

Fitohormonas y densidad de siembra en variables fisiológicas y productivas de frijol común en invernadero

Phytohormones and plant density on physiological and productive variables of common bean in greenhouse

Cándido Mendoza-Pérez¹ , Guadalupe Araceli Mendoza-Martínez² , Juan Enrique Rubiños-Panta¹ , Rogelio Núñez-Ambríz³ , Jesús del Rosario Ruelas-Islas⁴ , Fidel Núñez-Ramírez⁵ 

¹Colegio de Postgraduados, Posgrado en Hidrociencias. Carretera México-Texcoco, km 36.5, CP. 56230. Montecillo, estado de México, México.

²NovaUniversitas, Campus Periférico JuxtlaHuaca. Av. Universidad, 1o. de Julio 200, Colonia Santiago, CP. 68274. JuxtlaHuaca, Oaxaca, México.

³Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria. Avenida Francisco J. Múgica S/N, CP. 58030, Morelia, Michoacán, México.

⁴Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte. Calle 16 s/n esquina Japaraquí, CP. 81110. Juan José Ríos, Sinaloa, México.

⁵Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas. Ejido Nuevo León, CP. 21705 Mexicali, Baja California, México.

*Autor de correspondencia: chuyitaruelas@favf.mx

Artículo científico

Recibido: 15 de julio 2026

Aceptado: 04 de agosto 2026

RESUMEN. El frijol común representa un cultivo que ofrece un significativo valor nutritivo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el impacto de las fitohormonas y la densidad de plantas sobre el crecimiento, rendimiento, huella hídrica, productividad del agua y la relación beneficio/costo de frijol (variedad Pinto Saltillo) cultivado en invernadero. Se compararon tres densidades de siembra T1 (dos plantas/maceta), T2 (tres plantas/maceta) y T3 (cuatro plantas/maceta) y sus respectivos testigos (TES) con la aplicación de fitohormonas Vitaminum Forte, Cito Xplosión y Súper Hormonal. Los resultados indicaron que las plantas del T1 alcanzaron una altura máxima (402 cm) y diámetro de tallo (6.7 mm). El T3 presentó una altura inferior (250 cm) y tallos más delgados (5.5 mm) debido a una mayor competencia de las plantas por agua y nutrientes, lo que a su vez favorece un crecimiento aéreo más rápido para captar una mayor radiación solar. La evapotranspiración máxima (6.0 L m^{-2}) y la productividad de agua fue mayor en el T1 (1.96 kg m^{-3}), mientras que el valor más alto de huella hídrica se presentó en el TES-T2 (239 L kg^{-1}). El rendimiento de grano osciló entre 5.36 y 7.17 t ha^{-1} y la relación beneficio/costo fue baja (0.14 - 0.19). Los altos costos de producción en invernadero generaron utilidades netas negativas, evidenciando la necesidad de estrategias complementarias para optimizar la rentabilidad y sostenibilidad del cultivo. La combinación de fitohormonas y densidad de siembra adecuada optimizó la distribución de fotoasimilados hacia órganos productivos.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris* L., densidad, huella hídrica, productividad del agua, rendimiento.

ABSTRACT. Common bean represents a crop that offers significant nutritional value. The objective of this study was to evaluate the impact of phytohormones and plant density on growth, yield, water footprint, water use efficiency and the relationship profit-cost of bean production (variety Pinto Saltillo) grown in greenhouse conditions. Three plant densities were evaluated T1 (two plants/pot), T2 (three plants/pot), T3 (four plants/pot) with application of phytohormones (Vitaminum Forte, Cito Xplosion and Súper Hormonal) and their checkplots (TES). Results indicated that plants from T1 reached the greatest height (402 cm) and stem diameter (6.7 mm). T3 showed the lowest height (250 cm) and thinner stems (5.5 mm) due to higher competition of plants for water and nutrients, which in turn favors a higher growth to capture more solar radiation. Maximum evapotranspiration (6.0 L m^{-2}) and water use efficiency were higher in T1 (1.96 kg m^{-3}), while, the highest value of water footprint was registered in TES-T2 (239 L kg^{-1}). The seed yield ranged between 5.36 and 7.17 t ha^{-1} and the relationship profit /cost was low 0.14 - 0.19 . The production costs in greenhouse generated net negative profit, which showed the need of strategies to optimize profitability and sustainability of the crop. The combination of phytohormones and accurate plant density increased the distribution of assimilates towards reproductive organs.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L., density, water footprint, water use efficiency, yield.

Como citar: Mendoza-Pérez C, Mendoza-Martínez GA, Rubiños-Panta JE, Núñez-Ambríz R, Ruelas-Islas J del R, Núñez-Ramírez F (2026) Fitohormonas y densidad de siembra en variables fisiológicas y productivas de frijol común en invernadero. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. VI: e5272. DOI: 10.19136/era.a13nVI.5272.

INTRODUCCIÓN

La competencia por el recurso hídrico entre el sector agrícola doméstico, industrial, comercial y ambiental se está incrementando en regiones con escasez de agua, lo que ejerce un efecto negativo en muchos lugares del mundo. Esta escasez afecta sobre todo a la agricultura, considerada el principal usuario, ya que usa aproximadamente el 70% del total de agua disponible; por tal motivo, la estrategia clave se centra en mejorar la productividad del agua (FAO 2023). El cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México ocupa el segundo lugar de importancia después del maíz. Se siembra en 1 091 125.69 ha, de las cuales el 81.6% se cultiva bajo condiciones de temporal, mientras que solamente el 18.4% se establece bajo condiciones de riego en el ciclo primavera-verano, lo cual lo hace muy dependiente de las condiciones climáticas (SIACON 2023). Actualmente, el cambio climático representa uno de los principales retos que enfrenta la agricultura, por lo que requiere de estrategias de adaptación para mitigar el efecto adverso que causan dichos patrones climáticos en los cultivos. En ese sentido, diversos estudios mencionan que el incremento de temperatura es perjudicial para el rendimiento de cultivos a nivel global, y que el impacto negativo se exagera cuando dicha temperatura excede el valor umbral. Por otro lado, se ha observado que se acelera el desarrollo del cultivo acortando su ciclo (Arshad *et al.* 2021). En otro contexto, se argumenta que los sistemas de producción necesitan adaptarse al cambio climático, mejorando la eficiencia en el uso del agua (Condon *et al.* 2020). La huella hídrica es un indicador que estima la cantidad total de agua dulce utilizada, tanto directa como indirectamente en la producción de un bien o servicio (Nagypal *et al.* 2019) y la gran mayoría de estudios la definen en tres componentes: huella hídrica verde (agua del suelo), huella hídrica azul (volumen de agua superficial y subterránea consumida) y huella hídrica gris (volumen de agua para diluir contaminantes) (Ansorge *et al.* 2022).

Estudios realizados por Calero-Hurtado *et al.* (2018) argumentan que el manejo de la densidad de plantas juega un rol importante para incrementar la rentabilidad de este cultivo, ya que se mejora la eficiencia productiva y se reducen los costos de producción. Al respecto, Zhang *et al.* (2021) y Postma *et al.* (2020) indican que una alta densidad genera estrés en las plantas a través del sombreo, por lo que se disminuye la tasa fotosintética en una parte del dosel; mientras que otros estudios han demostrado que la biomasa por unidad de superficie aumenta en respuesta a una alta densidad de plantas en cultivos como maíz, canola, trigo, frutales y hortalizas, pero que el índice de cosecha usualmente disminuye a densidades muy altas (Zhang *et al.* 2021, Zhang *et al.* 2023, Lin *et al.* 2024). Por su parte, Mendoza-Pérez *et al.* (2025) argumentan que la solución nutritiva, el manejo agronómico y el control de las variables climáticas pueden ser factor clave para mejorar las variables fisiológicas y el rendimiento en los cultivos agrícolas. Para ello, la aplicación de fitohormonas ha representado una estrategia que permite controlar de manera específica algunos procesos fisiológicos de la planta (Núñez-Ramírez *et al.* 2023, Mendoza-Pérez *et al.* 2024). El frijol cultivado en sistema hidropónico en invernadero representa una opción viable en la agricultura moderna, resaltando por su notable eficiencia en la utilización de agua y nutrientes. Actualmente, el rendimiento de grano en frijol puede ser influenciado por la densidad de siembra, al promover más plantas en una menor superficie. Por otro lado, el uso de fitohormonas comerciales en combinación con diferentes densidades de siembra en cultivos desarrollados bajo sistemas hidropónicos en invernadero puede maximizar el potencial productivo de la planta, al mismo tiempo que reduce la huella hídrica mediante el uso más eficiente del agua. Por lo que el objetivo

de este trabajo consistió en evaluar el impacto de fitohormonas y la densidad de siembra sobre el crecimiento, rendimiento, huella hídrica, productividad del agua y beneficio/costo en frijol variedad Pinto Saltillo cultivado en invernadero bajo condiciones de hidroponía.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento

El experimento se llevó a cabo en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, en las coordenadas geográficas 19° 27' 58" latitud norte, 98° 54' 58" longitud oeste y altitud de 2431 msnm, durante el periodo primavera-verano 2025. El cultivo se estableció en un invernadero de plástico bajo un sistema hidropónico utilizando tezontle rojo como sustrato.

Dicho invernadero consta de una nave de tres túneles con estructuras de metal y cubierta con plástico de polietileno de alta densidad, que permite un 75% de transmisión de luz. Además, está equipado con un sistema de ventilación con un sistema de ventilación pasiva basado en ventilas laterales de apertura manual, y protegido con una malla anti-insectos en las paredes laterales. Las condiciones ambientales registradas fueron de 7° C como temperatura mínima y 44° C como máxima y humedad relativa promedio de 73 %. Las propiedades físicas del tezontle fueron: capacidad de retención de agua de 1.7 litros en 10 kg de sustrato, densidad aparente de 1.04 g cm⁻³, porosidad total de 40.98%, capacidad de aireación del 60% y capacidad de campo del 18.3%.

Material vegetal

Se germinaron semillas de frijol variedad Pinto Saltillo (crecimiento indeterminado postrado tipo III) con una mezcla de sustratos (Peat moss, perlita, vermiculita en relación 2:1:1) en charolas de unisel de 200 cavidades. El trasplante se realizó cuando las plántulas presentaron 15 cm de altura y se colocaron en bolsas maceteras el 2 de mayo y se finalizó el experimento el 25 de agosto de 2025. Las características de las bolsas maceteras fueron de 30 cm de alto, 16 cm de largo, 30 cm ancho y 14 cm de fuelle.

Tratamientos

Se establecieron tres tratamientos: el T1 constó de 24 macetas con dos plantas en cada una (48 plantas en total), el T2 tuvo 24 macetas con tres plantas cada una (72 plantas en total), el T3 tuvo 24 macetas con cuatro plantas cada una (96 plantas en total). Cada tratamiento tuvo sus respectivos testigos (TES) con seis macetas, y su número de plantas por maceta (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución de tratamientos y aplicación de fitohormonas en frijol cultivado en invernadero.

Variedad	Tratamientos	Hormona vegetal	Número de plantas	Número de macetas
Pinto	T1 (2 plantas/maceta)	Vitaminum Forte	48	24
Saltillo	T2 (3 plantas/maceta)	Cito Xplosión	72	24
	T3 (4 plantas/maceta)	Súper Hormonal	96	24
	TES (testigo)	Sin aplicación	54	24

Las hormonas vegetales fueron asignadas a los tratamientos en función de la densidad de siembra y la composición porcentual de sus componentes, la cual se detalla en la tabla 2.

Tabla 2. Composición porcentual de las hormonas vegetales en la etapa reproductiva.

Componente	Composición porcentual (ppm)		
	Vitaminum Forte	Cito Xplosión	Súper hormonal
Citocininas	600	3000	5000
Zinc	1826	1826	1826
Manganeso	1175	1175	1175
Auxinas	600	500	1000
Giberelinas	600	500	1000
Boro	531	531	531
Cobre	34	34	34
Fierro	26	26	26
Ácidos Fúlvicos	0	5	5
Diluyentes	98.94%	0	0
Nicotinamida	150	0	0
Tiamina	150	0	0
Ácido Fólico	150	0	0
Acido glutámico	150	0	0
Ácido Pantoténico	150	0	0

Diseño experimental

Cada tratamiento se estableció en una superficie de 7 m² (24 macetas) bajo un diseño experimental completamente al azar (DCA). El marco de plantación fue tres bolillo, las macetas se distribuyeron respetando una distancia de 40 cm entre plantas dentro de la misma hilera, 55 cm entre hileras y 1.0 m de separación entre tratamientos con el objetivo de evitar interferencia entre unidades experimentales.

Aplicación de fitohormonas

De manera general, se aplicó Rootindol 3000 y Cropstart con dosis de 1 mL L⁻¹ en etapa de plántula a todos los tratamientos, utilizando agua de la llave. Después del trasplante, se aplicó de nuevo Rootindol 3000 y Cropstart con dosis de 2 mL L⁻¹ en la raíz, mientras que al follaje se aplicaron aminofúlvicos (Fe, Mn y Zn) con dosis de 1 mL L⁻¹. En la etapa vegetativa e inicio de floración, se aplicó 1 mL L⁻¹ de GA3-Amin-Zinc. Finalmente, se realizó la aplicación de fitohormonas (Vitaminum Forte, Cito Xplosión y Súper Hormonal) con dosis de 1 mL L⁻¹ en la etapa de floración y 2 mL L⁻¹ en la etapa de formación y llenado de vaina a todos los tratamientos con excepción de los testigos (Tabla 3).

Tabla 3. Aplicación de fitohormonas en etapas fenológicas de frijol.

Tratamientos	Aplicación de fitohormonas en etapas fenológicas			
	Germinación	Trasplante-Desarrollo Vegetativo	D. Vegetativo-Inicio de Floración	Floración-Llenado de vaina
T1	Rootindol 3000 Cropstart	Rootindol 3000 Cropstart	(GA3-AMIN-Zn)	Vitaminum Forte
T2		Aminofulvico Fe		Cito Xplosión
T3		Aminofulvico Zn		Súper Hormonal
		Aminofulvico Mn		

Sistema de riego y fertilización

Se utilizó el sistema de riego por goteo con una línea regante superficial de 16 mm de diámetro, goteros autocompensados separados a 40 cm, gasto de 8 L h⁻¹, y una presión de operación de 68.64 kPa. El riego se aplicó con solución nutritiva Steiner (1984) ajustada a un potencial osmótico de -0.036 MPa, conductividad eléctrica 1 dS m⁻¹, pH de 6.5 desde el trasplante hasta el inicio de floración y de -0.072 MPa en la etapa reproductiva con conductividad eléctrica 2 dS m⁻¹ (Tabla 4).

Tabla 4. Composición de la solución nutritiva aplicada en el cultivo de frijol.

Fertilizante	Fórmula química	Solución nutritiva (g L ⁻¹)	
		-0.036 MPa	-0.072 MPa
Macronutrientes	Ca (NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	0.413	0.945
	KNO ₃	0.253	0.404
	MgSO ₄ · 4H ₂ O	0.089	0.335
	K ₂ SO ₄	0.072	0.247
	MnSO ₄	0.00708	0.0078
Micronutrientes	ZnSO ₄	0.00264	0.00264
	FeSO ₄	0.01	0.01
	CuSO ₄	0.00024	0.00024
	H ₃ BO ₃	0.00343	0.000343
Ácidos	H ₂ SO ₄ (98%)	0.098 (ml L ⁻¹)	0.052 (ml L ⁻¹)
	H ₃ PO ₄ (85%)	0.049 (ml L ⁻¹)	0.067 (ml L ⁻¹)

Evaluación de las variables agronómicas

La evapotranspiración real (E_{Tr}) se determinó con el método de lisímetro de drenaje, el cual consiste en aplicar un volumen de agua conocido mediante el sistema de riego. El agua en exceso se recolectó en el fondo del lisímetro y se midió volumétricamente con una probeta graduada de 1000 mL. La cantidad de agua evapotranspirada se determinó con el volumen de agua aplicada menos el volumen drenado (E_{Tr} = R - D), donde E_{Tr} = evapotranspiración real de cultivo, R = riego (L), D = drenaje (L) (Mendoza-Pérez *et al.* 2018).

