

Manejo de sistemas productivos

Artículos de investigación científica y tecnológica

Potencialidades de dos bioestimulantes en la germinación y el crecimiento de las plántulas de tomate

Potentialities of two biostimulants on germination and growth of tomato seedlings

 Iván Castro Lizazo^{1*}  Alexander Calero Hurtado^{2,5}
 Mayra G. Rodríguez Hernández³  Alberto Peláez Casas⁴  Dariellys Martínez Balmori¹
 Yanery Pérez Díaz⁵

¹Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez”. San José de las Lajas, Cuba.

²Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Jabotical Sao Paulo, Brasil.

³Centro Nacional de Sanidad Agropecuaria. Mayabeque, Cuba.

⁴Instituto de Ciencia Animal (ICA). San José de las Lajas, Cuba.

⁵Universidad Sancti Spíritus “José Martí Pérez”. Sancti Spíritus, Cuba.

*Autor de correspondencia: Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez”. Carretera Tapaste y Autopista Nacional km 23 1/2, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.CP:32700. ivanc@unah.edu.cu

Recibido: 18 de noviembre de 2020
Aprobado: 25 de octubre de 2021
Publicado: 04 de marzo de 2022

Editor temático: Gustavo Adolfo Rodríguez Yzquierdo., Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA]

Para citar este artículo: Castro Lizazo, I., Calero Hurtado, A., Rodríguez Hernández, M. G., Peláez Casas, A., Martínez Balmori, D., & Pérez Díaz, Y. (2022). Potencialidades de dos bioestimulantes en la germinación y el crecimiento de las plántulas de tomate. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(1), e2343. https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:2343

Resumen: El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de los bioestimulantes QuitoMax® y OPLANT+® en la germinación y el crecimiento de las plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). En condiciones de laboratorio, se realizó un experimento en esquema factorial (7 × 3), en un diseño completamente aleatorizado, con tres repeticiones. Tres concentraciones de QuitoMax® (2,5, 5 y 10 mg/L), tres diluciones de OPLANT+® (1:40, 1:50 y 1:60 (v:v)) y un control (agua) se combinaron con tres tiempos de imbibición (II) (10, 20 y 30 min). Otro experimento se realizó en condiciones de campo en bloques al azar, con tres tratamientos y siete réplicas. Un control (sin bioestimulantes), semillas embebidas en 5 mg/L de QuitoMax® por 20 min y 1:60, v:v de OPLANT+® por 30 min. Los resultados indican que el QuitoMax® y el OPLANT+® mostraron efectos similares en la germinación en los tratamientos con 5 mg/L por 20 min y 1:60 por 30 min, respectivamente. La masa seca de la parte aérea y de las raíces se incrementó en 24 % y 98 % con el QuitoMax®, y 11 % y 90 % con el OPLANT+® en relación con el tratamiento control. Sin embargo, el QuitoMax® fue más promisorio en la promoción del crecimiento de las plantas que las sustancias húmicas. Este estudio sugiere que ambos bioestimulantes son eficientes y viables para estimular la germinación y el crecimiento de las plantas de tomate, lo cual sugiere su utilización en la producción sostenible en estas etapas del cultivo.

Palabras clave: bioestimulantes, crecimiento de la planta, germinación, imbibición de semilla, plántulas, productividad agrícola, *Solanum lycopersicum* L., sustancias húmicas, quitosano.

Abstract: The objective of this study was to evaluate the influence of the biostimulants QuitoMax® and OPLANT+® on germination and growth of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings. Under laboratory conditions, an experiment was carried out in a factorial scheme (7 × 3), in a completely randomized design, with three repetitions. Three concentrations of QuitoMax® (2.5, 5 and 10 mg/L), three dilutions of OPLANT+® (1:40, 1:50 and 1:60 (v:v)) and a control (water) were combined with three imbibitions times (II) (10, 20 and 30 min). Another experiment was carried out under field conditions in a randomized block design, with three treatments and seven replications. A control (without biostimulants), seeds imbibed in 5 mg/L of QuitoMax® for 20 min and 1:60, v:v of OPLANT+® for 30 min. Results revealed that QuitoMax® and OPLANT+® showed similar effects on seeds germination in the treatments with 5 mg/L for 20 min and 1:60 for 30 min, respectively. The dry mass of the aerial part and the roots increased by 24 % and 98 % with the QuitoMax® and 11 % and 90 % with the OPLANT+® in relation to the control treatment, but QuitoMax® was more promising in growth promotion than humic substances. This study suggests that both biostimulants are efficient and viable to stimulate seed germination and tomato plants growth, which leads to their use in sustainable production in these crops stages.

Keywords: agricultural productivity, biostimulants, chitosan, germination, seed imbibition, plant growth, seedlings, *Solanum lycopersicum* L., humic substances.



Introducción

El tomate es una de las hortalizas de mayor preferencia más cultivada en el mundo con un alto consumo en el mundo y de elevado valor económico (Colman et al., 2019; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2019). De hecho, es la segunda especie de importancia del género *Solanum* por su papel en los hábitos alimenticios de una amplia parte de la población mundial (FAO, 2019). En Cuba, esta especie se cultiva en todas las provincias y sus rendimientos, al igual que en la mayoría de los países tropicales, son afectados por factores bióticos y abióticos que disminuyen las cosechas (Calero et al., 2019). Además de estas condiciones, en los cultivos no siempre se realiza un adecuado manejo fitotécnico, lo cual hace que sea necesario buscar alternativas que contribuyan a incrementar el desarrollo y rendimiento de las plantas (Calero et al., 2019; Olivera et al., 2015).

Con este propósito, frecuentemente los agricultores aplican bioestimulantes para promover el rápido desarrollo de las raíces y el crecimiento temprano de las plantas (Colman et al., 2019), ya que esto puede elevar la productividad del cultivo (Terry et al., 2017). En este contexto, existe un gran interés en el desarrollo de algunos bioestimulantes que aumenten el crecimiento, el rendimiento y la calidad nutricional de los cultivos con un impacto ambiental reducido (Calero-Hurtado et al., 2019; Reyes & Enríquez-Acosta, 2019).

Precisamente, en este cultivo se ha extendido la aplicación de algunos bioestimulantes con resultados que los avalan como soluciones locales, pues su uso permite el incremento acelerado de algunos parámetros del crecimiento y desarrollo de las plantas (Calero et al., 2019). Otras alternativas utilizadas son el QuitoMax[®] (Colman et al., 2019) y el OPLANT[™] (Jindo et al., 2020), a base de quitosano y sustancias húmicas (SH), respectivamente, los cuales se clasifican en la categoría de bioestimulantes (Iglesias et al., 2019; Qin & Leskovar, 2020). A continuación, se describe brevemente en qué consiste el quitosano y las SH.

