combinación entre una mayor disponibilidad de nutrientes minerales y la presencia de sustancias húmicas capaces de estimular la actividad fisiológica de las raíces. Uno de los aspectos más relevantes identificados en la evidencia científica corresponde al efecto de las sustancias húmicas presentes en el vermicompost sobre el metabolismo vegetal. Canellas et al. (2015) explican que estos

compuestos actúan regulando diversos procesos fisiológicos relacionados con la elongación celular, el desarrollo radicular y la absorción de nutrientes, favoreciendo un crecimiento más eficiente de las plantas. Como consecuencia, numerosos estudios describen incrementos en el vigor del cultivo y una mejor respuesta fisiológica durante las diferentes etapas fenológicas del tomate.

Además de sus efectos nutricionales y fisiológicos, el vermicompost constituye una importante fuente de microorganismos beneficiosos capaces de contribuir al equilibrio biológico del suelo y de la rizosfera. Canellas et al. (2015) destacan que estos microorganismos participan en procesos de mineralización de la materia orgánica, reciclaje de nutrientes y establecimiento de relaciones simbióticas que favorecen el desarrollo del cultivo. Esta característica diferencia al vermicompost de otros bioestimulantes exclusivamente químicos, ya que combina efectos físicos, biológicos y bioquímicos sobre el sistema productivo.

La revisión también evidencia un creciente interés por la utilización de extractos líquidos de vermicompost, conocidos como té de vermicompost o lixiviados, los cuales pueden aplicarse mediante tratamientos foliares o sistemas de fertirrigación. Según Canellas et al. (2015), estas formulaciones permiten aprovechar los compuestos bioactivos presentes en el vermicompost sin modificar significativamente las características físicas del sustrato, facilitando su incorporación en programas de manejo de cultivos protegidos. Diversos estudios reportan mejoras en el crecimiento vegetativo, el rendimiento y algunos indicadores de calidad de los frutos tras la aplicación de estos extractos.

Sin embargo, la literatura también pone de manifiesto importantes limitaciones relacionadas con la variabilidad en la composición del vermicompost. Las propiedades finales del producto dependen directamente del tipo de residuos orgánicos utilizados como materia prima, de la especie de lombriz empleada, de las condiciones del proceso de vermicompostaje y del grado de maduración alcanzado. Canellas et al. (2015) indican que estas diferencias pueden modificar significativamente la concentración de nutrientes, sustancias húmicas y microorganismos presentes en el producto final, dificultando la comparación entre investigaciones desarrolladas por distintos autores.

Asimismo, la dosis de aplicación constituye un factor determinante para obtener respuestas agronómicas favorables. Backer et al. (2018) señalan que cantidades moderadas de vermicompost suelen estimular el crecimiento y mejorar las propiedades del sustrato, mientras que proporciones excesivas pueden alterar el equilibrio físico o nutricional del medio de cultivo. En consecuencia, la definición de dosis óptimas continúa siendo una de las principales líneas de investigación para optimizar su utilización en sistemas intensivos de producción de tomate.

En conjunto, la evidencia científica confirma que el vermicompost representa una alternativa eficaz para fortalecer el crecimiento, la nutrición y el rendimiento del tomate cultivado bajo condiciones de invernadero. No obstante, la variabilidad inherente a su composición y la ausencia de protocolos estandarizados de producción limitan parcialmente la reproducibilidad de los resultados. Por ello, futuras investigaciones deberán profundizar en la caracterización físico-química y microbiológica del vermicompost, así como en la estandarización de los métodos de producción y aplicación, con el propósito de incrementar la confiabilidad de su utilización dentro de programas de agricultura sostenible (Rouphael et al., 2017).

Aplicación combinada de bioestimulantes

La aplicación combinada de bioestimulantes representa una de las líneas de investigación con mayor crecimiento dentro de la agricultura sostenible, debido a la posibilidad de integrar diferentes mecanismos de acción en una misma estrategia de manejo agronómico. Mientras los primeros estudios se concentraban en evaluar el efecto individual de extractos vegetales, sustancias húmicas o microorganismos, las investigaciones más recientes analizan formulaciones que combinan dos o más bioestimulantes con el propósito de obtener respuestas fisiológicas complementarias. Según Rouphael y Colla (2020), esta tendencia responde al reconocimiento de que el crecimiento y la productividad de las plantas dependen de múltiples procesos metabólicos que difícilmente pueden ser estimulados mediante un único compuesto bioactivo.

La evidencia científica muestra que las formulaciones combinadas suelen integrar sustancias húmicas, aminoácidos, extractos vegetales, microorganismos promotores del crecimiento y otros compuestos naturales capaces de actuar

sobre diferentes etapas del desarrollo del cultivo. Mientras algunos componentes estimulan el crecimiento radicular y favorecen la absorción de nutrientes, otros fortalecen la actividad fotosintética, regulan el metabolismo vegetal o incrementan la tolerancia frente a condiciones de estrés. Bulgari et al. (2019) señalan que esta complementariedad fisiológica constituye uno de los principales fundamentos para el desarrollo de bioestimulantes de nueva generación destinados a optimizar simultáneamente el crecimiento, el rendimiento y la calidad de los frutos.

Diversos estudios reportan que la utilización conjunta de diferentes bioestimulantes puede generar respuestas superiores a las obtenidas mediante aplicaciones individuales. Colla y Rouphael (2015) indican que la interacción entre microorganismos benéficos y compuestos orgánicos favorece una mayor eficiencia en la utilización de nutrientes y una regulación más equilibrada del metabolismo vegetal, permitiendo incrementar el vigor de las plantas y mejorar el rendimiento bajo condiciones de producción protegida. No obstante, estos beneficios dependen de la compatibilidad entre los componentes de la formulación y de las condiciones específicas en que se desarrolla el cultivo.

Sin embargo, la revisión también evidencia que las respuestas obtenidas mediante aplicaciones combinadas no siempre son aditivas. En algunos casos, determinados componentes pueden modificar o incluso reducir la actividad biológica de otros, generando respuestas inferiores a las esperadas. Según Yakhin et al. (2017), las interacciones entre diferentes sustancias bioactivas pueden ser sinérgicas, complementarias o antagónicas, dependiendo de factores como la concentración de cada componente, el método de aplicación, el estado fisiológico de la planta y las condiciones ambientales. Esta complejidad explica parte de la variabilidad observada entre investigaciones y pone de manifiesto la necesidad de evaluar cuidadosamente las formulaciones antes de su utilización comercial.

Otro aspecto destacado en la literatura corresponde a la importancia del diseño experimental para evaluar correctamente los efectos de las formulaciones combinadas. Rouphael y Colla (2020) señalan que las investigaciones deben incluir tratamientos con cada bioestimulante aplicado de manera individual, además de las combinaciones correspondientes, con el fin de identificar posibles efectos sinérgicos o antagónicos. Este tipo de enfoque permite determinar con mayor precisión la contribución específica de cada componente y establecer si la combinación proporciona beneficios reales sobre el crecimiento y la productividad del cultivo.

Asimismo, diversos autores coinciden en que la optimización de las dosis constituye uno de los principales desafíos para el desarrollo de formulaciones múltiples. La concentración adecuada de cada componente puede modificarse cuando se incorpora dentro de una mezcla, debido a las interacciones bioquímicas que se producen entre las diferentes sustancias activas. Bulgari et al. (2019) destacan que la determinación de estas proporciones requiere investigaciones específicas capaces de establecer relaciones dosis-respuesta para cada combinación evaluada, evitando extrapolar directamente las recomendaciones desarrolladas para aplicaciones individuales.

La creciente incorporación de tecnologías analíticas y herramientas de biología molecular también ofrece nuevas posibilidades para comprender los mecanismos responsables de la acción conjunta de diferentes bioestimulantes. El empleo de técnicas transcriptómicas, metabolómicas y proteómicas permite identificar las rutas metabólicas activadas por las distintas formulaciones y comprender cómo interactúan entre sí para modular el crecimiento vegetal. Según Rouphael y Colla (2020), estos avances facilitarán el diseño de productos más eficientes y específicamente adaptados a las necesidades fisiológicas de cada cultivo.

En conjunto, la evidencia científica confirma que la aplicación combinada de bioestimulantes representa una estrategia con elevado potencial para fortalecer la sostenibilidad y la productividad del tomate cultivado bajo condiciones de invernadero. No obstante, la complejidad de las interacciones entre sus componentes exige el desarrollo de investigaciones más rigurosas que permitan estandarizar formulaciones, optimizar las dosis y establecer protocolos de aplicación técnicamente confiables para diferentes condiciones de producción.

Efectos sobre la germinación y crecimiento inicial

La germinación y el establecimiento inicial de las plántulas constituyen etapas determinantes para el éxito de la producción de tomate, ya que durante este período se definen aspectos relacionados con el vigor, la uniformidad del cultivo y la capacidad de las plantas para desarrollarse adecuadamente durante las fases posteriores del ciclo

productivo. En este contexto, los bioestimulantes naturales han despertado un creciente interés debido a su potencial para favorecer la activación de procesos fisiológicos que intervienen en la emergencia de las semillas y en el desarrollo temprano de las plántulas. Según du Jardin (2015), la acción de estos productos durante las primeras etapas del crecimiento puede influir significativamente sobre el desempeño posterior del cultivo al estimular mecanismos metabólicos relacionados con la división celular, la movilización de reservas y la formación del sistema radicular.

La literatura revisada muestra que diferentes tipos de bioestimulantes, entre ellos extractos vegetales, aminoácidos, sustancias húmicas, quitosano y microorganismos promotores del crecimiento, pueden incrementar el porcentaje y la velocidad de germinación cuando son aplicados mediante tratamientos de semillas o durante las primeras fases del establecimiento del cultivo. du Jardin (2015) indican que estos efectos responden a una mayor activación de procesos fisiológicos asociados con la absorción de agua, la actividad enzimática y el inicio del metabolismo de las semillas, favoreciendo una emergencia más uniforme y reduciendo el tiempo requerido para el establecimiento de las plántulas. El crecimiento inicial representa otro de los aspectos ampliamente evaluados en la literatura científica. Diversos estudios coinciden en que la aplicación temprana de bioestimulantes favorece el desarrollo del sistema radicular, incrementando la longitud, el número de raíces laterales y la superficie de absorción disponible para captar agua y nutrientes. Rouphael y Colla (2020) señalan que un sistema radicular más desarrollado durante las primeras etapas del cultivo constituye una ventaja fisiológica importante, ya que mejora la capacidad de adaptación de las plantas frente a fluctuaciones ambientales y optimiza el aprovechamiento de los recursos disponibles en el sustrato.

Asimismo, la evidencia muestra que el desarrollo temprano de la biomasa aérea también puede verse favorecido mediante la aplicación de bioestimulantes naturales. El incremento en la altura de las plántulas, el número de hojas y el área foliar permite aumentar la capacidad fotosintética desde las primeras etapas del desarrollo, favoreciendo un crecimiento vegetativo más vigoroso. Bulgari et al. (2019) destacan que estas respuestas fisiológicas contribuyen a mejorar la calidad de las plántulas destinadas al trasplante y favorecen un establecimiento más rápido cuando son trasladadas a las condiciones definitivas de cultivo.

No obstante, la literatura también pone de manifiesto que los efectos positivos observados durante la germinación y el crecimiento inicial no siempre se mantienen durante todo el ciclo del cultivo. Diversas investigaciones muestran que plantas con elevado vigor inicial pueden presentar posteriormente respuestas similares a las observadas en tratamientos sin bioestimulación cuando las condiciones ambientales, nutricionales o de manejo no favorecen la continuidad de dichos efectos. Según Yakhin et al. (2017), esta situación demuestra que el éxito de los bioestimulantes depende de su integración dentro de un programa agronómico completo y no únicamente de su aplicación durante las primeras etapas de desarrollo.

Otro aspecto relevante identificado en la revisión corresponde a la influencia de la concentración y del método de aplicación sobre la respuesta fisiológica de las semillas y plántulas. Diversos autores coinciden en que dosis moderadas suelen generar los mejores resultados, mientras que concentraciones excesivas pueden alterar el equilibrio metabólico de las plantas jóvenes o incluso reducir el porcentaje de germinación. Rouphael y Colla (2020) destacan que la determinación de protocolos específicos para cada tipo de bioestimulante constituye uno de los principales desafíos para optimizar su utilización durante el establecimiento del cultivo.

La evidencia científica también señala que la respuesta obtenida depende del genotipo del tomate y de las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrolla la germinación. Factores como la temperatura, la humedad del sustrato, la disponibilidad de oxígeno y la calidad fisiológica de las semillas pueden modificar significativamente la eficacia de los tratamientos bioestimulantes. En consecuencia, du Jardin (2015) recomiendan que las evaluaciones experimentales consideren simultáneamente estos factores con el fin de comprender de manera más precisa las causas de la variabilidad observada entre diferentes investigaciones.

En conjunto, los estudios revisados confirman que los bioestimulantes naturales representan una alternativa eficaz para favorecer la germinación y el crecimiento inicial del tomate bajo condiciones de invernadero. Sin embargo, la magnitud de sus efectos depende de la interacción entre el tipo de bioestimulante, las dosis aplicadas, el método de tratamiento, las características del cultivar y las condiciones ambientales del sistema de producción. Por ello, futuras

investigaciones deberán profundizar en la estandarización de los protocolos de aplicación y en la evaluación de la relación existente entre el vigor inicial de las plántulas y el rendimiento final del cultivo.

Desarrollo radicular y absorción de nutrientes

El desarrollo del sistema radicular constituye uno de los efectos más consistentemente reportados en la literatura sobre bioestimulantes naturales aplicados al cultivo de tomate. Las raíces representan el principal órgano responsable de la absorción de agua y nutrientes, además de desempeñar funciones esenciales en la síntesis de reguladores del crecimiento, el almacenamiento de reservas y la interacción con los microorganismos presentes en la rizosfera. En este contexto, du Jardin (2015) señala que una de las principales características de los bioestimulantes consiste en su capacidad para estimular el crecimiento radicular mediante mecanismos fisiológicos que incrementan la eficiencia de utilización de los recursos disponibles en el suelo o en los sustratos de cultivo.

La evidencia científica muestra que diferentes tipos de bioestimulantes favorecen la formación de raíces laterales, incrementan la longitud radicular y estimulan el desarrollo de pelos absorbentes, características que aumentan significativamente la superficie disponible para la captación de agua y nutrientes. Rouphael y Colla (2020) indican que estas modificaciones morfológicas permiten mejorar la eficiencia fisiológica de las plantas, especialmente durante las etapas de mayor demanda nutricional, contribuyendo a mantener un crecimiento más equilibrado y un mejor desempeño productivo.

Diversas investigaciones atribuyen estos efectos a la presencia de compuestos bioactivos capaces de regular procesos hormonales relacionados con el crecimiento de las raíces. Sustancias húmicas, extractos vegetales, aminoácidos y microorganismos promotores del crecimiento actúan mediante diferentes mecanismos que favorecen la división y elongación celular, promoviendo una arquitectura radicular más extensa y funcional. Según Canellas et al. (2015), las sustancias húmicas estimulan rutas fisiológicas asociadas con el desarrollo radicular, mientras que Backer et al. (2018) destacan que las bacterias promotoras del crecimiento contribuyen adicionalmente a mejorar la disponibilidad de nutrientes mediante procesos de fijación biológica de nitrógeno y solubilización de fósforo.

La mejora del sistema radicular repercute directamente sobre la eficiencia en la absorción de nutrientes. Diversos estudios muestran que plantas con raíces más desarrolladas presentan una mayor capacidad para captar nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes, optimizando la utilización de los fertilizantes aplicados durante el ciclo de cultivo. Colla y Rouphael (2015) señalan que esta mayor eficiencia nutricional constituye uno de los principales beneficios asociados con la utilización de bioestimulantes, ya que permite incrementar la productividad reduciendo parcialmente las pérdidas de nutrientes por lixiviación o inmovilización en el suelo.

Sin embargo, la literatura también evidencia que los efectos positivos sobre la absorción de nutrientes dependen de la disponibilidad inicial de estos elementos en el sistema de cultivo. Los bioestimulantes pueden mejorar la eficiencia de utilización de los nutrientes presentes, pero no pueden compensar completamente deficiencias nutricionales severas ocasionadas por programas inadecuados de fertilización. En este sentido, Rouphael y Colla (2020) destacan que los bioestimulantes deben considerarse herramientas complementarias dentro del manejo nutricional del cultivo y no sustitutos de una fertilización balanceada.

Otro aspecto identificado en la revisión corresponde a la interacción entre bioestimulación y condiciones ambientales. Factores como la temperatura, la humedad del sustrato, el pH y la conductividad eléctrica pueden modificar la respuesta del sistema radicular a los bioestimulantes, condicionando tanto el crecimiento de las raíces como la disponibilidad de nutrientes. Bulgari et al. (2019) indican que estas interacciones explican parte de la variabilidad observada entre investigaciones desarrolladas bajo diferentes condiciones experimentales, lo que pone de manifiesto la necesidad de adaptar las recomendaciones de aplicación a cada sistema de producción.

Asimismo, diversos autores plantean que el fortalecimiento del sistema radicular puede contribuir indirectamente a mejorar la tolerancia del cultivo frente a condiciones de estrés hídrico y salino. Un mayor volumen de raíces permite explorar una mayor cantidad de sustrato, incrementando la disponibilidad de agua durante períodos de baja humedad y favoreciendo el mantenimiento del equilibrio fisiológico de las plantas. Van Oosten et al. (2017) destacan que esta

capacidad adaptativa constituye una de las principales ventajas de los bioestimulantes en los actuales escenarios de agricultura sostenible y cambio climático.

En conjunto, la evidencia científica confirma que el desarrollo radicular constituye uno de los principales mecanismos mediante los cuales los bioestimulantes naturales mejoran la eficiencia nutricional y el crecimiento del tomate bajo condiciones de invernadero. No obstante, la magnitud de estos beneficios depende de la interacción entre el tipo de bioestimulante, las condiciones del cultivo, la disponibilidad de nutrientes y el manejo agronómico implementado. En consecuencia, futuras investigaciones deberán profundizar en la comprensión de los mecanismos fisiológicos responsables de estas respuestas y en el establecimiento de protocolos que permitan optimizar simultáneamente el desarrollo radicular y la eficiencia en el uso de nutrientes.

Efectos sobre el crecimiento vegetativo

El crecimiento vegetativo constituye uno de los indicadores más utilizados para evaluar la eficacia de los bioestimulantes naturales en el cultivo de tomate, ya que refleja la capacidad de las plantas para desarrollar estructuras responsables de la captación de luz, la absorción de nutrientes y la acumulación de biomasa necesaria para sostener la producción de frutos. Variables como la altura de la planta, el diámetro del tallo, el número de hojas, el área foliar y la biomasa aérea son ampliamente empleadas para determinar la respuesta fisiológica del cultivo frente a diferentes tratamientos bioestimulantes. Según Rouphael y Colla (2020), el incremento de estos parámetros suele asociarse con una mayor actividad metabólica y con una utilización más eficiente de los recursos disponibles durante las primeras fases del desarrollo.

La literatura revisada muestra que los bioestimulantes naturales favorecen el crecimiento vegetativo mediante diversos mecanismos de acción. Sustancias húmicas, extractos vegetales, aminoácidos, quitosano y microorganismos benéficos estimulan procesos relacionados con la división celular, la síntesis de clorofila y la actividad fotosintética, contribuyendo al desarrollo de plantas más vigorosas. De acuerdo con du Jardin (2015), estos efectos no dependen únicamente de la composición química de los bioestimulantes, sino también de su capacidad para activar rutas fisiológicas que optimizan el metabolismo vegetal y mejoran la eficiencia en el aprovechamiento del agua y de los nutrientes.

Uno de los efectos más frecuentes reportados en la literatura corresponde al incremento del área foliar. Diversos estudios indican que una mayor superficie fotosintética permite incrementar la captación de radiación solar y la producción de fotoasimilados, favoreciendo el crecimiento general de la planta y proporcionando mayores recursos para las etapas reproductivas posteriores. Bulgari et al. (2019) destacan que este beneficio adquiere especial importancia en sistemas de producción protegida, donde las condiciones ambientales pueden controlarse para maximizar la eficiencia fotosintética del cultivo.

Asimismo, la evidencia científica señala que el fortalecimiento del crecimiento vegetativo se encuentra estrechamente relacionado con las mejoras observadas en el desarrollo radicular y en la absorción de nutrientes. Un sistema radical más eficiente incrementa la disponibilidad de agua y elementos minerales para la planta, favoreciendo la formación de nuevos tejidos y el desarrollo equilibrado de tallos y hojas. Colla y Rouphael (2015) explican que esta interacción entre raíces y parte aérea constituye uno de los principales mecanismos mediante los cuales los bioestimulantes incrementan el vigor del cultivo sin alterar significativamente su equilibrio fisiológico cuando las aplicaciones son correctamente manejadas.

Sin embargo, la revisión también pone de manifiesto que un crecimiento vegetativo excesivo no siempre representa una ventaja desde el punto de vista productivo. Diversas investigaciones muestran que un incremento desproporcionado de la biomasa aérea puede aumentar la competencia por fotoasimilados entre los órganos vegetativos y reproductivos, afectando la formación y el llenado de los frutos. Según du Jardin (2015), la eficiencia de los bioestimulantes debe evaluarse considerando simultáneamente variables de crecimiento y rendimiento, ya que el objetivo final de la producción hortícola no consiste únicamente en obtener plantas de mayor tamaño, sino en maximizar la productividad y la calidad comercial de los frutos.

Otro aspecto identificado en la literatura corresponde a la influencia de las condiciones ambientales sobre la respuesta vegetativa del tomate. Factores como la temperatura, la intensidad luminosa, la humedad relativa, el manejo del riego y la disponibilidad de nutrientes modifican significativamente la eficacia de los bioestimulantes. Rouphael y Colla (2020) señalan que estas interacciones explican gran parte de la variabilidad observada entre investigaciones desarrolladas en diferentes regiones o bajo distintos sistemas de producción protegida, por lo que las recomendaciones de manejo deben adaptarse a las características específicas de cada ambiente de cultivo.

Además, diversos autores coinciden en que la respuesta vegetativa depende del momento de aplicación y de la dosis utilizada. Aplicaciones realizadas durante las primeras etapas del desarrollo suelen favorecer la formación de estructuras vegetativas, mientras que tratamientos tardíos pueden presentar efectos más limitados o concentrarse en procesos reproductivos. Yakhin et al. (2017) destacan que la definición de programas de aplicación específicos constituye uno de los principales retos para optimizar el uso de bioestimulantes y obtener respuestas consistentes bajo condiciones comerciales.

En conjunto, la evidencia científica confirma que los bioestimulantes naturales contribuyen significativamente al fortalecimiento del crecimiento vegetativo del tomate mediante la estimulación de procesos fisiológicos relacionados con el desarrollo foliar, la actividad fotosintética y la absorción de nutrientes. No obstante, estos efectos deben analizarse dentro de un contexto agronómico integral, considerando su interacción con el desarrollo reproductivo, las condiciones ambientales y las prácticas de manejo implementadas. La integración equilibrada de estos factores permitirá aprovechar de manera más eficiente el potencial de los bioestimulantes para incrementar la productividad y la sostenibilidad de los sistemas de producción de tomate bajo invernadero.

3.12. Influencia de los bioestimulantes sobre la floración y fructificación

La floración y la fructificación constituyen dos de las etapas fisiológicas más importantes en el ciclo productivo del tomate, ya que determinan en gran medida el rendimiento y la calidad de la cosecha. Estos procesos dependen de una compleja interacción entre factores genéticos, fisiológicos y ambientales, en la que el equilibrio hormonal, la disponibilidad de nutrientes, la actividad fotosintética y las condiciones de cultivo desempeñan un papel determinante. En este contexto, los bioestimulantes naturales han demostrado una capacidad significativa para favorecer la transición hacia la fase reproductiva y optimizar la formación de frutos mediante la regulación del metabolismo vegetal. Según Rouphael y Colla (2020), la estimulación de los procesos reproductivos constituye uno de los principales beneficios asociados con la utilización de bioestimulantes en cultivos hortícolas de alto valor.

La evidencia científica revisada muestra que la aplicación de bioestimulantes durante las etapas previas a la floración favorece la formación de inflorescencias y mejora el desarrollo de las estructuras reproductivas. Diversos estudios indican que sustancias húmicas, extractos vegetales, aminoácidos y microorganismos benéficos contribuyen a optimizar la actividad metabólica necesaria para la diferenciación floral, incrementando el número de flores viables por planta y favoreciendo una mayor sincronización del proceso reproductivo. Du Jardin (2015) señala que estos efectos responden a la capacidad de los bioestimulantes para modular procesos fisiológicos relacionados con la síntesis de fitohormonas y el transporte de fotoasimilados hacia los órganos reproductivos.

