









Efecto de la aplicación de bioestimulantes en la huella hídrica del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)

Effect of biostimulant application on the water footprint of common beans (Phaseolus vulgaris L.)

 Donaldo Morales-Guevara^{1*},  José Dell'Amico-Rodríguez¹,  Eduardo Jerez-Mompie¹,  Yanitza Meriño-Hernández¹,
 Reinaldo Cun-González²,  Geisy Hernández-Cuello³,  Héctor Febles-Piñar¹ and  Betty L. González-Pérez¹

¹Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA). PO Box No. 1, San José de las Lajas. Mayabeque, Cuba, CP 32700. E-mail: amico@inca.edu.cu, ejerez@inca.edu.cu, ymeriño@inca.edu.cu, hfebles6@gmail.com, betty@inca.edu.cu

²Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAGRIC). Carretera Fontanar, Km 2 ½ Reparto ABEL Santamaría, Boyero, Havana, Cuba. E-mail: reinaldo.cun@iagric.minag.gob.cu

³Universidad Agraria de La Habana (UNAH). Carretera a tapaste km 23 1/2 y Autopista Nacioanl, San José de las Lajas, Mayabeque. E-mail: geisyh@unah.edu.cu

*Autor para correspondencia: Donaldo Morales-Guevara, e-mail: mguevaradonaldo@gmail.com

RESUMEN: El trabajo se realizó con el objetivo de estimar la huella hídrica del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) sometido a dos regímenes de riego y aplicaciones de bioestimulantes. Se utilizaron semillas de la variedad de frijol negro Triunfo 70 sembradas en 18 contenedores. Los tratamientos consistieron en aplicar en 9 contenedores el 100 % de la ETc (Evapotranspiración del cultivo) en condiciones estándares y en los otros 9 al 75 %. Antes de la siembra todas las semillas de todos los contenedores fueron inoculadas con Azofert®-frijol (A), a 12 contenedores (seis de cada variante de riego) se le adicionó Pectimorf® (P) junto con el Azofert®- frijol y a seis (a tres de cada variante de riego) se le asperjó el Quitomax® (Q) al inicio de la floración. Los tratamientos en los que se les repuso el 75 % de la ETc fueron cubiertos con mantas de polietileno transparente para evitar la incidencia de las precipitaciones. Los resultados indican que, la aplicación tanto de Pectimorf® en la semilla, como de Quitomax® en aspersión foliar al inicio de la floración favorecen el crecimiento y el rendimiento del cultivo del frijol, así como, contribuyó a mantener un mejor estado hídrico en las plantas. Ambos productos mejoraron la eficiencia en el uso del agua por las plantas y contribuyeron a disminuir la huella hídrica, en casi un 20 % respecto al tratamiento control. El Quitomax®, mostró señales de ejercer una acción antitranspirante en las plantas.

Palabras clave: humedad del suelo, contenido relativo de agua, potencial hídrico foliar, crecimiento, rendimiento.

ABSTRACT: With the aim of estimating the water footprint of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) subjected to two irrigation regimes and biostimulant applications. Seeds of the Triunfo 70 black bean variety were used and planted in 18 concrete containers. The treatments consisted of applying 100% of the ETc (crop evapotranspiration) in standard conditions to 9 containers and 75% to the other 9. Before sowing, the seeds in all containers were inoculated with Azofert®-bean (A), and Pectimorf® (P) was added to 12 containers (six from each irrigation variant) together with Azofert®-bean, and six (three from each irrigation variant) were sprayed with Quitomax® (Q) at the beginning of flowering. The treatments in which 75% of the ETc was replaced were covered with transparent polyethylene sheets to prevent rainfall. The results indicate that the application of both Pectimorf® to the seed and Quitomax® as a foliar spray at the beginning of flowering promotes the growth and yield of the bean crop, as well as helping to maintain better water status in the plants. Both products improved the plants' water use efficiency and contributed to reducing the water footprint by almost 20% compared to the control treatment. Quitomax® showed signs of exerting an antitranspirant action on the plants.

Keywords: Soil Moisture, Relative Water Content, Leaf Water Potential, Growth, Yield.

Recibido: 14/06/2025

Aceptado: 20/10/2025

Conflictos de intereses: Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Contribuciones de los autores: Conceptualización: D. Morales. Curación de datos: D. Morales. Análisis formal: D. Morales, J. Dell'Amico. Investigación: D. Morales, J. Dell'Amico, Y. Meriño, R. Cun, H. Febles, B.L. González. Metodología: D. Morales. Supervisión: D. Morales, J. Dell'Amico, H. Febles, B.L. González. Validación: D. Morales, J. Dell'Amico, R. Cun, H. Febles, B.L. Visualización: D. Morales, J. Dell'Amico, E. Jerez, Y. Meriño, R. Cun, G. Hernández. Redacción - borrador original: D. Morales. Redacción - revisión y edición: D. Morales, J. Dell'Amico, E. Jerez, Y. Meriño, R. Cun, G. Hernández.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



INTRODUCCIÓN

El cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris*) está considerado entre los prioritarios en el programa de producción de granos para la sustitución de importaciones que lleva a cabo el estado cubano (Cisneros et al., 2020).

Es la leguminosa más significativa en el consumo humano, constituye un complemento nutricional indispensable en la dieta diaria de más de 300 millones de personas en el mundo y es un elemento importante en los sistemas de producción agrícola. Su grano se considera imprescindible, no solo por sus propiedades nutricionales y culinarias, sino además, por su presencia en los cinco continentes y su valor para el desarrollo rural y social de muchas economías (Magaña et al., 2015).

En muchas ocasiones se produce en suelos de baja fertilidad, lo que reduce el rendimiento del cultivo (Beaver et al., 2021). En Cuba, gran parte de la producción de este grano se desarrolla en el periodo poco lluvioso, lo que obliga al suministro de agua a través del riego.