Por una parte, el quitosano es obtenido por desacetilación de la quitina, un polisacárido compuesto por unidades monoméricas de glucosamina y, en menor cuantía, de N-acetil D-glucosamina unidas con enlaces β -1,4. Entre las características especiales del quitosano se incluyen biocompatibilidad, biodegradabilidad, actividad antimicrobiana, baja toxicidad y bajo costo de producción (Colman et al., 2019; Malerba & Cerana, 2018).

Respecto a sus efectos, recientes evidencias observadas en múltiples especies hortícolas han sugerido que el quitosano desempeña un papel activo en el crecimiento y desarrollo de las plantas, induce su resistencia ante el ataque de patógenos y las protege ante condiciones de estrés medioambiental (Malerba & Cerana, 2019), debido al estímulo de diferentes fitohormonas (Asgari-Targhi et al., 2018) y al cierre estomático mediante un mecanismo dependiente del ácido abscísico (Iglesias et al., 2019).

Por otra parte, las sustancias húmicas (SH), que resultan de transformaciones químicas y biológicas de residuos de plantas y animales, así como del metabolismo microbiano, comprenden pequeñas moléculas orgánicas de estructura definida que están unidas a través de enlaces débiles y forman una asociación supramolecular (Soliman & Hamed, 2019). Una revisión sobre las SH como bioestimulantes en la horticultura evidencia que tienen efectos en el crecimiento y desarrollo de las plantas, la absorción de nutrientes y el metabolismo primario y secundario, este último relacionado con la tolerancia al estrés abiótico (Khan et al., 2019).

El mecanismo de acción de las SH es multifacético y está relacionado principalmente con una actividad tipo auxina mediante la estimulación de la actividad H^+ -ATPasa de membrana plasmática (Canellas et al., 2019), aunque existen otras vías de señalización independientes de esta hormona (Zanin et al., 2019). Otro mecanismo mediante el cual las SH promueven el crecimiento de las plantas es el aumento de los sistemas de defensas enzimáticos y no enzimáticos, que disminuyen las especies reactivas de oxígeno (ERO) y restablecen la homeostasis redox citosólica (García et al., 2016; Olaetxea et al., 2018). Con base en estas propiedades, Canellas et al. (2020) sostienen que las SH pueden ser usadas como agentes primarios de defensa (*plant chemical primed* / PS) para que las plantas puedan tolerar las condiciones de estrés.

Las características descritas permiten afirmar que los bioestimulantes serían una estrategia importante para reducir al mínimo el empleo de fertilizantes químicos. En este sentido, el artículo estudió las siguientes hipótesis: (1) la utilización de diferentes concentraciones del QuitoMax[®] y diluciones de OPLANT⁺[®] estimulan la germinación y el crecimiento inicial de las plántulas de tomate, y (2) aún es posible maximizar estos efectos benéficos con el empleo de varios tiempos de imbibición. Por tanto, el objetivo del estudio fue evaluar los efectos beneficiosos del QuitoMax[®] y el OPLANT⁺[®] en la germinación, crecimiento y producción de las plántulas de tomate.

Materiales y métodos

Área experimental y material vegetal

Los trabajos experimentales se realizaron en la Facultad de Agronomía de la Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez” (UNAH), en San José de las Lajas, provincia Mayabeque, Cuba.

Las semillas de *S. lycopersicum* cv. ‘Mara’ (Solanaceae) fueron obtenidas en la Empresa de Semilla Provincial de Mayabeque, con 99 % de pureza física y 90 % de germinación. Este cultivar, que se caracteriza por un crecimiento determinado compacto y de frutos grandes, se obtuvo por selección a partir de poblaciones sometidas a condiciones de estrés (Minag, 2017).

Composición de los bioestimulantes utilizados

QuitoMax[®]

Este producto líquido que tiene quitosano como principio activo y se obtiene por desacetilación de la quitina extraída del exoesqueleto de langostas (Falcón-Rodríguez et al., 2015). Es comercializado por el Departamento de Comercialización del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), Mayabeque, Cuba. En la tabla 1 se presenta su composición.

Tabla 1. Composición del QuitoMax[®] (Q), producido y comercializado por el INCA

Componentes	Cantidad
Quitosano	> 4 g/L
Ácido acético	> 0,4 %
Potasio	> 0,07 %
Benzoato de sodio	> 0,05 %

Fuente: Elaboración propia

***OPLANT⁺* (OP)**

Bioproducto líquido elaborado principalmente con sustancias húmicas (ácidos húmicos y ácidos fúlvicos). Se obtiene a partir de vermicompost de estiércol vacuno procesado por la lombriz roja africana *Eisenia foetida* (Sav.) (Clitellata: Haplotaxida: Lumbricidae) siguiendo el protocolo de Hernández et al. (2014). El OPLANT⁺ es proporcionado por el Departamento de Química de la Facultad de Agronomía de la UNAH. Las propiedades de este bioestimulante se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del OPLANT⁺, producido en el Departamento de Química de la UNAH

CO Mmol/L	CO _T	CO _{OP}	C _{AH}	C _{AF} g/kg	N	P	CE mS/cm	pH -
82,5	36,2	25,8	12,8	13,0	1,3	10,7	5,81	8,73

Nota: Carbono orgánico en el bioproducto líquido (CO), con base en peso seco carbono orgánico total (CO_T), como sustancias húmicas (CO_{OP}), como ácido húmico (C_{AH}), como ácido fúlvico (C_{AF}), contenido total de nitrógeno (N), contenido total de fósforo como P₂O₅ (P), conductividad eléctrica (CE).

Fuente: Elaboración propia

Evaluación del QuitoMax[®] y el OPLANT⁺ en la germinación de las semillas

En condiciones de laboratorio, se realizó un experimento durante el mes de diciembre de 2019. En cada tratamiento se depositaron 50 semillas de tomate en placas Petri (9,0 mm de diámetro) con doble papel de filtro (N.º 1, Whatman International, Maidstone, UK) estéril. Los tratamientos fueron distribuidos en esquema factorial (7 × 3), en un diseño completamente aleatorizado con tres repeticiones. Tres concentraciones del QuitoMax[®] 2,5, 5 y 10 mg/L (Q2,5, Q5 y Q10), tres diluciones de OPLANT⁺ 1:40, 1:50 y 1:60 (v:v) (OP40, OP50 y OP60) equivalentes a concentraciones de 2 mM C, 1,6 mM C y 1,3 mM C, respectivamente, y un control (agua) se combinaron con tres tiempos de imbibición (TI) (10, 20 y 30 minutos), para formar un total de 21 tratamientos y 63 unidades experimentales.

A los siete días de haber iniciado los tratamientos, se evaluaron las siguientes variables: porcentaje de germinación (PG), longitud de la radícula (LR) y la longitud del hipocótilo (LH). El PG se determinó a los siete días de acuerdo con la ecuación 1:

$$PG = \sum (Ni / Ti) \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde, N_i es el número de semillas germinadas el día i y T_i es el número de días después de la siembra.