Uno de los efectos más consistentes identificados en la literatura corresponde al incremento del porcentaje de cuajado, es decir, de flores que logran transformarse en frutos. Numerosas investigaciones reportan que la aplicación de bioestimulantes naturales favorece este proceso al mejorar el estado fisiológico de las plantas, incrementar la disponibilidad de carbohidratos y optimizar el equilibrio hormonal durante la fecundación y el desarrollo inicial del fruto. Bulgari et al. (2019) explican que estas respuestas contribuyen a disminuir la caída prematura de flores y frutos recién formados, incrementando el potencial productivo del cultivo.

La fructificación también se ve favorecida por la acción de los bioestimulantes al promover un desarrollo más uniforme de los frutos durante todo el período de crecimiento. Una mayor eficiencia fotosintética, junto con una absorción más efectiva de agua y nutrientes, permite mantener un suministro constante de fotoasimilados hacia los órganos reproductivos, favoreciendo la expansión celular y el adecuado llenado de los frutos. Colla y Rouphael (2015) destacan que este proceso mejora la uniformidad de la producción y reduce la incidencia de deformaciones, abortos fisiológicos

y pérdidas asociadas con un desarrollo reproductivo deficiente, aspectos de especial relevancia en los sistemas intensivos de producción bajo invernadero.

No obstante, la respuesta de la floración y la fructificación no depende exclusivamente de la aplicación de bioestimulantes. La revisión evidencia que factores ambientales como la temperatura, la humedad relativa, la intensidad luminosa, el manejo del riego y la disponibilidad de nutrientes ejercen una influencia decisiva sobre el éxito reproductivo del cultivo. Temperaturas excesivamente elevadas o demasiado bajas pueden afectar la viabilidad del polen y disminuir la fecundación, limitando parcialmente los beneficios derivados de la bioestimulación. Rouphael y Colla (2020) señalan que, aunque los bioestimulantes contribuyen a incrementar la tolerancia fisiológica frente a condiciones de estrés, su eficacia continúa dependiendo de un manejo agronómico adecuado y de condiciones ambientales favorables.

Asimismo, diversos estudios coinciden en que el momento de aplicación constituye uno de los factores más importantes para maximizar la respuesta reproductiva del tomate. Las aplicaciones realizadas antes del inicio de la floración o durante las primeras etapas del desarrollo reproductivo suelen producir efectos más consistentes sobre el cuajado y la fructificación que aquellas efectuadas cuando los frutos ya se encuentran en fases avanzadas de crecimiento. Yakhin et al. (2017) destacan que la sincronización entre la aplicación del bioestimulante y las etapas fenológicas del cultivo resulta esencial para optimizar la eficiencia de estos productos.

Otro aspecto relevante identificado en la literatura corresponde a la variabilidad observada entre diferentes cultivares de tomate. Las diferencias genéticas pueden modificar la sensibilidad de las plantas frente a los bioestimulantes, originando respuestas distintas en cuanto al número de flores producidas, el porcentaje de cuajado y la capacidad de fructificación. Esta diversidad explica parte de las discrepancias encontradas entre investigaciones desarrolladas bajo diferentes condiciones experimentales y pone de manifiesto la necesidad de establecer recomendaciones específicas para cada material vegetal y sistema de producción.

En conjunto, la evidencia científica confirma que los bioestimulantes naturales ejercen una influencia positiva sobre la floración y la fructificación del tomate mediante la optimización del estado fisiológico de las plantas, el fortalecimiento del equilibrio hormonal y la mejora de la eficiencia metabólica. Sin embargo, la magnitud de estos beneficios depende de la interacción entre el tipo de bioestimulante, la dosis aplicada, el momento de aplicación, las condiciones ambientales y las características genéticas del cultivo. Por ello, futuras investigaciones deberán profundizar en la comprensión de los mecanismos fisiológicos que regulan estos procesos y desarrollar estrategias de manejo que permitan maximizar la eficiencia reproductiva y la productividad del tomate bajo condiciones de invernadero.

Efectos sobre el rendimiento del tomate

El rendimiento del tomate constituye el principal indicador utilizado para evaluar la eficacia agronómica de los bioestimulantes naturales, ya que integra el efecto acumulado de las respuestas fisiológicas generadas durante todo el ciclo del cultivo. Variables como el número de frutos por planta, el peso promedio de los frutos, el rendimiento por unidad de superficie y la productividad comercial permiten determinar si las mejoras observadas en el crecimiento vegetativo y reproductivo se traducen en incrementos reales de la producción. En este sentido, Rouphael y Colla (2020) señalan que el rendimiento representa la expresión final de múltiples procesos fisiológicos regulados por los bioestimulantes, razón por la cual constituye uno de los parámetros más estudiados en la literatura científica.

La revisión de la evidencia muestra que la mayoría de las investigaciones reportan incrementos significativos en el rendimiento del tomate cuando se aplican bioestimulantes naturales bajo condiciones adecuadas de manejo. Diversos estudios indican que extractos vegetales, sustancias húmicas, aminoácidos, quitosano, vermicompost y microorganismos promotores del crecimiento favorecen una mayor producción de frutos mediante la optimización de la absorción de nutrientes, el fortalecimiento de la actividad fotosintética y el incremento de la eficiencia metabólica. Según du Jardin (2015), estos efectos no dependen de un único mecanismo fisiológico, sino de la interacción de múltiples procesos que mejoran la capacidad productiva de las plantas.

Uno de los principales factores responsables del incremento del rendimiento corresponde al aumento en el número de frutos cosechados por planta. La mejora de la floración, el cuajado y la reducción del aborto floral permiten que una mayor proporción de estructuras reproductivas complete exitosamente su desarrollo hasta la cosecha. Bulgari et al. (2019) destacan que este comportamiento se observa con frecuencia en cultivos tratados con bioestimulantes que fortalecen el equilibrio fisiológico de las plantas y mejoran la disponibilidad de recursos durante las etapas reproductivas.

Además del número de frutos, numerosos estudios reportan incrementos en el peso promedio de cada fruto como consecuencia de una mayor disponibilidad de fotoasimilados durante el proceso de llenado. La optimización del sistema radicular y de la eficiencia nutricional favorece el transporte continuo de agua y nutrientes hacia los órganos reproductivos, permitiendo un crecimiento más uniforme y una mayor acumulación de biomasa en los frutos. Colla y Rouphael (2015) indican que esta combinación de un mayor número de frutos y un incremento en su peso constituye uno de los mecanismos que explica el aumento del rendimiento observado en diversos sistemas de producción protegida.

Sin embargo, la literatura también evidencia que la magnitud de las respuestas productivas presenta una considerable variabilidad entre investigaciones. Factores como el tipo de bioestimulante, la composición del producto, las dosis utilizadas, el momento de aplicación, el cultivar de tomate y las condiciones ambientales modifican significativamente los resultados obtenidos. Rouphael y Colla (2020) explican que estas diferencias dificultan la comparación directa entre estudios y ponen de manifiesto la necesidad de establecer protocolos estandarizados para evaluar la eficacia de los bioestimulantes en diferentes condiciones de producción.

Asimismo, diversos autores coinciden en señalar que el efecto de los bioestimulantes suele ser más evidente cuando las plantas se desarrollan bajo condiciones de estrés moderado o cuando existen limitaciones parciales en la disponibilidad de recursos. En estas circunstancias, la mejora de la eficiencia fisiológica permite mantener niveles adecuados de crecimiento y productividad. Por el contrario, en cultivos que ya reciben un manejo agronómico altamente optimizado, los incrementos de rendimiento pueden ser menores debido a que las plantas se encuentran próximas a su potencial productivo. Yakhin et al. (2017) destacan que esta situación explica parte de la variabilidad observada en la respuesta del cultivo entre diferentes experimentos.

Otro aspecto relevante identificado en la revisión corresponde a la necesidad de evaluar el rendimiento desde una perspectiva económica y ambiental. El incremento de la producción solo representa una ventaja cuando compensa el costo de los bioestimulantes y contribuye simultáneamente a mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes, agua y otros insumos agrícolas. Du Jardin (2015) señala que uno de los principales aportes de estos productos consiste precisamente en incrementar la sostenibilidad de los sistemas productivos mediante una utilización más eficiente de los recursos, aspecto que adquiere especial importancia en la agricultura intensiva bajo invernadero.

En conjunto, la evidencia científica confirma que los bioestimulantes naturales pueden incrementar significativamente el rendimiento del cultivo de tomate al mejorar diversos procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento, la nutrición y la reproducción de las plantas. No obstante, la magnitud de estos beneficios depende de múltiples factores agronómicos, ambientales y genéticos que condicionan la respuesta del cultivo. Por ello, futuras investigaciones deberán orientar sus esfuerzos hacia la estandarización de metodologías experimentales, la evaluación económica de las tecnologías bioestimulantes y la definición de estrategias de manejo que permitan maximizar simultáneamente la productividad y la sostenibilidad de los sistemas de producción de tomate bajo invernadero (Rouphael et al., 2018).

Efectos sobre la calidad de los frutos

La calidad de los frutos constituye uno de los principales criterios utilizados para evaluar el impacto de los bioestimulantes naturales en la producción de tomate, debido a su estrecha relación con la aceptación comercial, el valor nutricional y la rentabilidad del cultivo. Además del rendimiento, la agricultura moderna demanda frutos con características físicas, químicas y organolépticas que respondan a las exigencias del mercado y de los consumidores. En este contexto, los bioestimulantes han despertado un creciente interés por su capacidad para mejorar atributos

relacionados con el tamaño, la firmeza, el color, el contenido de sólidos solubles, la acidez y la concentración de compuestos bioactivos, sin generar los efectos ambientales asociados al uso intensivo de productos químicos convencionales. Rouphael y Colla (2020) señalan que uno de los principales aportes de los bioestimulantes consiste precisamente en incrementar simultáneamente la productividad y la calidad de las cosechas.

La evidencia científica revisada muestra que numerosos bioestimulantes naturales favorecen el desarrollo de frutos con mejores características comerciales. Diversas investigaciones reportan incrementos en el tamaño y peso de los frutos como consecuencia de una mayor disponibilidad de fotoasimilados y de una utilización más eficiente del agua y los nutrientes durante el proceso de llenado. Según Colla y Rouphael (2015), estas respuestas están estrechamente relacionadas con la optimización del metabolismo vegetal y con el fortalecimiento de los procesos fisiológicos que regulan el crecimiento del fruto durante las etapas posteriores al cuajado.

Uno de los parámetros de calidad más frecuentemente evaluados corresponde al contenido de sólidos solubles totales, indicador directamente relacionado con el sabor y la aceptación del tomate por parte de los consumidores. Diversos estudios muestran que la aplicación de bioestimulantes puede incrementar la concentración de azúcares y otros compuestos solubles mediante una mayor eficiencia fotosintética y un transporte más efectivo de carbohidratos hacia los frutos. Bulgari et al. (2019) destacan que estos efectos contribuyen a mejorar las características organolépticas del tomate, especialmente en sistemas de producción protegida donde las condiciones ambientales pueden controlarse con mayor precisión.

La firmeza del fruto representa otra variable ampliamente analizada en la literatura. Los bioestimulantes naturales, particularmente aquellos formulados con quitosano, extractos vegetales y sustancias húmicas, han demostrado favorecer una mayor consistencia de los tejidos mediante la regulación del metabolismo celular y el fortalecimiento de la estructura de la pared celular. Pichyangkura y Chadchawan (2015) indican que una mayor firmeza prolonga la vida útil poscosecha y disminuye las pérdidas ocasionadas durante el transporte y la comercialización, aspecto especialmente relevante para los mercados de exportación.

La revisión también evidencia mejoras en el contenido de compuestos funcionales con importancia nutricional. Diversas investigaciones reportan incrementos en la concentración de licopeno, vitamina C, compuestos fenólicos y otros antioxidantes tras la aplicación de determinados bioestimulantes naturales. Van Oosten et al. (2017) explican que estos cambios pueden atribuirse a la activación de rutas metabólicas relacionadas con la síntesis de metabolitos secundarios, los cuales cumplen funciones protectoras frente al estrés oxidativo y, al mismo tiempo, incrementan el valor nutricional de los frutos destinados al consumo humano.

Sin embargo, la respuesta de los parámetros de calidad presenta una considerable variabilidad entre investigaciones. Factores como el cultivar de tomate, las condiciones ambientales, el sistema de producción, el estado nutricional de las plantas, el momento de aplicación y la composición del bioestimulante modifican significativamente la magnitud de los efectos observados. Rouphael y Colla (2020) señalan que esta heterogeneidad dificulta la comparación entre estudios y pone de manifiesto la necesidad de desarrollar metodologías estandarizadas para la evaluación de la calidad de los frutos.

Asimismo, diversos autores coinciden en que la mejora de la calidad no debe analizarse de manera aislada respecto al rendimiento. En algunos casos, incrementos muy elevados en la producción pueden ocasionar una redistribución de fotoasimilados que afecte determinadas características fisicoquímicas del fruto. Por esta razón, du Jardin (2015) recomiendan evaluar simultáneamente variables de productividad y calidad para determinar el verdadero impacto agronómico de los bioestimulantes sobre el cultivo.

En conjunto, la evidencia científica confirma que los bioestimulantes naturales constituyen una herramienta eficaz para mejorar diversos atributos de calidad del tomate, favoreciendo la producción de frutos con mejores características comerciales, nutricionales y poscosecha. No obstante, la magnitud de estos beneficios depende de la interacción entre factores fisiológicos, genéticos, ambientales y de manejo agronómico. En consecuencia, futuras investigaciones deberán profundizar en la comprensión de los mecanismos responsables de estas respuestas y en la

definición de estrategias de aplicación que permitan optimizar simultáneamente el rendimiento y la calidad de los frutos en sistemas de producción bajo invernadero (Bulgari et al., 2019; Van Oosten et al., 2017).

Bioestimulantes naturales y respuesta del tomate frente a condiciones de estrés

La respuesta del tomate frente a condiciones de estrés constituye uno de los aspectos más estudiados en la investigación sobre bioestimulantes naturales, debido a que factores como la sequía, la salinidad, las temperaturas extremas, la radiación excesiva y las deficiencias nutricionales limitan significativamente el crecimiento, la floración, la fructificación y el rendimiento del cultivo. En este contexto, los bioestimulantes naturales han adquirido una creciente relevancia por su capacidad para fortalecer los mecanismos fisiológicos y bioquímicos que permiten a las plantas adaptarse a condiciones ambientales adversas sin recurrir al uso intensivo de insumos químicos. Rouphael y Colla (2020) señalan que uno de los principales aportes de estos productos consiste precisamente en incrementar la resiliencia fisiológica del cultivo mediante la activación de mecanismos naturales de regulación metabólica y defensa. La evidencia científica revisada muestra que diversos bioestimulantes naturales, entre ellos sustancias húmicas, extractos de algas, aminoácidos, quitosano y microorganismos promotores del crecimiento vegetal, contribuyen a mejorar la respuesta fisiológica del tomate frente a diferentes tipos de estrés ambiental. Estos productos estimulan procesos relacionados con la regulación osmótica, la estabilidad de las membranas celulares, la actividad antioxidante y la eficiencia fotosintética, permitiendo que las plantas mantengan un funcionamiento metabólico más estable aun cuando las condiciones de cultivo resultan desfavorables. Según Bulgari et al. (2019), estas respuestas representan uno de los mecanismos fisiológicos más importantes mediante los cuales los bioestimulantes favorecen la sostenibilidad de la producción agrícola.

Uno de los factores de estrés más estudiados corresponde al déficit hídrico. Diversas investigaciones muestran que los bioestimulantes favorecen el desarrollo de sistemas radiculares más extensos y eficientes, incrementando la capacidad de absorción de agua durante períodos de baja disponibilidad hídrica. Además, algunos compuestos bioactivos estimulan la acumulación de osmólitos compatibles, como prolina y determinados aminoácidos, que contribuyen a mantener el equilibrio osmótico y la turgencia celular. Van Oosten et al. (2017) destacan que estos mecanismos permiten reducir parcialmente los efectos fisiológicos asociados con la sequía y favorecen una recuperación más rápida una vez restablecidas las condiciones normales de humedad.

La salinidad constituye otra limitación frecuente en numerosos sistemas de producción bajo invernadero. El exceso de sales solubles reduce la absorción de agua, altera el equilibrio nutricional y favorece la acumulación de especies reactivas de oxígeno, afectando el crecimiento y la productividad del cultivo. La revisión evidencia que diversos bioestimulantes contribuyen a disminuir estos efectos mediante la regulación de la absorción selectiva de iones, el fortalecimiento de los sistemas antioxidantes y la protección de las estructuras celulares. Du Jardin (2015) señala que estas respuestas permiten mantener una mayor estabilidad fisiológica y reducir el impacto negativo del estrés salino sobre el rendimiento del tomate.

Asimismo, la literatura destaca el papel de los bioestimulantes en la activación de los sistemas antioxidantes de las plantas. Bajo condiciones de estrés, el incremento de radicales libres puede provocar daños en proteínas, lípidos y ácidos nucleicos, comprometiendo el funcionamiento celular. Diversos estudios reportan aumentos en la actividad de enzimas antioxidantes como superóxido dismutasa, catalasa y peroxidasa tras la aplicación de bioestimulantes naturales. Según Rouphael y Colla (2020), esta respuesta favorece la neutralización del estrés oxidativo y contribuye a preservar la integridad funcional de los tejidos vegetales.

No obstante, la magnitud de los efectos observados depende de múltiples factores relacionados con el tipo de estrés, la intensidad de las condiciones adversas, el momento de aplicación y la composición del bioestimulante utilizado. La revisión pone de manifiesto que los beneficios suelen ser más evidentes bajo condiciones de estrés moderado, mientras que situaciones extremadamente severas pueden superar la capacidad de respuesta fisiológica inducida por estos productos. Yakhin et al. (2017) destacan que los bioestimulantes incrementan la tolerancia de las plantas, pero no eliminan completamente las limitaciones impuestas por factores ambientales extremos.

Otro aspecto relevante identificado en la literatura corresponde a la variabilidad genética entre cultivares de tomate. Las diferencias en la capacidad intrínseca de adaptación al estrés modifican la intensidad de las respuestas obtenidas tras la aplicación de bioestimulantes, lo que explica parte de la heterogeneidad observada entre diferentes investigaciones. Esta situación evidencia la necesidad de desarrollar estrategias de manejo específicas que consideren simultáneamente las características del cultivar y las condiciones particulares del sistema de producción.

En conjunto, la evidencia científica confirma que los bioestimulantes naturales constituyen una herramienta eficaz para incrementar la tolerancia del tomate frente a diferentes tipos de estrés abiótico mediante la regulación de procesos fisiológicos, bioquímicos y metabólicos relacionados con la adaptación ambiental. Sin embargo, la eficacia de estas estrategias depende de la interacción entre el tipo de bioestimulante, las condiciones de cultivo y el nivel de estrés experimentado por las plantas. Por ello, futuras investigaciones deberán profundizar en la comprensión de los mecanismos moleculares implicados en estas respuestas y en el desarrollo de protocolos de aplicación que permitan fortalecer la resiliencia del cultivo frente a los desafíos derivados del cambio climático y de la intensificación de la agricultura protegida.

Bioestimulantes y manejo de enfermedades en tomate bajo invernadero

El manejo de enfermedades constituye uno de los principales desafíos para la producción de tomate bajo condiciones de invernadero, debido a que la elevada densidad de plantas, la humedad relativa y las temperaturas favorables pueden facilitar el desarrollo y la dispersión de diversos patógenos. Hongos, bacterias y algunos virus ocasionan importantes pérdidas económicas al afectar el crecimiento, el rendimiento y la calidad de los frutos. Frente a esta problemática, los bioestimulantes naturales han adquirido una creciente importancia como herramientas complementarias dentro de los programas de manejo integrado, ya que fortalecen los mecanismos fisiológicos de defensa de las plantas y contribuyen a reducir la incidencia y severidad de diversas enfermedades sin incrementar la dependencia de productos químicos convencionales. Según Rouphael y Colla (2020), la incorporación de bioestimulantes representa una estrategia compatible con los principios de la agricultura sostenible y con las actuales exigencias de reducción del impacto ambiental.

La literatura científica revisada muestra que numerosos bioestimulantes naturales incrementan la capacidad de respuesta del tomate frente al ataque de microorganismos fitopatógenos mediante la activación de mecanismos de resistencia inducida. A diferencia de los fungicidas o bactericidas convencionales, estos productos no actúan directamente sobre el agente causal, sino que estimulan los sistemas naturales de defensa de la planta, permitiéndole responder con mayor rapidez y eficiencia frente a procesos de infección. Malerba y Cerana (2016) señalan que compuestos como el quitosano inducen respuestas fisiológicas relacionadas con la síntesis de proteínas de defensa, el fortalecimiento de las paredes celulares y la activación de enzimas antioxidantes que limitan el avance de diversos patógenos.

Entre los bioestimulantes más estudiados para el manejo sanitario del tomate destacan el quitosano, los extractos de algas, las sustancias húmicas y las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR). Estos últimos desempeñan un papel especialmente importante debido a su capacidad para colonizar la rizosfera, competir por espacio y nutrientes con microorganismos patógenos y producir metabolitos con actividad antagonista. Backer et al. (2018) indican que determinadas especies bacterianas, además de favorecer el crecimiento vegetal, contribuyen a disminuir la incidencia de enfermedades radiculares mediante mecanismos biológicos que fortalecen el equilibrio microbiológico del suelo. Asimismo, diversos estudios reportan que los bioestimulantes favorecen la acumulación de compuestos fenólicos, fitoalexinas y otras sustancias relacionadas con la respuesta inmune vegetal. Estas moléculas participan activamente en la limitación del crecimiento de patógenos y en la reparación de tejidos afectados por procesos infecciosos. Van Oosten et al. (2017) destacan que la activación de estas rutas metabólicas incrementa la capacidad defensiva de las plantas y reduce parcialmente los daños ocasionados por enfermedades, especialmente cuando los bioestimulantes son incorporados de forma preventiva dentro del manejo agronómico.

La evidencia científica también muestra que la mejora del estado nutricional y fisiológico inducida por los bioestimulantes fortalece indirectamente la resistencia del cultivo. Plantas con un sistema radicular más desarrollado, mayor eficiencia fotosintética y un metabolismo más equilibrado presentan una mejor capacidad para tolerar el impacto de agentes patógenos y recuperarse después de procesos infecciosos. Bulgari et al. (2019) señalan que esta relación entre nutrición, crecimiento y sanidad vegetal explica parte de los efectos positivos observados sobre la reducción de la incidencia de enfermedades en diferentes sistemas hortícolas.

No obstante, la revisión pone de manifiesto que los bioestimulantes no deben considerarse sustitutos de los programas convencionales de manejo fitosanitario. Su eficacia depende del tipo de patógeno, del nivel de presión de la enfermedad, de las condiciones ambientales y del momento de aplicación. En situaciones de alta incidencia o epidemias severas, el control químico o biológico específico continúa siendo necesario para evitar pérdidas económicas significativas. Rouphael y Colla (2020) destacan que el mayor potencial de los bioestimulantes radica en su integración dentro de programas de manejo integrado de enfermedades, donde complementan otras estrategias preventivas y curativas.

Otro aspecto relevante identificado en la literatura corresponde a la necesidad de profundizar en el estudio de las interacciones entre los bioestimulantes y el microbioma asociado a las raíces del tomate. Investigaciones recientes indican que la modificación de las comunidades microbianas puede influir significativamente sobre la capacidad de las plantas para resistir enfermedades y mantener un equilibrio sanitario estable. Backer et al. (2018) consideran que este constituye uno de los campos de investigación con mayor potencial para el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en microorganismos benéficos.

En conjunto, la evidencia científica confirma que los bioestimulantes naturales representan una alternativa prometedora para fortalecer el manejo de enfermedades en tomate bajo condiciones de invernadero mediante la activación de mecanismos de defensa, el fortalecimiento del estado fisiológico de las plantas y la promoción de interacciones favorables con microorganismos benéficos. Sin embargo, su utilización debe integrarse con otras prácticas de manejo fitosanitario dentro de un enfoque preventivo e integral que permita mejorar simultáneamente la productividad, la sostenibilidad y la sanidad de los sistemas de producción hortícola (Halpern et al., 2015).

Influencia de los bioestimulantes sobre la nutrición vegetal

La nutrición vegetal constituye uno de los procesos fisiológicos más importantes para el crecimiento, desarrollo y productividad del cultivo de tomate, debido a que el suministro adecuado de macro y micronutrientes determina el funcionamiento de múltiples rutas metabólicas relacionadas con la fotosíntesis, la respiración, la síntesis de proteínas y la formación de frutos. En este contexto, los bioestimulantes naturales han despertado un creciente interés por su capacidad para mejorar la eficiencia en la absorción, transporte y utilización de los nutrientes sin incrementar necesariamente la cantidad de fertilizantes aplicados. Según du Jardin (2015), uno de los principales mecanismos de acción de los bioestimulantes consiste precisamente en optimizar la eficiencia nutricional de las plantas mediante la regulación de procesos fisiológicos y bioquímicos que favorecen un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles.