El cambio climático es uno de los fenómenos más estudiado en la era actual dado el fuerte impacto que puede provocar en la agricultura, debido fundamentalmente a la ocurrencia de escasas precipitaciones (Ottaiano et al., 2021).

Cuba en su condición de archipiélago largo y estrecho, enfrenta limitaciones importantes de sus reservas hídricas, debido a que las precipitaciones constituyen la principal fuente de abasto para garantizar el preciado líquido que demanda el desarrollo de la nación (Girón et al., 2015).

El estrés hídrico es la respuesta fisiológica de las plantas al déficit de agua en el suelo, y afecta el equilibrio entre la transpiración y la absorción de agua según Girón et al. (2015), en condiciones de estrés hídrico, el crecimiento de los cultivos disminuye de manera proporcional a la severidad y a la magnitud de la condición de estrés (Rodríguez-Larramendi et al., 2021).

La gestión del riego determina cuándo y cuánto regar, sobre la base de las necesidades de agua de los cultivos, las características del suelo y las condiciones climáticas. Sin embargo, la no utilización de una programación de riego ajustada al clima, el suelo y las características del cultivo son una de las principales causas del uso excesivo del agua de riego (González-Cueto et al., 2020).

El empleo de bioestimulantes para incrementar la productividad de los cultivos se ha establecido en la práctica agrícola convencional.

Con el objetivo de hacer más eficiente los sistemas productivos, diferentes industrias agroquímicas comercializan en el mercado distintos complejos nutritivos que contienen micronutrientes, aminoácidos, extractos vegetales y/o fitohormonas, los cuales se han denominado promotores del crecimiento o bioestimulantes (Winkler et al., 2017; Roupael y Colla, 2020).

La amplia gama de bioestimulantes ofrece una alternativa biotecnológica porque promueve el crecimiento y desarrollo de las plantas, mejora su metabolismo y las protege contra estreses bióticos y abióticos (Van Oosten et al., 2017; Sanches et al., 2019).

El Azofert®-frijol, es un inoculante para leguminosas que contiene especies nativas de rizobios capaces de fijar el nitrógeno atmosférico el cual es utilizado por las plantas. A diferencia de otros inoculantes, induce en las bacterias altas concentraciones de factores de nodulación los cuales potencian su acción nodulante y su eficiencia en la fijación biológica del nitrógeno.

El Quitomax® es un bioestimulante a base de una mezcla de polímeros de quitosano a cuyo principio activo se le han atribuido propiedades como antitranspirante según Bittelli et al. (2001); Iriti et al. (2009), responde con especial referencia ante condiciones de estrés abiótico (Hidangmayum et al., 2019).

Por su parte el Pectimorf® está constituido por una mezcla de oligosacáridos pécticos que ha demostrado poseer un efecto positivo en el desarrollo del sistema radical de las plantas según Posada-Pérez et al. (2016); Sáez-Cigarruista et al. (2024) y que también ha indicado poseer alguna potencialidad para mejorar la eficiencia en el uso del agua de las plantas (Dell Amico et al., 2017).

La huella hídrica, de acuerdo a Hoekstra et al. (2011), constituye un indicador que en los últimos tiempos ha ido ganando en importancia como consecuencia de la escasez de agua dulce para las diferentes actividades y procesos que se realizan.

En la agricultura se expresa como el volumen de agua utilizado para producir una unidad de producto ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$). En su análisis contempla la cantidad de agua aplicada a través del riego (azul), por aportes de las lluvias (verde) y el agua utilizada en la dilución de aguas residuales o los fertilizantes a niveles tolerables por las plantas (gris).

Está constituida por tres componentes, la huella hídrica azul (correspondiente a la cantidad de agua aplicada a través del riego), la huella hídrica verde (cantidad de agua aprovechada proveniente de las lluvias) y la huella hídrica gris (la cual considera al fertilizante aplicado como carga contaminante, fundamentalmente al nitrógeno).

A partir de los elementos anteriores, este trabajo se desarrolló con el objetivo de estimar la huella hídrica del cultivo del frijol en diferentes condiciones de abasteciendo de agua en el suelo y evaluar el efecto del uso de los bioestimulantes mencionados.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó en el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA, 22°58'00"N y 82°09'00"O y a 130 msnm). Para ello se utilizaron 18 contenedores de hormigón de 2,60 m de largo por 0,60 m de ancho ($1,56 \text{ m}^2$) que contenían suelo Ferralítico Rojo lixiviado de la provincia de Mayabeque según Hernández-Jiménez et al. (2019), zona que forma parte de la llanura cársica Habana-Matanzas (Magaña et al., 2015).

En cada contenedor se sembraron semillas de frijol de la variedad Triunfo 70 dispuestas en dos hileras con una separación entre ellas de 0,40 m y 0,10 m entre plantas (52 plantas por contenedor).

Los tratamientos utilizados consistieron en aplicar en nueve contenedores el agua correspondiente al 100 % de la ETc (Evapotranspiración del cultivo) y en otros nueve el 75 %. Antes de la siembra las semillas de todos los contenedores fueron inoculadas con Azofert®- frijol (A), el que se ha considerado como parte de la tecnología del cultivo. En doce de ellos (seis de cada variante de riego) se le aplicó Pectimorf® (P) junto con el Azofert®- frijol antes de la siembra y de estos en seis (a tres de cada variante de riego) se aplicó el Quitomax® (Q) por aspersión foliar al inicio de la floración. Con ellos se conformaron los siguientes tratamientos: 100 A (control); 100 AP; 100 APQ; 75 A (control); 75 AP y 75 APQ.

Cada tratamiento contó con tres réplicas (contenedores) dispuestos en líneas continuas para facilitar el riego, atendiendo a las características del sistema instalado.