La LR y LH se midieron con una regla graduada.

Evaluación del QuitoMax[®] y el OPLANT⁺ en el crecimiento de las plántulas de tomate

En condiciones de campo (semillero tradicional) se condujo un experimento entre octubre y noviembre de 2020, con un diseño en bloques al azar con tres tratamientos y siete réplicas, de tal manera que se formaron 21 parcelas experimentales de 2 m² (2 m de longitud por 1 m de ancho). Los tratamientos fueron seleccionados con base en los mejores resultados que se obtuvieron en el ensayo de germinación en condiciones de laboratorio, de modo que se estudió un control absoluto (sin bioestimulantes), la concentración de 5 mg/L de QuitoMax[®] (Q5) embebiendo las semillas durante 20 min y la dilución 1:60 (OP60) de OPLANT⁺ durante 30 min.

La siembra de las semillas se realizó en surcos de 20 cm entre líneas y a chorrillo (riego de las semillas sin distancia entre estas), en canteros de 30 m² (30 m de longitud y 1 m de ancho). El suelo fue clasificado como ferralítico rojo lixiviado, típico, agrogénico dístico, según la última clasificación de los suelos de Cuba (Hernández et al., 2015), conocido como Nitisol (FAO, 2015). Las características físico-químicas del suelo (tabla 3) se establecieron siguiendo los métodos propuestos por Paneque et al. (2010). La posición fisiográfica del lugar y la topografía del terreno circundante son llanas y la pendiente es menor de 2 %, con regular drenaje superficial e interno.

Tabla 3. Características físico-químicas del suelo ferralítico rojo lixiviado

Ph	C	MO	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	Ca/Mg
H ₂ O	g/kg		mg/kg			Cmolc/kg		
7,6	21,7	37,5	325,5	178,8	16,5	2,7	198,0	6,1

Nota: Carbono (C), materia orgánica (MO), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), suma de bases (SB), relación calcio-magnesio (Ca/Mg).

Fuente: Elaboración propia

Durante la investigación se realizaron las labores fitotécnicas según las normas establecidas en el *Manual técnico del cultivo* (Minag, 2017). La temperatura máxima (26,4 °C), temperatura media (20,9 °C) y mínima (15,5 °C), el porcentaje de la humedad relativa (81,5 %) y las precipitaciones (68,1 mm) durante el desarrollo del experimento de campo fueron registradas en la Estación Meteorológica de Tapaste.

A los 10, 20 y 30, después de la emergencia (DDE) De se tomaron cinco plantas al azar por tratamiento y se evaluaron las siguientes variables: longitud radical (LRa, cm), medida con una regla graduada desde la base hasta la punta de la raíz principal. Longitud de la parte aérea (LP, cm), medida desde el cuello de la raíz hasta la axila de la hoja más joven. La masa seca de las raíces (MSR, g) y de la parte aérea (MSPA, g), que fueron obtenidas por gravimetría en estufa (Venticell-707, BMT Medical Technology, Alemania) de circulación de aire a 60 °C hasta obtener masa constante, en balanza analítica (Sartorius BS-124S; Gotingen, Germany).

El número de hojas por planta (NH) fue determinado por conteo visual y el diámetro del tallo (DT, cm) medido con un Vernier digital a dos centímetros del cuello de la raíz; ambas variables fueron observadas a los 20 y 30 DDE. El ciclo de producción (CP) de las plántulas se determinó según las orientaciones establecidas en el instructivo técnico del cultivo (Minag, 2017): cuando las plantas alcanzaron 15-18 cm de altura, aproximadamente 0,5 cm de DT y de 5-6 hojas por planta.

Análisis estadísticos

Los datos obtenidos en ambos ensayos fueron sometidos a los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Fisher, respectivamente. Por tanto, los datos referidos al PG del primer ensayo se transformaron antes del análisis, para cumplir con los supuestos anteriores, mediante la ecuación 2:

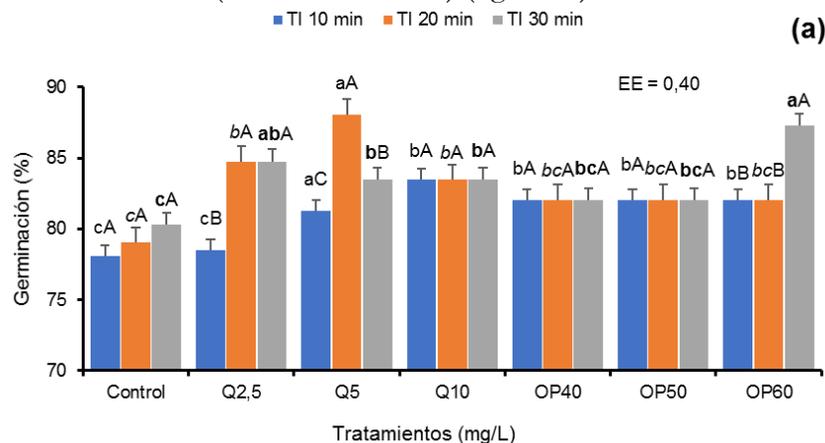
$$\frac{(2 \times \arcsen\sqrt{PG})}{100} \quad \text{Ecuación 2}$$

Por una parte, en el primer ensayo de germinación de las semillas (experimento de laboratorio) se utilizó un ANOVA de dos vías para evaluar los efectos de los bioestimulantes (B), los tiempos de imbibición (TI) y sus interacciones (B × TI). Por otra parte, los datos obtenidos en el segundo ensayo (experimento de campo) fueron analizados y comparados por un ANOVA de una vía. En ambos ensayos, la comparación de las medias se realizó por la prueba de rangos múltiples de Duncan ($P < 0,05$). Todos los análisis y comparaciones estadísticas se realizaron en el software IBM SPSS Statistics v.19.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, EE. UU.).

Resultados y discusión

Efecto del QuitoMax® y el OPLANT® en la germinación de las semillas de tomate

El ANOVA reveló interacciones significativas ($P < 0,0001$) entre los bioestimulantes (B) y los tiempos de imbibición (B × TI) en el porcentaje de germinación (PG) y la longitud del hipocótilo y la radícula (figura 1). El PG fue significativamente ($P < 0,0001$) superior en los tratamientos con Q5 durante 20 min y con OP60 durante 30 min, respectivamente, en comparación con los demás tratamientos evaluados (incluido el control) (figura 1a).



