

## Efectividad a la aplicación de bioestimulantes en frijol ejotero bajo estrés hídrico

Karla Ivonne Hernández-Figueroa<sup>1</sup>  
Esteban Sánchez-Chávez<sup>1§</sup>  
Damaris Leopoldina Ojeda-Barrios<sup>2</sup>  
Celia Chávez-Mendoza<sup>1</sup>  
Ezequiel Muñoz-Márquez<sup>1</sup>  
Alejandro Palacio-Márquez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unidad Delicias-Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. Av. Cuarta sur 3820, Fracc. Vencedores del Desierto, Ciudad Delicias, Chihuahua, México. CP. 33089. (hernandez.karla1611@gmail.com; celia.chavez@ciad.mx; alexmarquezmj8@gmail.com; emunoz@ciad.mx); <sup>2</sup>Universidad Autónoma de Chihuahua-Facultad de Ciencias Agrotecnológicas-Campus universitario I. Chihuahua, México. CP. 31350. (dojeda@uach.mx).

§Autor para correspondencia: esteban@ciad.mx.

### Resumen

El estrés hídrico es uno de los principales factores que afectan tanto el crecimiento y la productividad de los cultivos agrícolas. Una alternativa innovadora para mejorar la resistencia a este estrés hídrico es la aplicación de bioestimulantes. El objetivo de este trabajo fue evaluar la efectividad de bioestimulantes sobre el crecimiento, rendimiento, contenido y eficiencia de uso del agua (EUA) ante distintos niveles de estrés hídrico en la planta de frijol ejotero 'Strike'. El experimento se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero en Delicias, Chihuahua durante el periodo agosto-septiembre del 2021. Se empleó un diseño experimental completamente al azar y los tratamientos consistieron en tres tipos de riego: al 100% de capacidad de campo (CC), sin estrés hídrico y a 75 y 50% de CC, en estos tratamientos con déficit hídrico se aplicaron de forma foliar los bioestimulantes: nanopartículas de óxido de zinc más quitosano, Codasil<sup>®</sup>, Osmoplant<sup>®</sup>, Stimplex<sup>®</sup> y ácido salicílico. Los resultados obtenidos indican que el mejor tratamiento aplicado fue CC75 + nano Zn + quitosano ya que favoreció la mayor acumulación de biomasa, producción de frutos, contenido de agua y la eficiencia de uso del agua en plantas de frijol ejotero cv Strike, las cuales le permitieron una mejor adaptación y tolerancia al estrés hídrico en comparación a los tratamientos CC50 + Stimplex<sup>®</sup> y CC75+ Stimplex<sup>®</sup>, que probablemente los efectos negativos del estrés hídrico fueron superiores a los beneficios del bioestimulante Stimplex<sup>®</sup> aplicado. Se concluye que las nanopartículas de óxido de zinc más quitosano fue el bioestimulante más eficiente para aliviar y tolerar los efectos del estrés hídrico, se considera una alternativa innovadora para mantener y mejorar el crecimiento y la producción del cultivo frente a problemas de estrés hídrico.

**Palabras claves:** *Phaseolus vulgaris* L., estrés abiótico, productividad, sequía.

Recibido: marzo de 2022

Aceptado: mayo de 2022

## Introducción

La frecuencia e intensidad de la sequía ha aumentado en todo el mundo, y se prevé que se agravará debido al cambio climático global (Bechtold *et al.*, 2018). Esta es el principal factor que reduce el rendimiento de los cultivos y representa una amenaza para la seguridad alimentaria (Sytra *et al.*, 2019). Para evitar los efectos de la deficiencia hídrica las plantas presentan alteraciones de varios procesos fisiológicos y bioquímicos esenciales que afectan su desarrollo y pueden limitar el crecimiento y la productividad (Farouk y Amany, 2012).

Para contrarrestar los efectos nocivos de la sequía en los cultivos han sido reportados el uso de ciertos compuestos con el objetivo de mitigar el estrés hídrico, estos son los llamados bioestimulantes, los cuales son definidos como compuestos de moléculas orgánicas o inorgánicas y microorganismo que aplicados usualmente en bajas concentraciones de forma externa en la planta, estimulan su crecimiento, desarrollo y defensa contra patógenos, pero principalmente incrementan la tolerancia al estrés (Dalal *et al.*, 2019).

El Silicio (Si) es un elemento relevante en el tratamiento del estrés en las plantas y se considera un bioestimulante por su efecto positivo en el crecimiento y desarrollo de distintas especies vegetales, aumentando su tolerancia al estrés biótico y abiótico (Szulc *et al.*, 2019). Este elemento no se considera esencial para las plantas, pero es beneficioso para ellas ya que se ha visto que mejora el metabolismo primario al aumentar la fotosíntesis y la absorción de nutrientes, y el metabolismo secundario al promover la producción de compuestos fenólicos que favorecen la defensa antioxidante (Vega *et al.*, 2019). También se tiene el reporte del alga *Ascophyllum nodosum* como un organismo con efectos benéficos para la planta, aplicándose a cultivos como un bioestimulante para enfrentar el estrés, resultando en un mayor rendimiento fotosintético, altos niveles en el uso del agua, aumentando la tolerancia a la pérdida de ésta (Rosario *et al.*, 2021).