El riego se aplicó mediante un sistema automatizado de micro aspersión y la entrega del agua se controló mediante válvulas colocadas convenientemente en los laterales de riego de cada tratamiento.

Los valores de pH y conductividad eléctrica del agua aplicada al cultivo durante el experimento fueron de 7,8 y 0,58 dS/m respectivamente. Para este tipo de suelo (Ferralítico Rojo lixiviado) clasificado de categoría I, no presenta limitaciones de su uso para riego. El pH alcanzado se encuentra en el rango permisible para el riego (4.8 a 8.3). según la norma cubana (NC 1048, 2014).

Para evitar el efecto de las precipitaciones o del rocío, en los tratamientos con el 75 % de la ETc, se les colocó una manta de polietileno transparente sobre y sin hacer contacto con las plantas.

Los riegos consistieron en la reposición de la evapotranspiración del cultivo (ETc) acumulada entre cada riego, los que se realizaron tres veces por semana (lunes, miércoles y viernes).

Antes de la siembra se aplicaron 300 kg ha⁻¹ de fertilizante de la fórmula 23-12-17-5. Las demás atenciones culturales se realizaron según lo establecido en la Guía técnica para el cultivo del frijol en Cuba, (Alfonso, 2000).

La evapotranspiración de referencia ETo (mm) y la evapotranspiración del cultivo ETc (mm) se obtuvieron mediante el Programa CropWat.8.0. Este programa se actualizó con una serie histórica de datos meteorológicos de 34 años (1990- 2024) correspondientes a la estación meteorológica de Tapaste que pertenece al Instituto Nacional de Meteorología distante a unos 200 m del sitio experimental y para el cálculo de ETo y ETc se utilizaron los valores medios mensuales.

La precipitación efectiva se determinó de acuerdo al método de USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio de Conservación de Suelos) ya que este es el más recomendado por la FAO, así como se utilizaron los coeficientes del cultivo (Kc, inicial=0,15, Kc, medio= 1,10 y Kc, final= 0,65), propuestos para la región (Allen *et al.*, 2006).

Para estimar la huella azul se consideró la cantidad de agua aplicada a través del riego, en el caso de la verde los aportes de las lluvias según Hoekstra *et al.* (2011) y para hídrica gris, se consideró solamente la carga contaminante del fertilizante aplicado.

Las evaluaciones realizadas consistieron en determinar la humedad del suelo por el método gravimétrico, el contenido relativo de agua antes de las 7 horas solares según Turner (1981), el contenido relativo de clorofilas con un medidor SPAD (Soil Plant Analysis Development) para lo que se tomaron 15 muestras por tratamiento y el potencial hídrico foliar medido a las 11 horas con una cámara de presión de Scholander (9 repeticiones por tratamiento), estas variables se determinaron antes de aplicar el riego de reposición. También se midieron, la longitud y el diámetro de los tallos, la masa seca de los tallos y de las hojas, la superficie foliar (18 plantas por tratamiento), el número vainas por planta y de granos por vaina, la masa de 100 granos con los que se estimó el rendimiento. Los resultados obtenidos, se utilizaron para estimar la huella hídrica de cada uno de los tratamientos utilizados.

El análisis de los datos se realizó utilizando el paquete estadístico Statgraphics Plus 5 y las medias se compararon mediante la prueba de rangos múltiples de Tukey. Para graficar los datos se utilizó el programa Sigma Plot 11.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al evaluar el comportamiento de las plantas en condiciones semicontroladas tratadas con diferentes bioestimulantes y distintos suministros de agua a través del riego (Tabla 1), se encontraron diferencias entre los tratamientos estudiados. Se aprecia que los tratamientos a los que se le aplicaron los dos bioestimulantes en general mostraron valores superiores a los alcanzados por las plantas de los tratamientos controles. De igual forma general, cuando se adicionó el Quitomax® se alcanzaron los mayores valores, en cada una de las condiciones de abastecimiento hídrico al suelo. Esta respuesta asociada con el mejor estado hídrico que presentaron las plantas cuando se adicionó este bioestimulante, al que se ha atribuido entre otras propiedades, la de mejorar el crecimiento de las plantas.

También cuando se aplicó el Pectimorf®, se pudo apreciar un mejor comportamiento del crecimiento de las plantas, lo que está en correspondencia con el efecto positivo que ejerce este bioestimulante en el desarrollo del sistema radical de acuerdo a Sáez-Cigarruista *et al.* (2024), lo que favorece la absorción del agua y los nutrientes disponibles en el suelo.

Estos resultados, reafirman los informados por otros autores en trabajos realizados en el cultivo de la vid (*Vitis vinífera* L.) al analizar el comportamiento morfológico y fisiológico de las plantas tratadas con quitosano en condiciones de déficit hídrico en el suelo según Khalil y Badr Eldin (2021), o en el crecimiento vegetativo en *Reutealis trisperma* en condiciones de deficiencia hídrica Irawati *et al.* (2019), así como, en *Gliricidia sepium* (Valverde-Otárola y Arias, 2020).

Tabla 1. Componentes del crecimiento de plantas de frijol tratadas con bioestimulantes y sometidas a dos regímenes de riego. Letras diferentes significan diferencias significativas entre tratamientos para $\alpha \leq 0.05$ según la prueba de rangos múltiples de Tukey.