La evidencia científica revisada muestra que diferentes tipos de bioestimulantes, entre ellos sustancias húmicas, extractos vegetales, aminoácidos, quitosano y microorganismos promotores del crecimiento vegetal, incrementan la disponibilidad y absorción de nutrientes esenciales para el cultivo de tomate. Diversos estudios reportan mejoras en la captación de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y micronutrientes como hierro, zinc y manganeso, favoreciendo un desarrollo fisiológico más equilibrado y una mayor eficiencia metabólica. Rouphael y Colla (2020) señalan que estas respuestas se encuentran estrechamente relacionadas con la estimulación del crecimiento radicular y con el fortalecimiento de los mecanismos responsables del transporte de nutrientes desde la rizosfera hacia los tejidos vegetales.

Uno de los mecanismos más ampliamente documentados corresponde al incremento del desarrollo del sistema radicular. La formación de raíces más extensas, con mayor número de raíces laterales y pelos absorbentes, aumenta

considerablemente la superficie disponible para la exploración del suelo o del sustrato, favoreciendo una captación más eficiente de agua y elementos minerales. Canellas et al. (2015) explican que las sustancias húmicas desempeñan un papel fundamental en este proceso al estimular la elongación celular y la formación de nuevas estructuras radiculares, mejorando la capacidad de absorción de nutrientes durante todo el ciclo productivo.

La literatura también destaca el papel de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal en la disponibilidad de nutrientes. Diversas bacterias beneficiosas participan en procesos de fijación biológica de nitrógeno, solubilización de fósforo y movilización de otros elementos minerales que normalmente permanecen poco disponibles para las plantas. Backer et al. (2018) indican que estos microorganismos favorecen una interacción más eficiente entre las raíces y la microbiota del suelo, incrementando la disponibilidad de nutrientes y fortaleciendo simultáneamente el desarrollo fisiológico del cultivo.

Además de mejorar la absorción, los bioestimulantes favorecen una utilización más eficiente de los nutrientes ya incorporados por la planta. La evidencia científica muestra que estos productos estimulan la actividad de enzimas relacionadas con el metabolismo del nitrógeno, la síntesis de aminoácidos y proteínas, así como el transporte interno de compuestos minerales hacia los órganos de mayor demanda fisiológica. Colla y Rouphael (2015) señalan que esta mayor eficiencia nutricional permite optimizar el crecimiento vegetativo y reproductivo sin necesidad de incrementar proporcionalmente las dosis de fertilización mineral.

Otro aspecto relevante identificado en la literatura corresponde a la posibilidad de reducir parcialmente el uso de fertilizantes químicos mediante la incorporación de bioestimulantes dentro de programas de manejo nutricional. Diversas investigaciones reportan que la mejora en la eficiencia de absorción y utilización de nutrientes permite mantener niveles adecuados de crecimiento y productividad con menores pérdidas por lixiviación o inmovilización en el suelo. Bulgari et al. (2019) destacan que este beneficio posee importantes implicaciones ambientales, ya que contribuye a disminuir la contaminación asociada con el uso excesivo de fertilizantes y favorece sistemas de producción más sostenibles.

No obstante, la revisión también evidencia que los bioestimulantes no sustituyen el aporte de nutrientes esenciales requerido por el cultivo. Su función principal consiste en optimizar la utilización de los elementos disponibles y fortalecer los mecanismos fisiológicos relacionados con la nutrición vegetal, pero las plantas continúan dependiendo de un suministro adecuado de macro y micronutrientes para completar satisfactoriamente su ciclo biológico. Du Jardin (2015) enfatiza que estos productos deben integrarse dentro de programas de fertilización racional y no considerarse reemplazos de la nutrición mineral convencional.

Asimismo, la respuesta nutricional del tomate depende de diversos factores relacionados con las características del suelo o sustrato, las condiciones ambientales, el estado fenológico de las plantas y el tipo de bioestimulante utilizado. La heterogeneidad observada entre investigaciones pone de manifiesto la necesidad de establecer protocolos específicos para cada sistema de producción, considerando las particularidades de cada ambiente agrícola y las necesidades nutricionales del cultivo.

En conjunto, la evidencia científica confirma que los bioestimulantes naturales ejercen una influencia positiva sobre la nutrición vegetal al mejorar la absorción, movilización y utilización de nutrientes esenciales para el crecimiento del tomate. Estos efectos favorecen una mayor eficiencia fisiológica, fortalecen el desarrollo del cultivo y contribuyen a incrementar la sostenibilidad de los sistemas de producción bajo invernadero. Sin embargo, futuras investigaciones deberán profundizar en la comprensión de las interacciones entre bioestimulantes, fertilización y microbiota del suelo, con el propósito de desarrollar estrategias nutricionales más eficientes y ambientalmente responsables.

Posibilidades para reducir la utilización de fertilizantes convencionales

La creciente preocupación por los efectos ambientales derivados del uso intensivo de fertilizantes químicos ha impulsado la búsqueda de estrategias que permitan mantener la productividad agrícola mediante un manejo más eficiente de los recursos nutricionales. En el cultivo de tomate bajo invernadero, la aplicación excesiva de fertilizantes convencionales puede incrementar los costos de producción y generar problemas asociados con la contaminación de

suelos y cuerpos de agua, la acumulación de sales en los sustratos y la emisión de gases de efecto invernadero. En este contexto, los bioestimulantes naturales han surgido como una alternativa prometedora para optimizar la eficiencia en el uso de los nutrientes y reducir parcialmente la dependencia de fertilizantes sintéticos. Según du Jardin (2015), uno de los principales beneficios atribuidos a los bioestimulantes consiste en mejorar la utilización de los nutrientes disponibles, favoreciendo sistemas de producción más sostenibles.

La evidencia científica revisada muestra que la incorporación de bioestimulantes dentro de los programas de fertilización incrementa la eficiencia en la absorción y utilización de macro y micronutrientes, permitiendo obtener respuestas agronómicas satisfactorias con menores niveles de fertilización convencional. Diversas investigaciones reportan que sustancias húmicas, extractos vegetales, aminoácidos, hidrolizados de proteínas y microorganismos promotores del crecimiento favorecen una mayor disponibilidad de nutrientes en la rizosfera y optimizan su transporte hacia los tejidos vegetales. Rouphael y Colla (2020) señalan que estos efectos permiten mejorar la eficiencia del uso de los fertilizantes sin comprometer el crecimiento ni la productividad del cultivo.

Uno de los mecanismos más relevantes identificados en la literatura corresponde al fortalecimiento del sistema radicular. La formación de raíces más extensas y funcionales incrementa la capacidad de exploración del suelo o del sustrato, favoreciendo una absorción más eficiente de agua y nutrientes. Canellas et al. (2015) explican que las sustancias húmicas estimulan el desarrollo radicular mediante la activación de procesos fisiológicos relacionados con la elongación celular y la formación de raíces laterales, incrementando la eficiencia en el aprovechamiento de los fertilizantes aplicados.

Asimismo, los microorganismos promotores del crecimiento vegetal desempeñan un papel fundamental en la reducción de la dependencia de fertilizantes minerales. Diversas especies bacterianas participan en la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo y la movilización de potasio y otros nutrientes que normalmente permanecen poco disponibles para las plantas. Backer et al. (2018) destacan que estas interacciones biológicas incrementan la disponibilidad de nutrientes en la rizosfera y favorecen una nutrición más eficiente, reduciendo la necesidad de incrementar las dosis de fertilización química.

La literatura también evidencia que los bioestimulantes favorecen una utilización más eficiente de los nutrientes absorbidos mediante la activación de enzimas relacionadas con el metabolismo del nitrógeno, la síntesis de proteínas y el transporte interno de elementos minerales. Como consecuencia, una mayor proporción de los nutrientes aplicados es incorporada efectivamente a los procesos metabólicos de la planta, disminuyendo las pérdidas ocasionadas por lixiviación, volatilización o inmovilización en el suelo. Colla y Rouphael (2015) señalan que esta mayor eficiencia fisiológica constituye uno de los principales argumentos para promover el uso de bioestimulantes dentro de programas de fertilización sostenible.

Desde la perspectiva ambiental, la reducción parcial de fertilizantes convencionales representa una estrategia de gran importancia para disminuir los impactos negativos asociados con la agricultura intensiva. La disminución de las pérdidas de nitrógeno y fósforo contribuye a reducir los procesos de eutrofización de cuerpos de agua y la contaminación de acuíferos, mientras que una utilización más eficiente de los fertilizantes favorece la conservación de los recursos naturales y la mitigación de emisiones relacionadas con su fabricación y aplicación. Bulgari et al. (2019) destacan que estos beneficios posicionan a los bioestimulantes como herramientas estratégicas dentro de los modelos de producción agrícola orientados hacia la sostenibilidad.

No obstante, la revisión pone de manifiesto que la reducción de fertilizantes convencionales debe realizarse de manera gradual y sustentada en evidencia experimental. La magnitud de la disminución posible depende de factores como la fertilidad inicial del suelo, el sistema de producción, el tipo de bioestimulante empleado, el cultivar de tomate y las condiciones ambientales. Rouphael y Colla (2020) enfatizan que los bioestimulantes no reemplazan completamente la fertilización mineral, sino que incrementan su eficiencia, permitiendo optimizar las dosis de aplicación sin comprometer el rendimiento ni la calidad del cultivo.

Asimismo, diversos estudios coinciden en señalar la necesidad de desarrollar programas integrados de manejo nutricional que combinen fertilización racional, bioestimulantes y monitoreo permanente del estado nutricional de las

plantas. Esta estrategia permite ajustar las aplicaciones de nutrientes según las necesidades reales del cultivo y maximizar la eficiencia agronómica y ambiental de los sistemas de producción bajo invernadero.

En conjunto, la evidencia científica confirma que los bioestimulantes naturales ofrecen importantes posibilidades para reducir la utilización de fertilizantes convencionales mediante el fortalecimiento de la absorción, el transporte y la utilización eficiente de los nutrientes. Esta estrategia contribuye simultáneamente a mejorar la productividad, disminuir los costos de producción y reducir el impacto ambiental asociado con la fertilización intensiva. Sin embargo, futuras investigaciones deberán establecer protocolos específicos que definan el grado de reducción de fertilizantes compatible con diferentes condiciones de cultivo y tipos de bioestimulantes, fortaleciendo así el desarrollo de sistemas hortícolas más eficientes y sostenibles.

Producción de tomate sin suelo y utilización de bioestimulantes

La producción de tomate sin suelo ha experimentado un notable crecimiento durante las últimas décadas debido a las ventajas que ofrece en términos de eficiencia en el uso del agua, control de la nutrición mineral y optimización de las condiciones de cultivo. En estos sistemas, la utilización de bioestimulantes naturales ha adquirido una importancia creciente como estrategia para fortalecer el desarrollo fisiológico de las plantas, mejorar la absorción de nutrientes y aumentar la productividad sin incrementar significativamente el uso de fertilizantes convencionales. Según du Jardin (2015), los bioestimulantes actúan estimulando diversos procesos fisiológicos que favorecen la eficiencia nutricional y la capacidad adaptativa de las plantas, mientras que Rouphael y Colla (2020) destacan que su incorporación en sistemas hidropónicos y de cultivo sobre sustratos representa una de las principales tendencias para avanzar hacia modelos de horticultura intensiva más eficientes y sostenibles.

La evidencia científica revisada muestra que la aplicación de bioestimulantes en sistemas hidropónicos y de cultivo sobre sustratos favorece múltiples procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento, la nutrición y el rendimiento del tomate. Diversos estudios reportan mejoras en el desarrollo radicular, la absorción de nutrientes, la actividad fotosintética y la acumulación de biomasa cuando se incorporan sustancias húmicas, extractos vegetales, aminoácidos, hidrolizados de proteínas y microorganismos promotores del crecimiento dentro de los programas de fertirrigación. Según du Jardin (2015), estos efectos responden a la capacidad de los bioestimulantes para regular procesos metabólicos que incrementan la eficiencia en el uso de los recursos disponibles sin modificar significativamente la composición química de las soluciones nutritivas.

Uno de los principales beneficios identificados en la literatura corresponde al fortalecimiento del sistema radicular. En los sistemas sin suelo, donde el volumen de sustrato disponible suele ser limitado y el crecimiento de las raíces depende directamente de las condiciones del medio de cultivo, el desarrollo de un sistema radicular vigoroso constituye un factor determinante para garantizar una adecuada absorción de agua y nutrientes. Canellas et al. (2015) señalan que las sustancias húmicas y otros compuestos bioactivos estimulan la formación de raíces laterales y pelos absorbentes mediante la regulación de procesos hormonales y metabólicos, incrementando la superficie de contacto con la solución nutritiva y favoreciendo una mayor eficiencia fisiológica del cultivo.

Asimismo, la utilización de bioestimulantes contribuye a optimizar la eficiencia en el uso de nutrientes dentro de los sistemas hidropónicos. La evidencia demuestra que estos productos favorecen el transporte y la asimilación de macro y micronutrientes, reduciendo parcialmente las pérdidas ocasionadas por desequilibrios nutricionales y mejorando la utilización de los fertilizantes suministrados mediante fertirrigación. Colla y Rouphael (2015) destacan que este efecto adquiere especial importancia en la producción intensiva bajo invernadero, donde pequeñas variaciones en la disponibilidad de nutrientes pueden repercutir significativamente sobre el rendimiento, la calidad comercial de los frutos y la rentabilidad del sistema productivo.

La revisión también evidencia que los bioestimulantes incrementan la tolerancia del tomate frente a diferentes factores de estrés presentes en los sistemas de cultivo sin suelo. Fluctuaciones en la conductividad eléctrica, variaciones del pH de la solución nutritiva, limitaciones en el suministro de agua, acumulación de sales o cambios bruscos de temperatura pueden alterar el equilibrio fisiológico de las plantas y afectar su productividad. Diversos

estudios indican que la aplicación de bioestimulantes fortalece los mecanismos antioxidantes, mejora la regulación osmótica y favorece una mayor estabilidad metabólica bajo estas condiciones. Bulgari et al. (2019) señalan que estas respuestas contribuyen a mantener el crecimiento, la actividad fotosintética y la productividad incluso cuando el cultivo enfrenta condiciones ambientales o nutricionales subóptimas.

Otro aspecto relevante identificado en la literatura corresponde al creciente interés por la incorporación de microorganismos benéficos en sistemas hidropónicos. Aunque tradicionalmente estos sistemas han sido considerados ambientes con limitada actividad microbiana debido a la utilización de soluciones nutritivas controladas y sustratos inertes, investigaciones recientes demuestran que determinadas bacterias promotoras del crecimiento vegetal pueden establecer asociaciones favorables con las raíces incluso en sistemas de recirculación de nutrientes. Backer et al. (2018) indican que estos microorganismos favorecen la disponibilidad de nutrientes, fortalecen la salud radicular, mejoran la absorción de minerales y contribuyen a incrementar la eficiencia fisiológica del cultivo sin afectar el funcionamiento del sistema hidropónico.

La literatura también destaca que la utilización de bioestimulantes favorece una mayor eficiencia en el uso del agua, aspecto especialmente relevante en los sistemas de producción intensiva bajo invernadero. Diversos estudios muestran que la estimulación del crecimiento radicular y la regulación de procesos relacionados con la apertura estomática permiten mejorar el aprovechamiento del agua disponible, reduciendo el estrés hídrico y aumentando la eficiencia fisiológica del cultivo. Van Oosten et al. (2017) señalan que este beneficio adquiere especial importancia frente a los desafíos derivados del cambio climático y de la creciente necesidad de optimizar el uso de los recursos hídricos en la agricultura protegida.

No obstante, la revisión también pone de manifiesto que la respuesta de los bioestimulantes puede variar considerablemente según el tipo de sistema sin suelo utilizado. Factores como el sustrato empleado, el volumen radicular disponible, la frecuencia de fertirrigación, la composición de la solución nutritiva, el cultivar de tomate y las condiciones ambientales modifican la eficacia de los tratamientos. Rouphael y Colla (2020) destacan que esta variabilidad explica parte de las diferencias observadas entre investigaciones y pone de manifiesto la necesidad de desarrollar protocolos específicos para cada tecnología de producción, evitando extrapolar resultados obtenidos bajo condiciones experimentales diferentes.

Asimismo, diversos autores coinciden en que la incorporación de bioestimulantes dentro de sistemas de cultivo sin suelo debe formar parte de un manejo integral que combine una adecuada formulación de soluciones nutritivas, monitoreo permanente de parámetros fisicoquímicos, control ambiental y estrategias de manejo fitosanitario. La integración de estas prácticas permite maximizar la eficiencia en el uso de los recursos, reducir el impacto ambiental asociado con la producción intensiva y mantener elevados niveles de productividad y calidad comercial durante todo el ciclo del cultivo.

En conjunto, la evidencia científica confirma que la utilización de bioestimulantes naturales representa una alternativa eficaz para fortalecer la producción de tomate en sistemas sin suelo mediante la optimización de la nutrición, el desarrollo radicular, la eficiencia fisiológica, la utilización del agua y la tolerancia frente a condiciones de estrés. Su incorporación dentro de programas integrales de manejo permite incrementar la sostenibilidad de los sistemas hortícolas protegidos sin comprometer el rendimiento del cultivo. Sin embargo, futuras investigaciones deberán profundizar en la estandarización de dosis, momentos de aplicación y combinaciones de bioestimulantes para cada tipo de sistema sin suelo, con el propósito de desarrollar protocolos técnicamente sólidos que favorezcan una producción de tomate cada vez más eficiente, rentable y ambientalmente sostenible.

Concentración de los bioestimulantes y variabilidad de las respuestas

La concentración de los bioestimulantes constituye uno de los factores más determinantes para explicar la variabilidad de las respuestas observadas en el cultivo de tomate bajo invernadero. Aunque numerosos estudios coinciden en señalar efectos positivos derivados de su aplicación, la magnitud de estos beneficios depende en gran medida de la dosis empleada, la frecuencia de aplicación, el momento fenológico del cultivo y las características propias del

bioestimulante utilizado. Esta situación ha generado una importante heterogeneidad en los resultados reportados por la literatura científica, dificultando el establecimiento de recomendaciones universales para su manejo agronómico. Rouphael y Colla (2020) destacan que la optimización de las dosis constituye uno de los principales desafíos actuales para lograr una utilización eficiente y consistente de los bioestimulantes en los sistemas de producción hortícola.

La evidencia revisada muestra que muchos bioestimulantes presentan respuestas fisiológicas dependientes de la concentración aplicada. Dosis moderadas suelen estimular procesos relacionados con el desarrollo radicular, la actividad fotosintética, la absorción de nutrientes y el crecimiento vegetativo, mientras que concentraciones excesivamente elevadas pueden reducir estos efectos o incluso provocar respuestas fisiológicas desfavorables. Este comportamiento ha sido descrito para sustancias húmicas, extractos vegetales, aminoácidos, hidrolizados de proteínas y quitosano, cuyos efectos no aumentan de manera proporcional conforme se incrementa la dosis aplicada. Du Jardin (2015) señala que los bioestimulantes actúan mediante la regulación de procesos metabólicos complejos y no como simples fuentes de nutrientes, razón por la cual su eficacia depende del equilibrio entre la concentración utilizada y la capacidad fisiológica de respuesta de la planta.

Diversos autores explican que esta respuesta diferencial obedece a la naturaleza biológica de los compuestos presentes en los bioestimulantes. Muchos de ellos contienen moléculas con actividad similar a reguladores del crecimiento vegetal, péptidos bioactivos, compuestos fenólicos, polisacáridos y otras sustancias capaces de activar mecanismos de señalización celular. En consecuencia, pequeñas variaciones en la concentración pueden modificar significativamente la intensidad de las respuestas fisiológicas observadas. Bulgari et al. (2019) indican que estos mecanismos explican por qué una misma formulación puede generar resultados muy diferentes cuando se aplica en dosis distintas o bajo condiciones ambientales diferentes.

La variabilidad también se encuentra estrechamente relacionada con las características genéticas del cultivo. Diferentes cultivares de tomate presentan capacidades distintas para absorber, metabolizar y responder a los compuestos bioactivos presentes en los bioestimulantes. Algunas variedades muestran incrementos importantes en el desarrollo vegetativo y el rendimiento con determinadas concentraciones, mientras que otras responden de forma limitada o requieren ajustes en las dosis para alcanzar resultados similares. Colla y Rouphael (2015) señalan que esta interacción entre el genotipo y la concentración del bioestimulante constituye uno de los factores que contribuyen a la heterogeneidad observada entre investigaciones.

Otro aspecto ampliamente documentado corresponde a la influencia del estado fenológico sobre la eficacia de las concentraciones aplicadas. Las necesidades fisiológicas del tomate varían durante las diferentes etapas del ciclo de cultivo, por lo que una concentración adecuada para favorecer el establecimiento del sistema radicular puede no ser la más eficiente durante la floración, la fructificación o el llenado de frutos. La literatura científica coincide en que la sincronización entre la concentración del bioestimulante y la etapa de desarrollo de la planta incrementa significativamente la probabilidad de obtener respuestas favorables. Van Oosten et al. (2017) destacan que la regulación metabólica inducida por los bioestimulantes depende de la actividad fisiológica predominante en cada fase del crecimiento.

Las condiciones ambientales también modifican la respuesta de las plantas frente a diferentes concentraciones de bioestimulantes. Factores como la temperatura, la radiación solar, la humedad relativa, la disponibilidad de agua y el estado nutricional influyen directamente sobre la capacidad de absorción y utilización de los compuestos bioactivos. En ambientes favorables, concentraciones relativamente bajas pueden generar respuestas satisfactorias, mientras que bajo condiciones de estrés las plantas pueden requerir ajustes en las dosis o en la frecuencia de aplicación para mantener su eficacia. Rouphael y Colla (2020) destacan que esta interacción entre concentración y ambiente constituye uno de los principales motivos por los cuales los resultados experimentales no siempre son completamente reproducibles entre diferentes regiones o sistemas de producción.

Asimismo, la composición química de los bioestimulantes representa otra importante fuente de variabilidad. Productos comercializados bajo una misma categoría pueden diferir considerablemente en la concentración de sustancias bioactivas, el origen de las materias primas, los métodos de extracción y los procesos de formulación. Esta

falta de estandarización dificulta la comparación directa entre investigaciones y limita la posibilidad de establecer dosis de aplicación generalizadas. Du Jardin (2015) enfatiza la necesidad de caracterizar adecuadamente la composición de los bioestimulantes antes de extrapolar sus resultados a diferentes condiciones de cultivo.

La revisión también pone de manifiesto que las interacciones entre bioestimulantes y otras prácticas agronómicas pueden modificar significativamente la respuesta a las diferentes concentraciones aplicadas. La fertilización mineral, el manejo del riego, el tipo de sustrato, la densidad de plantación y las estrategias de manejo fitosanitario influyen sobre la eficacia de estos productos, generando respuestas que dependen del sistema de producción en su conjunto y no únicamente de la dosis utilizada. Esta interacción explica por qué protocolos similares pueden producir resultados distintos cuando se implementan bajo condiciones agronómicas diferentes.

En conjunto, la evidencia científica confirma que la concentración de los bioestimulantes constituye un factor determinante para explicar la variabilidad de las respuestas fisiológicas y productivas observadas en el cultivo de tomate. La optimización de las dosis debe considerar simultáneamente el tipo de bioestimulante, el cultivar, el estado fenológico, las condiciones ambientales y el sistema de producción empleado. En consecuencia, futuras investigaciones deberán orientarse hacia la estandarización de protocolos de aplicación y la identificación de concentraciones óptimas para diferentes condiciones de cultivo, permitiendo incrementar la reproducibilidad de los resultados y favorecer una utilización más eficiente de los bioestimulantes dentro de la horticultura protegida.

Frecuencia y momento de aplicación de los bioestimulantes

La frecuencia y el momento de aplicación de los bioestimulantes representan factores determinantes para alcanzar respuestas fisiológicas y productivas consistentes en el cultivo de tomate bajo invernadero. Aunque la composición química y la concentración de los productos influyen significativamente sobre su eficacia, la evidencia científica demuestra que los beneficios obtenidos dependen igualmente de la sincronización entre la aplicación y las diferentes etapas del desarrollo del cultivo. Debido a que los bioestimulantes actúan regulando procesos metabólicos y fisiológicos, su efectividad está estrechamente relacionada con el estado fenológico de las plantas y con las necesidades específicas que estas presentan durante cada fase de crecimiento. Rouphael y Colla (2020) destacan que la programación adecuada de las aplicaciones constituye uno de los componentes fundamentales para maximizar el potencial agronómico de los bioestimulantes.