La altura de planta (AP, cm) se midió desde la base de la planta hasta el ápice con una cinta métrica. El diámetro de tallo (DT, mm) se realizó en la base del mismo (3 cm de altura de la superficie del sustrato) con un vernier digital (Truper®), de 6 In y dos decimales, con una precisión de ±0,001in/0,01mm. El índice de clorofila se midió en la hoja trifoliada nueva completamente desarrollada de cada tratamiento con el dispositivo SPAD (Konica Minolta Spad-502plus). Estas mediciones se realizaron cada ocho días después del trasplante hasta que la planta terminó su crecimiento. La biomasa seca (g) se determinó con un total de tres muestreos destructivos durante todo el ciclo del cultivo. Se extrajo la planta de la maceta, después se separaron los órganos en hojas, tallos, raíces y frutos. Luego, se pesaron en fresco utilizando una balanza digital y posteriormente, se colocaron en bolsas de papel kraft para ser deshidratados en un horno de aire forzado a 70 °C durante 72 horas hasta alcanzar peso constante. El Índice de área foliar (IAF) se midió con el área foliar de tres plantas extraídas por tratamiento utilizando un medidor electrónico (Área Meter LI3100, Decagon Device Inc.). Dicho índice se determinó con la fórmula descrita por Reis *et al.* (2013): $IAF = [(AF \cdot NP) / AT]$, donde IAF (Índice de área foliar, m²), AF es la superficie media de la hoja de tres plantas m², NP es el número de plantas m² y el AT es el área total considerada (1m²).

La productividad del agua (PA) se estimó con la relación entre el rendimiento de grano de cada uno de los tratamientos con respecto al volumen de agua total aplicada [$PA = (R/VTA)$], donde R es rendimiento (kg) y VTA es volumen total aplicado (m^3). El rendimiento de grano ($kg\ ha^{-1}$) se determinó al pesar las semillas normales y dividir el peso de semilla entre el área cosechada. La huella hídrica ($L\ kg^{-1}$) se calculó como el cociente entre el volumen de agua azul consumida y el rendimiento del cultivo ($HHa = VAAC / Y$), donde HHA = Huella hídrica azul ($L\ kg^{-1}$), VAAC = Volumen de agua azul consumida ($L\ ha^{-1}$), Y = Rendimiento del cultivo ($kg\ ha^{-1}$) (Hoekstra *et al.* 2011). Para realizar el análisis económico se utilizó la relación beneficio-costos ($B/C = IT / CT$), donde, B/C = Relación beneficio-costos, IT = Ingresos totales por venta del producto, CT = Costo total de producción.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sujetos a prueba de normalidad (Shapiro y Wilk 1965), así como a un análisis de varianza. La separación de medias se realizó con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS

Altura de planta

Con respecto a este parámetro, se pudo observar que no hubo diferencias significativas ($p \geq 0.05$) con la aplicación de tratamientos (densidades con y sin aplicación de fitohormonas) entre los 23 y 35 ddt. A los 65 ddt, se registró la máxima altura especialmente para las plantas del TES-T1, TES-T2 y T1 (257, 237, 213 cm). Por otro lado, los tratamientos con 4 plantas sin fitohormonas (TES-T3) solamente alcanzaron 143 cm en comparación con el resto de los tratamientos (Tabla 5). La variación en la altura de las plantas durante la etapa inicial (11 a 29 ddt) se debe exclusivamente a la densidad de plantación; este proceso se manifiesta comúnmente cuando las plantas compiten entre sí por recursos esenciales como espacio, agua y radiación (Tabla 5).

Tabla 5. Altura de planta de frijol Pinto Saltillo en función del tiempo.

DDT	Tratamientos					
	T1	T2	T3	TES-T1	TES-T2	TES-T3
11	9a	10a	12a	9a	10a	12a
17	12a	13a	14a	12a	13a	16a
23	20a	20a	20a	18a	20a	23a
29	64c	62cd	59e	70b	74a	61de
35	111a	104a	86a	117a	111a	85a
41	161a	152b	128c	171a	165a	108d
47	188c	176d	146e	212a	195b	123f
53	201bc	190c	151d	237a	217b	134e
59	211c	205	152d	250a	230b	140e
65	213bcd	211bc	159cd	257a	237ab	143d

Medias con distintas letras dentro de la columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$).

Diámetro de tallo

Se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en esta variable en función del tiempo y en respuesta a los tratamientos aplicados (densidad de plantas con y sin fitohormonas). A los 35 ddt, se registró el mayor diámetro de tallo (4.9 y 4.8 mm) en el T1+ Vitaminum Forte y T2 + Cito Xplosión. Sin embargo, este fue aún mayor en el TES-T2 (5.6 mm), mientras que el menor diámetro se registró en tratamientos con mayor densidad (4 plantas). A los 65 ddt, el valor máximo de diámetro (6.7 mm) se obtuvo bajo estas condiciones, seguido por el tratamiento TES-T2 (6.3 mm). En contraste, los tratamientos T3 y TES-T3 mostraron los tallos más delgados (5.1 y 5.2 mm) respectivamente (Tabla 6).

Tabla 6. Diámetro de tallo de frijol Pinto Saltillo en función del tiempo.

DDT	Tratamientos					
	T1	T2	T3	TES-T1	TES-T2	TES-T3
11	3.6a	3.5 a	3.2b	3.5 a	3.1b	2.9b
17	3.6a	3.5ab	3.3abc	3.5abc	3.3c	3.3bc
23	3.8c	3.8c	3.7c	4.1ab	4.1a	3.9bc
29	4.4c	4.4c	4.1c	5.1a	4.7b	4.3c
35	4.9c	4.8c	4.4d	5.6a	5.3b	4.6d
41	5.0c	4.8d	4.5e	5.9a	5.5b	4.6de
47	5.1c	4.9d	4.6e	6.4a	5.5b	4.8d
53	5.6c	5.0d	4.7e	6.5a	5.8b	4.9de
59	5.7c	5.2d	4.9d	6.5a	6.0b	5.1d
65	5.9c	5.2d	5.1e	6.7a	6.3b	5.2de

Medias con distintas letras dentro de la columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$).

Producción de biomasa en función del tiempo

La dinámica de acumulación de biomasa seca en los diferentes órganos de la planta fue muy similar en etapa inicial (30 ddt) para cada uno de los tratamientos aplicados (densidad de planta con o sin aplicación de fitohormonas). A los 60 ddt, hubo una ligera diferenciación en el patrón de acumulación en función de los tratamientos (Figura 1AB). A partir de los 82 ddt, la biomasa seca de vainas, hoja y raíz fue mayor en comparación con el resto de los órganos (tallos, flor y peciolo) para los tratamientos con densidad de plantas + fitohormonas. Sin embargo, la mayor producción de vainas (262 g) se registró en el T3 + Súper hormonal, seguido del T1+ Vitaminum Forte (141g) y T2 + Cito Xplosión (134 g) (Figura 1A). La misma tendencia se observó en los tratamientos con diferentes densidades sin aplicación de fitohormonas. En este caso, la producción de biomasa en vainas fue 255 g para el TES-T3, 211 g para el TES-T2 y 207 g para el TES-T1 (Figura 1B).