Tratamientos	Longitud del tallo (cm)	Diámetro del tallo (mm)	Masa seca del tallo (g)	Masa seca de las hojas (g)	Área foliar (cm ²)
100 A (control)	24,8 a	4,31 b	1,19 ab	1,91 ab	4336,76 b
100AP	21,4 ab	4,86 ab	1,27 ab	2,05 a	5279,31 ab
100 APQ	23,6 a	4,92 a	1,46 a	2,16 a	6450,91 a
75 A (control)	18,8 b	4,33 b	1,12 b	1,59 b	3429,36 b
75 AP	24,4 a	4,57 ab	1,26 ab	1,94 ab	4895,85 ab
75 APQ	24,0 a	4,97 a	1,38 ab	2,11 a	5167,84 ab
ESx	1,28*	0,26*	0,14*	0,15*	701,66*

La humedad en el suelo (Figura 1), al igual que el crecimiento presentó los mayores valores cuando se aplicó el quitosano, seguido del tratamiento que recibió la aplicación de Pectimorf® en el momento de la siembra, pero sin diferencia estadística entre ellos, igual comportamiento mostraron el tratamiento al que se le aplicó el Pectimorf® y los controles, aunque la respuesta más notoria se presentó entre las plantas de los tratamientos controles y las que recibieron la aplicación de Quitomax®.

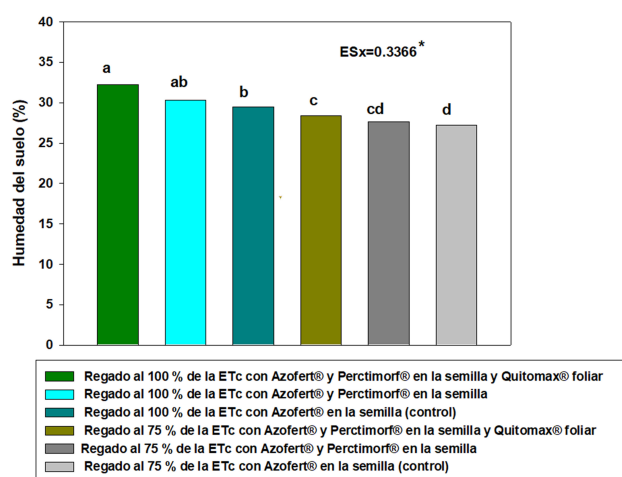


Figura 1. Humedad del suelo cultivado con plantas de frijol tratadas con bioestimulantes y sometidas a dos regímenes de riego. Letras diferentes significan diferencias significativas entre tratamientos para $\alpha \leq 0.05$ según la prueba de rangos múltiples de Tukey.

Se destacan las diferencias mostradas entre los niveles de abastecimiento hídrico aplicados al suelo, lo que asegura la presencia de dos tratamientos bien diferentes.

El comportamiento desigual entre tratamientos con un mismo nivel de abastecimiento hídrico está dado, en primer lugar, por la capacidad que posee el Pectimorf® para estimular el crecimiento del sistema radical según Sáez-Cigarriista et al. (2024), lo que le permite absorber el agua de zonas donde las plantas no estimuladas no la puedan alcanzar, o también mediante la menor transpiración que realizan las plantas tratadas con quitosano de acuerdo a Bittelli et al. (2001) e Iriti et al. (2009), lo que conlleva a una menor absorción de agua por las plantas.

El contenido relativo de clorofilas (Figura 2) no mostró diferencias significativas entre los tratamientos estudiados, lo que demuestra que las plantas mantuvieron un estado nutricional muy similar entre los tratamientos utilizados, fundamentalmente en lo que respecta al nitrógeno, lo que permite asegurar que este factor no provocó ninguna variación en el comportamiento de las plantas

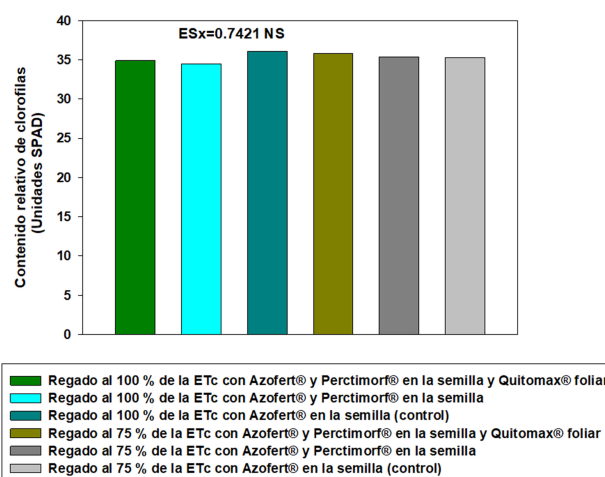


Figura 2. Contenido relativo de clorofilas en plantas de frijol tratadas con bioestimulantes y sometidas a dos regímenes de riego. Letras diferentes significan diferencias significativas entre tratamientos para $\alpha \leq 0.05$ según la prueba de rangos múltiples de Tukey.

Las determinaciones del contenido relativo de clorofilas están siendo muy utilizado actualmente para conocer de una forma rápida y no destructiva los tenores de clorofilas presentes en las hojas de las plantas, sus medidas están estrechamente relacionadas con su estado nutricional, fundamentalmente en lo que respecta al nitrógeno (Lopez-Bellido et al., 2004).

La mayor cantidad de nitrógeno (N) en las hojas está incorporada en la clorofila. por tal razón, cuantificando el contenido de clorofila se obtiene una medida indirecta del nivel de N en las hojas (Loayza et al., 2022).

Este es un elemento muy importante para el desarrollo de las plantas, se usa para producir los aminoácidos que van a formar parte de las proteínas, las enzimas y las clorofilas, es esencial en la constitución de las células y es uno de los componentes básico del ADN.

El contenido relativo de agua, representa el grado de saturación hídrica de la planta ante una determinada condición de abastecimiento hídrico en el suelo. Como es conocido, el mismo mantiene una estrecha relación con procesos como la transpiración y la fotosíntesis, sobre todo, la transpiración que es quien determina la absorción de agua y nutrientes hacia el interior de la planta, lo que promueve la realización de los demás procesos que intervienen en la fisiología de la planta.

La **Figura 3** muestra el comportamiento de esta variable en cada uno de los tratamientos utilizados, en ella se pueden apreciar diferencias entre los tratamientos mejor abastecidos de agua y los que recibieron solo el 75% de la ETc, así como, entre las variantes que fueron tratadas con los dos bioestimulantes y las que solo se les aplicó el Pectimorf® y los controles.