Otro bioestimulante es el óxido de zinc que es utilizado para la regulación de crecimiento y desarrollo de las plantas a diferentes niveles y la mejora a la tolerancia de reacciones bióticas y abióticas (Ma *et al.*, 2015). De la mano con las cualidades del óxido de zinc se encuentra la nanotecnología que en los últimos años ha sido de gran importancia su uso en áreas, incluida la agricultura donde son comercializadas las nanopartículas, que por su tamaño ofrecen un mejor uso de insumos agrícolas al ser utilizados en menor cantidad ya que por su tamaño les da mayor facilidad de penetración a través de las membranas biológicas y un mayor aprovechamiento en comparación de los insumos convencionales (Razzaq *et al.*, 2016).

Un bioestimulante utilizado junto con Nanopartículas de óxido de zinc (Palacio *et al.*, 2021) es el Quitosano, que es utilizado para proteger las plantas del estrés oxidativo y estimular el crecimiento de estas (Farouk *et al.*, 2011). Este compuesto es natural, poco tóxico y biodegradable, sus aplicaciones foliares dieron como resultado un mayor crecimiento vegetativo y una mejora en la calidad del fruto (Ghoname *et al.*, 2010).

El ácido salicílico actualmente es considerado como un bioestimulante del crecimiento de las plantas (Najafian *et al.*, 2009), se reporta que tiene distintos efectos incluyendo el cierre de estomas y reducción de la transpiración (Larqué *et al.*, 1978), aumento en la biomasa foliar, raíz y de frutos, (Sánchez *et al.*, 2011) y su aplicación también ha demostrado respuestas de adaptación en ambientes extremos incrementando su concentración cuando las plantas son sometidas a

condiciones de estrés (Salinas, 2010). Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la efectividad de la aplicación de bioestimulantes en el cultivo de frijol ejotero *cv* Strike sometido a distintos niveles de estrés hídrico.

## Materiales y métodos

### Manejo del cultivo

El experimento se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo en Cd. Delicias, Chihuahua, México, durante el mes de agosto y septiembre de 2021. El experimento se estableció bajo condiciones de invernadero a una temperatura media ambiental de  $30.8 \pm 4.6$  °C. Para el estudio se utilizaron semillas de frijol ejotero (*Phaseolus vulgaris* L.) *cv* Strike, las cuales se cultivaron en macetas de plástico de 13.4 L (dos plantas por maceta) en una mezcla de sustrato compuesta por vermiculita y perlita en una proporción de 2:1.

Cada riego aplicado se realizó con una solución nutritiva completa compuesta por 6 mM  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 1.6 mM  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 0.3 mM  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , 4 mM  $\text{CaCl}_2$ , 1.4 mM  $\text{MgSO}_4$ , 5  $\mu\text{M}$  Fe-EDDHA, 2  $\mu\text{M}$   $\text{MnSO}_4$ , 0.25  $\mu\text{M}$   $\text{CuSO}_4$  y 0.5  $\mu\text{M}$   $\text{H}_3\text{BO}_3$ , preparada con agua purificada con un pH de 6-6.1. Los niveles de los riegos dependieron del estrés hídrico, se utilizaron tres niveles de riego, un riego completo al 100% considerándolo como control (sin estrés hídrico), un segundo riego al 75% por cada litro de solución nutritiva aplicada al riego de 100% se aplicó solamente 0.75 L, y por último un riego al 50% donde por cada litro aplicado al riego de 100% se aplicó 0.5 L. En el experimento se trabajó con cinco bioestimulantes, ácido salicílico, Stimplex<sup>®</sup>, Codasil<sup>®</sup>, Osmoplant<sup>®</sup> y nanopartículas de óxido de zinc con Quitosano, cada uno se aplicó a las plantas con riegos de 75 y 50% y se dejaron plantas con estos niveles de riego sin aplicación de bioestimulantes para su función como control.

### Caracterización de bioestimulantes

En este estudio se utilizaron cinco bioestimulantes; el producto Codasil<sup>®</sup> compuesto por 20% de silicio, 4% de aminoácidos libres y 11.2% de potasio en dosis de 2 ml  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{O}$  (recomendada por el fabricante), el producto Osmoplant<sup>®</sup> compuesto de 6% de aminoácidos libres, 2.4% de nitrógeno y 3.35% de potasio en dosis de 2 ml  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{O}$  (recomendada por el fabricante), el producto Stimplex<sup>®</sup> compuesto por extracto de alga *Ascophyllum nodosum* como su ingrediente activo al 0.34%, con una formulación de nitrógeno total 0.1% y potasio soluble ( $\text{K}_2\text{O}$ ) 4% en dosis de 2 ml  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{O}$  (recomendada por el fabricante), otro bioestimulante fueron las nanopartículas de óxido de zinc (<50 nm, 99.9%) en dosis de 0.1246 g  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{O}$  (100 ppm) junto con el quitosano (Poli-D-glucosamina) en dosis de 2 ml  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{O}$  y el último compuesto utilizado como bioestimulante fue el ácido salicílico  $\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$  en dosis de 0.0138 g  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{O}$  (0.1 mM).

### Diseño experimental y tratamientos

Cada unidad experimental se constituyó de una maceta con dos plantas, teniendo un total de trece tratamientos (Cuadro 1). Los tratamientos de bioestimulantes fueron aplicados a las unidades experimentales a partir de los 15 días después de la germinación y de la aparición de las primeras hojas verdaderas, se realizaron 6 aplicaciones foliares, cada siete días, en horario vespertino, por un periodo de dos meses.