Evapotranspiración real (ET_r) del cultivo

La Figura 2 muestra el comportamiento de evapotranspiración real del cultivo de frijol para todos los tratamientos. En todos los casos se registró que las plantas del testigo (densidades sin aplicación de fitohormona) presentaron valores más altos de ET_r desde el trasplante hasta final de ciclo. En etapa inicial (hasta los 25 ddt), ambos tratamientos (T1 y testigo) tuvieron un rango de ET_r de 0.46 a 0.74 L m⁻², posteriormente dichos valores incrementaron (1.0 y 3.0 L m⁻²) desde los 60 hasta los 85 ddt, para después declinar al final del ciclo (3.2 y 3.4 L m⁻²) (Figura 2A). Por otra parte, las plantas

del T2 + Cito Xplosión presentaron valores más altos de ETr comparado con su testigo (Figura 2B). Finalmente, la ETr fue ligeramente mayor en las plantas del T3 + Súper hormonal en comparación con su testigo, especialmente en la etapa de máxima demanda hídrica (60-85 ddt) con un consumo de agua de 3.3 y 2.2 L m⁻² (Figura 2C).

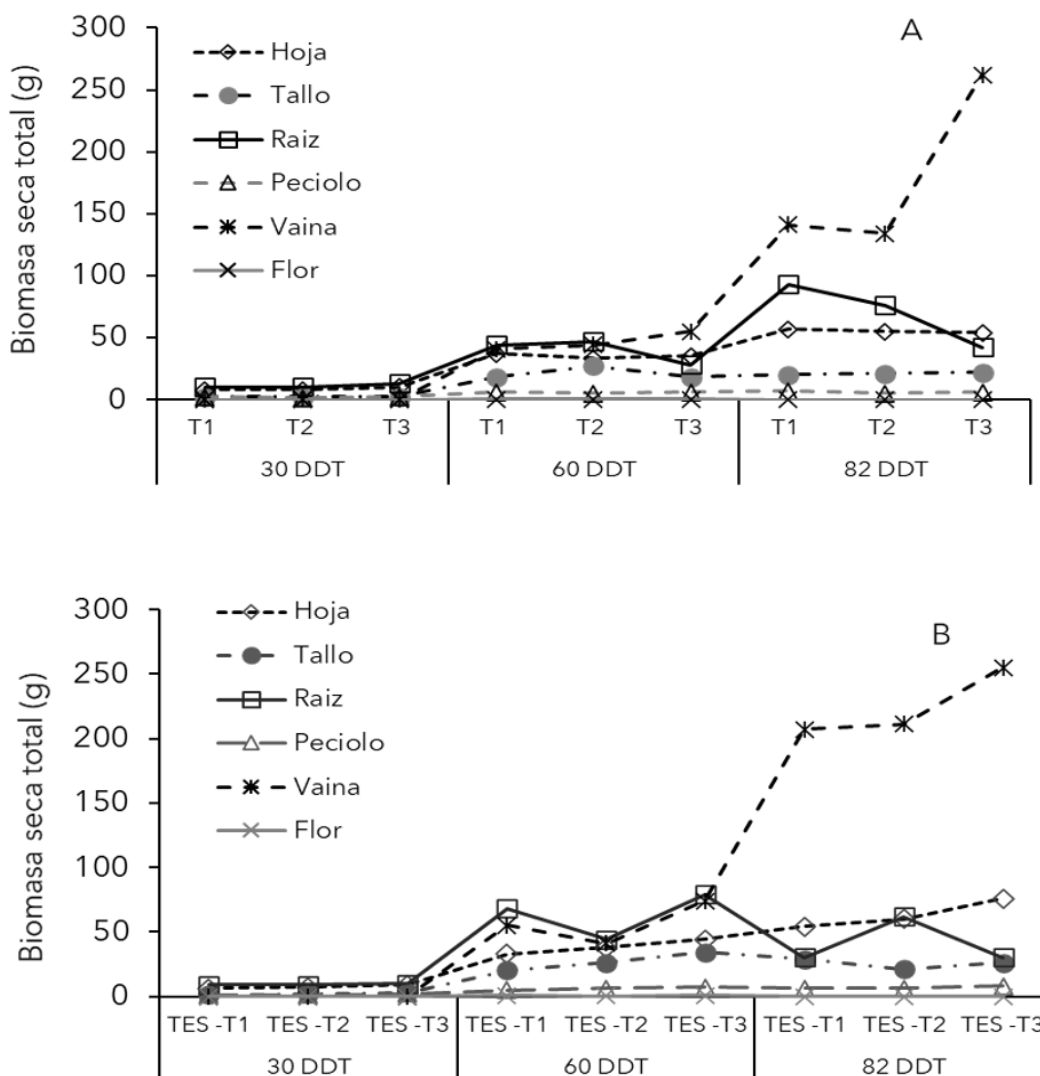


Figura 1. Acumulación de biomasa seca en órganos de la planta.

Índice de área foliar

La Figura 3 muestra que el T1 presentó el mayor IAF en las tres evaluaciones con respecto a los demás tratamientos y también con su respectivo testigo (TES-T1). Adicionalmente, se observó que el IAF en los tratamientos sin fitohormonas (TES-T2 y TES-T3) se incrementó de manera considerable después de los 30 ddt. El máximo IAF en los tratamientos se presentó a los 70 ddt con 2.97, 2.37, 2.50 m² m⁻² para T1, T2 y T3 y 2.76, 3.37, 3.75 m² m⁻² para TES-T1, TES-T2, TES-T3 respectivamente en la etapa de formación y llenado de vaina. Finalmente, se observó que el IAF disminuyó después de los 85 ddt debido a la senescencia y caída de hojas. La aplicación de fitohormonas no tuvo efecto directo en la acumulación de área foliar.

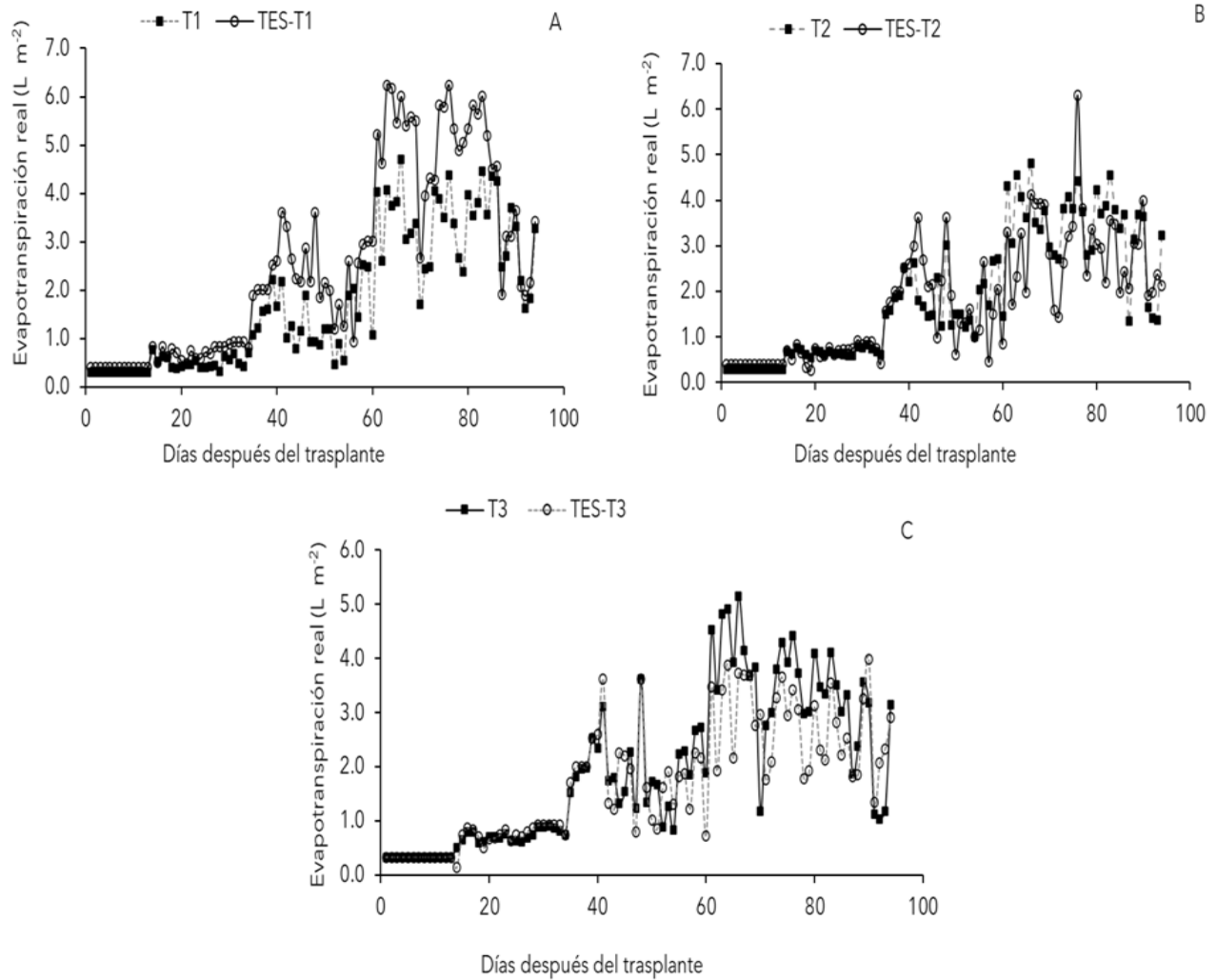


Figura 2. Evapotranspiración real en frijol Pinto Saltillo.