La literatura revisada muestra que las primeras etapas del desarrollo del cultivo representan uno de los momentos más favorables para la aplicación de bioestimulantes. Durante el establecimiento de las plántulas y el desarrollo inicial del sistema radicular, las plantas presentan una elevada demanda de procesos relacionados con la diferenciación celular, la formación de nuevas raíces y la adaptación al trasplante. La aplicación de sustancias húmicas, aminoácidos, extractos vegetales y microorganismos promotores del crecimiento durante esta fase favorece el desarrollo radicular, incrementa la capacidad de absorción de nutrientes y mejora el establecimiento del cultivo. Du Jardin (2015) señala que la estimulación temprana de estos procesos fisiológicos contribuye a fortalecer el crecimiento posterior y aumenta la capacidad de respuesta de las plantas frente a condiciones ambientales adversas.

Otro momento de especial importancia corresponde al periodo previo a la floración y al inicio de la fructificación. Durante esta etapa se incrementan las demandas metabólicas relacionadas con la diferenciación floral, el cuajado de frutos y la redistribución de fotoasimilados hacia los órganos reproductivos. Diversas investigaciones reportan que la aplicación de bioestimulantes antes del inicio de la floración favorece la formación de inflorescencias, mejora el porcentaje de cuajado y contribuye al desarrollo inicial de los frutos. Bulgari et al. (2019) indican que la sincronización de las aplicaciones con las fases reproductivas permite potenciar la eficiencia fisiológica del cultivo y favorecer una mayor estabilidad en la producción.

La frecuencia de aplicación constituye otro factor ampliamente analizado por la literatura científica. Los estudios muestran que aplicaciones periódicas, realizadas en intervalos previamente establecidos durante el ciclo del cultivo, suelen generar respuestas más estables que aplicaciones únicas de elevada concentración. La repetición controlada de los tratamientos permite mantener una estimulación continua de los procesos fisiológicos relacionados con la

absorción de nutrientes, la actividad fotosintética y los mecanismos de defensa vegetal. Sin embargo, Rouphael y Colla (2020) señalan que una frecuencia excesiva no necesariamente incrementa los beneficios agronómicos y, en algunos casos, puede generar respuestas menos eficientes debido a la saturación de los mecanismos fisiológicos involucrados. Asimismo, la frecuencia óptima depende del tipo de bioestimulante empleado y de su mecanismo de acción. Los productos basados en microorganismos promotores del crecimiento suelen requerir aplicaciones que favorezcan el establecimiento y mantenimiento de poblaciones microbianas funcionales en la rizosfera, mientras que extractos vegetales, sustancias húmicas y aminoácidos pueden aplicarse siguiendo programas diferentes según la duración de sus efectos fisiológicos. Colla y Rouphael (2015) destacan que estas diferencias explican la diversidad de protocolos descritos en la literatura y la ausencia de esquemas universales de aplicación para todos los bioestimulantes disponibles en el mercado.

La vía de aplicación también influye sobre la frecuencia y el momento más apropiados para suministrar los bioestimulantes. Las aplicaciones foliares permiten una absorción relativamente rápida de compuestos bioactivos y suelen utilizarse durante etapas de elevada actividad fotosintética o cuando se busca una respuesta fisiológica inmediata frente a condiciones de estrés. En contraste, las aplicaciones al suelo o mediante fertirrigación favorecen principalmente el desarrollo del sistema radicular y la interacción con la microbiota del sustrato, proporcionando efectos más prolongados sobre la nutrición vegetal y el crecimiento de las raíces. Van Oosten et al. (2017) indican que la selección de la vía de aplicación debe considerar simultáneamente los objetivos fisiológicos perseguidos y las condiciones específicas del sistema de producción.

La revisión también pone de manifiesto que las condiciones ambientales modifican la eficacia del momento de aplicación. Factores como la temperatura, la radiación solar, la humedad relativa y la disponibilidad de agua influyen sobre la absorción y el metabolismo de los compuestos bioactivos presentes en los bioestimulantes. En consecuencia, aplicaciones realizadas bajo condiciones ambientales desfavorables pueden reducir considerablemente su efectividad, aun cuando se utilicen dosis adecuadas. Diversos estudios recomiendan realizar las aplicaciones durante periodos de menor estrés térmico y en momentos de alta actividad fisiológica para maximizar la respuesta del cultivo (Bulgari et al., 2019; Rouphael & Colla, 2020).

Otro aspecto relevante identificado en la literatura corresponde a la necesidad de integrar la programación de los bioestimulantes con el resto de las prácticas de manejo agronómico. La fertilización, el riego, el manejo fitosanitario y las labores culturales modifican las condiciones fisiológicas de las plantas y pueden potenciar o limitar los efectos de los bioestimulantes cuando no existe una adecuada coordinación entre estas prácticas. Por esta razón, numerosos autores recomiendan diseñar programas de manejo integral en los cuales la frecuencia y el momento de aplicación se ajusten a las necesidades específicas del cultivo y a las características del sistema de producción.

En conjunto, la evidencia científica confirma que la frecuencia y el momento de aplicación de los bioestimulantes constituyen variables decisivas para maximizar su eficacia en la producción de tomate bajo invernadero. La programación adecuada de las aplicaciones permite optimizar el desarrollo radicular, mejorar la eficiencia nutricional, fortalecer la respuesta fisiológica durante las etapas críticas del cultivo y favorecer una mayor estabilidad en el rendimiento y la calidad de los frutos. Sin embargo, futuras investigaciones deberán establecer protocolos estandarizados que integren el tipo de bioestimulante, el estado fenológico, las condiciones ambientales y el sistema de producción, permitiendo desarrollar recomendaciones técnicas más precisas para la horticultura protegida.

Métodos de aplicación de los bioestimulantes naturales

Los métodos de aplicación de los bioestimulantes naturales constituyen un componente esencial para determinar la magnitud de las respuestas fisiológicas y productivas observadas en el cultivo de tomate bajo invernadero. La eficacia de estos productos no depende únicamente de su composición química o de la concentración empleada, sino también de la vía mediante la cual los compuestos bioactivos entran en contacto con la planta y ejercen sus efectos sobre los diferentes procesos metabólicos. La literatura científica demuestra que la selección del método de aplicación debe responder a los objetivos específicos del tratamiento, al tipo de bioestimulante utilizado y a las condiciones

particulares del sistema de producción. Según du Jardin (2015), los bioestimulantes actúan mediante diversos mecanismos fisiológicos cuya eficacia puede variar significativamente dependiendo de la estrategia de aplicación adoptada.

Entre los métodos más ampliamente utilizados se encuentra la aplicación foliar, considerada una de las alternativas más eficientes para suministrar compuestos bioactivos directamente sobre los tejidos vegetales. Mediante esta técnica, sustancias como extractos de algas, aminoácidos, hidrolizados de proteínas, quitosano y extractos vegetales son absorbidas a través de la cutícula y los estomas, alcanzando rápidamente los tejidos metabólicamente activos. La literatura revisada indica que este método favorece respuestas fisiológicas rápidas relacionadas con la actividad fotosintética, la síntesis de clorofila, la regulación hormonal y la activación de mecanismos antioxidantes. Rouphael y Colla (2020) destacan que las aplicaciones foliares resultan especialmente eficaces durante periodos de elevada demanda fisiológica o cuando las plantas enfrentan condiciones de estrés ambiental.

Otro método ampliamente empleado corresponde a la aplicación al suelo o al sustrato, particularmente frecuente en los sistemas de producción bajo invernadero y en los cultivos sin suelo. Esta modalidad permite que los bioestimulantes interactúen directamente con el sistema radicular y con la microbiota presente en la rizosfera, favoreciendo el desarrollo de raíces, la absorción de nutrientes y la actividad biológica del medio de cultivo. Sustancias húmicas, microorganismos promotores del crecimiento vegetal y diversos compuestos orgánicos muestran resultados especialmente favorables cuando son incorporados mediante fertirrigación o aplicación directa al sustrato. Canellas et al. (2015) señalan que este método favorece una respuesta fisiológica más prolongada debido a la interacción continua entre los compuestos bioactivos y el sistema radicular.

La fertirrigación representa otra estrategia de creciente importancia en la horticultura protegida, ya que permite incorporar los bioestimulantes directamente dentro del sistema de riego, facilitando una distribución uniforme de los compuestos bioactivos en toda la zona radicular. Esta técnica resulta particularmente útil en sistemas hidropónicos y cultivos establecidos sobre sustratos inertes, donde el control preciso de la nutrición vegetal constituye un componente fundamental del manejo agronómico. Diversas investigaciones indican que la aplicación mediante fertirrigación favorece una utilización más eficiente de los bioestimulantes al sincronizar su suministro con la absorción de agua y nutrientes. Colla y Rouphael (2015) destacan que esta estrategia mejora la eficiencia nutricional y contribuye a optimizar el desarrollo fisiológico del cultivo durante todo su ciclo productivo.

La literatura también describe la aplicación de bioestimulantes durante el tratamiento de semillas o plántulas antes del trasplante. Esta modalidad busca estimular el establecimiento inicial del cultivo mediante la activación temprana del crecimiento radicular, el fortalecimiento de los mecanismos de defensa y la mejora de la capacidad de adaptación frente al estrés ocasionado por el trasplante. Diversos estudios muestran que la bioestimulación temprana favorece un establecimiento más uniforme de las plantas y mejora el desempeño fisiológico durante las primeras etapas del desarrollo. Du Jardin (2015) señala que estas aplicaciones iniciales pueden incrementar significativamente la eficiencia de los tratamientos posteriores al fortalecer desde el inicio los procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento.

La eficacia de cada método de aplicación también depende de las características fisicoquímicas del bioestimulante. Algunos productos presentan mayor estabilidad y capacidad de absorción cuando son aplicados sobre el follaje, mientras que otros requieren un contacto prolongado con el sistema radicular para expresar plenamente sus efectos fisiológicos. Los microorganismos benéficos, por ejemplo, necesitan establecerse en la rizosfera para ejercer funciones relacionadas con la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo y la producción de sustancias promotoras del crecimiento. Backer et al. (2018) destacan que la selección del método de aplicación debe considerar las características biológicas de cada formulación y el mecanismo mediante el cual actúan los microorganismos sobre la planta.

Asimismo, diversos estudios ponen de manifiesto que la combinación de diferentes métodos de aplicación puede potenciar la eficacia de los bioestimulantes en determinadas condiciones de producción. La utilización conjunta de aplicaciones foliares y radiculares permite estimular simultáneamente procesos relacionados con la actividad fotosintética, el metabolismo vegetal y el desarrollo del sistema radicular, generando respuestas fisiológicas más

integrales. No obstante, la magnitud de estos beneficios depende de la adecuada coordinación entre ambos métodos y de la compatibilidad de los productos utilizados. Bulgari et al. (2019) señalan que estas estrategias combinadas representan una de las líneas de investigación con mayor potencial para incrementar la eficiencia de los programas de bioestimulación en horticultura protegida.

Otro aspecto relevante identificado en la literatura corresponde a la influencia de las condiciones ambientales sobre la eficacia de los diferentes métodos de aplicación. Variables como la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar, la velocidad del viento y el estado hídrico de las plantas modifican la absorción y el transporte de los compuestos bioactivos. En aplicaciones foliares, por ejemplo, condiciones de elevada radiación o temperaturas excesivas pueden reducir la permanencia de las soluciones sobre la superficie de las hojas y limitar su absorción, mientras que en aplicaciones radiculares la disponibilidad de agua y las características del sustrato condicionan la movilidad de los compuestos bioactivos. Van Oosten et al. (2017) destacan que la adaptación del método de aplicación a las condiciones ambientales constituye un elemento esencial para maximizar la eficiencia de los bioestimulantes.

En conjunto, la evidencia científica confirma que la selección del método de aplicación representa un factor decisivo para optimizar la respuesta del cultivo de tomate frente al uso de bioestimulantes naturales. La elección entre aplicaciones foliares, radiculares, fertirrigación o tratamientos de semillas debe fundamentarse en las características del bioestimulante, los objetivos agronómicos, el estado fisiológico del cultivo y las condiciones del sistema de producción. En consecuencia, futuras investigaciones deberán continuar evaluando la eficiencia comparativa de los diferentes métodos de aplicación y desarrollar protocolos estandarizados que permitan maximizar los beneficios fisiológicos, productivos y ambientales asociados al uso de bioestimulantes en la horticultura protegida.

Interacción entre bioestimulantes, variedades de tomate y condiciones ambientales

La respuesta del cultivo de tomate a los bioestimulantes naturales constituye el resultado de una compleja interacción entre las características del producto aplicado, el potencial genético de la variedad cultivada y las condiciones ambientales presentes durante el ciclo de producción. La literatura científica coincide en señalar que los efectos positivos atribuidos a los bioestimulantes no pueden interpretarse como respuestas uniformes para todos los sistemas agrícolas, ya que su eficacia depende de múltiples factores fisiológicos y ambientales que modifican la capacidad de las plantas para percibir y responder a los compuestos bioactivos. Rouphael y Colla (2020) destacan que esta interacción multifactorial representa uno de los principales desafíos para la estandarización de protocolos de aplicación en la horticultura moderna.

La variabilidad genética existente entre las diferentes variedades de tomate constituye uno de los factores que mayor influencia ejerce sobre la respuesta a los bioestimulantes. Cada cultivar presenta diferencias en su arquitectura radicular, eficiencia fotosintética, metabolismo hormonal, capacidad de absorción de nutrientes y tolerancia frente a condiciones de estrés, características que determinan la magnitud de las respuestas fisiológicas inducidas por estos productos. Como consecuencia, una misma formulación puede generar incrementos significativos en el crecimiento, el rendimiento o la calidad de los frutos en determinadas variedades, mientras que en otras los efectos pueden ser más limitados o incluso estadísticamente no significativos. Colla y Rouphael (2015) señalan que la interacción entre el genotipo y los bioestimulantes constituye uno de los principales factores responsables de la heterogeneidad observada entre los resultados experimentales.

La literatura revisada también evidencia que las condiciones ambientales modifican profundamente la eficacia de los bioestimulantes durante el cultivo del tomate. Variables como la temperatura, la radiación solar, la humedad relativa, la disponibilidad de agua, la concentración de dióxido de carbono y las características del suelo o sustrato influyen directamente sobre la actividad metabólica de las plantas y, por tanto, sobre su capacidad para responder a los compuestos bioactivos. Du Jardin (2015) explica que los bioestimulantes no actúan de forma independiente del ambiente, sino que potencian procesos fisiológicos cuya intensidad depende del estado funcional del cultivo y de las condiciones bajo las cuales se desarrolla.

En condiciones ambientales favorables, las plantas suelen responder mediante incrementos en la actividad fotosintética, el crecimiento vegetativo y la eficiencia en la absorción de nutrientes, favoreciendo mayores niveles de productividad. Sin embargo, bajo condiciones de estrés ocasionadas por altas temperaturas, déficit hídrico, salinidad o fluctuaciones térmicas, los bioestimulantes pueden ejercer funciones diferentes relacionadas con la regulación osmótica, la activación de sistemas antioxidantes y la estabilización del metabolismo celular. Bulgari et al. (2019) destacan que esta doble función, promotora del crecimiento y mitigadora del estrés, explica gran parte del interés actual por estos productos dentro de los programas de agricultura sostenible.

Otro aspecto relevante identificado en la literatura corresponde a la interacción entre los bioestimulantes y las características fisicoquímicas del suelo o del sustrato de cultivo. La disponibilidad de nutrientes, el contenido de materia orgánica, el pH, la conductividad eléctrica y la actividad biológica del medio modifican la respuesta fisiológica del tomate frente a las aplicaciones de bioestimulantes. En sistemas con adecuada fertilidad, los efectos suelen manifestarse principalmente mediante mejoras en la eficiencia metabólica y la calidad de los frutos, mientras que en ambientes con limitaciones nutricionales o condiciones de estrés las respuestas suelen orientarse hacia el fortalecimiento del sistema radicular y la optimización de la absorción de nutrientes. Canellas et al. (2015) señalan que estas interacciones deben considerarse al diseñar programas de manejo específicos para cada sistema productivo.

La respuesta diferencial entre variedades también se relaciona con la capacidad genética de cada cultivar para sintetizar y regular fitohormonas, compuestos antioxidantes y proteínas involucradas en los mecanismos de defensa vegetal. Diversas investigaciones muestran que algunas variedades poseen mayor sensibilidad frente a sustancias húmicas, extractos de algas, aminoácidos o microorganismos promotores del crecimiento, mientras que otras requieren diferentes estrategias de aplicación para expresar respuestas fisiológicas similares. Esta variabilidad confirma que los bioestimulantes no deben evaluarse únicamente en función de sus características químicas, sino también considerando las particularidades fisiológicas del material vegetal utilizado. Van Oosten et al. (2017) indican que el conocimiento de estas interacciones permitirá desarrollar programas de bioestimulación cada vez más específicos y eficientes.

Asimismo, la literatura pone de manifiesto que las prácticas de manejo agronómico modifican la interacción entre los bioestimulantes, las variedades de tomate y el ambiente. La fertilización, la frecuencia de riego, la densidad de plantación, la poda, el manejo fitosanitario y el sistema de conducción influyen sobre el estado fisiológico del cultivo y condicionan la respuesta obtenida tras la aplicación de los bioestimulantes. Por esta razón, protocolos desarrollados bajo determinadas condiciones experimentales no siempre pueden extrapolarse directamente a otros sistemas de producción sin considerar las diferencias existentes en el manejo agronómico.

Diversos autores coinciden en señalar que la comprensión de estas interacciones representa una de las principales líneas de investigación para el futuro desarrollo de la bioestimulación agrícola. La integración de herramientas fisiológicas, moleculares y genómicas permitirá identificar variedades con mayor capacidad de respuesta frente a diferentes tipos de bioestimulantes y diseñar estrategias adaptadas a las condiciones ambientales específicas de cada región. Rouphael y Colla (2020) destacan que este enfoque permitirá avanzar hacia modelos de agricultura de precisión donde la selección del bioestimulante y su forma de aplicación respondan simultáneamente al genotipo, al ambiente y al sistema de producción.

En conjunto, la evidencia científica confirma que la eficacia de los bioestimulantes naturales depende de una estrecha interacción entre las características genéticas de las variedades de tomate y las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrolla el cultivo. La comprensión de estas relaciones resulta fundamental para optimizar el manejo agronómico, incrementar la reproducibilidad de los resultados experimentales y desarrollar programas de bioestimulación adaptados a diferentes sistemas de producción. Sin embargo, aún son necesarias investigaciones que integren enfoques fisiológicos, agronómicos y moleculares para comprender con mayor precisión los mecanismos que regulan estas interacciones y fortalecer el uso eficiente de los bioestimulantes en la horticultura protegida (European Commission, 2019; Rouphael y Colla, 2020).

Bioestimulantes naturales y sostenibilidad de los sistemas productivos

La sostenibilidad de los sistemas productivos constituye uno de los principales desafíos de la agricultura contemporánea, especialmente en cultivos intensivos como el tomate bajo invernadero, donde la elevada demanda de fertilizantes, agua y productos fitosanitarios puede generar importantes impactos ambientales. En este contexto, los bioestimulantes naturales han adquirido un papel estratégico debido a su capacidad para mejorar la eficiencia fisiológica de las plantas, optimizar el aprovechamiento de los recursos disponibles y reducir parcialmente la dependencia de insumos sintéticos. La literatura científica reconoce que estos productos representan una herramienta relevante para avanzar hacia modelos agrícolas más sostenibles, capaces de mantener altos niveles de productividad sin comprometer la conservación de los recursos naturales. Según du Jardin (2015), los bioestimulantes deben entenderse como componentes de una agricultura orientada a incrementar simultáneamente la eficiencia productiva y la sostenibilidad ambiental.

La evidencia científica revisada demuestra que uno de los principales aportes de los bioestimulantes a la sostenibilidad radica en el incremento de la eficiencia en el uso de los nutrientes. Al estimular el desarrollo del sistema radicular, mejorar la absorción de macro y micronutrientes y favorecer una utilización más eficiente de los fertilizantes aplicados, estos productos contribuyen a disminuir las pérdidas ocasionadas por lixiviación, volatilización y fijación de nutrientes en el suelo. Como consecuencia, es posible optimizar los programas de fertilización y reducir parcialmente el consumo de fertilizantes minerales sin afectar significativamente el rendimiento del cultivo. Rouphael y Colla (2020) destacan que esta mejora en la eficiencia nutricional constituye uno de los mecanismos mediante los cuales los bioestimulantes favorecen la sostenibilidad de los sistemas hortícolas intensivos.

Otro aspecto ampliamente documentado corresponde al uso más eficiente del recurso hídrico. Diversas investigaciones muestran que la aplicación de bioestimulantes fortalece el desarrollo radicular, mejora la regulación estomática y optimiza los mecanismos fisiológicos relacionados con la absorción y conservación del agua. Estas respuestas permiten incrementar la eficiencia en el uso hídrico y disminuir los efectos negativos asociados con periodos de déficit de humedad o restricciones en el suministro de agua para riego. Van Oosten et al. (2017) señalan que esta característica adquiere especial relevancia frente al cambio climático y a la creciente necesidad de desarrollar estrategias agrícolas que permitan producir más alimentos utilizando menores cantidades de agua.

La literatura también evidencia que los bioestimulantes contribuyen a reducir el impacto ambiental derivado del uso intensivo de productos químicos en la agricultura. Aunque estos productos no sustituyen completamente a los fertilizantes ni a los fitosanitarios convencionales, su incorporación dentro de programas de manejo integrado permite disminuir parcialmente la cantidad de insumos sintéticos requeridos durante el ciclo productivo. La reducción en el uso de fertilizantes minerales favorece una menor contaminación de suelos y cuerpos de agua, mientras que el fortalecimiento de los mecanismos naturales de defensa vegetal puede contribuir a disminuir la presión ejercida por algunas enfermedades y reducir la necesidad de aplicaciones fitosanitarias. Bulgari et al. (2019) destacan que estos beneficios ambientales representan una de las principales razones que explican el creciente interés por los bioestimulantes en los sistemas agrícolas modernos.

Asimismo, numerosos estudios resaltan la importancia de los bioestimulantes para fortalecer la salud del suelo y la biodiversidad microbiana. La aplicación de sustancias húmicas, vermicompost y microorganismos promotores del crecimiento vegetal favorece el desarrollo de comunidades microbianas beneficiosas que participan en procesos de descomposición de materia orgánica, reciclaje de nutrientes y regulación biológica de diversos procesos edáficos. Backer et al. (2018) indican que estas interacciones contribuyen a mejorar la calidad biológica del suelo y fortalecen el funcionamiento de los agroecosistemas, favoreciendo una producción más estable y resiliente en el largo plazo.

Otro componente relevante de la sostenibilidad corresponde a la posibilidad de incrementar la resiliencia de los sistemas productivos frente a condiciones ambientales adversas. La literatura científica demuestra que los bioestimulantes fortalecen los mecanismos fisiológicos relacionados con la tolerancia al estrés hídrico, salino, térmico y oxidativo, permitiendo que las plantas mantengan niveles adecuados de crecimiento y productividad bajo escenarios menos favorables. Esta capacidad de adaptación adquiere una importancia creciente frente a la mayor frecuencia e

intensidad de eventos climáticos extremos asociados al cambio climático. Rouphael y Colla (2020) señalan que la mejora en la resiliencia fisiológica del cultivo constituye uno de los principales aportes de los bioestimulantes para garantizar la sostenibilidad futura de la producción agrícola.

La revisión también pone de manifiesto que la sostenibilidad promovida por los bioestimulantes no depende exclusivamente de sus propiedades biológicas, sino de su integración dentro de programas de manejo agronómico racional. La combinación de bioestimulantes con prácticas como la fertilización balanceada, el uso eficiente del agua, la rotación de cultivos, el manejo integrado de plagas y enfermedades y la conservación de la calidad del suelo permite potenciar significativamente sus beneficios. Colla y Rouphael (2015) destacan que los bioestimulantes deben considerarse parte de un enfoque integral de producción sostenible y no como soluciones independientes capaces de resolver por sí solas los problemas asociados con la agricultura intensiva.

Desde la perspectiva económica, la utilización de bioestimulantes también puede contribuir a mejorar la sostenibilidad de las explotaciones agrícolas mediante la reducción parcial de costos relacionados con fertilización, manejo del estrés y pérdidas de productividad ocasionadas por condiciones ambientales desfavorables. Aunque la magnitud de estos beneficios depende de las características de cada sistema de producción, diversos estudios coinciden en señalar que la mejora de la eficiencia en el uso de los recursos puede incrementar la rentabilidad sin comprometer la calidad de los frutos ni la estabilidad del rendimiento. Esta dimensión económica complementa los beneficios ambientales y sociales que caracterizan a los sistemas agrícolas sostenibles.