**Cuadro 1. Descripción de tratamientos aplicados.**

Tratamiento	Dosis de riego (%) a capacidad de campo	Bioestimulante/dosis
CC100	100	Ninguno
CC75	75	Ninguno
CC75 + NPOZn + Quitosano	75	Nanopartículas de óxido de zinc con Quitosano/100 ppm, 100 ppm
CC75 + Codasil	75	Codasil <sup>®</sup> /dosis comercial
CC75 + Osmoplant	75	Osmoplant <sup>®</sup> /dosis comercial
CC 75 + Stimplex	75	Stimplex <sup>®</sup> /dosis comercial
CC75 + AS	75	Ácido salicílico/0.1 mM
CC50	50	-
CC50 + NPOZn + Quitosano	50	Nanopartículas de óxido de zinc con Quitosano/100 ppm, 100 ppm
CC50 + Codasil	50	Codasil <sup>®</sup> /dosis comercial
CC50 + Osmoplant	50	Osmoplant <sup>®</sup> /dosis comercial
CC50 + Stimplex	50	Stimplex <sup>®</sup> /dosis comercial
CC50 + AS	50	Ácido salicílico / 0.1mM

### Muestreo de plantas

A los 60 días después de la germinación, cuando las plantas alcanzaron su madurez fisiológica fueron muestreadas para su análisis. Las plantas se dividieron en la parte aérea y la radicular, seguido se pesaron, después se lavaron, primero con agua corriente y posteriormente dos veces con agua destilada y se prosiguió a un secado total.

### Análisis vegetal

#### Biomasa aérea

Se evaluó la biomasa aérea considerando los órganos de hojas, tallos y frutos de la planta, para los cálculos se tomó en cuenta la masa fresca y seca de la planta. Para cuantificar el peso se utilizó una balanza analítica (AND HR-120, San José, California, USA). La biomasa aérea se expresó en gramos de masa seca.

#### Biomasa radicular

Se evaluó la biomasa radicular considerando solamente la raíz de la planta, para los cálculos se tomó en cuenta la masa fresca y seca de la raíz. Para cuantificar la masa se utilizó una balanza analítica (AND HR-120, San José, California, USA). La biomasa radicular se expresó en gramos de masa seca.

## Producción de vainas

El rendimiento de la planta se expresó como el promedio de peso de las vainas por planta y se expresó en gramos de masa fresca.

## Contenido de agua en la planta

El contenido de agua en la planta se obtuvo calculando la diferencia entre la masa fresca y la masa seca (Kochhar y Gujral, 2020).

## Eficiencia del uso del agua

La eficiencia del uso del agua (EUA) se obtuvo dividiendo la masa de materia seca cosechada (gramos de masa seca por tratamiento) entre el volumen total de agua aplicado en cada tratamiento (Trejo, 2006).

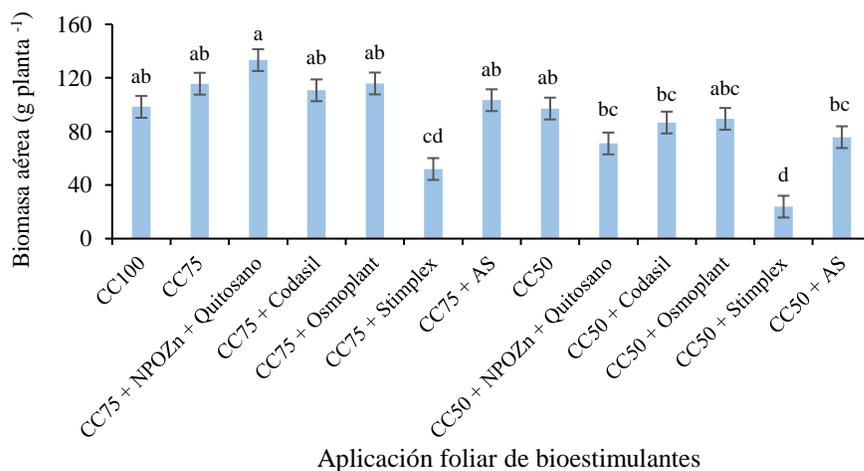
## Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza de clasificación simple, con una prueba de separación de medias usando el método Tukey usando el paquete estadístico SAS 9.4.

## Resultados y discusión

### Biomasa aérea

El contenido de biomasa acumulada es una de las variables más importantes para indicar el funcionamiento correcto de la planta (Sánchez *et al.*, 2016). En el presente estudio, se encontraron diferencias significativas en la biomasa aérea (Figura 1), sobresaliendo el tratamiento CC75 + NPOZn + Quitosano con un incremento de 82% respecto al tratamiento CC50 + Stimplex que presentó los valores menores de biomasa aérea.