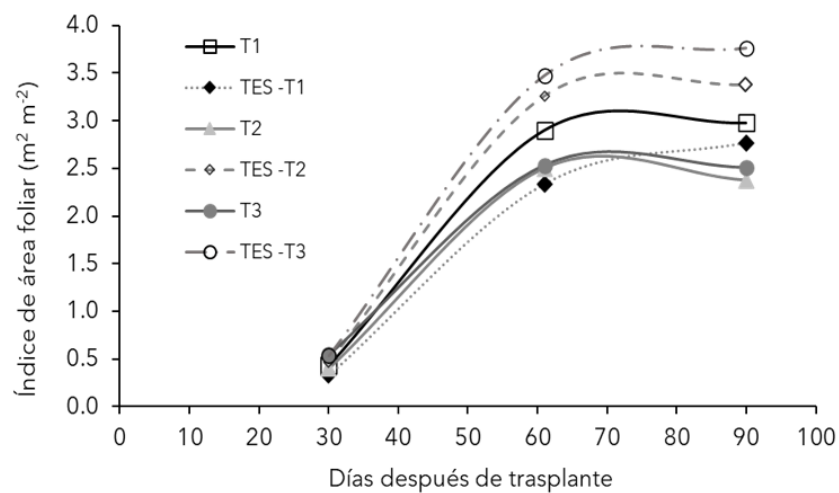


Figura 3. Índice de área foliar en frijol Pinto Saltillo.

Índice de clorofila

De manera general, los tratamientos donde se aplicaron las fitohormonas presentaron valores más altos de clorofila durante todo el ciclo del cultivo en comparación con los testigos. A los 32 ddt, el T1 tuvo el mayor índice de clorofila (~45) (Figura 4 A) con respecto al T2 y T3 (~40) (Figura 4 B, C).

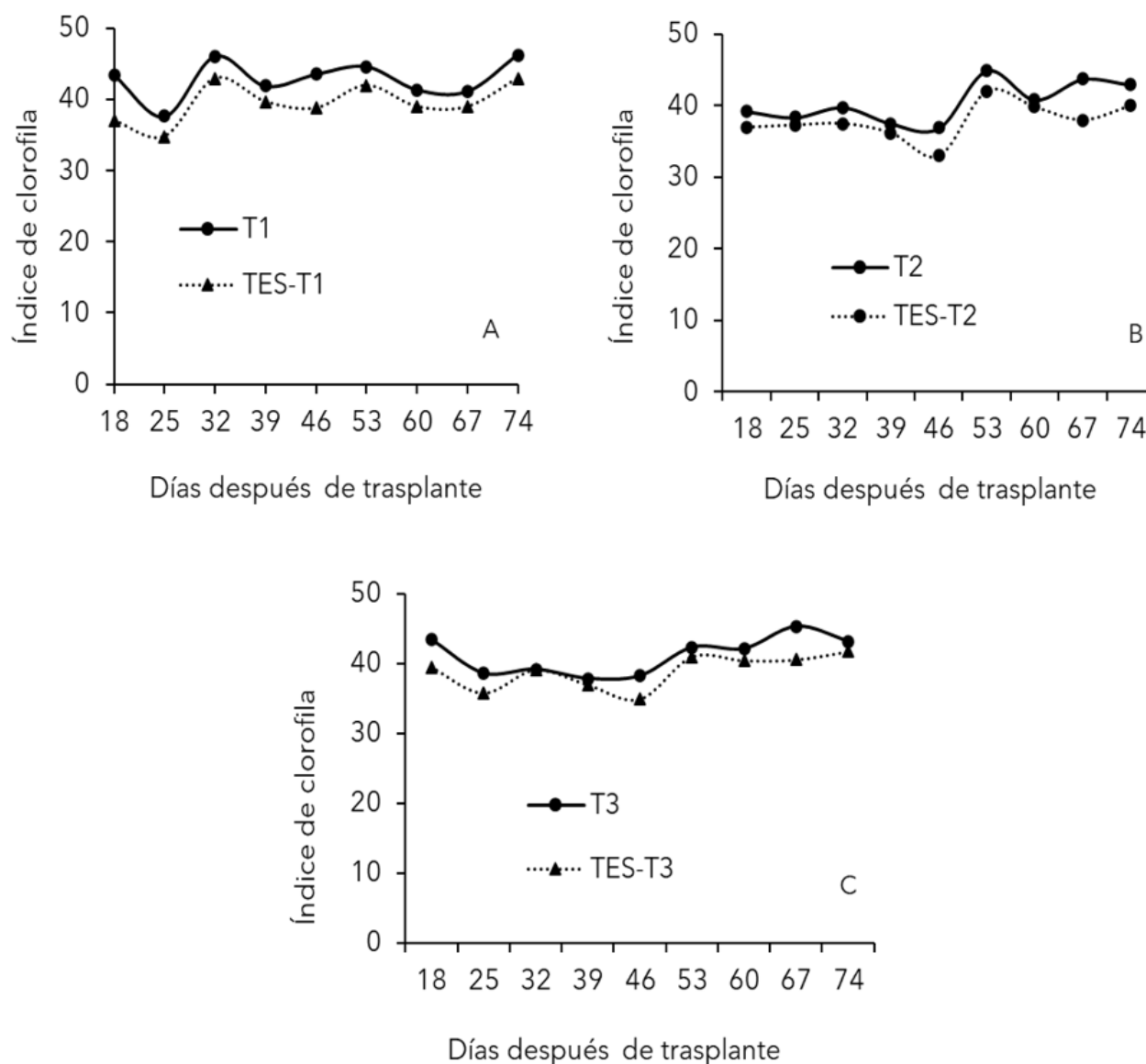


Figura 4. Índice de clorofila en frijol Pinto Saltillo.

Componentes del rendimiento

No se encontraron diferencias significativas por efecto de los tratamientos aplicados (densidades con o sin aplicación de fitohormonas). Sin embargo, se puede observar que los tratamientos de densidad de plantas sin aplicación de fitohormonas presentaron mayor número de vainas (NV), número de granos (NG), peso fresco y seco de grano en comparación con los tratamientos con aplicación de fitohormonas (Tabla 7).

Tabla 7. Componentes del rendimiento de frijol Pinto Saltillo.

Tratamientos	NV	NS	NSV	PFG (g)	PSG (g)	%HG	PSGA (g)
T1	95a	440a	5a	176a	167a	5a	194a
T2	96a	441a	5a	171a	162a	5a	188a
T3	87a	400a	5a	161a	153a	5a	177a
TES -T1	133a	605a	5a	217a	204a	6a	237a
TES -T2	117a	479a	4a	200a	190a	5a	220a
TES -T3	94a	419a	4a	155a	148a	5a	171a

Medias con distintas letras dentro de la columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$). NV: número de vainas, NSV: Número de semillas por vaina, NS: número de semillas, PFG: Peso fresco de grano, PSG: Peso seco de grano, %HG: Porcentaje de humedad de grano, PSGA (14%); Peso seco de grano ajustado al 14%.