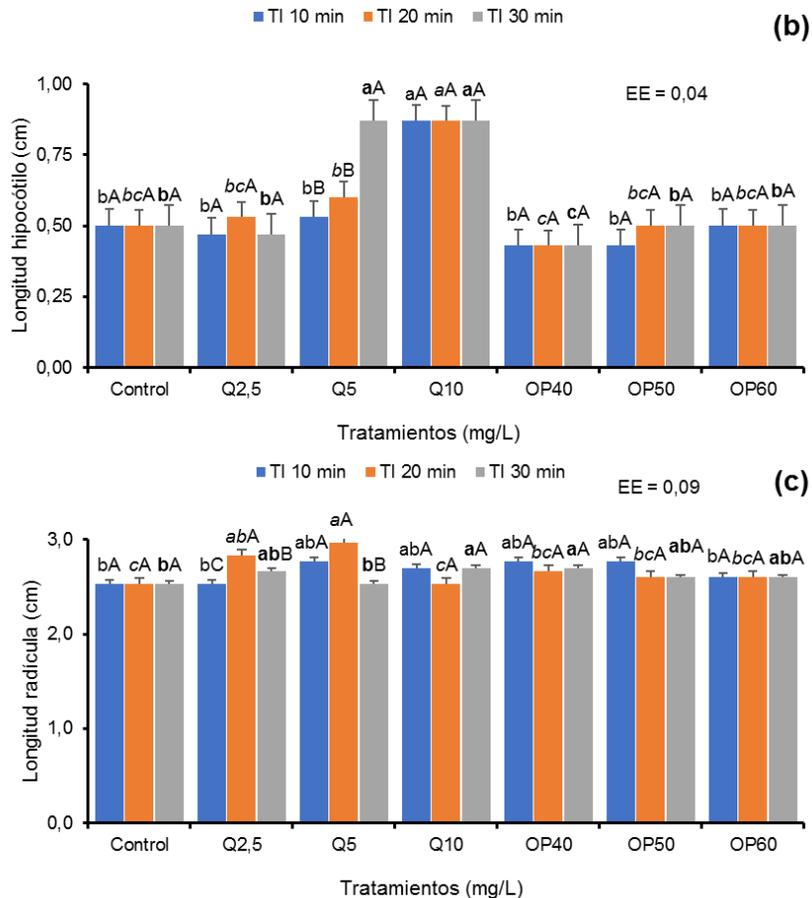


Figura 1. Porcentaje de germinación (a), longitud del hipocótilo (b) y longitud de la radícula (c) obtenidas en las semillas de tomate en función de la aplicación de QuitoMax[®] (2,5, 5 y 10 mg/L), OPLANT⁺[®] (1:40, 1:50 y 1:60 (v:v)) y un control (agua) combinados con 10, 20 y 30 min de tiempo de inmersión de las semillas. Valores representados por las medias de tres repeticiones \pm desviación estándar (DS). Las letras minúsculas normales, cursivas y negritas iguales no muestran diferencias significativas entre los tratamientos en los TI de 10, 20 y 30 min, respectivamente, y las letras mayúsculas iguales no difieren estadísticamente entre los TI en el mismo tratamiento, de acuerdo con la prueba de Duncan ($P < 0,05$). TI: tiempo de imbibición. EE: error estándar de la media.

Fuente: Elaboración propia

Los TI mostraron efectos similares ($P = 0,319$) en el PG en los tratamientos con Q10, OP40, OP50 y el control. No obstante, el PG fue incrementado en los TI de 20 y 30 min en el tratamiento con Q2,5 en comparación con el TI de 10 min ($P < 0,0011$). En los TI de 10 y 20 min, el PG se incrementó significativamente ($P < 0,0003$) en el tratamiento con Q5 comparado con el TI de 30 min. Mientras que el TI de 30 min aumentó el PG en el tratamiento con OP60 y mostró efectos significativos ($P < 0,001$) comparados con los TI de 10 y 20 min (figura 1a).

La LH fue significativamente ($P < 0,0001$) superior en los tratamientos con Q5 durante 10 y 20 min en comparación con los demás tratamientos. Sin embargo, la LH mostró efectos similares ($P = 0,226$) en los tratamientos Q2,5 y Q5 durante 30 min y fueron significativamente superiores al resto de los tratamientos evaluados (incluido el control) (figura 1b). No obstante, los TI mostraron efectos similares ($P = 0,319$) en los tratamientos Q2,5, Q10, OP40, OP50, OP60 y el

control. Sin embargo, el TI de 30 min en el tratamiento con Q5 exhibió la mayor LH y mostró diferencias significativas ($P < 0,001$) comparado con los tiempos de 10 y 20 min (figura 1b).

La LR fue significativamente ($P < 0,0001$) superior en los tratamientos Q5, Q10, OP40 y OP50 durante 10 min comparado con los tratamientos Q2,5, OP40 y el control. La mayor LR fue observada en el tratamiento Q5 durante 20 min y no difirió significativamente ($P = 0,233$) del tratamiento con Q2,5, pero fue significativamente ($P < 0,001$) superior a los tratamientos OP40, OP50 y OP60 y el control. La LR exhibió mayor crecimiento en los tratamientos con Q10 y OP40 embebidas durante 30 min y mostraron efectos similares ($P = 0,079$) a los tratamientos con Q2,5, OP50 y OP60, pero fueron significativamente ($P < 0,0001$) superiores a los tratamientos con Q5 y el control (figura 1c). Los TI no mostraron efectos significativos ($P = 0,548$) en la LR en los tratamientos Q10, OP40, OP50, OP60 y el control. Sin embargo, la LR reveló que la imbibición durante 20 min en los tratamientos Q2,5 y Q5 mostraron diferencias significativas ($P < 0,0002$) en comparación con los TI de 10 y 30 min, respectivamente (figura 1c).

En este estudio se evidenciaron los efectos benéficos del QuitoMax[®] y el OPLANT⁺⁺[®] en el incremento de la germinación. Una posible explicación de los hallazgos es que pueden estar relacionados con la presencia de nutrientes en la composición de ambos bioestimulantes (tablas 1 y 2) (Chun & Chandrasekaran, 2019; Zanin et al., 2019), o por la actividad “tipo-hormona” presente en el OPLANT⁺⁺[®] (Ebrahimi et al., 2019). Otro probable efecto ocurre presumiblemente por el enlace del quitosano a componentes celulares (ADN, constituyentes de la membrana plasmática y pared celular), lo cual mejora la síntesis de hormonas vegetales como las giberelinas, involucradas en la germinación (Colman et al., 2019; Iglesias et al., 2019).

Otros efectos positivos del quitosano en el incremento de los PG de las semillas se debe a que induce la actividad antioxidante (Iglesias et al., 2019). Además, aumenta la absorción de agua debido a la formación de una capa semipermeable en la superficie de la semilla (Shahrajabian et al., 2021), y restringe la pérdida de CO₂ en la semilla (Costales et al., 2019). Estudios similares demostraron que el quitosano promueve los PG en las semillas de tomate (Chun & Chandrasekaran, 2019; Reyes & Enríquez-Acosta, 2019).