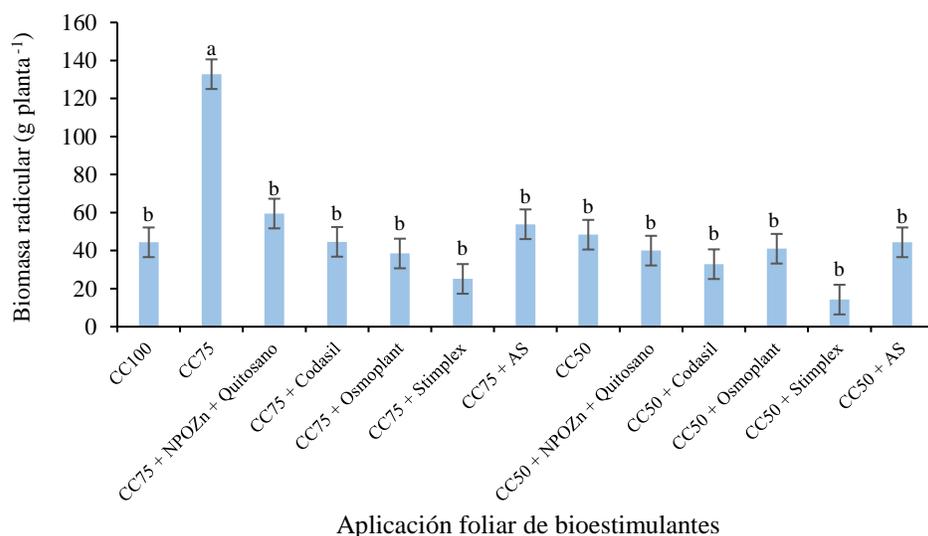


**Figura 1. Efecto de la aplicación de bioestimulantes sobre la producción de biomasa aérea en plantas de frijol ejotero cv Strike bajo condiciones de estrés hídrico.** Medias con letras iguales no difieren según prueba de Tukey ( $p < 0.005$ ).

Distintos trabajos previos han señalado el uso de nanopartículas de óxido de zinc como una fuente viable para la producción de biomasa. Palacio *et al.* (2021) reportaron que el uso de nanopartículas de óxido de zinc con quitosano en frijol ejotero *cv* Strike, promovieron la mayor producción de biomasa. Burman *et al.* (2013) aplicaron nanopartículas de óxido de zinc en el cultivo de garbanzo donde reportaron un aumento de biomasa de 22.8% con respecto a su control. Ambos trabajos coinciden con los resultados obtenidos en la producción de biomasa del presente trabajo, atribuyendo al uso de nanopartículas de óxido de zinc con quitosano para lograr una mejor producción de biomasa a pesar de las condiciones de estrés hídrico.

### Biomasa radicular

Los resultados respecto a esta variable indicaron que el tratamiento sin aplicación de bioestimulante con riego al 75% de su capacidad de campo (CC75) fue el que de manera estadística destaca con respecto a los demás tratamientos, teniendo un incremento de 89% comparado con el tratamiento CC50 + Stimplex<sup>®</sup> que fue el que presentó los valores menores respecto a la producción de biomasa radicular (Figura 2).



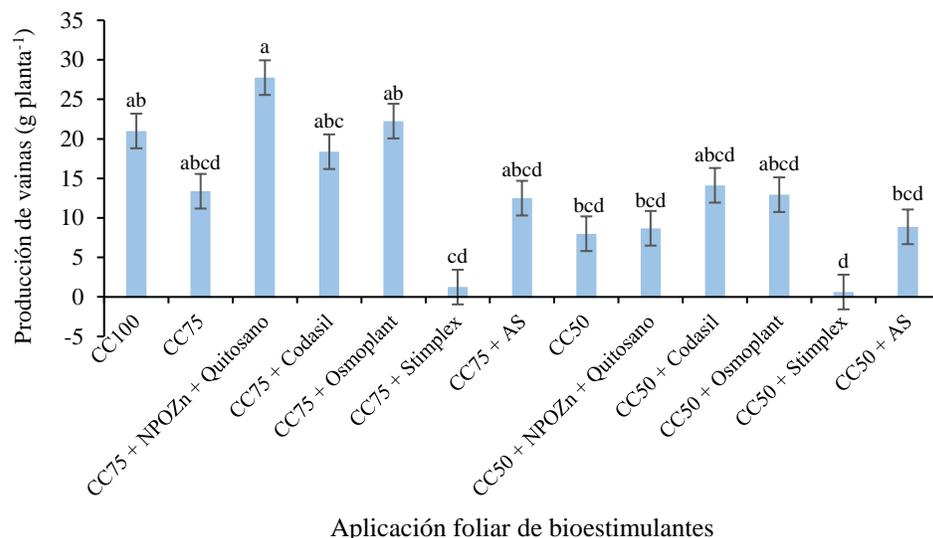
**Figura 2. Efecto de la aplicación de bioestimulantes sobre la producción de biomasa radicular en plantas de frijol ejotero *cv* Strike bajo estrés hídrico.** Medias con letras iguales no difieren según prueba de Tukey ( $p < 0.005$ ).

Autores como Barrios *et al.* (2014) señalan que el crecimiento de la raíz tiene una relación fundamental con la biomasa aérea y las actividades agrícolas como la labranza pueden afectar directamente la producción de biomasa radicular y su equilibrio funcional con la biomasa aérea, ellos informan que en condiciones normales de humedad edáfica la actividad de raíces es superior cuando se aplica la labranza que sin hacerlo, sin embargo, señalan que en períodos con déficit hídricos dicha actividad resulta superior cuando no se hace la labranza.

Estos resultados y observaciones concuerdan con los resultados presentes, donde el tratamiento CC75 (riego a capacidad de campo al 75%) tiene un destacado incremento en comparación con los demás tratamientos, lo que permite señalar que el estrés hídrico aplicado al tratamiento promueve el crecimiento radicular por las condiciones físicas e hídricas del suelo, en este caso sustrato.

## Producción de vainas

Se encontraron diferencias significativas en la producción de vainas por efecto de los bioestimulantes aplicados se observa en la Figura 3, destacando el tratamiento CC75 + Nano Zn + Quitosano con la mayor producción de vainas en comparación a los tratamientos CC75 + Stimplex® y CC50 + Stimplex® que presentaron los menores valores de producción de vainas.



**Figura 3. Efecto de la aplicación de bioestimulantes sobre la producción de frutos en plantas de frijol ejotero cv Strike bajo estrés hídrico.** Medias con letras iguales no difieren según prueba de Tukey ( $p < 0.005$ ).