Rendimiento de grano

Aunque no se identificaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p \geq 0.05$), los resultados muestran variaciones en los rendimientos obtenidos. En el tratamiento con baja densidad (T1 + aplicación de Vitaminum Forte), se alcanzó un rendimiento de 5.88 t ha^{-1} , mientras que su testigo (TES-T1) registró una producción superior de 7.17 t ha^{-1} , lo cual representa un aumento de 1.29 t ha^{-1} . Por otro lado, en el tratamiento con densidad intermedia (T2 + aplicación de Cito Xplosión) se obtuvo un rendimiento de 5.69 t ha^{-1} y 6.68 t ha^{-1} en su testigo (Figura 5). De igual manera, el tratamiento con alta densidad (T3 + Súper Hormonal) tuvo un rendimiento de 5.36 t ha^{-1} , mientras que su testigo presentó un rendimiento ligeramente inferior (5.19 t ha^{-1}). En términos generales, los datos indican que la aplicación de fitohormonas no tuvo un impacto significativo en el rendimiento de grano (Figura 5).

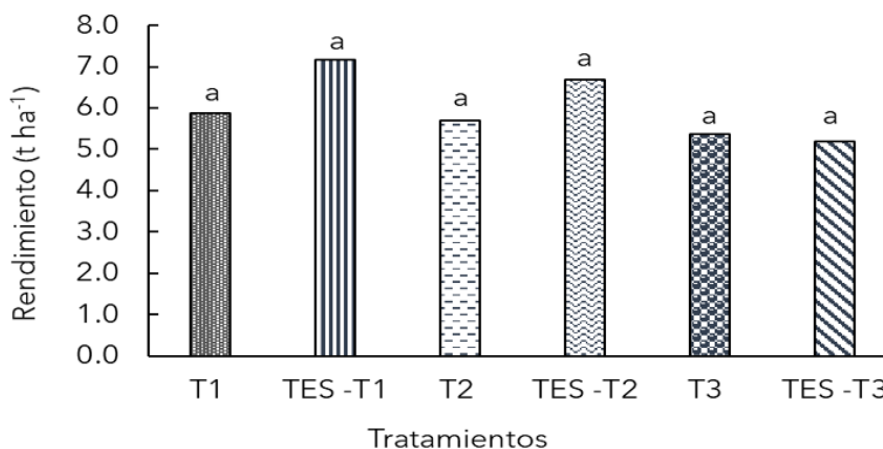


Figura 5. Rendimiento de grano.

Productividad del agua

Con respecto a esta variable, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. Se pudo apreciar que el T1 alcanzó la mayor productividad del agua (1.96 kg m^{-3}), seguido por su testigo (1.50 kg m^{-3}). Por el contrario, la productividad del agua disminuyó al aumentar la densidad de plantas, específicamente el T2 y TES-T2 presentaron valores intermedios (1.04 y 1.38 kg m^{-3}), mientras que el T3 y TES-T3 presentaron valores más bajos (0.78 y 0.85 kg m^{-3}) (Figura 6).

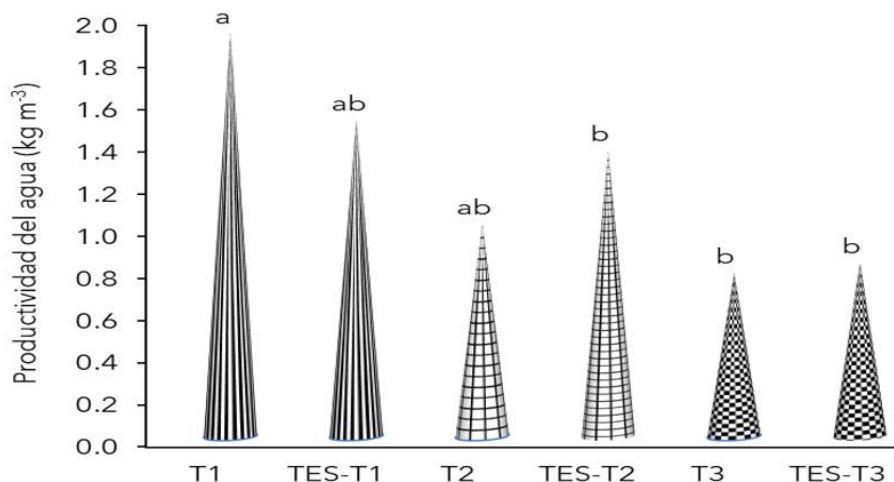


Figura 6. Productividad del agua en frijol Pinto Saltillo.

Huella hídrica

A pesar de que los resultados no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos, se pudo registrar que la huella hídrica fue mayor a medida que se aumentó el número de plantas. Dichos valores fueron 278.8 L kg⁻¹ para el T1 y 335.9 L kg⁻¹ en su testigo. Para el T2 fue 324.1 L kg⁻¹ y en su testigo fue 239 L kg⁻¹, para el T3 fue 335.8 L kg⁻¹ y en su testigo fue 305 L kg⁻¹ (Tabla 8).

Tabla 8. Evaluación del consumo de agua y huella hídrica azul de frijol Pinto Saltillo.

Tratamiento	Consumo de agua (L m ⁻²)	Consumo de agua (L ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Huella Hídrica Azul (L kg ⁻¹)
T1	159.9a	1615442.4a	5794.8a	278.8a
T2	175.2a	1769806.1a	5460.2a	324.1a
T3	183.6a	1853109.1a	5518.3a	335.8a
TES-T1	238.5a	2408453.5a	7170.0a	335.9a
TES-T2	158.1a	1596152.5a	6677.2a	239.0a
TES-T3	156.9a	1584179.8a	5193.5a	305.0a

Medias con distintas letras dentro de la columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$).

Relación beneficio-costo de frijol Pinto Saltillo en invernadero

De acuerdo al análisis para este cultivo, se determinó que los rendimientos variaron entre 5.35 y 5.87 t ha⁻¹ bajo distintos tratamientos de densidad de siembra + la aplicación de fitohormonas, lo cual generó ingresos de \$133 986 062 a \$146 945 032, mientras que los costos de producción por hectárea fueron de \$968 847 048, mismos que resultaron en utilidades netas negativas de -\$821 902 016 a -\$834 860 086 y relación beneficio/costo bajas (0.14-0.15) (Tabla 9). Sin embargo, el rendimiento incrementó en los tratamientos sin fitohormonas, destacando TES-T1 con 7.17 t ha⁻¹ y TES-T2 con 6.67 t ha⁻¹, lo que elevó los ingresos hasta \$179 250 082 (Tabla 9). Por otro lado, los altos costos de producción mantuvieron utilidades netas negativas de -\$789 596 066 a -\$801 916 035 con una ligera mejora en la relación B/C, las cuales alcanzaron un máximo de 0.19. En conjunto, estos resultados indican que, aunque sin el uso de fitohormonas se puede mejorar el rendimiento y la eficiencia económica relativa.

Tabla 9. Costos de producción de cultivo de frijol Pinto Saltillo en invernadero.