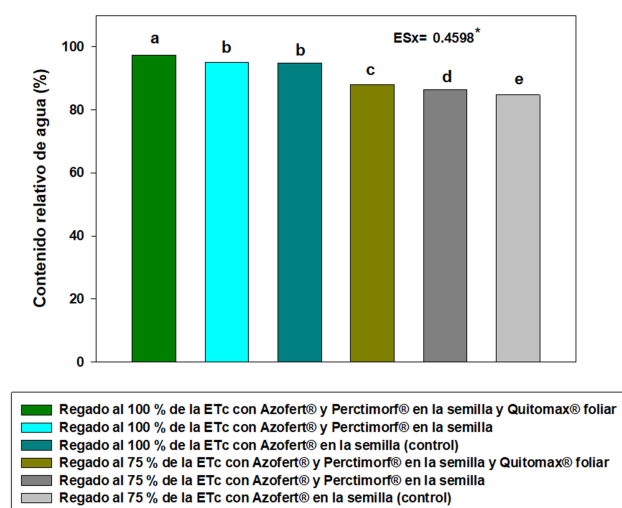


Figura 3. Contenido relativo de agua en plantas de frijol tratadas con bioestimulantes y sometidas a dos regímenes de riego. Letras diferentes significan diferencias significativas entre tratamientos para $\alpha \leq 0.05$ según la prueba de rangos múltiples de Tukey.

Esta respuesta coincide con lo planteado acerca de los posibles efectos ejercidos por los quitosanos utilizados y su capacidad antitranspirante por **Berliana et al. (2020)**; **Jawad y Al-Shammari (2023)** lo que les permitió a las plantas, mantener un mejor estado hídrico respecto al control.

La medida del potencial hídrico es una herramienta útil en la planificación del riego, pues está asociado de manera muy directa con el estado hídrico de la planta. El conocimiento de su umbral crítico, es un instrumento para determinar cuándo y cuánto regar.

La **Figura 4** muestra el comportamiento de los potenciales hídricos medidos en hojas descubiertas de plantas de frijol. Se observa que el potencial fue menor en las plantas que estuvieron sometidas a un déficit de agua en el suelo, condición que conlleva a una reducción del potencial hídrico en los tejidos de la planta (**Avila et al., 2020**).

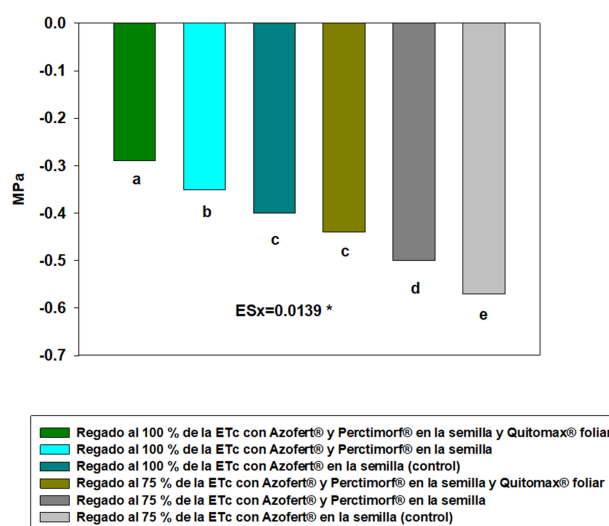


Figura 4. Potencial hídrico foliar en plantas de frijol tratadas con bioestimulantes y sometidas a dos regímenes de riego. Letras diferentes significan diferencias significativas entre tratamientos para $\alpha \leq 0.05$ según la prueba de rangos múltiples de Tukey.

Se aprecia, además que el potencial hídrico foliar al igual que el contenido relativo de agua, indican las diferencias en el estado hídrico, cuando las plantas fueron tratadas con los bioestimulantes, con marcada superioridad en las que fueron asperjadas con Quitomax®.

Esta respuesta está asociada con su propiedad elicitora de mecanismos de defensa ante condiciones de estrés abiótico. Al respecto, se ha señalado que el tratamiento con quitosano, estimula la tasa fotosintética y el cierre estomático a través de la síntesis de ABA según **Hidangmayum et al. (2019)**, mecanismo que controla la pérdida de agua por la planta a través de la transpiración (**García-León et al., 2019**).

Este señalamiento, puede ayudar a comprender lo antes planteado en cuanto a la capacidad antitranspirante del quitosano encontrada por otros autores **Bittelli et al. (2001)**; **Iriti et al. (2009)**; **Berliana et al. (2020)**; **Jawad y Al-Shammari (2023)**.

El análisis del rendimiento y sus componentes reafirman los resultados obtenidos en las variables evaluadas anteriormente (**Tabla 2**). Las plantas que recibieron el 100% y estuvieron bajo el efecto de los bioestimulantes mostraron rendimientos superiores al resto de los tratamientos. Esta respuesta está dada por la condición de abastecimiento hídrico en el que estuvieron expuestas, unido al efecto bioestimulador que ejercen el Pectimorf® y Quitomax® en los cultivos.

En otros estudios realizados en este cultivo en los que han utilizado estos bioestimulantes, se han obtenido incrementos de los rendimientos respecto a los alcanzados en las plantas que no fueron tratadas con ellos, lo que demuestra sus potencialidades para estimular los mecanismos que contribuyen a la formación del rendimiento (**Dell Amico et al., 2017**; **Morales-Guevara et al., 2017**; **Romero-Félix et al., 2019**).

Tabla 2. Rendimiento y sus componentes en el cultivo del frijol tratado con bioestimulantes y sometido a dos regímenes de riego. Letras diferentes significan diferencias significativas entre tratamientos para $\alpha \leq 0.05$ según la prueba de rangos múltiples de Tukey.