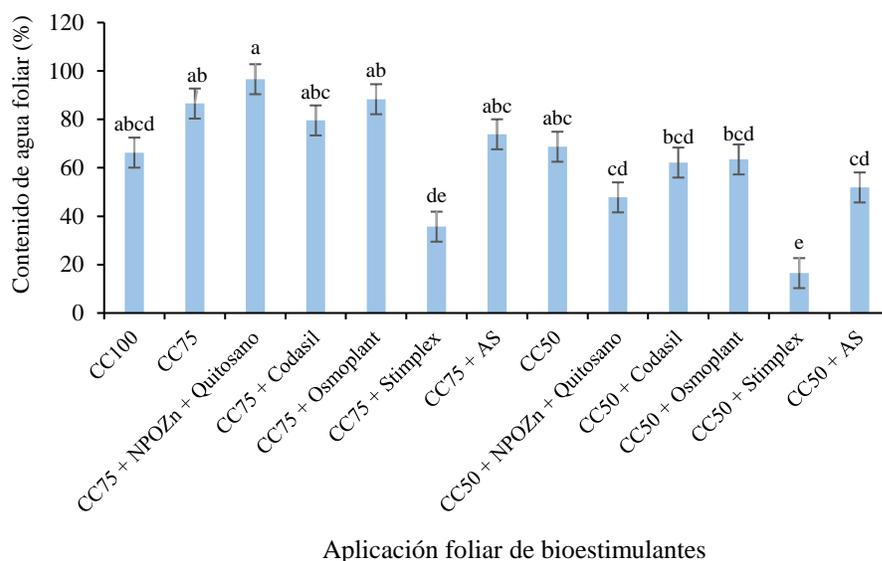
En el trabajo realizado por Hassnain *et al.* (2020) se informa que el uso de quitosano incrementó la producción del cultivo del tomate, tanto en condiciones normales como bajo estrés hídrico, lo que iguala con los resultados del presente trabajo. Palacio *et al.* (2021) en su trabajo con frijol ejotero, muestran resultados favorables del uso de nanopartículas de óxido de zinc especialmente agregando el uso del quitosano, reportaron que hubo un incremento de 21.99% cuando se aplicó este bioestimulante en la dosis de 100 ppm, que concuerda con los resultados del presente trabajo, donde el tratamiento de nanopartículas de óxido de zinc con quitosano muestra ser el tratamiento más favorable para la producción bajo estrés hídrico, incluso por encima del control (CC100).

Arciniegas (2017) en su trabajo con *Ascophyllum nodosum* (Stimplex®) con ácidos húmicos y fúlvicos (Lonite®), sobre el rendimiento del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) reportó resultados donde se observa que el mejor rendimiento lo obtuvo utilizando los dos productos en conjunto, lo mismo que sucede con el trabajo de Sánchez (2019) en maíz (*Zea mays* L.) reportó mejores valores utilizando el Stimplex con un producto en conjunto.

Por la naturaleza del alga se podría considerar que sus cualidades como bioestimulante ante estrés hídrico es de resistencia, pero no de producción, para analizar la calidad del alga serían necesarios otros parámetros donde se puedan observar sus cualidades frente al estrés hídrico como reporta Du Jardin *et al.* (2015); do Rosario *et al.* (2021) donde ponen de ejemplo la actividad fotosintética y la tolerancia de la planta ante la pérdida de agua.

## Contenido de agua en la planta

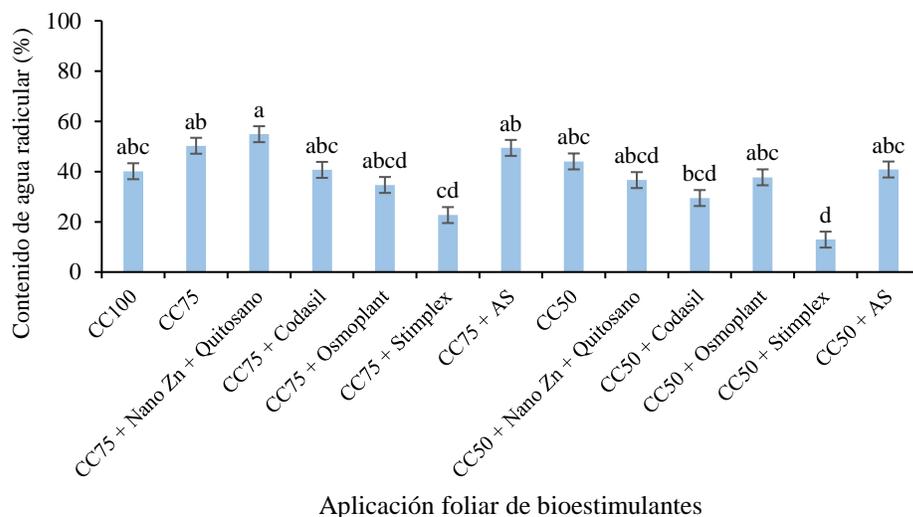
En el presente estudio, se encontraron diferencias significativas en el contenido de agua en la planta por efecto de la aplicación de bioestimulantes (Figura 4), destacando el tratamiento CC75 + Nano Zn + Quitosano con los mayores contenidos de agua en comparación a los tratamientos CC75 + Stimplex® y CC50 + Stimplex® que presentaron los menores contenidos de agua foliar.