No obstante, la literatura revisada reconoce que aún existen importantes desafíos para consolidar el papel de los bioestimulantes dentro de la agricultura sostenible. La diversidad de formulaciones comerciales, la variabilidad en su composición, la ausencia de protocolos universalmente aceptados y la heterogeneidad de las condiciones de cultivo dificultan la comparación entre investigaciones y limitan la formulación de recomendaciones técnicas estandarizadas. Du Jardin (2015) señala la necesidad de profundizar en la comprensión de los mecanismos fisiológicos y moleculares responsables de la acción de los bioestimulantes con el propósito de optimizar su utilización en diferentes sistemas agrícolas.

En conjunto, la evidencia científica confirma que los bioestimulantes naturales representan una herramienta de gran relevancia para fortalecer la sostenibilidad de los sistemas productivos de tomate bajo invernadero. Su capacidad para mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes y agua, favorecer la salud del suelo, incrementar la resiliencia frente al estrés ambiental y reducir parcialmente la dependencia de insumos sintéticos contribuye al desarrollo de modelos agrícolas más eficientes y ambientalmente responsables. Sin embargo, el aprovechamiento pleno de estos beneficios requiere continuar desarrollando investigaciones orientadas a estandarizar protocolos de aplicación e integrar los bioestimulantes dentro de estrategias de manejo sostenible que respondan a las necesidades específicas de cada sistema de producción.

Viabilidad económica de la utilización de bioestimulantes

La viabilidad económica constituye uno de los principales criterios para determinar la adopción de los bioestimulantes naturales dentro de los sistemas comerciales de producción de tomate bajo invernadero. Aunque numerosos estudios han demostrado los beneficios fisiológicos y agronómicos asociados con estos productos, su incorporación en los programas de manejo depende, en gran medida, de que los incrementos en productividad, calidad de los frutos y eficiencia en el uso de los recursos compensen los costos derivados de su adquisición y aplicación. En este sentido, la literatura científica señala que la evaluación económica de los bioestimulantes debe considerar no solo los costos directos del producto, sino también los efectos sobre el rendimiento, la reducción del uso de insumos convencionales, la calidad comercial de la producción y la rentabilidad global del sistema agrícola. Rouphael y Colla (2020) destacan que el análisis costo-beneficio representa un componente indispensable para valorar la conveniencia de incorporar bioestimulantes en la agricultura intensiva.

La evidencia científica revisada muestra que uno de los principales beneficios económicos derivados del uso de bioestimulantes corresponde al incremento del rendimiento productivo. Diversos estudios reportan aumentos en el

número de frutos por planta, el peso promedio de los frutos y la producción total por unidad de superficie, factores que repercuten directamente sobre los ingresos obtenidos por los productores. Sin embargo, la magnitud de estos beneficios varía considerablemente según el tipo de bioestimulante, la variedad cultivada, las condiciones ambientales y el manejo agronómico implementado. Du Jardin (2015) señala que la rentabilidad asociada a los bioestimulantes depende de la capacidad de estos productos para generar incrementos productivos suficientemente elevados que justifiquen la inversión realizada.

Además del incremento en el rendimiento, numerosos trabajos destacan la mejora en la calidad comercial de los frutos como uno de los principales factores que fortalecen la rentabilidad de los sistemas productivos. Los bioestimulantes favorecen atributos como el tamaño, la uniformidad, la firmeza, el contenido de sólidos solubles, la concentración de licopeno y otros compuestos antioxidantes, características que incrementan el valor comercial del tomate y permiten acceder a mercados que demandan productos de mayor calidad. Colla y Rouphael (2015) indican que estos beneficios pueden generar retornos económicos adicionales que, en algunos casos, superan incluso los obtenidos únicamente por el incremento en el volumen de producción.

La reducción parcial de los costos de producción constituye otro aspecto relevante identificado en la literatura. Al mejorar la eficiencia en la absorción y utilización de nutrientes, los bioestimulantes permiten optimizar los programas de fertilización y disminuir, en determinadas condiciones, el consumo de fertilizantes minerales. Asimismo, el fortalecimiento de la tolerancia frente a diferentes tipos de estrés puede reducir las pérdidas de rendimiento ocasionadas por condiciones ambientales desfavorables y disminuir algunos costos asociados al manejo del cultivo. Rouphael y Colla (2020) destacan que estas mejoras en la eficiencia del uso de los recursos contribuyen a incrementar la competitividad económica de los sistemas hortícolas protegidos.

No obstante, la literatura también reconoce que la rentabilidad de los bioestimulantes no es uniforme en todos los sistemas de producción. La amplia diversidad de formulaciones comerciales disponibles en el mercado, las diferencias en sus mecanismos de acción y la variabilidad en las respuestas fisiológicas del cultivo dificultan la realización de generalizaciones sobre su comportamiento económico. Algunos productos presentan elevados costos de adquisición que solo pueden justificarse cuando generan incrementos importantes en productividad o calidad, mientras que otros ofrecen beneficios más moderados con inversiones relativamente bajas. Bulgari et al. (2019) señalan que la selección del bioestimulante debe basarse en evaluaciones técnicas y económicas específicas para cada sistema productivo.

La escala de producción también influye significativamente sobre la viabilidad económica de estos productos. En explotaciones comerciales de gran tamaño, donde pequeños incrementos porcentuales en el rendimiento representan aumentos importantes en el volumen total de producción, la utilización de bioestimulantes puede generar beneficios económicos considerables. En contraste, para pequeños productores, la inversión inicial puede representar una proporción mayor de los costos de producción, por lo que resulta fundamental seleccionar productos cuya eficacia haya sido demostrada bajo condiciones similares a las de su sistema agrícola. Esta diferencia pone de manifiesto la necesidad de adaptar las recomendaciones técnicas a las características socioeconómicas de cada tipo de explotación. Otro aspecto de creciente interés corresponde a la demanda del mercado por alimentos obtenidos mediante prácticas agrícolas sostenibles. El incremento del consumo de productos con menor impacto ambiental ha favorecido la adopción de tecnologías que reduzcan la dependencia de fertilizantes y otros insumos sintéticos. En este contexto, la utilización de bioestimulantes puede representar una ventaja competitiva para los productores al facilitar el acceso a mercados diferenciados que valoran la sostenibilidad ambiental y la calidad nutricional de los alimentos. Van Oosten et al. (2017) destacan que esta tendencia puede incrementar el valor agregado de la producción y fortalecer la rentabilidad de los sistemas agrícolas sostenibles.

La literatura revisada también señala que los análisis económicos sobre bioestimulantes aún presentan importantes limitaciones metodológicas. Muchos estudios se concentran en evaluar variables fisiológicas y agronómicas, mientras que son menos frecuentes las investigaciones que incorporan análisis detallados de costos de producción, retorno de la inversión, margen de utilidad, indicadores financieros o evaluación económica de largo plazo. Esta situación dificulta la comparación entre investigaciones y limita la formulación de recomendaciones económicas sólidamente

fundamentadas. Du Jardin (2015) destaca la necesidad de integrar evaluaciones agronómicas y económicas dentro de futuros estudios para proporcionar información más útil a productores y responsables de políticas agrícolas.

Asimismo, la rentabilidad debe analizarse considerando los beneficios indirectos que generan los bioestimulantes sobre la sostenibilidad de los sistemas productivos. La mejora de la salud del suelo, la reducción del impacto ambiental, el uso más eficiente del agua y los nutrientes y el fortalecimiento de la resiliencia frente al cambio climático representan beneficios económicos que pueden manifestarse progresivamente en el mediano y largo plazo mediante una mayor estabilidad de la producción y una reducción de los costos asociados a la degradación de los recursos naturales. Estos beneficios, aunque frecuentemente difíciles de cuantificar de forma inmediata, constituyen componentes esenciales de la sostenibilidad económica de la agricultura moderna.

En conjunto, la evidencia científica confirma que la utilización de bioestimulantes naturales puede representar una alternativa económicamente viable para la producción de tomate bajo invernadero cuando su aplicación se fundamenta en criterios técnicos adecuados y se adapta a las características particulares del sistema productivo. Los incrementos en el rendimiento, la mejora de la calidad comercial, la optimización en el uso de fertilizantes y agua y la reducción parcial de los costos asociados al manejo del cultivo contribuyen a fortalecer la rentabilidad de la producción. Sin embargo, futuras investigaciones deberán incorporar análisis económicos integrales que permitan establecer con mayor precisión la relación costo-beneficio de los diferentes bioestimulantes y desarrollar recomendaciones que faciliten su adopción eficiente dentro de los sistemas hortícolas sostenibles (Rouphael et al., 2018).

Limitaciones metodológicas de los estudios analizados

El análisis de la literatura científica evidencia que, a pesar del creciente número de investigaciones sobre bioestimulantes naturales aplicados al cultivo de tomate bajo invernadero, persisten importantes limitaciones metodológicas que dificultan la comparación de resultados y la formulación de conclusiones generalizables (du Jardin, 2015). La elevada heterogeneidad observada en los diseños experimentales, los materiales biológicos empleados, las formulaciones evaluadas y las variables de respuesta constituye uno de los principales obstáculos para consolidar una base científica suficientemente sólida que permita establecer recomendaciones técnicas universalmente aplicables (Bulgari et al., 2019). En este contexto, diversos autores coinciden en señalar que esta variabilidad metodológica representa uno de los mayores desafíos para el avance de la investigación en bioestimulación vegetal y limita la posibilidad de desarrollar protocolos estandarizados que puedan ser reproducidos en diferentes sistemas de producción (Rouphael & Colla, 2020).

Una de las limitaciones más frecuentes corresponde a la diversidad de los bioestimulantes evaluados. La literatura incluye investigaciones desarrolladas con extractos vegetales, extractos de algas, sustancias húmicas, aminoácidos, hidrolizados de proteínas, quitosano, microorganismos promotores del crecimiento vegetal, vermicompost y numerosas formulaciones comerciales con composiciones diferentes. Incluso dentro de una misma categoría de bioestimulantes existen diferencias importantes en cuanto al origen de las materias primas, procesos de obtención, concentración de compuestos bioactivos y estabilidad química, lo que dificulta establecer comparaciones directas entre estudios. Bulgari et al. (2019) destacan que la ausencia de estandarización en las formulaciones constituye uno de los principales factores responsables de la variabilidad de los resultados reportados.

Otra limitación metodológica ampliamente identificada corresponde a la heterogeneidad de las dosis, frecuencias y métodos de aplicación utilizados en las investigaciones. Los estudios analizados emplean concentraciones muy variables, diferentes momentos fenológicos para las aplicaciones y diversas vías de suministro, incluyendo aplicaciones foliares, fertirrigación, tratamientos radiculares y aplicaciones a semillas. Esta diversidad metodológica dificulta identificar con precisión cuáles son los protocolos más eficientes para cada tipo de bioestimulante y limita la posibilidad de desarrollar recomendaciones agronómicas respaldadas por evidencia consistente. Rouphael y Colla (2020) señalan que la optimización de estos protocolos representa una prioridad para futuras investigaciones.

La variabilidad genética de las variedades de tomate utilizadas constituye otra importante fuente de heterogeneidad metodológica. Los diferentes cultivares presentan características fisiológicas, morfológicas y metabólicas particulares que modifican su respuesta frente a los bioestimulantes. Sin embargo, numerosos estudios evalúan únicamente una o dos variedades, lo que limita la posibilidad de extrapolar los resultados a otros materiales genéticos utilizados en la producción comercial. Van Oosten et al. (2017) destacan que la interacción entre el genotipo y los bioestimulantes requiere investigaciones comparativas que permitan comprender mejor las diferencias observadas entre variedades. Las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrollan los experimentos también representan una limitación importante. Aunque gran parte de las investigaciones se realiza en condiciones de invernadero, existen diferencias significativas en temperatura, radiación solar, humedad relativa, manejo del riego, características del sustrato y programas de fertilización. Estas variaciones ambientales modifican la respuesta fisiológica de las plantas y dificultan la comparación entre investigaciones realizadas en diferentes regiones o sistemas de producción. Como consecuencia, algunos resultados pueden reflejar condiciones particulares del experimento más que el efecto propio del bioestimulante evaluado.

La revisión también evidencia limitaciones relacionadas con el tamaño y la representatividad de las muestras experimentales. Diversos estudios utilizan un número reducido de plantas, parcelas o repeticiones, situación que disminuye la potencia estadística de los análisis y aumenta la probabilidad de obtener resultados influenciados por la variabilidad biológica. Además, en algunos casos los experimentos son desarrollados durante un único ciclo de cultivo, sin evaluar la estabilidad de las respuestas en diferentes estaciones o condiciones ambientales. Estas limitaciones dificultan establecer conclusiones robustas sobre la consistencia de los efectos observados.

Otro aspecto metodológico relevante corresponde a la diversidad de variables empleadas para evaluar la eficacia de los bioestimulantes. Mientras algunos estudios se centran exclusivamente en indicadores de crecimiento vegetativo, otros priorizan variables relacionadas con el rendimiento, la calidad de los frutos, la absorción de nutrientes, la actividad fotosintética o la tolerancia al estrés. La ausencia de un conjunto estandarizado de indicadores limita la comparación cuantitativa entre investigaciones y dificulta la integración de los resultados dentro de revisiones sistemáticas o metaanálisis. Du Jardin (2015) destaca la necesidad de establecer criterios homogéneos para la evaluación del desempeño de los bioestimulantes en diferentes cultivos.

Asimismo, la literatura revisada muestra que son relativamente escasos los estudios que profundizan en los mecanismos fisiológicos, bioquímicos y moleculares responsables de las respuestas observadas. Aunque numerosos trabajos reportan incrementos en crecimiento, rendimiento o calidad, en muchos casos no se analizan los procesos celulares y metabólicos que explican dichos efectos. Esta limitación restringe la comprensión de los mecanismos de acción de los bioestimulantes y dificulta el desarrollo de formulaciones cada vez más eficientes y específicas para diferentes condiciones de producción.

Desde el punto de vista metodológico también resulta evidente la limitada incorporación de análisis económicos y ambientales integrales. La mayoría de las investigaciones se concentra en evaluar respuestas agronómicas inmediatas, mientras que son menos frecuentes los estudios que analizan simultáneamente la rentabilidad económica, la eficiencia en el uso de los recursos naturales, la reducción del impacto ambiental y la sostenibilidad de los sistemas productivos. La integración de estas dimensiones permitiría valorar con mayor precisión la contribución real de los bioestimulantes al desarrollo de una agricultura sostenible.

Finalmente, la revisión pone de manifiesto la necesidad de fortalecer la calidad metodológica de las investigaciones futuras mediante el desarrollo de protocolos experimentales más estandarizados, el empleo de diseños multicéntricos, la evaluación de diferentes variedades bajo condiciones ambientales contrastantes y la incorporación de herramientas fisiológicas, bioquímicas, moleculares y económicas que permitan comprender de manera integral la acción de los bioestimulantes. Rouphael y Colla (2020) señalan que solo mediante investigaciones metodológicamente más consistentes será posible consolidar recomendaciones técnicas sólidas que favorezcan una adopción más amplia y eficiente de los bioestimulantes naturales en la producción de tomate bajo invernadero.

En conjunto, la evidencia científica confirma que las limitaciones metodológicas presentes en la literatura actual explican buena parte de la variabilidad observada entre los resultados publicados. La heterogeneidad en los productos evaluados, los protocolos de aplicación, las variedades de tomate, las condiciones ambientales y las variables analizadas dificulta la formulación de conclusiones universales. En consecuencia, futuras investigaciones deberán avanzar hacia una mayor estandarización metodológica que facilite la comparación entre estudios, fortalezca la reproducibilidad de los resultados y contribuya al desarrollo de programas de bioestimulación basados en evidencia científica de alta calidad.

Vacíos de conocimiento identificados

La revisión de la literatura científica pone de manifiesto que, a pesar del notable crecimiento de las investigaciones relacionadas con el uso de productos bioestimulantes naturales en el cultivo de tomate bajo invernadero, aún persisten importantes vacíos de conocimiento que limitan la comprensión integral de sus mecanismos de acción y restringen el desarrollo de recomendaciones agronómicas suficientemente sólidas. Aunque existe abundante evidencia sobre sus efectos positivos en variables de crecimiento, rendimiento y calidad de los frutos, numerosos aspectos fisiológicos, moleculares, económicos y ambientales permanecen insuficientemente explorados, dificultando su incorporación plenamente fundamentada dentro de los sistemas de producción comercial (du Jardin, 2015). Esta situación evidencia la necesidad de orientar futuras investigaciones hacia enfoques multidisciplinarios que permitan comprender con mayor profundidad la complejidad de la bioestimulación vegetal.

Uno de los principales vacíos identificados corresponde al conocimiento de los mecanismos fisiológicos y moleculares responsables de las respuestas inducidas por las distintas formulaciones disponibles. Aunque numerosos estudios documentan mejoras en el crecimiento, la productividad y la tolerancia al estrés, en muchos casos los procesos bioquímicos, hormonales y genéticos involucrados no son analizados de forma detallada. Esta limitación dificulta establecer relaciones causales entre la composición de los compuestos bioactivos y las respuestas fisiológicas observadas en las plantas. Rouphael y Colla (2020) señalan que el desarrollo de investigaciones apoyadas en herramientas de transcriptómica, proteómica, metabolómica y otras tecnologías ómicas permitirá comprender con mayor precisión los mecanismos responsables de dichos efectos.

Otro vacío importante se relaciona con la limitada caracterización química de numerosas formulaciones naturales. Diversas investigaciones utilizan extractos vegetales, composts, sustancias húmicas o productos comerciales cuya composición bioquímica no es descrita con suficiente detalle, dificultando la identificación de los compuestos responsables de la actividad bioestimulante. Esta situación limita la reproducibilidad de los estudios y dificulta la comparación entre investigaciones realizadas por diferentes grupos científicos. Bulgari et al. (2019) destacan que una caracterización química más precisa permitirá establecer relaciones más claras entre la composición de estas formulaciones y sus efectos fisiológicos sobre el cultivo.

La revisión también evidencia una limitada cantidad de investigaciones comparativas entre las diferentes categorías de productos disponibles. La mayoría de los estudios evalúa una única formulación o un grupo específico de sustancias, mientras que son escasas las investigaciones diseñadas para comparar directamente la eficacia relativa de extractos vegetales, sustancias húmicas, aminoácidos, microorganismos promotores del crecimiento, quitosano u otras alternativas bajo condiciones experimentales similares. Esta ausencia de comparaciones sistemáticas dificulta establecer cuáles opciones ofrecen mayores beneficios para determinadas condiciones de producción y limita el desarrollo de criterios objetivos para su selección.

Asimismo, persisten importantes vacíos relacionados con la interacción entre estas tecnologías y el genotipo vegetal. Aunque diferentes investigaciones reconocen que las variedades de tomate responden de manera diferencial a los tratamientos aplicados, todavía existe escasa información que explique los factores genéticos responsables de dicha variabilidad. Van Oosten et al. (2017) indican que la identificación de cultivares con mayor capacidad de respuesta permitirá desarrollar estrategias de manejo más específicas y eficientes, favoreciendo una agricultura de precisión adaptada a las características fisiológicas de cada variedad.

Otro aspecto insuficientemente estudiado corresponde a los efectos de largo plazo derivados del uso continuo de estas formulaciones en los sistemas productivos. La mayoría de las investigaciones analiza únicamente un ciclo de cultivo, mientras que son muy escasos los estudios que evalúan las consecuencias acumulativas sobre la fertilidad del suelo, la biodiversidad microbiana, la estabilidad de la productividad, la calidad ambiental y la sostenibilidad económica durante varios años de producción. Esta información resulta especialmente relevante para determinar el verdadero impacto de estas estrategias dentro de programas permanentes de manejo agrícola sostenible.

La literatura revisada también muestra una escasez de investigaciones que integren simultáneamente variables agronómicas, fisiológicas, económicas y ambientales. La mayor parte de los trabajos se concentra en medir indicadores productivos como crecimiento vegetativo, rendimiento o calidad de frutos, mientras que son menos frecuentes los estudios que incorporan análisis de eficiencia económica, huella ambiental, uso eficiente del agua, reducción de emisiones o conservación de la biodiversidad. Rouphael y Colla (2020) destacan que la integración de estas dimensiones permitirá evaluar de manera más completa la contribución de estas herramientas al desarrollo sostenible de la agricultura.

Un vacío adicional identificado corresponde a la limitada disponibilidad de estudios realizados bajo condiciones reales de producción comercial. Gran parte de la evidencia científica procede de experimentos controlados desarrollados en invernaderos experimentales o condiciones altamente estandarizadas, donde los factores ambientales y agronómicos pueden controlarse rigurosamente. Sin embargo, las condiciones presentes en las explotaciones comerciales suelen ser considerablemente más variables y complejas, por lo que resulta necesario incrementar las investigaciones desarrolladas directamente en sistemas productivos comerciales para validar la aplicabilidad práctica de los resultados obtenidos en condiciones experimentales.

También se observa una escasa estandarización en los indicadores utilizados para evaluar la eficacia de estas tecnologías. La diversidad de variables medidas, metodologías analíticas y criterios de interpretación dificulta la realización de comparaciones cuantitativas entre investigaciones y limita el desarrollo de revisiones sistemáticas y metaanálisis con alto nivel de evidencia científica. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de establecer protocolos metodológicos comunes que faciliten la generación de información comparable entre diferentes regiones y grupos de investigación (du Jardin, 2015).

Desde una perspectiva regulatoria, la literatura también evidencia vacíos relacionados con la armonización de las definiciones, los criterios de clasificación y los procedimientos de evaluación de estos insumos agrícolas. Aunque en los últimos años se han producido importantes avances normativos, aún existen diferencias entre países respecto a los requisitos para su registro, comercialización y evaluación, situación que dificulta la comparación internacional de resultados y limita la transferencia tecnológica hacia los sectores productivos.

En conjunto, la evidencia científica confirma que aún existen importantes vacíos de conocimiento que deben ser abordados para consolidar la aplicación de estas estrategias de bioestimulación en la producción de tomate bajo invernadero. La profundización en los mecanismos fisiológicos y moleculares de acción, la estandarización metodológica, la caracterización química de las formulaciones, la realización de estudios comparativos, la evaluación de sus efectos a largo plazo y la integración de dimensiones agronómicas, económicas y ambientales constituyen algunas de las principales prioridades de investigación. El abordaje de estos desafíos permitirá fortalecer la base científica disponible y facilitar el desarrollo de estrategias de manejo cada vez más eficientes, sostenibles y adaptadas a las necesidades de la horticultura moderna.

Perspectivas futuras para la utilización de bioestimulantes naturales

El creciente interés por desarrollar sistemas agrícolas más eficientes y sostenibles sitúa a los bioestimulantes naturales como una de las tecnologías con mayor potencial para transformar la producción hortícola durante las próximas décadas. Los avances alcanzados hasta el momento demuestran que estas formulaciones pueden mejorar el crecimiento vegetal, incrementar la productividad, optimizar el uso de los recursos y fortalecer la tolerancia frente a diversos factores de estrés. Sin embargo, la evidencia científica también indica que su verdadero potencial aún está

lejos de ser plenamente aprovechado, debido a las limitaciones existentes en el conocimiento de sus mecanismos de acción y en la estandarización de su aplicación (Rouphael & Colla, 2020). En este contexto, las futuras líneas de investigación deberán orientarse no solo a demostrar su eficacia agronómica, sino también a comprender de manera integral las bases fisiológicas, moleculares y ecológicas que sustentan sus efectos sobre las plantas (du Jardin, 2015). Una de las principales perspectivas de desarrollo corresponde a la profundización en los mecanismos moleculares que regulan la respuesta vegetal frente a estas formulaciones. Aunque numerosos estudios han documentado mejoras en variables agronómicas, todavía resulta necesario comprender con mayor precisión cómo los diferentes compuestos bioactivos modulan la expresión génica, la síntesis hormonal, el metabolismo secundario y las rutas de señalización celular. La incorporación de herramientas de transcriptómica, proteómica, metabolómica y fenotipado de alta precisión permitirá identificar los procesos responsables de las respuestas fisiológicas observadas y favorecerá el diseño de productos cada vez más específicos y eficientes (du Jardin, 2015).

Otra línea de investigación con amplio potencial consiste en el desarrollo de formulaciones de nueva generación basadas en una mejor caracterización química y biológica de sus componentes. El conocimiento creciente sobre los metabolitos secundarios presentes en extractos vegetales, algas, sustancias húmicas y microorganismos beneficiosos permitirá formular productos con composiciones más estables, mecanismos de acción mejor definidos y mayor reproducibilidad entre diferentes condiciones de producción. Bulgari et al. (2019) señalan que esta evolución favorecerá la obtención de formulaciones con mayor eficacia y permitirá reducir la variabilidad actualmente observada entre investigaciones.