Asimismo, la acción estimuladora de las SH en la germinación están asociadas a un incremento de la actividad de la enzima H⁺-ATPasa en la membrana plasmática (Khan et al., 2019; Qin & Leskovar, 2020). Otro efecto positivo se debe a la presencia de diferentes fitohormonas (Jindo et al., 2020; Zanin et al., 2019), que causan la hiperpolarización de la membrana y la activación de canales de Ca²⁺ intra y extracelulares (Canellas et al., 2020), así como al incremento de la actividad de diversas enzimas, proteínas y carbohidratos presentes en las sustancias de reserva de las semillas (Qin & Leskovar, 2020). Por tanto, los hallazgos de este estudio indican que el QuitoMax[®] y el OPLANT⁺⁺[®] aceleran las respuestas de las plantas durante esta fase de cultivo.

Efecto del QuitoMax[®] y el OPLANT⁺⁺[®] en el crecimiento de las plántulas de tomate

El ANOVA reveló diferencias significativas ($P < 0,0001$) entre los tratamientos en la longitud radical (LRa) y longitud de la parte aérea (LP) de las plantas de tomate (figura 2). La LP y LRa variaron en función de los tratamientos en los diferentes momentos evaluados. En este sentido, la LP reveló efectos similares ($P = 0,088$) en los tratamientos con Q5 y OP60 a los 10 DDE

(efecto de la imbibición) y fueron significativamente ($P < 0,0001$) superiores en aproximadamente 36 % comparados con el tratamiento control ($P < 0,0001$).

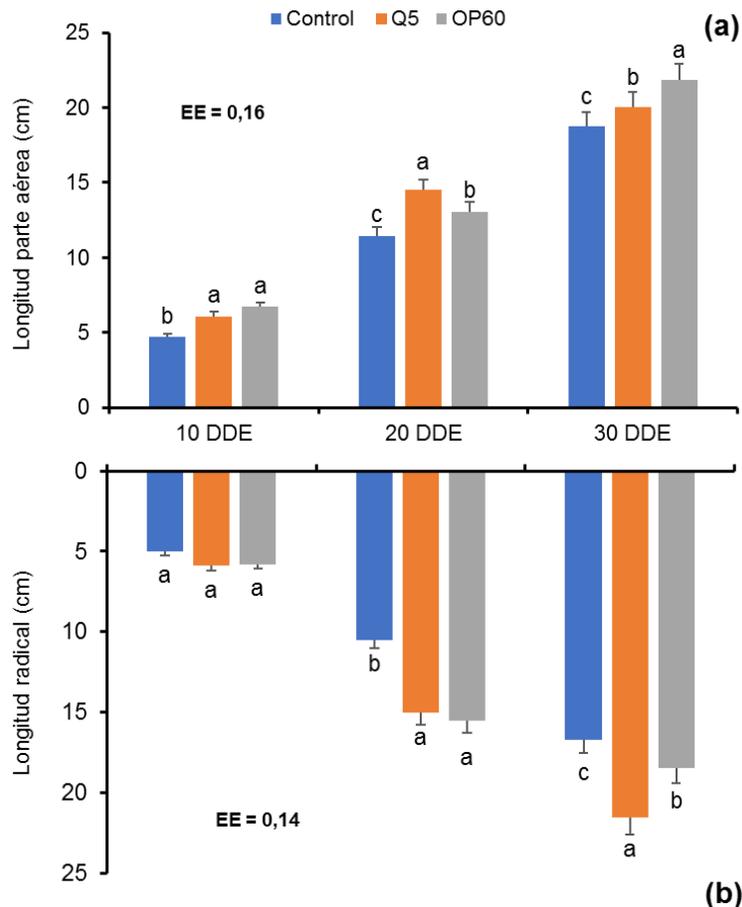


Figura 2. Longitud de la parte aérea (a) y de la raíz (b) de plántulas de tomate cv. Mara a los 10, 20 y 30 DDE las plantas obtenidas mediante la imbibición de semillas en agua (control), QuitoMax® (5 mg/L durante 20 min) y OPLANT+® (1:60 v:v durante 30 min). Valores representados por las medias de siete repeticiones \pm desviación estándar (DS) (Medias \pm DS; $n = 7$). Medias con letras comunes no difieren significativamente según prueba de Duncan ($P < 0,05$). EE: error estándar de la media.

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, la LP a los 20 DDE (efecto de la imbibición) fue superior en el tratamiento con Q5 con incrementos aproximados de 27 % y 11 % y mostró diferencias significativas ($P < 0,0002$) comparado con los tratamientos control y OP60, respectivamente. Pero, el OP60, al mismo tiempo, reveló aumentos significativos ($p < 0,0022$) en la LP de 14 % en relación con el tratamiento control (figura 2a). Mientras que, la LP a los 30 DDE (efecto de la imbibición) mostró un incremento en el tratamiento con OP60 de 16 % y 9 % comparado con los tratamientos control y Q5, respectivamente ($P < 0,0003$). No obstante, el tratamiento con Q5 fue significativamente superior en 9 % en comparación con el tratamiento control ($P < 0,0001$) (figura 2a).

La LP es el principal indicador visible que muestra que las plántulas están de trasplante. En este estudio, el QuitoMax® y el OPLANT+® disminuyeron el ciclo de producción (CP) de plántulas

de tomate. El primero en ocho días en relación con el control y tres días con el OPLANT⁺®, mientras que este último disminuyó el ciclo cinco días comparado con el control.

La LR a los 10 DDE no mostró diferencias significativas ($P = 0,067$) entre los tratamientos (figura 2b), sin embargo, a los 20 DDE los tratamientos con Q5 y OP exhibieron efectos similares ($P = 0,173$) en la LR y superan en $\sim 17\%$ al tratamiento control ($P < 0,0003$). Mientras que a los 30 DDE la LR fue significativamente ($P < 0,0014$) superior en el tratamiento con Q5 en 29% y 16% en comparación con los tratamientos control y OP60, respectivamente, pero este último, a la vez, exhibió un incremento de 11% comparado con el tratamiento control ($P < 0,0001$) (figura 2b).

El diámetro del tallo (DT) y el número de hojas (NH) (figura 3) muestran diferencias significativas ($P < 0,0001$) entre los tratamientos, tanto a los 20 como a los 30 de DDE las plantas. El DT, a los 20 DDE mostró efectos similares ($P = 0,193$) entre los tratamientos Q5 y OP60 y superaron en 22% al tratamiento control (figura 3a). Mientras que a los 30 DDE el DT fue significativamente ($P < 0,0001$) superior en el tratamiento Q5 en 34% y 15% comparado con los tratamientos control y OP60, pero este último reveló al mismo tiempo incrementos de 17% comparado con el control ($P < 0,0001$) (figura 3a).

El NH a los 20 DDE exhibió efectos iguales ($P = 0,099$) en los tratamientos Q5 y OP60 y fueron significativamente ($P < 0,002$) superiores en $\sim 12\%$ en relación con el control. Sin embargo, a los 30 DDE el tratamiento Q5 mostró incrementos en el NH de 25% y $\sim 11\%$ en comparación con los tratamientos control y OP60, mientras que este último fue superior en $\sim 13\%$ en relación con el control ($P < 0,0001$) (figura 3b).