**Figura 4. Efecto de la aplicación de bioestimulantes sobre el contenido de agua en órganos aéreos en plantas de frijol ejotero cv Strike bajo estrés hídrico.** Medias con letras iguales no difieren según prueba de Tukey ( $p < 0.005$ ).

Medrano *et al.* (2007) reporta que el contenido de agua en la planta tiene una relación con el óptimo rendimiento de esta, ya que influye como una correlación positiva, mientras más agua se encuentre disponible, a pesar de los recursos ambientales la planta presenta mayor tamaño, rendimiento, ellos mencionan que para el buen contenido agua en la planta influyen factores externos como la temperatura, las horas luz, la disponibilidad de nutrientes; sin embargo, hacen la connotación que teniendo una óptima disponibilidad de agua la planta, supera obstáculos como los anteriores y logra la captación idónea para su desarrollo. Estos resultados son equiparables con los presentados en este trabajo, ya que la producción de biomasa aérea en los tratamientos sobresalientes coincide con los valores mayores del análisis del contenido de agua, que sería el tratamiento CC75 + NPOZn + Quitosano.

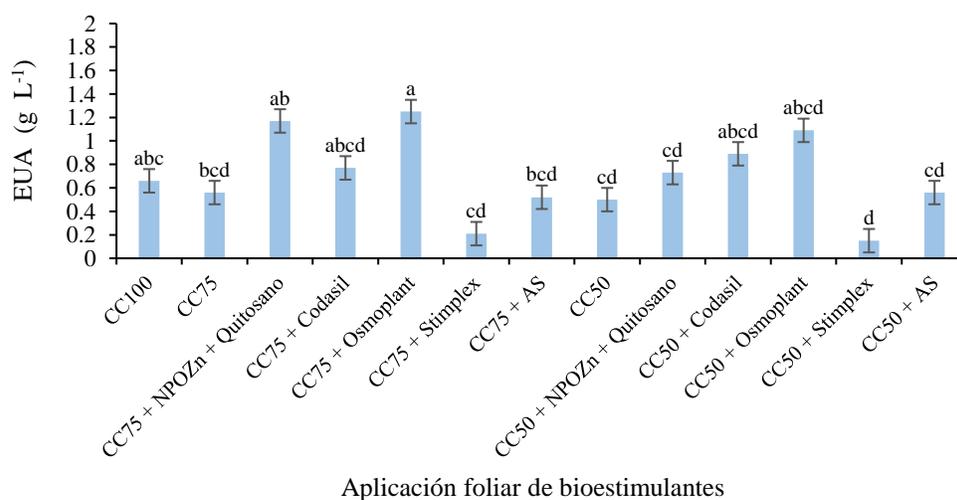
Con respecto al contenido de agua radicular, indicar que se encontraron diferencias significativas por efecto de los bioestimulantes aplicados, se presenta en la Figura 5, destacando el tratamiento CC75 + Nano Zn + Quitosano con el mayor contenido de agua radicular en comparación a los tratamientos CC75 Stimplex® y CC50 Stimplex® que presentaron los menores contenidos de agua radicular, comportándose de forma similar al contenido de agua foliar (Figura 4).



**Figura 5. Efecto de la aplicación de bioestimulantes sobre el contenido de agua radicular en plantas de frijol ejotero cv Strike bajo estrés hídrico.** Medias con letras iguales no difieren según prueba de Tukey ( $p < 0.005$ ).

### Eficiencia de uso del agua (EUA)

La EUA se expresó en gramos de producción de vainas por litros de agua aplicada, al tratamiento con capacidad de campo de 100% se le aplicó 31.5 L en total durante los 60 días del cultivo, a los tratamientos con dosis de riego de 75% en total se les aplicaron 23.63 L y a los tratamientos sometidos a un riego de 50% se les aplicó 15.75 L. En el presente estudio, se encontraron diferencias significativas en la EUA por efecto de los bioestimulantes aplicados (Figura 6), destacando los tratamientos CC75+ Stimplex® y CC75 + Nano Zn + Quitosano con la mayor EUA en comparación a los tratamientos CC75 Stimplex® y CC50 Stimplex® que presentaron menores EUA, comportándose de forma similar al contenido de agua en la planta (Figura 4 y 5).



**Figura 6. Efecto de la aplicación de bioestimulantes sobre la eficiencia del uso del agua (EUA) en los en plantas de frijol ejotero cv Strike bajo estrés hídrico.** Medias con letras iguales no difieren según prueba de Tukey ( $p < 0.005$ ).

La EUA involucra distintos procesos de la planta tanto fisiológicos como metabólicos. Respecto a los fisiológicos los niveles de uso de agua dependen de la producción de biomasa, de la disponibilidad que se encuentra en el suelo, la capacidad de almacenamiento de este, influyendo directamente la densidad y profundidad del sistema radicular, que de este dependen otros factores anteriormente mencionados. Ante el problema de estrés hídrico, la planta emplea comportamientos constitutivos de la especie (adaptaciones), como la síntesis de ácido abscísico, el descenso de la conductancia estomática, que a su vez lleva a limitaciones de reacciones fotoquímicas, en el ciclo de Calvin y el transporte de asimilados (Medrano *et al.*, 2007).