Asimismo, la agricultura de precisión representa un escenario particularmente prometedor para la utilización de estas herramientas agronómicas. La integración de sensores, sistemas de monitoreo remoto, imágenes multiespectrales, inteligencia artificial y analítica de datos permitirá identificar en tiempo real las necesidades fisiológicas del cultivo y determinar el momento óptimo para la aplicación de estas formulaciones. Rouphael y Colla (2020) destacan que esta combinación entre bioestimulación y tecnologías digitales favorecerá un manejo mucho más eficiente de los recursos, optimizando simultáneamente la productividad y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

La interacción entre estas formulaciones y el microbioma vegetal constituye otra de las áreas con mayor proyección científica. Durante los últimos años se ha reconocido que las comunidades microbianas asociadas a la rizosfera y a los tejidos vegetales desempeñan funciones esenciales relacionadas con la nutrición, el crecimiento y la resistencia frente a condiciones de estrés. En consecuencia, futuras investigaciones deberán profundizar en las interacciones existentes entre los compuestos bioactivos, los microorganismos benéficos y el metabolismo vegetal, permitiendo desarrollar estrategias integradas que potencien simultáneamente la actividad biológica del suelo y el desempeño fisiológico del cultivo. Backer et al. (2018) destacan que este enfoque representa una de las fronteras más prometedoras para la innovación en agricultura sostenible.

La adaptación al cambio climático también impulsará el desarrollo de nuevas investigaciones orientadas a incrementar la resiliencia de los cultivos. El aumento de la frecuencia de sequías, temperaturas extremas, salinidad y otros factores ambientales adversos exige tecnologías capaces de fortalecer la capacidad adaptativa de las plantas sin incrementar significativamente el consumo de recursos. En este contexto, se espera que futuras investigaciones identifiquen formulaciones específicas dirigidas a mitigar diferentes tipos de estrés, permitiendo mantener la productividad bajo escenarios climáticos cada vez más variables. Van Oosten et al. (2017) señalan que esta línea de investigación será determinante para garantizar la seguridad alimentaria en las próximas décadas.

Otra perspectiva relevante corresponde al desarrollo de protocolos agronómicos más estandarizados y adaptados a las características particulares de cada sistema productivo. La evidencia actual demuestra que la eficacia de estas tecnologías depende de factores como la variedad cultivada, las condiciones ambientales, el estado fenológico, el método de aplicación y el manejo agronómico (Rouphael & Colla, 2020). Por ello, futuras investigaciones deberán generar recomendaciones específicas para diferentes regiones, cultivares y modalidades de producción, facilitando la transferencia del conocimiento científico hacia los productores y mejorando la reproducibilidad de los resultados obtenidos en diferentes contextos agrícolas.

Desde el punto de vista regulatorio, también se prevé un fortalecimiento de los marcos normativos que regulan la producción, caracterización y comercialización de estas formulaciones. La consolidación de criterios internacionales para su clasificación y evaluación permitirá mejorar la calidad de los productos disponibles en el mercado, incrementar la confianza de los productores y favorecer una mayor adopción de estas tecnologías dentro de la agricultura comercial (du Jardin, 2015). Paralelamente, la estandarización normativa facilitará el desarrollo de investigaciones comparables entre diferentes países y contribuirá a fortalecer la base científica disponible (Rouphael & Colla, 2020).

En conjunto, la literatura científica permite anticipar un escenario altamente favorable para la expansión del uso de bioestimulantes naturales en la producción de tomate bajo invernadero. Van Oosten et al. (2017) señalan que los avances en biología molecular, microbiología, agricultura de precisión, inteligencia artificial y manejo sostenible de los agroecosistemas contribuirán al desarrollo de formulaciones más eficientes y adaptadas a las necesidades específicas de cada cultivo. Asimismo, la integración de estas innovaciones con estrategias de manejo agronómico permitirá optimizar la productividad y el uso eficiente de los recursos disponibles (Rouphael & Colla, 2020). No obstante, el éxito de estas perspectivas dependerá de la consolidación de investigaciones interdisciplinarias, metodológicamente rigurosas y orientadas a transformar el conocimiento científico en soluciones tecnológicas capaces de incrementar simultáneamente la productividad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la horticultura moderna, como plantea du Jardin (2015).

4. DISCUSIÓN

La presente revisión pone de manifiesto que los bioestimulantes naturales representan una de las alternativas más prometedoras para incrementar la sostenibilidad de la producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo condiciones de invernadero. La evidencia científica analizada confirma que estas formulaciones pueden favorecer múltiples procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento vegetativo, el desarrollo radicular, la absorción de nutrientes, la productividad y la calidad de los frutos. No obstante, los resultados disponibles también muestran una marcada variabilidad entre investigaciones, atribuible principalmente a las diferencias en la composición de los productos, las concentraciones utilizadas, los métodos y momentos de aplicación, las condiciones ambientales y las características genéticas de las variedades evaluadas. Esta heterogeneidad coincide con lo señalado por du Jardin (2015), quien sostiene que la complejidad biológica de los bioestimulantes dificulta la generalización de sus efectos cuando no existe una adecuada caracterización de las formulaciones empleadas. De manera similar, Rouphael y Colla (2020) destacan que la eficacia de estos productos depende de la interacción simultánea entre el cultivo, el ambiente y el manejo agronómico, por lo que sus beneficios deben interpretarse dentro del contexto específico en el que son evaluados.

Uno de los aspectos más relevantes identificados durante esta revisión corresponde a la capacidad de estas formulaciones para influir sobre distintas etapas del ciclo biológico del tomate. Diversos estudios muestran que sus efectos pueden manifestarse desde la germinación y el establecimiento inicial hasta las fases de floración, fructificación y maduración de los frutos, lo que evidencia que la bioestimulación no constituye un fenómeno limitado a una única etapa fisiológica, sino un proceso dinámico que acompaña el desarrollo de la planta. Esta observación coincide con lo descrito por du Jardin (2015), quienes indican que muchos compuestos bioactivos actúan modulando procesos metabólicos relacionados con el crecimiento y la adaptación al ambiente durante diferentes fases del desarrollo vegetal. Asimismo, Bulgari et al. (2019) señalan que la respuesta obtenida depende tanto de la naturaleza del producto como del estado fisiológico en que se realiza la aplicación, razón por la cual las estrategias de manejo deben ajustarse a las necesidades particulares del cultivo.

A pesar de los resultados favorables observados durante las etapas iniciales del crecimiento, la literatura revisada demuestra que un mejor establecimiento de las plantas no garantiza necesariamente incrementos proporcionales en el rendimiento final. Numerosas investigaciones muestran respuestas positivas en variables como porcentaje de germinación, vigor de plántulas o desarrollo radicular temprano, mientras que los efectos sobre la producción comercial pueden variar considerablemente. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de interpretar los resultados considerando el ciclo completo del cultivo y no únicamente las respuestas fisiológicas tempranas. Rouphael

y Colla (2020) destacan que la productividad final depende de la integración de múltiples procesos fisiológicos que interactúan entre sí durante todo el desarrollo de la planta, mientras que Van Oosten et al. (2017) advierten que las respuestas iniciales deben complementarse con evaluaciones realizadas hasta la cosecha para determinar el verdadero impacto agronómico de estas tecnologías.

Los resultados relacionados con la producción de biomasa muestran igualmente una tendencia consistente hacia el incremento del crecimiento vegetativo cuando se emplean diferentes categorías de bioestimulantes naturales. El aumento de la altura de planta, el diámetro del tallo, el desarrollo foliar y la biomasa aérea ha sido documentado con frecuencia en investigaciones desarrolladas bajo condiciones controladas, lo que sugiere una mejora en la eficiencia fotosintética y en la utilización de los recursos disponibles. Sin embargo, la interpretación de estos resultados requiere un análisis más amplio, ya que un crecimiento vegetativo excesivo no siempre se traduce en una mayor producción de frutos. Colla y Rouphael (2015) explican que la productividad del tomate depende del equilibrio entre el crecimiento vegetativo y el desarrollo reproductivo, de manera que una distribución inadecuada de fotoasimilados puede favorecer la formación de biomasa sin incrementar el rendimiento comercial. En consecuencia, la evaluación de estos productos debe integrar simultáneamente indicadores de crecimiento y variables directamente relacionadas con la producción. Desde esta perspectiva, la relación entre desarrollo vegetativo y rendimiento constituye uno de los principales aspectos que requieren mayor profundización en futuras investigaciones. La mayoría de los estudios analizados reporta mejoras significativas en variables individuales; sin embargo, son menos frecuentes aquellos que analizan la interacción funcional entre el crecimiento de la planta, la formación de flores, el cuajado de frutos y la productividad final. Yakhin et al. (2017) señalan que la acción de los bioestimulantes debe interpretarse como el resultado de una regulación fisiológica compleja que involucra procesos hormonales, metabólicos y nutricionales, mientras que Bulgari et al. (2019) destacan la necesidad de incorporar evaluaciones integrales capaces de explicar cómo estas respuestas se traducen en beneficios agronómicos sostenibles a largo plazo.

Los extractos vegetales constituyen una de las categorías de mayor interés dentro de la agricultura sostenible debido a la amplia diversidad de especies que pueden emplearse como fuente de compuestos bioactivos. La revisión evidencia un incremento progresivo en el número de investigaciones orientadas a evaluar extractos obtenidos de diferentes plantas con potencial bioestimulante, cuyos efectos se relacionan con la presencia de compuestos fenólicos, flavonoides, aminoácidos, polisacáridos y otras moléculas capaces de modular procesos fisiológicos del cultivo. Du Jardin (2015) señala que la diversidad química de estos extractos representa simultáneamente una fortaleza y un desafío científico, ya que permite disponer de múltiples alternativas biológicas, pero también dificulta la comparación entre investigaciones cuando la composición no es adecuadamente caracterizada. En este sentido, Bulgari et al. (2019) enfatizan que la estandarización de los procedimientos de extracción y el análisis químico detallado de las formulaciones constituyen requisitos indispensables para avanzar desde estudios experimentales hacia aplicaciones comerciales con resultados reproducibles.

Los resultados obtenidos para los extractos vegetales también permiten reflexionar sobre su potencial dentro de los programas de manejo sostenible de cultivos. A diferencia de numerosos insumos de síntesis química, estas formulaciones pueden elaborarse a partir de recursos vegetales disponibles localmente, favoreciendo el aprovechamiento de la biodiversidad y la valorización de residuos agroindustriales. Esta característica contribuye a fortalecer los principios de la economía circular y puede disminuir parcialmente la dependencia de insumos externos en determinados sistemas productivos. Sin embargo, el origen biológico de estas formulaciones también representa una importante fuente de variabilidad, ya que factores como la especie utilizada, el estado fenológico de la planta, las condiciones ambientales de crecimiento y el método de extracción pueden modificar significativamente la concentración de los compuestos bioactivos presentes. Du Jardin (2015) señala que esta variabilidad constituye uno de los principales desafíos para la consolidación científica de los bioestimulantes, mientras que Bulgari et al. (2019) destacan que la caracterización química detallada resulta indispensable para garantizar la reproducibilidad de los resultados experimentales.

La importancia de estandarizar las formulaciones trasciende el ámbito estrictamente experimental y adquiere una dimensión práctica para su adopción por parte del sector productivo. Los agricultores requieren productos cuya composición y respuesta agronómica presenten un comportamiento relativamente estable bajo condiciones similares de manejo. Cuando las formulaciones muestran una elevada variabilidad entre lotes o cuando la información sobre su composición resulta insuficiente, disminuye la posibilidad de establecer recomendaciones técnicas confiables y se dificulta la transferencia de la investigación hacia la producción comercial. Rouphael y Colla (2020) sostienen que el fortalecimiento de los protocolos de producción y control de calidad constituye un requisito esencial para consolidar el uso de estas tecnologías dentro de la horticultura moderna.

Otro hallazgo relevante de la presente revisión corresponde al creciente interés por la utilización de bacterias promotoras del crecimiento vegetal como parte de las estrategias de bioestimulación. La evidencia científica demuestra que estos microorganismos pueden favorecer la productividad mediante diversos mecanismos fisiológicos, entre ellos la solubilización de nutrientes, la fijación biológica de nitrógeno, la producción de fitohormonas y la estimulación del desarrollo radicular. Backer et al. (2018) destacan que estos mecanismos no actúan de forma independiente, sino que interactúan con las características físicas, químicas y biológicas de la rizosfera, generando respuestas complejas que pueden traducirse en una mayor eficiencia nutricional y una mejor adaptación frente a condiciones ambientales adversas. De manera similar, Backer et al. (2018) indican que la incorporación de microorganismos benéficos constituye una de las estrategias con mayor potencial para reducir la dependencia de fertilizantes minerales sin comprometer la productividad agrícola.

No obstante, la utilización de microorganismos promotores del crecimiento también plantea desafíos que deben ser considerados durante la interpretación de los resultados. A diferencia de otras formulaciones, la eficacia de estos inoculantes depende de su capacidad para sobrevivir, establecerse y competir con las comunidades microbianas presentes naturalmente en el suelo o en los sustratos utilizados bajo condiciones de invernadero. Factores como la temperatura, la humedad, la disponibilidad de materia orgánica, las prácticas de manejo y las características fisicoquímicas del medio pueden modificar significativamente la colonización microbiana y, en consecuencia, la magnitud de la respuesta observada en las plantas. Backer et al. (2018) señalan que la interacción entre microorganismos introducidos y microbiota nativa constituye uno de los factores que explican la elevada variabilidad reportada entre investigaciones, mientras que Backer et al. (2018) recomiendan desarrollar protocolos específicos para cada sistema de producción antes de generalizar los resultados obtenidos experimentalmente.

En este contexto, la calidad de los productos comerciales adquiere una importancia determinante. La viabilidad celular durante el almacenamiento, el transporte y la aplicación representa un requisito indispensable para garantizar la eficacia de los inoculantes microbiológicos. La reducción de la población microbiana antes de la aplicación puede disminuir considerablemente su capacidad para colonizar la rizosfera y limitar los beneficios esperados sobre el cultivo. Por ello, la caracterización microbiológica, el control de calidad y la validación periódica de las formulaciones constituyen aspectos esenciales para fortalecer la confianza de los productores y favorecer una adopción más amplia de estas tecnologías. Rouphael y Colla (2020) destacan que el éxito de los bioinsumos microbianos depende tanto de la calidad del producto como de la correcta integración con el manejo agronómico del cultivo.

La revisión también pone de manifiesto el creciente interés por el empleo de quitosano como una alternativa capaz de complementar los programas de manejo sostenible del tomate bajo invernadero. Este polisacárido de origen natural ha demostrado efectos positivos sobre el crecimiento vegetal, el desarrollo radicular, la absorción de nutrientes y la activación de mecanismos de defensa, lo que explica el aumento de investigaciones orientadas a evaluar su aplicación tanto de forma individual como en combinación con otras formulaciones. Malerba y Cerana (2016) indican que el quitosano actúa como una molécula señalizadora capaz de inducir diversas respuestas fisiológicas y bioquímicas relacionadas con la resistencia de las plantas, mientras que Pichyangkura y Chadchawan (2015) destacan su capacidad para modular procesos asociados con el crecimiento y la adaptación frente a diferentes condiciones de estrés. Estas características permiten considerar al quitosano como una herramienta con un amplio potencial para fortalecer simultáneamente la productividad y la sostenibilidad de los sistemas hortícolas protegidos.

A pesar de estos resultados favorables, la evidencia científica disponible demuestra que aún persisten importantes interrogantes acerca de los mecanismos responsables de las respuestas inducidas por este compuesto. La magnitud de los efectos observados depende de factores como la concentración empleada, el peso molecular, el grado de desacetilación, el método de aplicación y el estado fisiológico del cultivo, lo que explica parte de la variabilidad descrita entre investigaciones. Malerba y Cerana (2016) señalan que pequeñas modificaciones en las características fisicoquímicas del quitosano pueden alterar significativamente su actividad biológica, mientras que Rouphael y Colla (2020) consideran necesario avanzar hacia protocolos experimentales más estandarizados que permitan identificar las condiciones óptimas de utilización para cada sistema de producción.

La combinación del quitosano con otras formulaciones naturales constituye igualmente una línea de investigación con perspectivas prometedoras. Diversos estudios han explorado su integración con aminoácidos, sustancias húmicas, extractos vegetales y microorganismos promotores del crecimiento, buscando aprovechar la complementariedad entre diferentes mecanismos fisiológicos. Sin embargo, la literatura demuestra que la combinación de varios productos no garantiza necesariamente respuestas superiores a las obtenidas mediante aplicaciones individuales. Colla y Rouphael (2015) explican que las interacciones pueden ser sinérgicas, aditivas o incluso antagónicas, dependiendo de la naturaleza de los compuestos involucrados y de las condiciones ambientales en que son aplicados. En consecuencia, resulta indispensable diseñar experimentos que permitan diferenciar claramente los efectos individuales de cada componente y cuantificar objetivamente las posibles interacciones entre ellos.

Los aminoácidos representan otra categoría ampliamente incorporada dentro de las formulaciones bioestimulantes debido a su participación directa en numerosos procesos metabólicos esenciales para el desarrollo vegetal. La evidencia revisada muestra que estos compuestos pueden favorecer la síntesis de proteínas, la actividad enzimática, el metabolismo del nitrógeno y la regulación osmótica, contribuyendo al mantenimiento del crecimiento bajo condiciones ambientales desfavorables. Sin embargo, la respuesta observada no depende exclusivamente de la aplicación externa de aminoácidos, sino también del estado nutricional de la planta y de la disponibilidad de otros elementos esenciales para el metabolismo. Colla y Rouphael (2015) destacan que la eficacia de los hidrolizados proteicos y otras formulaciones ricas en aminoácidos aumenta cuando forman parte de programas de manejo nutricional equilibrados, mientras que Bulgari et al. (2019) señalan que su efecto puede disminuir considerablemente cuando existen limitaciones severas de fertilización o condiciones fisiológicas restrictivas.

Estos resultados permiten comprender que la bioestimulación no debe interpretarse como una estrategia independiente del manejo nutricional, sino como un complemento orientado a optimizar la utilización de los recursos disponibles por la planta. Los bioestimulantes pueden incrementar la eficiencia en la absorción y utilización de nutrientes, pero no sustituyen el suministro adecuado de nitrógeno, fósforo, potasio y otros elementos indispensables para el crecimiento. Rouphael y Colla (2020) enfatizan que el mayor potencial de estas tecnologías se alcanza cuando son incorporadas dentro de programas integrales de fertilización, donde contribuyen a mejorar la eficiencia nutricional sin reemplazar completamente los insumos minerales requeridos por el cultivo. Desde esta perspectiva, la integración entre fertilización racional y bioestimulación constituye una de las estrategias con mayor potencial para incrementar simultáneamente la productividad y la sostenibilidad de la producción de tomate bajo invernadero.

El vermicompost constituye otra de las alternativas naturales que ha despertado un creciente interés dentro de la producción hortícola protegida debido a su capacidad para mejorar simultáneamente las propiedades físicas, químicas y biológicas de los sustratos de cultivo. La evidencia analizada indica que sus beneficios no dependen únicamente del aporte de nutrientes, sino también de la presencia de sustancias húmicas, microorganismos benéficos y compuestos bioactivos capaces de estimular diversos procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento vegetal. Canellas et al. (2015) demostraron que el vermicompost favorece el desarrollo de diferentes especies hortícolas incluso cuando el suministro de nutrientes es similar al proporcionado por otros fertilizantes orgánicos, lo que sugiere la participación de mecanismos bioestimulantes adicionales. De igual manera, Backer et al. (2018) destacan que este material constituye una fuente importante de metabolitos y microorganismos que contribuyen a mejorar el desarrollo radicular y la productividad de los cultivos.

No obstante, los resultados también evidencian que la respuesta agronómica obtenida mediante la utilización de vermicompost presenta una variabilidad considerable entre investigaciones. Esta situación puede explicarse por las diferencias existentes en las materias primas utilizadas para su elaboración, las especies de lombrices empleadas, las condiciones de vermicompostaje y el grado de maduración alcanzado antes de su aplicación. Como consecuencia, dos productos comercializados bajo la misma denominación pueden presentar composiciones químicas y microbiológicas significativamente distintas. Canellas et al. (2015) señalan que esta heterogeneidad constituye una de las principales limitaciones para comparar resultados entre estudios, mientras que Canellas et al. (2015) destacan la necesidad de caracterizar adecuadamente cada formulación antes de interpretar sus efectos fisiológicos sobre las plantas.

La caracterización detallada de las formulaciones constituye, por tanto, una necesidad transversal para todas las categorías de bioestimulantes analizadas en esta revisión. La ausencia de información sobre la composición química, la concentración de compuestos bioactivos o las características microbiológicas limita la reproducibilidad de los experimentos y dificulta la identificación de los mecanismos responsables de las respuestas observadas. Du Jardin (2015) sostiene que el desarrollo de esta área de investigación requiere una descripción mucho más precisa de los productos utilizados, mientras que Rouphael y Colla (2020) consideran que la estandarización metodológica permitirá fortalecer la calidad de la evidencia científica y facilitar la transferencia tecnológica hacia los sistemas de producción comercial.

Otro aspecto que ha adquirido especial relevancia durante los últimos años corresponde a la utilización combinada de diferentes formulaciones bioestimulantes. La literatura revisada evidencia un incremento progresivo en el número de investigaciones orientadas a integrar extractos vegetales, sustancias húmicas, aminoácidos, microorganismos benéficos y otros compuestos dentro de una misma estrategia de manejo. Este enfoque parte del supuesto de que diferentes mecanismos fisiológicos pueden actuar de manera complementaria para mejorar el crecimiento, la nutrición y la tolerancia al estrés. Colla y Rouphael (2015) destacan que la combinación racional de diversas formulaciones puede generar respuestas fisiológicas más completas que las obtenidas mediante aplicaciones individuales, siempre que exista una adecuada compatibilidad entre sus componentes.

Sin embargo, la evidencia científica demuestra que la combinación de diferentes productos no garantiza automáticamente un incremento de la eficacia agronómica. Las interacciones entre los compuestos bioactivos pueden producir efectos sinérgicos, aditivos o antagónicos, dependiendo de la composición de las formulaciones, las concentraciones empleadas y las condiciones ambientales bajo las cuales son aplicadas. Yakhin et al. (2017) señalan que esta complejidad explica parte de la variabilidad observada en la literatura y justifica la necesidad de desarrollar diseños experimentales capaces de diferenciar claramente el efecto individual de cada componente respecto al efecto de sus combinaciones. En este sentido, la incorporación de tratamientos individuales, mezclas y controles constituye un requisito metodológico indispensable para interpretar correctamente los resultados obtenidos.

El análisis estadístico también adquiere una importancia fundamental dentro de este tipo de investigaciones. La simple comparación de tratamientos no resulta suficiente para demostrar la existencia de interacciones entre diferentes formulaciones, por lo que se requieren diseños factoriales y procedimientos estadísticos que permitan identificar objetivamente la naturaleza de dichas relaciones. Rouphael y Colla (2020) destacan que el empleo de metodologías experimentales más robustas facilitará la comprensión de los mecanismos de interacción y contribuirá al desarrollo de programas de bioestimulación más eficientes y científicamente fundamentados. Desde esta perspectiva, la utilización combinada de diferentes formulaciones representa una línea de investigación con un elevado potencial, pero cuyo aprovechamiento dependerá del fortalecimiento metodológico de los estudios futuros.

El desarrollo del sistema radicular constituye uno de los efectos fisiológicos más consistentemente reportados en la literatura científica sobre bioestimulación vegetal. La eficiencia con la que las plantas exploran el suelo o el sustrato determina, en gran medida, su capacidad para absorber agua y nutrientes, mantener el equilibrio hídrico y sostener el crecimiento durante las diferentes etapas fenológicas. En este sentido, numerosos estudios coinciden en señalar que diversas formulaciones naturales favorecen la emisión de raíces laterales, incrementan la longitud radicular y estimulan la formación de pelos absorbentes, mejorando la superficie disponible para la captación de recursos.

Canellas et al. (2015) destacan que estos efectos están estrechamente relacionados con la regulación hormonal inducida por sustancias húmicas, mientras que Backer et al. (2018) indican que los microorganismos promotores del crecimiento complementan este proceso mediante la producción de fitohormonas y la mejora de las condiciones biológicas de la rizosfera.