Tratamiento	Rendimiento (t ha ⁻¹)	PMR (\$ t)	Utilidad (\$ PMR* R)	Costos de producción	Utilidad neta (\$)	Relación de B/C
T1	5.8778	25 000	146 945 315	968 847 482	-821 902 016	0.15
TES -T1	7.1700	25 000	179 250 82	968 847 482	-789 596 066	0.19
T2	5.6904	25 000	142 261 096	968 847 482	-826 586 038	0.15
TES -T2	6.6772	25 000	166 931 127	968 847 482	-801 916 035	0.17
T3	5.3595	25 000	133 986 617	968 847 482	-834 860 086	0.14
TES -T3	5.1935	25 000	129 836 429	968 847 482	-839 011 005	0.13

PMR: Precio medio rural, R: rendimiento

DISCUSIÓN

Altura de planta

Se observó que este parámetro mostró un incremento en condiciones de baja densidad de plantas, indicando una menor competencia por recursos esenciales como la luz, el agua y los nutrientes, lo que promovió un crecimiento vertical. A partir de este punto, la planta comenzó a redistribuir fotoasimilados hacia los órganos reproductivos para la formación y llenado de las vainas. Además, los resultados obtenidos indican que las fitohormonas no ejercieron un efecto significativo sobre esta variable. En ese sentido, Capetillo-Burela y López-Romero (2025) encontraron que una densidad de siembra entre 60 y 70 cm entre plantas favorece tanto el crecimiento vertical como la productividad del cultivo del frijol común. Por otro lado, Musana *et al.* (2020) reportaron que una alta densidad (350 000 de plantas ha⁻¹) incrementó la altura en promedio (21.6 cm) en comparación con densidades más bajas (300 000 y 250 000 plantas ha⁻¹) que registraron alturas de 17.6 y 13.5 cm respectivamente en la variedad RWR 1668 de frijol común cultivada en Rwanda. De manera similar, Kouam *et al.* (2020) reportaron que la altura de las plantas no fue afectada por diferentes densidades de plantas (16, 36, 49, 121 plantas m⁻²) al evaluar cuatro variedades de frijol.

Diámetro de tallo

Se encontró que el diámetro del tallo fue influenciado únicamente por la densidad de plantas, por lo cual, los tratamientos con densidad baja y media sin fitohormonas (TES-T1 y TES-T2) mostraron tallos más gruesos en comparación con las plantas tratadas. Sin embargo, los tratamientos con más alta densidad exhibieron los tallos más delgados. Este comportamiento indica que una menor competencia intraespecífica favorece el engrosamiento del tallo, otorgando a la planta una mayor resistencia estructural. En contraste, Sundar y Lal (2022) exhibieron que diferentes densidades (11, 8.5, 7.5 y 6.5 plantas m⁻¹) no ejercieron efecto en el grosor del tallo (6.6, 6.5 y 6.7 mm) en dos variedades de frijol (*P. vulgaris* y *P. lunatus*). Otros como Kouam *et al.* (2020) reportaron tallos más gruesos en frijol con densidad de 16 plantas m⁻² y tallos más delgados con mayor densidad. Finalmente, Roshdi *et al.* (2021) encontraron que una densidad alta (30 plantas m⁻²) en frijol rojo redujo el grosor del tallo.

Producción de biomasa en función del tiempo

La acumulación de biomasa en los distintos órganos fue muy distintiva a los 30 ddt, periodo que coincide con otros reportes fenológicos. Específicamente se observó que bajo condiciones

protegidas se puede reducir la competencia entre plantas, lo cual permite un mayor aprovechamiento del agua y de los nutrientes y por consiguiente, se puede reducir el efecto de estrés térmico (Mendoza-Pérez *et al.* 2018). Los resultados muestran que el T2 (3 plantas/maceta) presentó la mayor acumulación de biomasa seca respecto a los demás tratamientos bajo condiciones de invernadero. Estudios realizados por Kouam *et al.* (2020) reportaron la mayor acumulación de biomasa (23.9, 13.2, 16.5 y 20.2 kg) en cuatro variedades de frijol con baja densidad de plantas (16 plantas m⁻²). Por otra parte, Zamukulu *et al.* (2023) encontraron que una densidad baja (25 plantas m⁻²) en tres variedades de frijol produjeron la mayor cantidad de biomasa seca (3.16 kg en 12.96 m²) en comparación con la densidad alta (33 plantas m⁻²) que produjeron 2.87 kg con la misma superficie.

Evapotranspiración real de cultivo de frijol (ET_r)

El patrón de requerimiento hídrico sugiere que una menor densidad de plantas permitió una mayor eficiencia en el uso de agua, sin competencia por dicho recurso y/o nutrientes entre plantas. Cabe resaltar que las plantas empezaron a incrementar su demanda hídrica a medida que se aumentó dicha densidad, por lo que las plantas redujeron su crecimiento. El consumo neto de agua durante todo el ciclo agrícola fue de 54, 60 y 61 litros por planta para el T1, T2 y T3, respectivamente y de 80, 56 y 63 litros por planta para TES-T1, TES-T2 y TES-T3.

Estos hallazgos evidencian que los tratamientos de densidad + fitohormonas redujeron notablemente su consumo neto de agua en comparación con los tratamientos sin aplicación de fitohormonas. En ese aspecto, Alves-Souza *et al.* (2020) reportaron que el consumo de agua en frijol común fue mayor (131 y 122 mm) con la aplicación de dos y tres riegos; mientras que el menor (94 mm) con una sola frecuencia de riego. También reportaron que el mayor consumo de agua (157 mm) se presentó en tratamientos con densidad de 30 plantas m⁻² con la aplicación de un riego. Mientras que los tratamientos con densidad de 24 plantas m⁻² consumieron 194 mm con la aplicación de tres riegos. Finalmente, determinaron que el consumo de agua total fue menor que la evapotranspiración de referencia (ET_o) (212 mm).

Índice de área foliar

Los resultados indicaron que el índice de área foliar (IAF) fue mayor en el tratamiento con menor densidad de plantas combinado con la aplicación de Vitaminum Forte (T1). En cambio, los tratamientos con densidad media y alta sin aplicación de fitohormonas, mostraron un incremento en el IAF durante las etapas iniciales del cultivo. Por otro lado, el IAF disminuyó debido a la caída natural de las hojas a medida que el cultivo avanzó hacia su madurez. Al respecto, Báez-González *et al.* (2020) identificaron que las variedades de frijol Pinto lograron los valores más altos de IAF (2.4-3.0) en respuesta a una alta densidad de siembra (260,000 plantas ha⁻¹). Además, observaron que la variedad Pinto Saltillo tardó hasta 34 días en alcanzar su máximo IAF bajo condiciones de baja densidad de plantas en sistemas de temporal. Trabajos realizados por Merga (2020) reportaron un aumento significativo en el IAF al reducir la distancia entre plantas, lo que dio lugar a una densidad mayor.

Índice de clorofila

El índice de clorofila reflejó un incremento en los tratamientos con fitohormonas, superando consistentemente los niveles observados en las plantas sin esta aplicación. Este resultado resalta el impacto positivo sobre la biomasa radicular, mayor actividad fotosintética, crecimiento vegetativo más vigoroso y un color verde más intenso en las hojas. Estudios realizados por Rodríguez-Mendoza *et al.* (2020) reportaron que el uso de bioestimulantes a base de extractos vegetales y aminoácidos en frijol común incrementó el contenido de clorofila, lo que se tradujo en una mayor actividad fotosintética y como consecuencia un mejor rendimiento del cultivo. De la misma manera, Rudzani (2021) encontró el valor más alto de índice de clorofila (10.94) en tratamientos con una densidad de 150 000 plantas ha⁻¹ en dos variedades de frijol y el valor más bajo (8.81) en tratamientos con densidad de 210 000 plantas ha⁻¹. Así mismo, argumentó que dicha reducción fue debido a una baja interceptación de luz causada por sombreado de las hojas inferiores. Otros como Bueno *et al.* (2024) reportaron que la intensidad de luz influenció el contenido relativo de clorofila en frijol común, el cual fue mayor (24.37) en plantas con luz azul fuerte y el menor (18.75) en plantas con luz roja débil.