Los resultados de este estudio indican un claro aumento de los indicadores del crecimiento evaluados en las plantas de tomate con la imbibición de las semillas en el QuitoMax® (5 mg/L durante 20 min) y el OPLANT⁺® (1:60 v:v durante 30 min) (figuras 2 y 3). Estos efectos benéficos se pueden deber a que el quitosano y las SH aumentan la eficiencia de la absorción de nutrientes (Zanin et al., 2018), lo cual favorece el crecimiento y desarrollo del sistema radical, y consecuentemente se estimula la producción de la parte aérea. Estos resultados son consistentes con estudios anteriores con el quitosano en tomate (Reyes & Enríquez-Acosta, 2019) y con las SH (Qin & Leskovar, 2020).

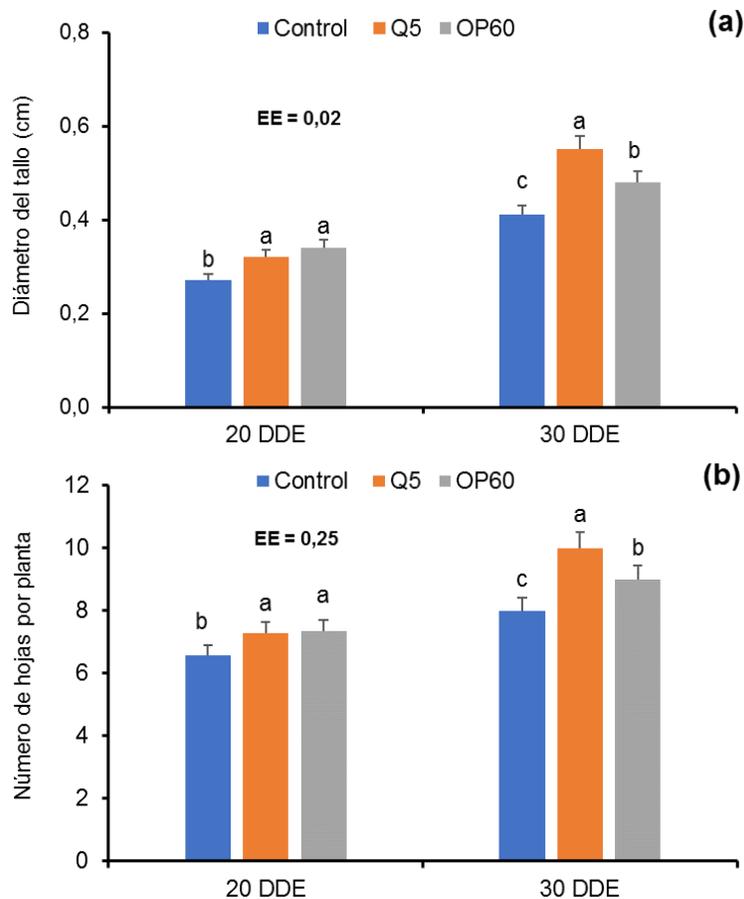


Figura 3. Diámetro del tallo (a) y número de hojas por planta (b) de plántulas de tomate cv. Mara a los 20 y 30 de DDE las plantas obtenidas mediante la imbibición de las semillas en agua (control), QuitoMax® (5 mg/L durante 20 min) y el OPLANT+® (1:60 v:v durante 30 min). Medias \pm DS; n = 7). Medias con letras comunes no difieren significativamente según prueba de Duncan ($P < 0,05$). EE: error estándar de la media.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la masa seca de la parte aérea (MSPA) y de las raíces (MSR) de las plantas de tomate, se encontró que fueron modificadas con el tratamiento con QuitoMax® (5 mg/L durante 20 min) y el OPLANT+® (1:60 v:v durante 30 min) (figura 4). La MSPA fue significativamente ($P < 0,0001$) superior en el tratamiento Q5 en todos los momentos evaluados comparados con los tratamientos con OP60 y control en 39 % y 108 % a los 10 DDE, 17 % y 67 % a los 20 DDE y 12 % y 24 % a los 30 DDE, respectivamente (figura 4a).

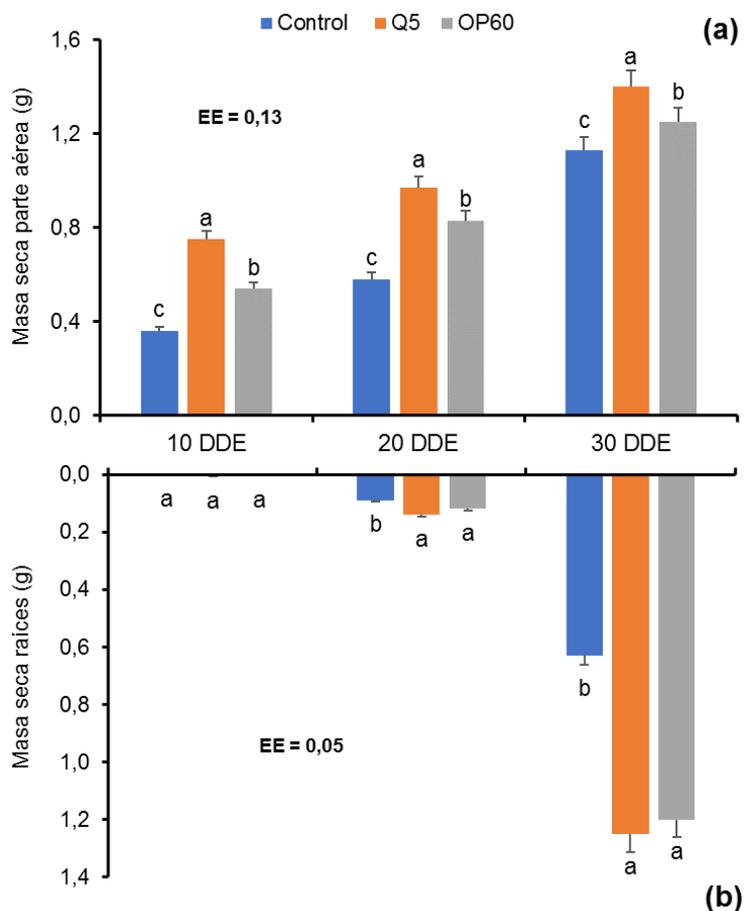


Figura 4. Producción de masa seca de la parte aérea (a) y de las raíces (b) de plántulas de tomate cv. Mara a los 10, 20 y 30 de DDE las plantas obtenidas mediante la imbibición de las semillas en agua (control), QuitoMax[®] (5 mg/L durante 20 min) y OPLANT⁺⁺[®] (1:60 v:v durante 30 min). Medias \pm DS; n = 7. Medias con letras comunes no difieren significativamente según prueba de Duncan (P < 0,05). EE: error estándar de la media.