A pesar de la importancia del sistema radicular para la productividad del cultivo, la revisión evidencia que una proporción considerable de las investigaciones continúa concentrándose principalmente en variables aéreas como altura de planta, número de hojas o biomasa foliar, mientras que las evaluaciones detalladas de la arquitectura radicular son relativamente escasas. Esta limitación metodológica dificulta comprender los mecanismos fisiológicos responsables de muchas de las respuestas observadas en la parte aérea de las plantas. Rouphael y Colla (2020) señalan que el fortalecimiento del sistema radicular constituye uno de los principales mecanismos de acción de numerosos bioestimulantes, por lo que futuras investigaciones deberían incorporar análisis más completos de variables relacionadas con la longitud, volumen, área superficial y distribución espacial de las raíces.

Las dificultades para estudiar el sistema radicular explican parcialmente esta situación. La extracción de raíces sin alterar su estructura, la cuantificación de sus componentes y la evaluación de su crecimiento en condiciones de campo o invernadero representan desafíos metodológicos importantes que no siempre pueden resolverse mediante procedimientos convencionales. Sin embargo, el desarrollo reciente de tecnologías de análisis digital de imágenes, escáneres especializados y herramientas de fenotipado tridimensional ofrece nuevas posibilidades para caracterizar con mayor precisión la arquitectura radicular. Rouphael y Colla (2020) consideran que la incorporación de estas metodologías permitirá comprender mejor las relaciones existentes entre el crecimiento de las raíces, la absorción de nutrientes y la respuesta fisiológica inducida por las diferentes formulaciones bioestimulantes.

La absorción de nutrientes constituye otra dimensión fundamental dentro de la interpretación de los resultados obtenidos. La mayoría de las investigaciones coincide en señalar que estas formulaciones mejoran la eficiencia nutricional mediante diferentes mecanismos complementarios, entre ellos el incremento de la superficie radicular, la estimulación de transportadores de nutrientes, la modificación de la actividad enzimática y la interacción con microorganismos benéficos presentes en la rizosfera. Canellas et al. (2015) destacan que las sustancias húmicas pueden activar procesos relacionados con el transporte de nutrientes hacia el interior de las células vegetales, mientras que Backer et al. (2018) describen la contribución de los microorganismos promotores del crecimiento a la solubilización de fósforo, la fijación biológica de nitrógeno y la disponibilidad de otros elementos esenciales.

No obstante, la revisión también confirma que estas tecnologías no deben interpretarse como sustitutos directos de los programas convencionales de fertilización. Su principal función consiste en incrementar la eficiencia con la que las plantas utilizan los nutrientes disponibles, pero ello no elimina la necesidad de suministrar cantidades adecuadas de nitrógeno, fósforo, potasio y otros elementos indispensables para completar el ciclo biológico del cultivo. Du Jardin (2015) señala que la definición de bioestimulante excluye expresamente la sustitución de los fertilizantes tradicionales, mientras que Rouphael y Colla (2020) enfatizan que el mayor beneficio agronómico se obtiene cuando estas formulaciones son integradas dentro de estrategias racionales de manejo nutricional. Desde esta perspectiva, futuras investigaciones deberán profundizar en la determinación de las dosis mínimas de fertilización compatibles con el empleo de bioestimulantes, incorporando experimentos de largo plazo que permitan evaluar simultáneamente la productividad, la fertilidad del suelo y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

Los efectos observados sobre el crecimiento vegetativo constituyen otro de los hallazgos recurrentes identificados en la literatura analizada. El incremento en la altura de las plantas, el diámetro del tallo, el número de hojas, el área foliar y la acumulación de biomasa aérea han sido documentados para diversas categorías de bioestimulantes, lo que sugiere una mejora general en la capacidad fotosintética y en el aprovechamiento de los recursos disponibles. Sin embargo, estos indicadores no deben interpretarse de manera aislada, ya que el éxito agronómico del cultivo de tomate depende del equilibrio fisiológico entre el desarrollo vegetativo y la formación de estructuras reproductivas. Colla y Rouphael (2015) señalan que el crecimiento excesivo de la parte aérea puede modificar la distribución de fotoasimilados hacia hojas y tallos, reduciendo la disponibilidad de recursos destinados a la formación y llenado de los frutos. En

consecuencia, la evaluación de estas formulaciones requiere integrar simultáneamente variables de crecimiento y productividad para obtener una interpretación más completa de su verdadero impacto sobre el cultivo.

Esta relación adquiere especial importancia en los sistemas de producción bajo invernadero, donde las prácticas de conducción, poda y manejo del dosel vegetal desempeñan un papel determinante sobre el rendimiento final. Las respuestas inducidas por los bioestimulantes pueden modificar la velocidad de crecimiento de las plantas y, por tanto, influir indirectamente sobre la frecuencia de poda, el manejo de brotes laterales y la distribución de la radiación dentro del cultivo. Rouphael y Colla (2020) destacan que la interpretación de los efectos fisiológicos debe realizarse considerando el sistema de producción en su conjunto y no únicamente las respuestas individuales de determinadas variables morfológicas. Desde esta perspectiva, el crecimiento vegetativo constituye un componente de un proceso fisiológico mucho más amplio cuya finalidad última es optimizar la productividad y la calidad de los frutos.

La floración y la fructificación representan etapas críticas del ciclo biológico del tomate y, por tanto, uno de los principales objetivos de las estrategias de bioestimulación. La evidencia recopilada muestra que diversas formulaciones naturales pueden favorecer la emisión de inflorescencias, incrementar el porcentaje de cuajado y mejorar el desarrollo inicial de los frutos, contribuyendo posteriormente al aumento del rendimiento comercial. Bulgari et al. (2019) explican que estos efectos se encuentran asociados con la regulación del metabolismo vegetal, la mejora del estado nutricional y la optimización de los procesos fisiológicos responsables del desarrollo reproductivo. Asimismo, du Jardin (2015) indican que muchos compuestos bioactivos actúan modulando rutas metabólicas relacionadas con la síntesis hormonal y la asignación de recursos durante las etapas reproductivas, favoreciendo un desarrollo más equilibrado del cultivo.

No obstante, la respuesta reproductiva continúa dependiendo en gran medida de las condiciones ambientales presentes dentro del invernadero. Factores como la temperatura, la humedad relativa, la disponibilidad de agua, la radiación solar y la ventilación pueden modificar significativamente la viabilidad del polen, la fecundación y el desarrollo de los frutos, independientemente de la aplicación de bioestimulantes. Van Oosten et al. (2017) señalan que estas tecnologías fortalecen la capacidad fisiológica de las plantas para responder a diferentes condiciones ambientales, pero no sustituyen el manejo adecuado del microclima. Por ello, la utilización de bioestimulantes debe integrarse con prácticas agronómicas orientadas a mantener condiciones favorables para la reproducción del cultivo, evitando interpretarlos como soluciones capaces de compensar deficiencias importantes en el manejo del ambiente protegido.

El rendimiento constituye, sin duda, la variable de mayor interés desde la perspectiva productiva, y los estudios analizados muestran resultados ampliamente favorables respecto al efecto de diferentes formulaciones naturales sobre la producción de tomate. En numerosos trabajos se reportan incrementos en el número de frutos por planta, el peso individual, el rendimiento por unidad de superficie y la eficiencia productiva general, aunque la magnitud de estas respuestas presenta una considerable variabilidad entre investigaciones. Rouphael y Colla (2020) explican que esta diversidad de resultados refleja la naturaleza multifactorial de la productividad agrícola, donde el efecto de los bioestimulantes interactúa continuamente con factores genéticos, nutricionales, ambientales y de manejo. En consecuencia, los incrementos de rendimiento no deben atribuirse exclusivamente a la acción directa de estos productos, sino a la interacción de múltiples procesos fisiológicos que, en conjunto, favorecen el desempeño productivo del cultivo.

La calidad de los frutos representa otro componente fundamental que merece una evaluación integral junto con el rendimiento. La literatura científica demuestra que el aumento de la producción pierde relevancia cuando no va acompañado de mejoras o, al menos, del mantenimiento de atributos comerciales como firmeza, contenido de sólidos solubles, acidez, coloración, vida poscosecha y concentración de compuestos funcionales. Bulgari et al. (2019) destacan que diversos bioestimulantes pueden favorecer simultáneamente la acumulación de antioxidantes, vitaminas y metabolitos secundarios relacionados con la calidad nutricional del tomate, mientras que Yakhin et al. (2017) señalan que la respuesta depende de la interacción entre el metabolismo vegetal y las condiciones específicas de cultivo. En este contexto, futuras investigaciones deberán incorporar evaluaciones más completas de la calidad física, química,

sensorial y nutricional de los frutos, con el propósito de determinar el verdadero valor agregado que estas tecnologías pueden aportar a la producción hortícola sostenible.

Los resultados relacionados con la respuesta de las plantas frente a diferentes condiciones de estrés constituyen uno de los campos de investigación que mayor desarrollo ha experimentado durante la última década. Aunque el cultivo bajo invernadero permite ejercer un mayor control sobre variables ambientales en comparación con los sistemas a cielo abierto, las plantas continúan expuestas a factores adversos como altas temperaturas, déficit hídrico, salinidad, desequilibrios nutricionales y estrés oxidativo, los cuales afectan negativamente el crecimiento y la productividad. En este contexto, la evidencia científica demuestra que diversas formulaciones naturales pueden fortalecer los mecanismos fisiológicos responsables de la adaptación al estrés mediante la regulación del metabolismo antioxidante, el mantenimiento de la integridad de las membranas celulares y la mejora de la eficiencia fotosintética. Van Oosten et al. (2017) destacan que los bioestimulantes incrementan la capacidad adaptativa de las plantas al favorecer respuestas fisiológicas más eficientes frente a condiciones ambientales limitantes, mientras que Bulgari et al. (2019) señalan que su acción contribuye a preservar el equilibrio metabólico durante situaciones de estrés moderado.

Sin embargo, la revisión también pone de manifiesto que la eficacia de estas formulaciones depende estrechamente de la intensidad, duración y naturaleza del factor estresante. Las respuestas favorables observadas bajo condiciones de estrés moderado no siempre se mantienen cuando las plantas son sometidas a condiciones extremas que superan su capacidad fisiológica de adaptación. Rouphael y Colla (2020) explican que los bioestimulantes deben interpretarse como herramientas orientadas a incrementar la resiliencia del cultivo y no como mecanismos capaces de eliminar completamente los efectos de condiciones ambientales severas. Desde esta perspectiva, su utilización adquiere mayor efectividad cuando forma parte de estrategias integrales que incluyen un adecuado manejo del riego, la ventilación, el control térmico y la nutrición vegetal, permitiendo reducir el impacto del estrés sin sustituir las prácticas agronómicas fundamentales para mantener la estabilidad productiva del sistema.

La posibilidad de incorporar estas formulaciones dentro de programas de manejo integrado de enfermedades constituye igualmente una de las líneas de investigación con mayor proyección. Diversos estudios muestran que algunos extractos vegetales, microorganismos benéficos y compuestos como el quitosano pueden estimular mecanismos de defensa de las plantas y, simultáneamente, ejercer efectos inhibitorios sobre determinados microorganismos fitopatógenos. Pichyangkura y Chadchawan (2015) destacan que el quitosano induce respuestas de defensa relacionadas con la activación de enzimas antioxidantes y proteínas asociadas con la resistencia, mientras que Backer et al. (2018) señalan que ciertos microorganismos promotores del crecimiento contribuyen indirectamente al control biológico mediante la competencia por nutrientes y espacio, además de estimular la resistencia sistémica inducida. Estos mecanismos permiten reducir parcialmente la incidencia de algunas enfermedades sin incrementar la dependencia de productos químicos convencionales.

No obstante, resulta imprescindible diferenciar claramente los efectos bioestimulantes de la actividad fitosanitaria directa. Aunque algunos productos naturales presentan propiedades antimicrobianas, su principal función continúa siendo la estimulación de procesos fisiológicos propios de la planta y no el control específico de agentes causales de enfermedades. Du Jardin (2015) establece esta distinción como uno de los principios fundamentales en la definición de bioestimulante, mientras que Rouphael y Colla (2020) advierten que la confusión entre ambas funciones puede conducir a interpretaciones erróneas sobre la eficacia real de estos productos. En consecuencia, las investigaciones futuras deberán diseñar experimentos que permitan diferenciar objetivamente los mecanismos de bioestimulación de los posibles efectos fitosanitarios, facilitando así el desarrollo de recomendaciones técnicas con mayor fundamento científico.

La revisión también evidencia un interés creciente por la utilización de bioestimulantes en sistemas de producción sin suelo, especialmente en cultivos hidropónicos y en sustratos artificiales utilizados bajo condiciones de invernadero. Estos sistemas ofrecen un elevado nivel de control sobre la nutrición, el suministro de agua y las condiciones de crecimiento, lo que los convierte en escenarios adecuados para evaluar con precisión la respuesta fisiológica inducida por diferentes formulaciones. Rouphael y Colla (2020) destacan que la integración de bioestimulantes con sistemas

hidropónicos puede incrementar la eficiencia en el aprovechamiento de nutrientes y optimizar el desarrollo vegetal, mientras que Bulgari et al. (2019) consideran que estos ambientes controlados permiten estudiar con mayor precisión los mecanismos responsables de las respuestas observadas.

Sin embargo, los resultados obtenidos en sistemas sin suelo no pueden extrapolarse automáticamente a cultivos establecidos directamente en el suelo agrícola. La ausencia de una microbiota edáfica compleja, las diferencias en la dinámica de los nutrientes y las características particulares de cada sustrato modifican significativamente las interacciones fisiológicas y microbiológicas asociadas con la bioestimulación. Backer et al. (2018) señalan que la respuesta de los microorganismos benéficos depende en gran medida de las condiciones biológicas del medio donde se desarrollan, mientras que Rouphael y Colla (2020) recomiendan validar cada formulación específicamente bajo las condiciones productivas en las que será utilizada. Esta necesidad de validación adquiere aún mayor importancia cuando se consideran las diferencias existentes entre sistemas hidropónicos abiertos, recirculantes y aquellos basados en diversos tipos de sustratos, los cuales pueden modificar considerablemente la eficacia de las aplicaciones.

La concentración de las formulaciones constituye uno de los factores que con mayor frecuencia explica la variabilidad de los resultados reportados en la literatura. La revisión realizada demuestra que incrementos en la dosis aplicada no producen necesariamente respuestas fisiológicas superiores y que, en numerosos casos, concentraciones excesivas pueden disminuir la eficacia de los tratamientos e incluso generar efectos adversos sobre el crecimiento vegetal. Esta respuesta coincide con el comportamiento típico de muchas sustancias bioactivas, cuya acción depende de un rango óptimo de concentración más que de una relación lineal entre dosis y respuesta. Du Jardin (2015) señala que la naturaleza compleja de los bioestimulantes impide establecer recomendaciones generales de dosificación para todos los cultivos, mientras que Bulgari et al. (2019) destacan que las diferencias en composición química y origen biológico obligan a determinar experimentalmente las concentraciones más eficientes para cada formulación y condición de cultivo.

En este contexto, la revisión evidencia que numerosos estudios continúan evaluando una única concentración, lo que limita considerablemente la posibilidad de comprender el comportamiento fisiológico de las plantas frente a diferentes niveles de aplicación. La construcción de curvas dosis-respuesta permitiría identificar no solo las concentraciones óptimas, sino también los umbrales a partir de los cuales la eficacia comienza a disminuir. Rouphael y Colla (2020) consideran que este tipo de información resulta indispensable para optimizar el uso de los bioestimulantes en condiciones comerciales, ya que favorece la obtención de mayores beneficios agronómicos y evita aplicaciones innecesarias que incrementan los costos de producción sin aportar mejoras adicionales al rendimiento.

La frecuencia y el momento de aplicación representan igualmente variables determinantes para la eficacia de estas tecnologías. La respuesta fisiológica de las plantas cambia a lo largo del ciclo de cultivo y, por tanto, una misma formulación puede producir efectos diferentes dependiendo de la etapa fenológica en la que sea aplicada. La evidencia analizada demuestra que algunas formulaciones generan mejores respuestas cuando se utilizan durante la germinación y el establecimiento inicial, mientras que otras alcanzan su mayor eficacia durante el crecimiento vegetativo, la floración o el desarrollo de los frutos. du Jardin (2015) destacan que la regulación de los procesos metabólicos inducida por los compuestos bioactivos depende estrechamente del estado fisiológico de la planta, mientras que Van Oosten et al. (2017) señalan que la identificación de las etapas con mayor sensibilidad constituye una de las estrategias más importantes para incrementar la eficiencia de los programas de bioestimulación.

La frecuencia de aplicación también debe analizarse desde una perspectiva agronómica y económica. Aunque las aplicaciones repetidas pueden mantener durante más tiempo determinados procesos fisiológicos beneficiosos, un incremento excesivo en el número de tratamientos puede elevar los costos de producción sin generar mejoras proporcionales en el rendimiento o la calidad del cultivo. Rouphael y Colla (2020) indican que uno de los principales retos de la investigación actual consiste en definir programas de aplicación capaces de maximizar la respuesta biológica utilizando la menor cantidad posible de intervenciones. En consecuencia, futuras investigaciones deberían incorporar análisis que integren simultáneamente la frecuencia de aplicación, la duración de los efectos fisiológicos y la rentabilidad económica de las diferentes estrategias de manejo.

El método de aplicación constituye otro aspecto cuya importancia ha sido ampliamente reconocida en la literatura científica. Las aplicaciones foliares, los tratamientos de semillas, la incorporación al suelo o sustrato y la fertirrigación representan las principales alternativas utilizadas para suministrar bioestimulantes al cultivo de tomate. Cada una de estas estrategias presenta ventajas y limitaciones que dependen de la naturaleza del producto, del mecanismo fisiológico involucrado y de las condiciones propias del sistema de producción. Rouphael y Colla (2020) señalan que las aplicaciones foliares facilitan una absorción relativamente rápida de determinados compuestos bioactivos, mientras que las aplicaciones al suelo favorecen especialmente aquellas formulaciones cuya acción depende de la interacción con el sistema radicular o con la microbiota presente en la rizosfera.

La selección del método de aplicación, por tanto, no debe responder únicamente a criterios operativos, sino fundamentarse en el conocimiento de los mecanismos de acción de cada formulación. Los microorganismos benéficos requieren condiciones que permitan su establecimiento y colonización de la rizosfera para expresar plenamente sus efectos, mientras que algunos extractos vegetales y compuestos solubles pueden ejercer respuestas más eficientes mediante aplicaciones foliares. Backer et al. (2018) destacan que la compatibilidad entre el método de aplicación y el mecanismo fisiológico constituye un requisito indispensable para alcanzar resultados consistentes, mientras que Bulgari et al. (2019) consideran que futuras investigaciones deberán comparar sistemáticamente diferentes estrategias de aplicación con el propósito de establecer protocolos técnicamente más eficientes para la producción de tomate bajo invernadero.

La interacción entre las características genéticas de las variedades de tomate y las condiciones ambientales constituye uno de los factores que mejor explica la diversidad de respuestas observadas en la literatura científica. Aunque numerosos estudios reportan efectos positivos derivados de la aplicación de bioestimulantes, la magnitud de dichos beneficios no es uniforme entre cultivares, lo que pone de manifiesto la existencia de diferencias fisiológicas y metabólicas asociadas con el genotipo. Las variedades de crecimiento determinado e indeterminado, los híbridos comerciales y los materiales desarrollados para condiciones específicas de cultivo presentan capacidades distintas para absorber nutrientes, regular el metabolismo y responder frente a estímulos externos. Rouphael y Colla (2020) destacan que la interacción entre genotipo y bioestimulante constituye uno de los aspectos menos comprendidos dentro de esta área de investigación, mientras que Bulgari et al. (2019) señalan que la identificación de variedades con mayor capacidad de respuesta permitirá optimizar el uso de estas tecnologías en diferentes sistemas de producción.

La influencia del ambiente incrementa aún más esta complejidad. Incluso bajo condiciones de invernadero, variables como la intensidad lumínica, la temperatura, la humedad relativa, la disponibilidad de dióxido de carbono y las características del sustrato pueden modificar significativamente la respuesta fisiológica de las plantas frente a una misma formulación. Van Oosten et al. (2017) explican que los bioestimulantes actúan regulando procesos metabólicos que dependen estrechamente del estado fisiológico del cultivo y de las condiciones ambientales predominantes, razón por la cual un tratamiento exitoso en un determinado contexto puede producir respuestas considerablemente diferentes cuando cambian las condiciones de producción. Esta realidad pone de manifiesto la necesidad de ampliar las evaluaciones multilocales y multicondicionales, incorporando una mayor diversidad de ambientes y materiales genéticos antes de establecer recomendaciones de aplicación con alcance general.

La revisión también confirma que la sostenibilidad constituye uno de los principales argumentos que respaldan el creciente interés por la utilización de bioestimulantes naturales dentro de la horticultura moderna. La posibilidad de mejorar la eficiencia en el uso del agua y de los nutrientes, reducir parcialmente la dependencia de fertilizantes minerales y aprovechar materias primas de origen biológico convierte a estas formulaciones en herramientas compatibles con los principios de la agricultura sostenible. Du Jardin (2015) señala que los bioestimulantes representan una estrategia orientada a optimizar los procesos fisiológicos de las plantas sin incrementar necesariamente el consumo de insumos convencionales, mientras que Rouphael y Colla (2020) destacan que su incorporación puede contribuir al desarrollo de sistemas productivos más eficientes desde el punto de vista ambiental, económico y agronómico.

No obstante, la sostenibilidad no debe evaluarse únicamente considerando los beneficios obtenidos durante el cultivo. El verdadero impacto ambiental de estas tecnologías requiere incorporar análisis más amplios que contemplen la obtención de las materias primas, los procesos de fabricación, el consumo energético asociado con la producción, el transporte, el almacenamiento y el destino final de los residuos generados. Desde esta perspectiva, la evaluación del ciclo de vida constituye una herramienta indispensable para determinar si los beneficios agronómicos observados compensan efectivamente los recursos empleados durante la producción de las formulaciones. Canellas et al. (2015) destacan que la valorización de residuos orgánicos como fuente de bioestimulantes puede fortalecer los principios de la economía circular, aunque advierten que cada tecnología debe analizarse individualmente para evitar interpretaciones simplificadas acerca de su sostenibilidad ambiental.

La viabilidad económica representa otro aspecto que continúa recibiendo una atención limitada dentro de la literatura científica. Una proporción considerable de los estudios se concentra en describir respuestas fisiológicas y agronómicas, mientras que son relativamente escasas las investigaciones que incorporan análisis de costos, rentabilidad o retorno económico de la inversión. Esta limitación dificulta la transferencia de los resultados hacia el sector productivo, donde las decisiones de adopción tecnológica dependen no solamente de la eficacia biológica de una innovación, sino también de su capacidad para generar beneficios económicos sostenibles. Rouphael y Colla (2020) enfatizan que la incorporación de indicadores económicos constituye un componente esencial para evaluar objetivamente la factibilidad de los programas de bioestimulación bajo condiciones comerciales.

En este sentido, la rentabilidad asociada al uso de bioestimulantes debe analizarse desde una perspectiva integral que considere simultáneamente el incremento del rendimiento, la mejora de la calidad comercial, la posible reducción en el consumo de fertilizantes y agua, la disminución de pérdidas ocasionadas por condiciones de estrés y el valor agregado derivado de una producción más sostenible. La interacción entre estos factores puede modificar sustancialmente la conveniencia económica de cada formulación, dependiendo de las características del sistema productivo y del mercado de destino. Por ello, futuras investigaciones deberán complementar las evaluaciones agronómicas con análisis económicos rigurosos que permitan estimar indicadores como costo-beneficio, margen neto, retorno de la inversión y sensibilidad frente a variaciones en los precios de los insumos y del producto final, proporcionando así información más útil para la toma de decisiones por parte de los productores.

Las limitaciones metodológicas identificadas durante la presente revisión constituyen uno de los aspectos que merece mayor atención para fortalecer la calidad de la evidencia científica disponible. La heterogeneidad observada entre investigaciones dificulta la comparación de resultados y limita la posibilidad de establecer conclusiones generalizables acerca de la eficacia de las diferentes formulaciones. Las diferencias en la composición de los productos, las dosis empleadas, los métodos de aplicación, las variables evaluadas y las condiciones experimentales generan un escenario en el que resultados aparentemente contradictorios pueden responder más a diferencias metodológicas que a una verdadera falta de efectividad de los bioestimulantes. Du Jardin (2015) advierte que esta diversidad constituye una de las principales limitaciones para consolidar el conocimiento científico en este campo, mientras que Bulgari et al. (2019) destacan que la ausencia de protocolos homogéneos continúa siendo uno de los principales obstáculos para realizar comparaciones objetivas entre estudios desarrollados en diferentes regiones y sistemas de producción.