Se puede observar en la Figura 6 que los tratamientos bajo riego de CC 75% con aplicación de bioestimulantes (CC75+ Stimplex<sup>®</sup> y CC75 + Nano Zn + Quitosano) son los que tienen mejor eficiencia en cuanto a la utilización del agua de riego en comparación a los tratamientos CC50% con aplicación de bioestimulantes, especialmente los tratamientos CC75 Stimplex<sup>®</sup> y CC50 Stimplex<sup>®</sup> que son menos eficientes en el uso del agua, debido a que están sometidos a un mayor estrés hídrico y los mecanismos empleados no son suficientes para tolerar dicho estrés; es decir, emplean sus procesos fisiológicos y metabólicos para sobrevivir como medida básica para la resistencia en detrimento de la acumulación de biomasa y producción de vainas.

Estudios previos, han demostrado que la aplicación de bioestimulantes juegan un papel importante en la tolerancia al estrés hídrico (Colla y Rouphael, 2015). En el presente estudio, el tratamiento de CC75 + Nano Zn + Quitosano fue el que mejoró la acumulación de biomasa, producción de vainas, contenido de agua en la planta, así como, la eficiencia de uso del agua en plantas de frijol ejotero *cv* Strike en comparación a los tratamientos CC50+ Stimplex<sup>®</sup> y CC75+ Stimplex<sup>®</sup> que presentaron los valores más bajos y por lo tanto, fueron los tratamientos menos eficaces en tolerar el estrés hídrico.

La explicación del porque el tratamiento CC75 + Nano Zn + Quitosano fue mejor a los tratamientos CC50+ Stimplex<sup>®</sup> y CC75+ Stimplex<sup>®</sup> pudieran deberse a los mecanismos y respuestas fisiológicas y bioquímicas relacionadas con la tolerancia al estrés hídrico. En el caso de las respuestas fisiológicas, estas involucran: 1) la pérdida de turgencia y ajuste osmótico; 2) tasa de transpiración reducida debido al cierre estomático (baja conductancia estomática); 3) concentración interna de CO<sub>2</sub> reducida; 4) tasa fotosintética reducida; y 5) reducción del crecimiento (Onaga y Wydra, 2016).

Con respecto a las respuestas bioquímicas, éstas incluyen: i) disminución de la eficiencia fotoquímica; ii) disminución de la actividad Rubisco; iii) acumulación de metabolitos como glutatión, prolina, glicina betaína y poliaminas; iv) aumento de enzimas antioxidantes; y v) reducción de la acumulación de especies reactivas de oxígeno (Onaga y Wydra, 2016). Se considera que, en el caso del mejor tratamiento aplicado, tal es el caso de CC75 + Nano Zn + Quitosano probablemente fue favorecido en las respuestas fisiológicas y bioquímicas, las cuales le permitieron una mejor adaptación y tolerancia al estrés hídrico en comparación a los tratamientos CC50 + Stimplex<sup>®</sup> y CC75+ Stimplex<sup>®</sup>, que probablemente los efectos negativos del estrés hídrico fueron superiores a los beneficios del bioestimulante Stimplex<sup>®</sup> aplicado.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que el mejor tratamiento aplicado fue CC75 + Nano Zn + Quitosano ya que favoreció la mayor acumulación de biomasa, producción de frutos, contenido de agua y la eficiencia de uso del agua en plantas de frijol ejotero cv Strike, las cuales le permitieron una mejor adaptación y tolerancia al estrés hídrico en comparación a los tratamientos CC50 + Stimplex® y CC75+ Stimplex®, que probablemente los efectos negativos del estrés hídrico fueron superiores a los beneficios del bioestimulante Stimplex® aplicado. Finalmente, se concluye que las nanopartículas de óxido de zinc más quitosano fue el bioestimulante más eficiente para aliviar y tolerar los efectos del estrés hídrico, por lo que se considera una alternativa innovadora para mantener y mejorar el crecimiento y la producción del cultivo frente a problemas de estrés hídrico.

## Literatura citada

- Arciniegas, B. S. R. 2017. Efecto de la aplicación de *Ascophyllum nodosum* con ácidos húmicos y fúlvicos, sobre el rendimiento del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.), bajo riego, en la zona de Babahoyo. Universidad Técnica de Babahoyo. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 30-31 pp.
- Barrios, M. B.; Buján, A.; Debelis, S. P.; Sokolowski, A. C.; Blasón, Á. D.; Rodríguez, H. A.; López, S. C.; De Grazia, J.; Mazo, C. R. y Gagey, M. C. (2014). Relación de raíz/biomasa total de Soja (*Glycine max*) en dos sistemas de labranza. Terra Latinoam. 32(3):221-230.
- Bechtold, U. and Field, B. 2018. Molecular mechanisms controlling plant growth during abiotic stress. J. Exp. Bot. 69(11):2753-2758.
- Burman, U.; Saini, M. and Kumar, P. 2013. Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. Toxicol. Environ. Chem. 95(4):605-612.
- Colla, G. and Roupael, Y. 2015. Biostimulants in horticulture. Sci. Hort. 196(30):1-134.
- Dalal, A.; Bourstein, R.; Haish, N.; Shenhar, I.; Wallach, R. and Moshelion, M. 2019. Dynamic physiological phenotyping of drought-stressed pepper plants treated with 'productivity-enhancing' and 'survivability-enhancing' biostimulants. Front. Plant Sci. 905(10):2-3.
- Farouk, S.; Mosa, A. A.; Taha, A. A.; Ibrahim, H. M. and Gahmery, A. M. 2011. Protective effect of humic acid and chitosan on radish (*Raphanus sativus* L. var. Sativus) plants subjected to cadmium stress. J. Stress physiol. Biochem. 7(2):99-116.
- Farouk, S. and Amany, A. R. 2012. Improving growth and yield of cowpea by foliar application of chitosan under water stress. Egypt. Acad. J. Biol. Sci. 14:14-26.
- Ghonaime, A. A.; Nemr, M. A.; Abdel, M. A. M. R. and Tohamy, W. A. 2010. Enhancement of sweet pepper crop growth and production by application of biological, organic, and nutritional solutions. Res. J. Agric. Biol. Sci. 6(3):349-355.
- Hassnain, M.; Alam, I.; Ahmad, A.; Basit, I.; Ullah, N.; Alam, I. and Shair, M. M. 2020. Efficacy of chitosan on performance of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) plant under water stress condition. Pak. J. Agric. Res. 33(1):27-41.
- Du Jardin, P. 2015. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. Sci. Hort. 196(30):3-14.
- Kochhar, S. L. and Gujral, S. K. 2020. Plant physiology -theory and applications. 2<sup>nd</sup> (Ed.). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom. 702 p.
- Larqué, S. A. 1978. The antitranspirant effect of acetylsalicyc acid on *Phaseolus vulgaris*. Physiol. Plant. 43(2):126-128.