Fuente: Elaboración propia

La MSR no mostró diferencias significativas (P = 0,222) entre los tratamientos a los 10 DDE. Sin embargo, exhibió efectos similares entre los tratamientos Q5 y OP60 y fueron significativamente superiores en 44 % a los 20 DDE y 94 % a los 30 DDE, respectivamente, en comparación con el tratamiento control (figura 4b).

Los resultados de esta investigación mostraron que la imbibición de las semillas en QuitoMax[®] a 5 mg/L durante 20 min logró un mejor desempeño que el OPLANT⁺⁺[®] a 1:60 v:v durante 30 min, en el incremento de la MSPA y la MSR. Estos resultados pueden estar relacionados con el incremento de la LP, LR, DT y el NH (figuras 1 y 2) o por las condiciones climatológicas (véase el apartado “Materiales y métodos”) que beneficiaron el desarrollo de las plantas (Minag, 2017). Una posible explicación para estos resultados es que se deben a la incorporación de nutrientes (N, P, K), los cuales favorecen el crecimiento de las plantas (tablas 1 y 2) o al incremento de la actividad de enzimas claves del metabolismo del N y del C (Colman et al., 2019).

Además, las SH tienen la capacidad de formar quelatos solubles con metales presentes en el suelo (tabla 1), lo que aumenta su disponibilidad para las plantas (Zanin et al., 2019). De forma similar, se demostró previamente que el quitosano y las SH disminuyen la producción de las ERO (Jindo et al., 2020). Estos efectos positivos en el crecimiento de las plántulas también se puede explicar porque estos bioestimulantes influyen en el balance hormonal de la planta: el quitosano induce las vías de señalización relacionadas con la biosíntesis de hormonas vegetales (Iglesias et al., 2019), mientras que las SH poseen hormonas o precursores en su estructura compleja que favorecen el crecimiento de las plantas (Khan et al., 2019).

Estudios recientes demuestran que la estimulación del crecimiento de la parte aérea de las plantas ocurre presumiblemente por procesos dependientes de la luz que conllevan la producción de biomasa. Estos hallazgos ocurren principalmente por el incremento de los pigmentos fotosintéticos y la clorofila, relacionados con una mayor área foliar (Khan et al., 2019). Estos efectos benéficos del quitosano y las SH fueron descritos anteriormente en el crecimiento de las plantas de tomate (Qin & Leskovar, 2020; Reyes & Enríquez-Acosta, 2019).

Otro beneficio observado con el QuitoMax[®] y el OPLANT⁺⁺[®] mediante la imbibición de las semillas fue la disminución del CP en relación con las plantas sin bioestimulantes, y también destacamos que el QuitoMax[®] fue más promisorio que el OPLANT⁺⁺[®]. Estos resultados indican que las plantas están menos tiempo expuestas a condiciones de estrés (sequía), plagas y daños mecánicos, además implica ahorros de recursos económicos, lo cual permite obtener plántulas más sanas, vigorosas, robustas y óptimas para el trasplante. Resultados similares en la reducción del CP de las plántulas de tomate fueron obtenidos anteriormente con el quitosano (Terry et al., 2017) y con las SH (Qin & Leskovar, 2020). Por tanto, ambos bioestimulantes vía imbibición de las semillas desempeñan un papel crucial en el crecimiento y la producción de plántulas de tomate, lo cual constituye una contribución importante al manejo productivo del cultivo en esta etapa.

Finalmente, nuestras hipótesis fueron validadas e indican que el QuitoMax[®] y el OPLANT⁺⁺[®] (embebiendo las semillas) son una alternativa eficiente y viable para incrementar los PG y promover el crecimiento inicial de la planta de tomate.

Conclusiones

Los resultados mostraron que los factores bioestimulantes y tiempo de imbibición tienen interacciones significativas en la germinación y el crecimiento inicial de la planta de tomate. La imbibición de las semillas en QuitoMax[®] (5 mg/L) durante 20 min y en OPLANT⁺⁺[®] (1:60 v:v) por 30 min incrementaron los porcentajes de germinación, lo cual sugiere su establecimiento en esta etapa del cultivo.

Los hallazgos de este estudio validaron los efectos benéficos del QuitoMax[®] y el OPLANT⁺⁺[®] en el crecimiento inicial de las plantas de tomate en condiciones de campo, sin embargo, el QuitoMax[®] fue más prominente que el OPLANT⁺⁺[®], pues disminuyó el ciclo de producción de las plántulas. Colectivamente, estos resultados sugieren que ambos bioestimulantes pueden ser utilizados como promotores sostenibles del crecimiento del tomate y otras especies vegetales, lo que conduce a la producción de plántulas más sanas, vigorosas, robustas y de mayor calidad en el establecimiento del cultivo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los revisores anónimos por sus correcciones y comentarios, los cuales ayudaron a mejorar el manuscrito.

Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento y están de acuerdo en su publicación, además manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

Referencias

- Asgari-Targhi, G., Iranbakhsh, A., & Ardebili, Z. O. (2018). Potential benefits and phytotoxicity of bulk and nano-chitosan on the growth, morphogenesis, physiology, and micropropagation of *Capsicum annuum*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 127, 393-402. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.04.013>
- Calero, A., Quintero, E., Pérez, Y., Olivera, D., Peña, K., Castro, I., & Jiménez, J. (2019). Evaluation of efficient microorganisms in the tomato seedling production (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista de Ciencias Agrícolas*, 36(1), 67-78. <https://doi.org/10.22267/rcia.193601.99>
- Calero-Hurtado, A., Pérez Díaz, Y., Quintero Rodríguez, E., Olivera Viciado, D., & Peña Calzada, K. (2019). Effect of the associated application between *Rhizobium leguminosarum* and efficient microorganisms on common bean production. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(2), 309-322. https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num2_art:1460
- Canellas, L. P., Canellas, N. O. A., Da S. Irineu, L. E. S., Olivares, F. L., & Piccolo, A. (2020). Plant chemical priming by humic acids. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 7, Article number 12. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00178-4>
- Canellas, L. P., Olivares, F. L., Canellas, N. O. A., Mazzei, P., & Piccolo, A. (2019). Humic acids increase the maize seedlings exudation yield. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 6, Article number 3. <https://doi.org/10.1186/s40538-018-0139-7>
- Chun, S. C., & Chandrasekaran, M. (2019). Chitosan and Chitosan nanoparticles induced expression of pathogenesis-related proteins genes enhances biotic stress tolerance in tomato. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125, 948-954. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.167>
- Colman, S. L., Salcedo, M. F., Mansilla, A. Y., Iglesias, M. J., Fiol, D. F., Martín-Saldaña, S., Alvarez, V. A., Chevalier, A. A., & Casalengué, C. A. (2019). Chitosan microparticles improve tomato seedling biomass and modulate hormonal, redox and defense pathways. *Plant Physiology and Biochemistry*, 143, 203-211. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.09.002>
- Costales, D., Nápoles, M. C., Falcón-Rodríguez, A., González-Anta, G., Petit, C., Solá, S., & Perrig, D. (2019). Effect of chitosan polymer and inoculated with *B. japonicum* on soybean germination survival of seedling, nodulation and bacteria viability on seeds. *Legume Research*, 42(2), 265-269. <https://doi.org/10.18805/LR-410>
- Ebrahimi, E., Ghorbani, R., & Von Fragstein und Niemsdorff, P. (2019). Effects of vermicompost placement on nutrient use efficiency and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Biological Agriculture & Horticulture*, 36(1), 44-52. *Cienc. Tecnol. Agropecuaria*, 23(1): e2343
- DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:2343