Tratamientos	Vainas por planta	Granos por vaina	Granos por planta	Masa de 100 granos (g)	Rendimiento estimado (t ha ⁻¹)
100 A (control)	10.81 bc	5.63 bc	62.24 b	18.56 ab	1.65 b
100 AP	11.36 b	5.77 ab	65.13 b	18.28 abc	1.71 b
100 APQ	12.59 a	6.04 a	76.13 a	18.59 a	2.03 a
75 A (control)	9.45 d	5.40 c	52.00 c	18.17 bc	1.33 c
75 AP	9.78 cd	5.66 bc	59.26 bc	17.08 d	1.52 bc
75 APQ	11.08 bc	5.82 ab	63.00 b	18.01 c	1.62 b
ES	0.46*	0.14*	3.14*	0.14*	0.12*

En trabajos realizados en otros cultivos en condiciones de deficiencia hídrica en el suelo, también se han encontrado incrementos de los rendimientos y mejora de su calidad con la aplicación de quitosano (Tawaha *et al.*, 2020). Al respecto se ha planteado que este compuesto induce tolerancia al déficit hídrico, debido a que provoca regulaciones en el proceso de fotosíntesis y de la producción de metabolitos primarios, osmorreguladores y antioxidantes (Ávila *et al.*, 2023).

Como se aprecia en la Tabla 3, el mayor peso le corresponde a la huella hídrica azul, lo que indica la insuficiencia de las precipitaciones ocurridas para satisfacer las necesidades del cultivo.

Se puede señalar que en los tratamientos que no se cubrieron con mantas de polietileno, la lluvia efectiva contribuyó en un 25 % del agua requerida por el cultivo.

También se destaca que la aplicación de Pectimorf® a la semilla y posteriormente la adición de Quitomax® por aspersión foliar al inicio de la floración, contribuyó a la reducción de la huella hídrica en un 18 %, respecto a los controles respectivos.

Por otra parte, se observa que la utilización tanto del Pectimorf® como del Quitomax® mejoraron la eficiencia del uso de agua, con los mejores resultados en el tratamiento que recibió una aplicación foliar de quitosano, producto que ha demostrado, al igual que otros derivados de quitosano, la propiedad de además de favorecer el rendimiento, el de provocar una disminución de la tasa de transpiración Jafari *et al.* (2025), provocada por la acumulación de Ácido abscísico (ABA), compuesto que estimula el cierre parcial de los estomas (Hidangmayum *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

La aplicación tanto de Pectimorf® en la semilla, como de Quitomax® en aspersión foliar al inicio de la floración favorecen el crecimiento y el rendimiento del cultivo del frijol, así como, contribuyó a mantener un mejor estado hídrico en las plantas.

La utilización de ambos productos mejoró la eficiencia en el uso del agua por las plantas y contribuyeron a disminuir la huella hídrica, en casi un 20 % respecto al tratamiento control.

El Quitomax®, cuyo principio activo está constituido por una mezcla de polímeros de quitosano, ha mostrado señales de ejercer al igual que otros productos comerciales en cuya composición está presente el quitosano, una acción antitranspirante en las plantas, lo que les permite mantener un mejor estado hídrico en sus tejidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFONSO, A.C.: *Guía técnica para el cultivo del frijol en Cuba*, Inst. Instituto de Investigaciones Hortícola, Liliana Dimitrova, Informe técnico, Qivican, Mayabeque, Cuba, 38 p., 2000.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M.: “Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos”, Roma: FAO, 298(0), 2006.
- AVILA, R.G.; MAGALHÃES, P.C.; DA SILVA, E.M.; GOMES JÚNIOR, C.C.; DE PAULA LANA, U.G.; DE ALVARENGA, A.A.; DE SOUZA, T.C.: “Silicon supplementation improves tolerance to water deficiency in sorghum plants by increasing root system growth

Tabla 3. Huella hídrica estimada en el cultivo del frijol tratado con bioestimulantes y sometido a dos regímenes de riego.

Tratamientos	Dotación de riego (m ³ ha ⁻¹)	Lluvia efectiva (m ³ ha ⁻¹)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Huella hídrica azul (m ³ t ⁻¹)	Huella hídrica Verde (m ³ t ⁻¹)	Huella hídrica gris (m ³ t ⁻¹)	Huella hídrica total (m ³ t ⁻¹)
100 A (control)	3413	1144	1.65	2068	693	44	2806
100 AP	3413	1144	1.71	1996	669	42	2707
100 APQ	3413	1144	2.03	1681	564	35	2280
75 A (control)	2560	0	1.33	1925	0	54	1979
75 AP	2560	0	1.52	1684	0	47	1731
75 APQ	2560	0	1.62	1580	0	44	1624