- Ma, Y.; Zhang, P.; Zhang, Z.; He, X.; Li, Y.; Zhang, J. and Zhao, Y. 2015. Origin of the different phytotoxicity and biotransformation of cerium and lanthanumoxide nanoparticles in cucumber. *Nanotoxicology*. 9(2):262-270.
- Medrano, H.; Bota, J.; Cifre, J.; Flexas, J.; Ribas, C. M. and Gulías, J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*. (43):63-84.
- Najafian, S.; Khoshkhui, M.; Tavallali, V. and Saharkhiz, M. J. 2009. Effect of salicylic acid and salinity in thyme (*Thymus vulgaris* L.): Investigation on changes in gas exchange, water relations, and membrane stabilization and biomass accumulation. *Australian J. Basic Appl. Sci.* 3(3):2620-2626.
- Onaga, G. and Wydra, K. 2016. Advances in plant tolerance to abiotic stresses. *Plant Genomics*. 10(9):229-272.
- Palacio, M. A.; Ramírez, E. C. A.; Gutiérrez, R. N. J.; Sánchez, C. E.; Ojeda, B. D. L.; Chávez, M. C. and Sida, A. J. P. 2021. Efficiency of foliar application of zinc oxide nanoparticles versus zinc nitrate complexed with chitosan on nitrogen assimilation, photosynthetic activity, and production of green beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Sci. Hortic.* 288(10):110297.
- Rosário, R. V.; Santos, A. L.; Silva, A. A.; Sab, M. P. V.; Germino, G. H.; Cardoso, F. B. and Almeida, S. M. 2021. Increased soybean tolerance to water deficiency through biostimulant based on fulvic acids and *Ascophyllum nodosum* (L.) seaweed extract. *Plant physiol. Biochem.* 158(11):228-243.
- Razzaq, A.; Ammara, R.; Jhanzab, H. M.; Mahmood, T.; Hafeez, A. and Hussain, S. 2016. A novel nanomaterial to enhance growth and yield of wheat. *J. Nanosci. Technol.* 2(1):55-58.
- Sánchez, B. J. J. 2019. Efecto del *Ascophyllum nodosum* combinado con ácidos húmicos y fúlvicos, sobre el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.). Universidad Técnica de Babahoyo, Facultad de Ciencia Agropecuarias. 29-32 pp.
- Sánchez-Chávez, E.; Barrera-Tovar, R.; Muñoz-Márquez, E.; Ojeda-Barrios, D. L. y Anchondo-Nájera, Á. 2011. Efecto del ácido salicílico sobre biomasa, actividad fotosintética, contenido nutricional y productividad del chile jalapeño. *Rev. Chapingo. Ser. Hortic.* 17(SPE1):63-68.
- Sánchez, C. E.; Ruiz, J. M. and Romero, M. L. 2016. Compuestos nitrogenados indicadores de estrés en respuesta a las dosis tóxicas y deficientes de nitrógeno en frijol ejotero. *Nova Sci.* 8(16):228-244.
- Sánchez, C. E.; Barrera, T. R.; Muñoz, M. E.; Ojeda, B. D. L. y Anchondo, N. Á. 2011. Efecto del ácido salicílico sobre biomasa, actividad fotosintética, contenido nutricional y productividad del chile jalapeño. *Rev. Chapingo. Ser. Hortic.* 17(1):63-68.
- Sytar, O.; Kumari, P.; Yadav, S.; Brestic, M. and Rastogi, A. 2019. Phytohormone priming regulator for heavy metal stress in plants. *J. Plant Growth Regul.* 38(2):739-752.
- Szulc, W.; Rutkowska, B.; Hoch, M.; Ptasinski, D. and Kazberuk, W. 2019. Plant available silicon in differentiated fertilizing conditions. *Plant, Soil Environ.* 65(5):233-237.
- Trejo, J. A. M.; Monsivais, A. O. G.; Ramírez, J. O.; González, A. Z.; Cerda, E. R.; Hernández, M. F. y Nuncio, R. A. 2006. Efecto de tres profundidades de cinta de riego por goteo en la eficiencia de uso de agua y en el rendimiento de maíz forrajero. *Rev. Mex. Cienc. Pec.* 44(3):359-364.
- Vega, I.; Nikolic, M.; Pontigo, S.; Godoy, K.; Mora, M. D. L. L. and Cartes, P. 2019. Silicon improves the production of high antioxidant or structural phenolic compounds in barley cultivars under aluminum stress. *Agronomy*. 9(7):388-403.