- <https://doi.org/10.1080/01448765.2019.1671220>
- Falcón-Rodríguez, A. B., Costales Méndez, D., González-Peña Fundora, D., & Nápoles, M. C. (2015). Nuevos productos naturales para la agricultura: Las oligosacarinas. *Cultivos Tropicales*, 36(especial), 111-129. <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v36s1/ctr10s115.pdf>
- García, A. C., de Souza, L. G. A., Pereira, M. G., Castro, R. N., García-Mina, J. M., Zonta, E., Gonçalves Lisboa, F. J., & Louro Berbara, R. L. (2016). Structure-property-function relationship in humic substances to explain the biological activity in plants. *Scientific Reports*, 6, Article number 20798. <https://doi.org/10.1038/srep20798>
- Hernández, A., Pérez, J. M., Bosch, D., & Castro, N. (2015). *Clasificación de los suelos de Cuba 2015* (1.ª ed.). Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. <https://cerlalc.org/ri/vi/clasificacion-de-los-suelos-de-cuba-2015-8870/>
- Hernández, O. L., Calderín, A., Huelva, R., Martínez-Balmori, D., Guridi, F., Aguiar, N. O., Olivares, F. L., & Canellas, L. P. (2014). Humic substances from vermicompost enhance urban lettuce production. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 225-232. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0221-x>
- Iglesias, M. J., Colman, S. L., Terrile, M. C., París, R., Martín-Saldaña, S., Chevalier, A. A., Álvarez, V. A., & Casalangué, C. A. (2019). Enhanced properties of chitosan microparticles over bulk chitosan on the modulation of the auxin signaling pathway with beneficial impacts on root architecture in plants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(25), 6911-6920. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00907>
- Jindo, K., Canellas, L. P., Albacete, A., Figueiredo dos Santos, L., Frinhani Rocha, R. L., Carvalho Baia, D., Oliveira Aguiar Canellas, N., Goron, T. L., & Olivares, F. L. (2020). Interaction between humic substances and plant hormones for phosphorous acquisition. *Agronomy*, 10(5), Article number 640. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050640>
- Khan, M. Z., Ahmed, H., Ahmed, S., Khan, A., Khan, R. U., Hussain, F., Hayat, A., & Sarwar, S. (2019). Formulation of humic substances coated fertilizer and its use to enhance K fertilizer use efficiency for tomato under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 42(6), 626-633. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1568462>
- Malerba, M., & Cerana, R. (2018). Recent advances of chitosan applications in plants. *Polymers*, 10(2), Article number 118. <https://doi.org/10.3390/polym10020118>
- Malerba, M., & Cerana, R. (2019). Recent applications of chitin- and chitosan-based polymers in plants. *Polymers*, 11(5), Article number 839. <https://doi.org/10.3390/polym11050839>
- Ministerio de la Agricultura [MINAG]. (2017). *Instructivo técnico para semillero de tomate*. Ministerio de la Agricultura.
- Olaetxea, M., De Hita, D., García, C. A., Fuentes, M., Baigorri, R., Mora, V., Garnica, M., Urrutia, O., Erro, J., Zamarreño, A. M., Berbara, R. L., & García-Mina, J. M. (2018). Hypothetical framework integrating the main mechanisms involved in the promoting action of rhizospheric humic substances on plant root- and shoot- growth. *Applied Soil Ecology*, 123, 521-537. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.007>
- Olivera Viciado, D., Leiva, L., Calero, A., & Meléndrez, J. F. (2015). Empleo de microorganismos nativos multipropósitos (MNM) en el comportamiento agro-productivo de cultivos hortícolas. *Agrotecnia de Cuba*, 39(7), 34-42. https://www.grupoagricoladecuba.gag.cu/media/Agrotecnia/pdf/39_2015/No_7/34_42.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2015). *World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* [Update 2015]. <https://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2019).

- Faostat [base de datos]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Paneque Pérez, V. M., Calaña Naranjo, J. M., Calderón Valdés, M., Borges Benítez, Y. Hernández García, T. C., & Caruncho Contreras, M. (2010). *Manual de técnicas analíticas para análisis del suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos* (1.ª ed.). Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. <https://bit.ly/3rNrop0>
- Qin, K., & Leskovar, D. I. (2020). Humic substances improve vegetable seedling quality and post-transplant yield performance under stress conditions. *Agriculture*, 10(7), Article number 254. <https://doi.org/10.3390/agriculture10070254>
- Reyes Pérez, J., & Enríquez-Acosta, E. (2019). Evaluación de Quitomax® en la emergencia, crecimiento y nutrientes de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Ciencia y Tecnología*, 11(2), 31-37. <https://doi.org/10.18779/cyt.v11i2.233>
- Shahrajabian, M. H., Chaski, C., Polyzos, N., Tzortzakis, N., & Petropoulos, S. A. (2021). Sustainable agriculture systems in vegetable production using chitin and chitosan as plant biostimulants. *Biomolecules*, 11(6), Article number 819. <https://doi.org/10.3390/biom11060819>
- Soliman, M., & Hamed, L. (2019). Application of bio-stimulants in comparison with organic and mineral N fertilizers for growth promotion of spinach and common bean grown on sandy soil. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 10(1), 79-85. <https://doi.org/10.21608/jssae.2019.36666>
- Terry Alfonso, E., Falcón Rodríguez, A., Ruiz Padrón, R., Carrillo Sosa, Y., & Morales Morales, H. (2017). Respuesta agronómica del cultivo de tomate al bioproducto QuitoMax®. *Cultivos Tropicales*, 38(1), 147-154. <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193250540019.pdf>
- Zanin, L., Tomasi, N., Cesco, S., Varanini, Z., & Pinton, R. (2019). Humic substances contribute to plant iron nutrition acting as chelators and biostimulants. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article number 675. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00675>
- Zanin, L., Tomasi, N., Zamboni, A., Segal, D., Varanini, Z., & Pinton, R. (2018). Water-extractable humic substances speed up transcriptional response of maize roots to nitrate. *Environmental and Experimental Botany*, 147, 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.12.014>