- and improving photosynthesis”, *Silicon*, 12(11): 2545-2554, 2020, ISSN: 1876-990X, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00349-5>.
- ÁVILA, R.G.; MAGALHÃES, P.C.; VITORINO, L.C.; BESSA, L.A.; DE SOUZA, K.R.D.; QUEIROZ, R.B.; JAKELAITIS, A.; TEIXEIRA, M.B.: “Chitosan induces sorghum tolerance to water deficits by positively regulating photosynthesis and the production of primary metabolites, osmoregulators, and antioxidants”, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1): 1156-1172, 2023, ISSN: 0718-9508, DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01111-4>.
- BEAVER, J.S.; GONZÁLEZ-VÉLEZ, A.; LORENZO-VÁZQUEZ, G.; MACCHIAVELLI, R.; PORCH, T.G.; ESTEVEZ-DE-JENSEN, C.: “Performance of Mesoamerican bean (*Phaseolus vulgaris* L.) lines in an unfertilized oxisol”, *Agronomía Mesoamericana*, 32(3): 701-718, 2021, ISSN: 1659-1321, DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v32i3.44498.4>.
- BERLIANA, A.; KUSWANDARI, C.; RETMANA, B.; PUTRIKA, A.; PURBANINGSIH, S.: “Analysis of the potential application of chitosan to improve vegetative growth and reduce transpiration rate in *Amaranthus hybridus*”, En: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Ed. IOP Publishing, vol. 481, p. 012021, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/481/1/012021>, ISSN: 1755-1315.
- BITTELLI, M.; FLURY, M.; CAMPBELL, G.S.; NICHOLS, E.J.: “Reduction of transpiration through foliar application of chitosan”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 107(3): 167-175, 2001, ISSN: 0168-1923.
- CISNEROS, Z.; CUM, G.R.; HERRERA, P.J.; GONZÁLEZ, R.; RODRÍGUEZ, S.; GARCÍA, O.: “Efecto de los polímeros en la economía del agua.”, *Ingeniería Agrícola*, 10(1), 2020.
- DELL AMICO, J.; MORALES, D.; JEREZ, E.; RODRÍGUEZ, P.; ÁLVAREZ, I.; MARTÍN, R.; DÍAS, Y.: “Efecto de dos variantes de riego y aplicaciones foliares de Pectimorf® en el desarrollo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)”, *Cultivos Tropicales*, 38(3): 129-134, 2017, ISSN: 0258-5936.
- GARCÍA-LEÓN, M.; CUYAS, L.; EL-MONEIM, D.A.; RODRIGUEZ, L.; BELDA-PALAZÓN, B.; SANCHEZ-QUANT, E.; FERNÁNDEZ, Y.; ROUX, B.; ZAMARREÑO, Á.M.; GARCÍA-MINA, J.M.: “Arabidopsis ALIX regulates stomatal aperture and turnover of abscisic acid receptors”, *The Plant Cell*, 31(10): 2411-2429, 2019, ISSN: 1532-298X.
- GIRÓN, I.; CORELL, M.; GALINDO, A.; TORRECILLAS, E.; MORALES, D.; DELL’AMICO, J.; TORRECILLAS, A.; MORENO, F.; MORIANA, A.: “Changes in the physiological response between leaves and fruits during a moderate water stress in table olive trees”, *Agricultural Water Management*, 148: 280-286, 2015, ISSN: 0378-3774, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.024>.
- GONZÁLEZ-CUETO, O.; MONTAÑA-VALLADARES, A.; LÓPEZ-BRAVO, E.; SÁNCHEZ-VALLE, S.; ZAMBRANO-CASANOVA, D.E.; MACIAS-MARTÍNEZ, L.M.; HERRERA-SUÁREZ, M.: “Productividad del agua de riego en cultivos seleccionados de la región central de Cuba”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(1), 2020, ISSN: 2071-0054.
- HERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PÉREZ-JIMÉNEZ, J.M.; BOSCH-INFANTE, D.; SPECK, N.C.: “La clasificación de suelos de Cuba: énfasis en la versión de 2015”, *Cultivos tropicales*, 40(1), 2019, ISSN: 0258-5936.
- HIDANGMAYUM, A.; DWIVEDI, P.; KATIYAR, D.; HEMANTARANJAN, A.: “Application of chitosan on plant responses with special reference to abiotic stress”, *Physiology and molecular biology of plants*, 25(2): 313-326, 2019, ISSN: 0971-5894, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0633-1>.
- HOEKSTRA, A.Y.; CHAPAGAIN, A.K.; ALDAYA, M.M.; MEKONNEN, M.M.: *The water footprint assessment manual: setting the global standard*, [en línea], London/Washington, DC: Earthscan ed., 2011, Disponible en: https://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf.
- IRAWATI, E.; SASMITA, E.; SURYAWATI, A.: “Application of chitosan for vegetative growth of kemiri sunan plant in marginal land”, En: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Ed. IOP Publishing, vol. 250, p. 012089, 2019, ISBN: 1755-1315.
- IRITI, M.; PICCHI, V.; ROSSONI, M.; GOMARASCA, S.; LUDWIG, N.; GARGANO, M.; FAORO, F.: “Chitosan antitranspirant activity is due to abscisic acid-dependent stomatal closure”, *Environmental and Experimental Botany*, 66(3): 493-500, 2009, ISSN: 0098-8472, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.01.004>.
- JAFARI, L.; SHAMEKH, M.R.; ABDOLLAHI, F.; HAMID, R.: “Elicitor potential of chitosan and its derivatives to enhancing greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) performance under deficit irrigation conditions”, *Scientia Horticulturae*, 349: 114259, 2025, ISSN: 0304-4238, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114259>.
- JAWAD, A.A.; AL-SHAMMARI, G.N.H.: “Effect of Anti-Transpiration Inhibitors Copper and Chitosan, Pomegranate Peel and Thyme Leaves Extracts and Storage Period on the Chemical Traits of Local Orange Fruits”, En: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Ed. IOP Publishing, vol. 1262, p. 042014, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1262/4/042014>, ISSN: 1755-1315.
- KHALIL, H.A.; BADR ELDIN, R.: “Chitosan improves morphological and physiological attributes of grapevines under deficit irrigation conditions”, *Journal of Horticultural Research*, 29(1): 9-22, 2021, ISSN: 2300-5009, DOI: <https://doi.org/10.2478/johr-2021-0003>.