Esta situación también limita el desarrollo de revisiones sistemáticas y metaanálisis con un elevado nivel de evidencia. Cuando los experimentos utilizan indicadores distintos para evaluar variables fisiológicas similares o describen de forma insuficiente la composición de las formulaciones empleadas, resulta difícil integrar cuantitativamente los resultados y estimar el verdadero tamaño del efecto asociado con cada categoría de bioestimulante. Page et al. (2021) señalan que la calidad de cualquier síntesis de evidencia depende directamente de la rigurosidad metodológica de los estudios primarios, mientras que Rouphael y Colla (2020) consideran prioritario avanzar hacia protocolos experimentales estandarizados que permitan comparar resultados obtenidos bajo diferentes condiciones sin perder de vista las particularidades propias de cada sistema agrícola.

Otra limitación importante corresponde al predominio de investigaciones desarrolladas durante un único ciclo de cultivo. Aunque estos estudios proporcionan información valiosa sobre las respuestas fisiológicas inmediatas de las

plantas, resultan insuficientes para comprender los efectos acumulativos que determinadas formulaciones pueden ejercer sobre la fertilidad del suelo, las comunidades microbianas, la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad productiva a largo plazo. Backer et al. (2018) destacan que muchas de las interacciones entre microorganismos benéficos y la rizosfera requieren períodos prolongados para alcanzar un equilibrio funcional, mientras que Canellas et al. (2015) señalan que los cambios inducidos por sustancias húmicas sobre las propiedades biológicas del suelo también pueden manifestarse de manera progresiva durante varios ciclos agrícolas. En consecuencia, el desarrollo de experimentos multianuales constituye una necesidad para evaluar la persistencia y estabilidad de los beneficios observados.

La presente revisión también pone de manifiesto la necesidad de fortalecer la investigación interdisciplinaria como estrategia para comprender la complejidad de los mecanismos asociados con la bioestimulación vegetal. La agronomía proporciona información sobre crecimiento, rendimiento y manejo del cultivo; la fisiología vegetal permite explicar las respuestas metabólicas inducidas por los compuestos bioactivos; la microbiología facilita el análisis de las interacciones entre plantas y microorganismos; mientras que la química contribuye a caracterizar la composición de las formulaciones naturales. Rouphael y Colla (2020) destacan que la integración de estas disciplinas resulta indispensable para identificar los mecanismos responsables de la respuesta agronómica, mientras que Van Oosten et al. (2017) señalan que los avances en biología molecular ofrecen nuevas herramientas para comprender cómo las plantas perciben y responden a los diferentes bioestimulantes.

En este contexto, las tecnologías digitales representan una oportunidad particularmente relevante para impulsar el desarrollo de esta línea de investigación. La incorporación de sensores ambientales, plataformas de monitoreo en tiempo real, imágenes multiespectrales, sistemas de fenotipado automatizado e inteligencia artificial permite generar grandes volúmenes de información sobre el comportamiento fisiológico de las plantas durante todo el ciclo de cultivo. Van Oosten et al. (2017) sostienen que estas herramientas facilitarán la identificación de patrones fisiológicos difíciles de detectar mediante metodologías convencionales, mientras que Rouphael y Colla (2020) consideran que su integración con la agricultura de precisión permitirá optimizar el momento, la dosis y la frecuencia de aplicación de los bioestimulantes de acuerdo con las necesidades específicas de cada cultivo y condición ambiental.

No obstante, la incorporación de tecnologías avanzadas también plantea desafíos relacionados con su disponibilidad, costo y aplicabilidad en diferentes contextos productivos. Muchos sistemas hortícolas, especialmente aquellos de pequeña y mediana escala, aún presentan limitaciones para acceder a herramientas de monitoreo automatizado o plataformas digitales de apoyo a la decisión. En consecuencia, el desarrollo tecnológico deberá orientarse no solamente hacia soluciones de alta precisión, sino también hacia metodologías accesibles, económicamente viables y adaptables a las distintas realidades productivas. La transferencia efectiva del conocimiento dependerá, por tanto, de la capacidad para integrar innovación científica, desarrollo tecnológico y aplicabilidad práctica, favoreciendo que los avances alcanzados en investigación puedan traducirse en mejoras reales para los productores y para la sostenibilidad de la producción de tomate bajo invernadero.

La investigación participativa constituye otra perspectiva con un enorme potencial para fortalecer el desarrollo y la adopción de los bioestimulantes naturales. La mayor parte de la evidencia científica disponible proviene de experimentos realizados bajo condiciones altamente controladas, donde numerosas variables pueden mantenerse relativamente constantes. Aunque estos estudios resultan indispensables para comprender los mecanismos fisiológicos implicados, sus resultados no siempre reflejan la complejidad de los sistemas comerciales de producción. La incorporación activa de productores, técnicos agrícolas y empresas del sector en las diferentes etapas de la investigación puede contribuir a validar las formulaciones bajo condiciones reales de cultivo, identificar limitaciones operativas y adaptar las recomendaciones a las necesidades específicas de cada región. Rouphael y Colla (2020) destacan que la generación conjunta de conocimiento entre investigadores y productores favorece una transferencia tecnológica más eficiente y acelera la adopción de innovaciones dentro de la agricultura moderna.

De manera complementaria, el aprovechamiento de materias primas locales para la elaboración de bioestimulantes representa una oportunidad importante para fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Diversos residuos

provenientes de actividades agroindustriales, forestales y agropecuarias contienen compuestos bioactivos con potencial para ser transformados en formulaciones de alto valor agregado, contribuyendo simultáneamente a reducir problemas asociados con la disposición de desechos y a generar nuevas alternativas productivas. Canellas et al. (2015) señalan que la valorización de residuos orgánicos constituye uno de los pilares de la economía circular aplicada a la agricultura, mientras que du Jardin (2015) considera que el desarrollo de bioestimulantes obtenidos a partir de recursos regionales puede favorecer la disponibilidad de insumos adaptados a las condiciones específicas de cada territorio.

No obstante, la producción local de estas formulaciones también exige garantizar estándares adecuados de calidad, seguridad y reproducibilidad. La utilización de materias primas de origen biológico implica una variabilidad inherente que puede afectar la concentración de compuestos bioactivos y, en consecuencia, modificar la eficacia agronómica del producto final. Cuando los procesos de elaboración carecen de protocolos estandarizados o controles de calidad rigurosos, aumenta la probabilidad de obtener formulaciones con respuestas inconsistentes, lo que limita la confianza de los productores y dificulta la consolidación de estas tecnologías dentro del mercado agrícola. Bulgari et al. (2019) enfatizan que la caracterización química y biológica de los productos constituye un requisito indispensable para garantizar resultados reproducibles, mientras que Rouphael y Colla (2020) destacan la necesidad de establecer sistemas de certificación y control que respalden la calidad de las formulaciones comercializadas.

En este escenario, la transferencia tecnológica adquiere una relevancia estratégica para transformar los avances científicos en soluciones aplicables dentro de los sistemas de producción. La generación de conocimiento, por sí sola, resulta insuficiente si no va acompañada de procesos de capacitación, asistencia técnica y difusión que permitan a los productores comprender los principios de funcionamiento de los bioestimulantes y utilizarlos de manera adecuada. Van Oosten et al. (2017) señalan que la incorporación de innovaciones agrícolas depende tanto de su eficacia biológica como de la disponibilidad de información técnica confiable para quienes las implementan, mientras que Rouphael y Colla (2020) sostienen que la formación continua de productores y asesores constituye un componente esencial para maximizar los beneficios derivados de estas tecnologías.

En conjunto, los resultados obtenidos en la presente revisión permiten concluir que los bioestimulantes naturales representan una herramienta con un elevado potencial para fortalecer la sostenibilidad de la producción de tomate bajo condiciones de invernadero. La evidencia científica demuestra efectos favorables sobre el desarrollo radicular, el crecimiento vegetativo, la eficiencia en la absorción y utilización de nutrientes, el rendimiento, la calidad de los frutos y la capacidad de respuesta frente a diferentes factores de estrés, aunque la magnitud de estos beneficios depende de la interacción entre la composición del producto, la dosis, el momento y método de aplicación, las características genéticas del cultivo y las condiciones ambientales donde se desarrolla la producción. Du Jardin (2015) destaca que la naturaleza multifactorial de la bioestimulación impide establecer recomendaciones universales, mientras que Rouphael y Colla (2020) subrayan que el mayor potencial de estas formulaciones se alcanza cuando son incorporadas como parte de programas integrales de manejo agronómico.

Finalmente, la presente revisión pone de manifiesto que el futuro de la bioestimulación vegetal dependerá de la consolidación de investigaciones interdisciplinarias que integren fisiología vegetal, microbiología, química, agronomía, biología molecular y tecnologías digitales para comprender con mayor profundidad los mecanismos responsables de las respuestas observadas. Asimismo, será necesario fortalecer la estandarización metodológica, desarrollar evaluaciones de largo plazo, incorporar análisis económicos y ampliar los estudios comparativos entre variedades, ambientes y sistemas de producción. Van Oosten et al. (2017) señalan que la convergencia entre innovación tecnológica y conocimiento científico permitirá desarrollar formulaciones cada vez más precisas y eficientes, mientras que Rouphael y Colla (2020) consideran que este enfoque contribuirá a consolidar los bioestimulantes como una de las herramientas más importantes para avanzar hacia sistemas hortícolas altamente productivos, resilientes y ambientalmente sostenibles.

5.CONCLUSIÓN

La presente revisión bibliográfica permitió integrar y analizar críticamente la evidencia científica disponible acerca del efecto de los bioestimulantes naturales sobre la producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado bajo condiciones de invernadero. El análisis de la literatura demuestra que estas formulaciones constituyen herramientas con un importante potencial para fortalecer la sostenibilidad de los sistemas hortícolas, debido a su capacidad para estimular procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento, el desarrollo vegetal, la eficiencia nutricional, el rendimiento y la calidad de los frutos. No obstante, la evidencia también confirma que sus efectos no son uniformes, ya que dependen de la interacción entre la composición del producto, las características fisiológicas del cultivo, las condiciones ambientales y el manejo agronómico implementado. En este sentido, du Jardin (2015) establece que la acción de los bioestimulantes debe interpretarse como el resultado de mecanismos biológicos complejos más que como una respuesta universal aplicable a cualquier sistema de producción, mientras que Rouphael y Colla (2020) destacan que la eficacia de estas tecnologías aumenta cuando forman parte de estrategias integrales de manejo del cultivo.

En respuesta al objetivo planteado en la presente revisión, puede concluirse que los principales beneficios asociados con la utilización de bioestimulantes naturales comprenden el fortalecimiento del desarrollo radicular, el incremento de la biomasa vegetal, la mejora del crecimiento vegetativo, el aumento de la eficiencia en la absorción y utilización de nutrientes, la optimización de la floración y fructificación, el incremento del rendimiento y el fortalecimiento de la capacidad de respuesta frente a diferentes condiciones de estrés. Sin embargo, la magnitud de estos efectos depende significativamente de factores como la naturaleza de las formulaciones, la concentración empleada, la frecuencia y el momento de aplicación, el método utilizado, las características genéticas de la variedad de tomate y las condiciones específicas del sistema de producción. Bulgari et al. (2019) señalan que esta variabilidad constituye una característica inherente a los bioestimulantes de origen natural, mientras que Van Oosten et al. (2017) destacan que las respuestas fisiológicas deben interpretarse considerando la interacción simultánea entre la planta y el ambiente.

La revisión también permite concluir que los extractos vegetales, los microorganismos promotores del crecimiento vegetal, el quitosano, los aminoácidos, el vermicompost y las formulaciones combinadas representan las principales categorías de bioestimulantes con aplicación potencial en la producción protegida de tomate. Cada una de ellas actúa mediante mecanismos fisiológicos diferentes y aporta ventajas específicas relacionadas con el desarrollo radicular, la regulación metabólica, la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiológica o la activación de mecanismos de defensa. Sin embargo, el aprovechamiento de estas tecnologías requiere superar importantes desafíos relacionados con la variabilidad en la composición de las formulaciones, la ausencia de protocolos estandarizados y la limitada caracterización química y microbiológica de numerosos productos. Du Jardin (2015) y Canellas et al. (2015) coinciden en señalar que la estandarización y el control de calidad constituyen requisitos indispensables para garantizar la reproducibilidad de los resultados y favorecer la transferencia de estas tecnologías hacia aplicaciones comerciales confiables.

Otro aspecto relevante identificado durante la revisión corresponde a la estrecha relación existente entre la bioestimulación y el manejo nutricional del cultivo. La evidencia científica demuestra que estas formulaciones pueden incrementar la eficiencia en la absorción y utilización de nutrientes mediante el fortalecimiento del sistema radicular, la estimulación de procesos fisiológicos y la interacción con microorganismos benéficos; sin embargo, ello no implica que puedan sustituir completamente la fertilización convencional. Rouphael y Colla (2020) destacan que los bioestimulantes deben entenderse como herramientas complementarias orientadas a optimizar el aprovechamiento de los nutrientes disponibles, mientras que Backer et al. (2018) señalan que su integración con programas racionales de fertilización constituye una de las estrategias con mayor potencial para incrementar simultáneamente la productividad y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

Asimismo, la revisión confirma que el crecimiento vegetativo, el rendimiento y la calidad de los frutos deben evaluarse de manera integrada, evitando interpretar cada variable de forma independiente. Aunque numerosos estudios reportan incrementos en altura de planta, biomasa, número de hojas o área foliar, estos indicadores solo adquieren verdadero significado cuando se relacionan con la producción comercial y con atributos de calidad como firmeza,

contenido de sólidos solubles, concentración de compuestos antioxidantes y valor nutricional de los frutos. Colla y Rouphael (2015) explican que la productividad del tomate depende del equilibrio fisiológico entre el desarrollo vegetativo y reproductivo, mientras que Yakhin et al. (2017) destacan que la respuesta final es consecuencia de la interacción entre múltiples procesos metabólicos regulados simultáneamente por los bioestimulantes y las condiciones ambientales.

La evidencia analizada también demuestra que estas formulaciones pueden contribuir a incrementar la resiliencia del cultivo frente a factores de estrés como la salinidad, las temperaturas extremas, el déficit hídrico y determinados desequilibrios nutricionales, además de fortalecer indirectamente algunas respuestas relacionadas con el manejo integrado de enfermedades. No obstante, sus efectos dependen de la intensidad del estrés y de la capacidad fisiológica de las plantas para responder a dichas condiciones, por lo que no deben considerarse sustitutos del adecuado manejo ambiental, nutricional o fitosanitario. Van Oosten et al. (2017) sostienen que la principal contribución de los bioestimulantes consiste en mejorar la capacidad adaptativa del cultivo, mientras que Rouphael y Colla (2020) enfatizan que los mayores beneficios se obtienen cuando estas tecnologías se incorporan dentro de programas integrales de manejo agronómico.

Finalmente, la presente revisión permite identificar importantes desafíos para el desarrollo futuro de esta área de investigación. Resulta prioritario fortalecer la caracterización química y microbiológica de las formulaciones, estandarizar protocolos experimentales, desarrollar investigaciones multianuales, ampliar las evaluaciones bajo diferentes variedades y condiciones ambientales, incorporar análisis económicos y ambientales, y aprovechar las posibilidades ofrecidas por la biología molecular, la agricultura de precisión y la inteligencia artificial para comprender con mayor profundidad los mecanismos responsables de las respuestas observadas. Asimismo, será necesario promover investigaciones participativas que faciliten la validación de estas tecnologías bajo condiciones reales de producción y favorezcan una transferencia tecnológica más eficiente hacia el sector agrícola. En conjunto, la evidencia disponible permite concluir que los bioestimulantes naturales representan una de las estrategias más prometedoras para avanzar hacia sistemas de producción de tomate progresivamente más eficientes, resilientes y sostenibles, siempre que su utilización esté respaldada por evidencia científica sólida, protocolos técnicamente validados y un manejo agronómico integral, como plantean du Jardin (2015), Van Oosten et al. (2017) y Rouphael y Colla (2020).

Otro aspecto que merece destacarse es que la utilización de bioestimulantes naturales no debe interpretarse como una solución aislada para incrementar la productividad del tomate, sino como un componente de estrategias integrales de manejo orientadas a optimizar simultáneamente la eficiencia productiva, la sostenibilidad ambiental y la rentabilidad económica de los sistemas agrícolas. La evidencia analizada demuestra que los mayores beneficios se alcanzan cuando estas formulaciones se combinan con prácticas adecuadas de fertilización, manejo del riego, control del microclima, conservación de la salud del suelo y programas fitosanitarios técnicamente fundamentados. Desde esta perspectiva, Rouphael y Colla (2020) destacan que el éxito de los bioestimulantes depende de su integración con el manejo agronómico general del cultivo y no únicamente de las características intrínsecas de cada formulación, mientras que Bulgari et al. (2019) señalan que este enfoque sistémico permite maximizar la eficiencia fisiológica de las plantas y reducir progresivamente la dependencia de insumos convencionales.

Asimismo, la revisión evidencia que la consolidación científica de los bioestimulantes requiere superar importantes limitaciones metodológicas que todavía persisten en la literatura especializada. La amplia heterogeneidad observada en la composición de los productos, las concentraciones utilizadas, los métodos de aplicación, las variables evaluadas y las condiciones experimentales dificulta la comparación directa entre investigaciones y limita la posibilidad de realizar síntesis cuantitativas con un elevado nivel de evidencia. Du Jardin (2015) advierte que la falta de estandarización continúa siendo uno de los principales desafíos para el desarrollo de esta disciplina, mientras que Page et al. (2021) destacan que la calidad de las revisiones y metaanálisis depende directamente del rigor metodológico con que se desarrollan los estudios primarios. En consecuencia, futuras investigaciones deberán incorporar protocolos experimentales más homogéneos, descripciones detalladas de las formulaciones y metodologías comparables que permitan fortalecer la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados.

De igual manera, resulta indispensable ampliar el horizonte temporal de las investigaciones para comprender con mayor profundidad los efectos acumulativos de estas formulaciones sobre la fertilidad del suelo, la dinámica de las comunidades microbianas, la eficiencia en el uso de los recursos y la estabilidad productiva de los agroecosistemas. La mayoría de los estudios disponibles evalúa únicamente un ciclo de cultivo, lo que limita la comprensión de procesos biológicos que requieren períodos más prolongados para manifestarse. Backer et al. (2018) señalan que las interacciones entre microorganismos benéficos y la rizosfera evolucionan progresivamente con el tiempo, mientras que Canellas et al. (2015) destacan que las modificaciones inducidas por sustancias húmicas sobre las propiedades biológicas del suelo pueden expresarse con mayor claridad en evaluaciones multianuales. Por ello, el desarrollo de investigaciones de largo plazo permitirá generar evidencia más robusta sobre la estabilidad y persistencia de los beneficios atribuidos a los bioestimulantes naturales.

En síntesis, la evidencia científica disponible confirma que los bioestimulantes naturales representan una alternativa innovadora con capacidad para contribuir a la transición hacia sistemas hortícolas más sostenibles, eficientes y resilientes, favoreciendo un uso más racional de los recursos y una producción agrícola ambientalmente responsable (du Jardin, 2015). No obstante, su consolidación como herramientas ampliamente adoptadas por el sector productivo dependerá del fortalecimiento de la investigación interdisciplinaria y de la generación de evidencia reproducible en diferentes condiciones agroecológicas (Van Oosten et al., 2017), así como de la estandarización de las formulaciones y de la integración de evaluaciones agronómicas, económicas y ambientales que permitan valorar objetivamente sus beneficios (Rouphael y Colla, 2020). Asimismo, será fundamental fortalecer los procesos de transferencia tecnológica, la capacitación de productores y la validación de estas formulaciones bajo condiciones comerciales para facilitar su adopción en los sistemas productivos (Rouphael y Colla, 2020). Desde esta perspectiva, el verdadero potencial de los bioestimulantes naturales trasciende la estimulación de procesos fisiológicos específicos y se relaciona con su capacidad para favorecer el desarrollo de modelos de producción agrícola más competitivos y sostenibles (du Jardin, 2015), capaces de responder a los desafíos actuales de la seguridad alimentaria, el cambio climático y la sostenibilidad de la agricultura (Rouphael y Colla, 2020).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. (2019). Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy*, 9(6), 306. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060306>
- Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P., & Piccolo, A. (2015). Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>
- Colla, G., & Rouphael, Y. (2015). Biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.10.044>
- Colla, G., Hoagland, L., Ruzzi, M., Cardarelli, M., Bonini, P., Canaguier, R., & Rouphael, Y. (2017). Biostimulant action of protein hydrolysates: Unraveling their effects on plant physiology and microbiome. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2202. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02202>
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>

- European Commission. (2019). Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj>
- Halpern, M., Bar-Tal, A., Ofek, M., Minz, D., Muller, T., & Yermiyahu, U. (2015). The use of biostimulants for enhancing nutrient uptake. *Advances in Agronomy*, 130, 141–174. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.001>
- Malerba, M., & Cerana, R. (2016). Chitosan effects on plant systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(7), 996. <https://doi.org/10.3390/ijms17070996>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Parađiković, N., Teklić, T., Zeljković, S., Lisjak, M., & Špoljarević, M. (2019). Biostimulants research in some horticultural plant species—A review. *Food and Energy Security*, 8(2), e00162. <https://doi.org/10.1002/fes3.162>
- Pichyangkura, R., & Chadchawan, S. (2015). Biostimulant activity of chitosan in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 49–65. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.031>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
- Rouphael, Y., Cardarelli, M., Bonini, P., & Colla, G. (2017). Synergistic action of a microbial-based biostimulant and a plant-derived protein hydrolysate enhances lettuce tolerance to alkalinity and salinity. *Frontiers in Plant Science*, 8, 131. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00131>
- Rouphael, Y., Giordano, M., Cardarelli, M., Cozzolino, E., Mori, M., Kyriacou, M. C., Bonini, P., & Colla, G. (2018). Plant- and seaweed-based extracts increase yield but differentially modulate nutritional quality of greenhouse spinach through biostimulant action. *Agronomy*, 8(7), 126. <https://doi.org/10.3390/agronomy8070126>
- Rouphael, Y., Spíchal, L., Panzarová, K., Casa, R., & Colla, G. (2018). High-throughput plant phenotyping for developing novel biostimulants: From lab to field or from field to lab? *Frontiers in Plant Science*, 9, 1197. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01197>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Van Oosten, M. J., Pepe, O., De Pascale, S., Silletti, S., & Maggio, A. (2017). The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4, 5. <https://doi.org/10.1186/s40538-017-0089-5>
- Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in plant science: A global perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2049. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>
- Zulfiqar, F., Casadesús, A., Brockman, H., & Munné-Bosch, S. (2020). An overview of plant-based natural biostimulants for sustainable horticulture with a particular focus on moringa leaf extracts. *Plant Science*, 295, 110194. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110194>

CONSIDERACIONES ÉTICAS

El presente estudio se llevó a cabo de conformidad con los principios éticos que rigen la investigación con participantes humanos. Antes de la recolección de los datos, el protocolo de investigación fue revisado y aprobado por el comité de ética institucional correspondiente. Todos los participantes fueron informados de manera clara sobre los objetivos del

estudio, los procedimientos, las posibles implicaciones y el carácter voluntario de su participación, otorgando posteriormente su consentimiento informado. Durante todo el proceso de investigación se garantizó la confidencialidad de la información, el anonimato de los participantes y el uso exclusivo de los datos recopilados con fines científicos y académicos.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA)

Los autores declaran que la herramienta de inteligencia artificial generativa ChatGPT fue utilizada exclusivamente para la traducción al idioma inglés y la revisión lingüística del manuscrito. Esta herramienta no contribuyó a la concepción del estudio, el diseño de la investigación, la recolección de datos, el análisis estadístico, la interpretación de los resultados ni a la elaboración de las conclusiones. Los autores asumen la plena responsabilidad por la originalidad, exactitud, integridad y validez científica del contenido presentado en este manuscrito.

FINANCIAMIENTO

La presente investigación no recibió subvenciones, becas ni apoyo financiero específico por parte de organismos públicos, entidades comerciales u organizaciones sin fines de lucro.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses de carácter financiero, personal, profesional o institucional que hayan podido influir en el desarrollo, los resultados o la publicación de esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Nombres de autores e iniciales:

Alfonso Llanderal Quiroz (ALQ)

Funciones desempeñadas por cada autor:

Conceptualización: (ALQ)

Curación de datos: (ALQ)

Análisis formal: (ALQ)

Adquisición de fondos: (ALQ)

Investigación: (ALQ)

Metodología: (ALQ)

Administración del proyecto: (ALQ)

Recursos: No aplica

Software: (ALQ)

Supervisión: (ALQ)

Validación: (ALQ)

Visualización: (ALQ)

Redacción – Borrador original: (ALQ)

Redacción – Revisión y edición: (ALQ)