- LOAYZA, H.; CALDERÓN, A.; GUTIÉRREZ, R.O.; CÉSPEDES, E.; QUIROZ, R.: “Estimación de las concentraciones relativas de clorofila en folíolos de papa (*Solanum tuberosum* L.) Utilizando técnicas de reflectancia de la vegetación”, *Ecología aplicada*, 21(2): 91-101, 2022, ISSN: 1726-2216, DOI: <https://doi.org/10.21704/rea.v21i2.1961>.
- LOPEZ-BELLIDO, R.; SHEPHERD, C.; BARRACLOUGH, P.: “Predicting post-anthesis N requirements of bread wheat with a Minolta SPAD meter”, *European Journal of Agronomy*, 20(3): 313-320, 2004, ISSN: 1161-0301, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00025-X](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00025-X).
- MAGAÑA, L.D.; GAUCÍN, S.D.; FLORES, L.D.: “Análisis sectorial y de la dinámica de los precios del frijol en México”, *Compendium: Cuadernos de Economía y Administración*, 2(3): 1-21, 2015, ISSN: 1390-9894.
- MORALES-GUEVARA, D.; DELL AMICO-RODRÍGUEZ, J.; JEREZ-MOMPIE, E.; RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, P.; ÁLVAREZ-BELLO, I.; DÍAZ-HERNÁNDEZ, Y.; MARTÍN-MARTÍN, R.: “Efecto del Quitomax® en plantas de (*Phaseolus vulgaris* L.) sometidas a dos regímenes de riego. II. Variables Fisiológicas”, *Cultivos Tropicales*, 38(4): 92-101, 2017, ISSN: 0258-5936.
- NC 1048: *Calidad del agua para preservar el suelo. Especificaciones. Normas de Calidad del agua*, Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba, 2014.
- OTTAIANO, L.; DI MOLA, I.; CIRILLO, C.; COZZOLINO, E.; MORI, M.: “Yield performance and physiological response of a maize early hybrid grown in tunnel and open air under different water regimes”, *Sustainability*, 13(20): 11251, 2021, ISSN: 2071-1050, DOI: <https://doi.org/10.3390/su132011251>.
- POSADA-PÉREZ, L.; PADRÓN-MONTESINOS, Y.; GONZÁLEZ-OLMEDO, J.; RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, R.; BARBÓN-RODRIGUEZ, R.; NORMAN-MONTENEGRO, O.; RODRÍGUEZ-ESCRIBA, R.C.; GÓMEZ-KOSKY, R.: “Efecto del Pectimorf® en el enraizamiento y la aclimatización in vitro de brotes de papaya (*Carica papaya* L.) cultivar Maradol Roja”, *Cultivos Tropicales*, 37(3): 50-59, 2016, ISSN: 0258-5936, DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1642.2642>.
- RODRÍGUEZ-LARRAMENDI, L.A.; SALAS-MARINA, M.; HERNÁNDEZ-GARCÍA, V.; CAMPOS-SALDAÑA, R.A.; CRUZ-MACÍAS, W.O.; CRUZ-MORALES, M.; GORDILLO-CURIEL, A.; GUEVARA-HERNÁNDEZ, F.: “Efecto fisiológico de la disponibilidad de agua y nitrógeno en plantas de guayaba”, *Tropical and subtropical Agroecosystems*, 24: 19, 2021, DOI: <https://doi.org/10.56369/tsaes.3391>.
- ROMERO-FÉLIX, C.S.; LÓPEZ-CASTAÑEDA, C.; KOHASHI-SHIBATA, J.; MIRANDA-COLÍN, S.; AGUILAR-RINCON, V.H.; MARTÍNEZ-RUEDA, C.G.: “Changes in yield and its components in bean under irrigation and drought”, *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(2): 351-364, 2019, ISSN: 2007-0934, DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i2.1607>.
- ROUPHAEL, Y.; COLLA, G.: “Biostimulants in agriculture”, *Frontiers in plant science*, 11: 40, 2020, ISSN: 1664-462X, DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>.
- SÁEZ-CIGARRUISTA, A.E.; MORALES-GUEVARA, D.; GORDÓN-MENDOZA, R.; JAÉN-VILLARREAL, J.E.; RAMOS-MANZANÉ, F.P.; FRANCO-BARRERA, J.: “Effect of a Pectic Oligosaccharide on the Root Development of Maize”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 33(2), 2024, ISSN: 2071-0054, DOI: <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0932-0>.
- SANCHES, M.; NOGUEIRA, M.A.; HUNGRIA, M.: “Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture”, *Amb Express*, 9(1): 205, 2019, ISSN: 2191-0855.
- TAWAHA, R.M.; JAHAN, N.; ODAT, N.; RAMAMNEH, E.A.D.; ZAITOON, Y.M.; FANDI, K.; ALHAWATEMA, M.; RAUF, A.; WEDYAN, M.; SHALAT, M.; TAWAHA, I.K.; TURK, M.; KHANUM, S.: “Growth, yield and biochemical responses in barley to DAP and chitosan application under water stress”, *Journal of Ecological Engineering*, 21(6): 86-93, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1911/22998993/123251>.
- TURNER, N.C.: “Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status”, *Plant and soil*, 58(1): 339-366, 1981, ISSN: 0032-079X, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02180062>.
- VALVERDE-OTÁROLA, J.C.; ARIAS, D.: “Efectos del estrés hídrico en crecimiento y desarrollo fisiológico de *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp”, *Colombia forestal*, 23(1): 20-34, 2020, ISSN: 0120-0739, DOI: <https://doi.org/10.14483/2256201X.14786>.
- VAN OOSTEN, M.J.; PEPE, O.; DE PASCALE, S.; SILLETTI, S.; MAGGIO, A.: “The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants”, *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4(1): 5, 2017, ISSN: 2196-5641, DOI: <https://doi.org/10.1186>.
- WINKLER, A.J.; DOMINGUEZ-NUÑEZ, J.A.; ARANAZ, I.; POZA-CARRIÓN, C.; RAMONELL, K.; SOMERVILLE, S.; BERROCAL-LOBO, M.: “Short-chain chitin oligomers: Promoters of plant growth”, *Marine drugs*, 15(2): 40, 2017, ISSN: 1660-3397, DOI: <https://doi.org/10.3390/md15020040>.