Componentes del rendimiento

A pesar de que no se encontraron diferencias significativas por efecto de los tratamientos aplicados, se puede resaltar que la baja densidad de plantas favoreció el NV, NG y PS de grano. Por el contrario, la aplicación de fitohormonas únicamente influenció la producción de más semillas (5 semillas/vaina) comparado con los tratamientos sin aplicación (4 semillas/vaina), pero sin ningún efecto sobre el resto de los componentes (NV, NG y PS grano). En ese contexto, Musana *et al.* (2020) encontraron que las plantas de frijol común variedad RWR 1668 produjeron el mayor número de vainas por planta (11.43) y mayor peso de 100 granos (51.5 g) a una densidad baja (200, 000 plantas ha⁻¹) y que estos disminuyeron al incrementar la densidad. No obstante, Kouam *et al.* (2020) reportaron que una alta densidad (16 plantas m⁻²) incrementó el número de vainas (12 vainas/planta) y semillas por planta (22 a 39 semillas) en cuatro variedades de frijol en comparación con el resto de los componentes (número de semillas por vaina, peso de 100 granos y longitud de vaina). En contraste, Zamukulu *et al.* (2023) reportaron que la densidad de plantas (250, 000 y 333, 000 ha⁻¹) en tres variedades de frijol común (tipo arbustivo) no aumentaron el número de vainas por planta (7 ± 1), ni el número de semillas por vaina (3.8 ± 0.4), y tampoco el peso de 100 granos (39.3 ± 1.3).

Rendimiento de grano

Los resultados mostraron que los tratamientos con menor densidad de planta + fitohormonas (T1 y T2) tuvieron un rendimiento de grano ligeramente menor en comparación con los tratamientos sin aplicación. Este hallazgo se atribuye a los efectos de temperatura dentro del invernadero (~45 °C) en horas de máxima insolación, lo que provocó aborto y caída de flores. Mientras que el T3 (mayor densidad, con o sin aplicación) tuvieron un rendimiento similar. Estos resultados coinciden con lo señalado por Sánchez *et al.* (2019), quienes reportaron que el incremento en rendimiento de frijol común es mayor en densidades bajas y medias, mientras que altas densidades provocan competencia por luz, agua y nutrimentos, reduciendo la producción. Por otro lado, Schwember *et al.* (2025) reportaron un rendimiento óptimo de 4.47 t ha⁻¹ de frijol común variedad Zorzal

fertilizada con 120 kg N ha⁻¹ y una densidad de 180,000 plantas ha⁻¹ bajo sistema de riego por goteo. Adicionalmente, Musana *et al.* (2020) reportaron que el mejor rendimiento (2317 kg ha⁻¹) se encontró en tratamientos con densidad media (250, 000 plantas ha⁻¹), mientras que el menor (492 kg ha⁻¹) en densidad alta (350, 000 plantas ha⁻¹). De manera contraria, Zamukulu *et al.* (2023) reportaron que el rendimiento de frijol incrementó (1.37 t ha⁻¹) con alta densidad (333, 000 ha⁻¹) cultivado en un suelo arcilloso con alto contenido de M.O y ligeramente ácido (Nitisol-WRB), argumentando que dicho aumento podría atribuirse a la adaptabilidad del genotipo a algún tipo de estrés (hídrico y/o nutrimental) y a la variedad, ya que esta representa el principal factor que influencia la densidad de planta óptima para cada condición en particular. Otros trabajos han reportado que el incremento en rendimiento de frijol en respuesta a una alta densidad de plantas ha sido relacionado al crecimiento de ramas laterales en la parte inferior (Karavidas *et al.* 2022) y otros han argumentado que dicho rendimiento ha aumentado proporcionalmente con la densidad de plantas (Báez-González *et al.* 2020).

Productividad del agua

Los valores obtenidos sugieren que una menor densidad de plantas por maceta favorece un uso más eficiente del agua. Por lo tanto, la selección adecuada del sistema de riego está en relación directa con el cálculo de una lámina de riego que maximice el rendimiento por unidad de área y que a su vez suministre el requerimiento hídrico del cultivo y mantenga la productividad. Reportes de Alves-Souza *et al.* (2020) indican que una frecuencia de riego y una densidad de 28 plantas m⁻² tuvieron la mayor productividad hídrica (2.03 kg m⁻³) en la variedad de frijol común BRS Esteio en Brazil.

Huella hídrica

La huella hídrica (HH) es un concepto cuantitativo útil para conocer el requerimiento de agua para cualquier bien o servicio. Con los valores obtenidos se puede sostener que cuando se controlan las variables de producción como clima, riego, nutrición, plagas y enfermedades es posible mejorar el rendimiento de los cultivos e incluso con menos agua. Además, se refleja que un mayor rendimiento no siempre implica mayor eficiencia hídrica. Trabajos realizados por Bautista-Olivas *et al.* (2024) reportaron valores superiores de huella hídrica (750 a 1200 L kg⁻¹) con rendimiento de 3.2 a 5.1 t ha⁻¹ en frijol variedad Calima a campo abierto y sistema de riego por goteo. Por su parte, León *et al.* (2022) reportaron un valor de 0.2941 m³ kg⁻¹ (294.1 L kg⁻¹) de huella hídrica azul para el cultivo de lechuga bajo sistema de producción acuapónica y 0.1721 m³ kg⁻¹ (172.1 L kg⁻¹) para sistema hidropónico; mientras que Aldulaimy *et al.* (2025) determinaron que la menor huella hídrica azul (570 m³ t⁻¹) y huella hídrica verde (68 m³ t⁻¹) se registraron con la aplicación del riego al 25% de abatimiento de humedad aprovechable y con plantación doble en la hilera.

Relación beneficio-costo de frijol Pinto Saltillo

El análisis de beneficio-costo en el sector agrícola compara los ingresos (beneficios) con los gastos (costos de producción) para determinar la rentabilidad de un cultivo. Por lo que el análisis mostró que incrementar la densidad de planta + aplicación de fitohormonas generó mayor costo de producción sin efecto significativo en el rendimiento e ingresos. En conjunto, estos resultados

indican que, aunque sin el uso de fitohormonas se puede mejorar el rendimiento y la eficiencia económica relativa.

CONCLUSIONES

El uso de fitohormonas no favoreció el incremento de la altura de las plantas, ni del diámetro de tallo, pero sí tuvo efecto en el índice de área foliar y producción de biomasa en los distintos órganos de la planta. Los tratamientos con baja densidad de plantas mostraron los mayores niveles de productividad del agua, logrando una huella hídrica más eficiente. Por el contrario, las altas densidades ocasionaron una competencia más intensa por los recursos, lo que redujo el rendimiento por planta. El uso de fitohormonas Vitaminum Forte, Cito Xplosión y Súper Hormonal promovió la disminución en el consumo neto de agua en comparación con los tratamientos sin aplicación.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Aldulaimy SE, Mohammed HJ, Aljoumani B, Salman AK (2025) Water footprint and evapotranspiration partitioning in drip-irrigated Faba Bean: Effects of irrigation regime and planting pattern. *Agronomy* 15: 2282. <https://doi.org/10.3390/agronomy15102282>
- Ansorge L, Stejskalová L, Vološinová D, Dlabal, J (2022) Limitation of water footprint sustainability assessment: A Review. *European Journal of Sustainable Development* 11(2): 1. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2022.v11n2p1>
- Alves Souza S, Vieira JH, dos Santos Farias DB, da Silva GE, Cabral Aleman C (2020) Impact of irrigation frequency and planting density on Bean's morpho-physiological and productive traits. *Water* 12: 2468. <https://doi.org/10.3390/w12092468>
- Arshad A, Raza MA, Zhang Y, Zhang L, Wang X, Ahmed M, Habib-ur-Rehman M (2021) Impact of climate warming on cotton growth and yields in China and Pakistan: A Regional Perspective. *Agriculture* 11: 97. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020097>
- Báez-González A, Fajardo-Díaz R, Padilla-Ramírez J, Osuna-Ceja E, Kiniry J, Meki M, Acosta-Díaz E (2020) Yield performance and response to high plant densities of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars under semi- arid conditions. *Agronomy* 10: 1684. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111684>
- Bautista-Olivas AL., Mendoza-Cariño M, Álvarez-Chávez CR, Sánchez-Mexia AC (2024) Huella hídrica de la producción de lechuga en sistemas acuapónico e hidropónico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 15(3): 1-12. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i3.3304>
- Bueno PMC.; Vendrame WA (2024) Wavelength and light intensity affect macro and micronutrient uptake, stomata number and plant morphology of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plants* 13: 441. <https://doi.org/10.3390/plants13030441>
- Calero-Hurtado A, Castillo Y, Quintero E, Pérez Y, Olivera D (2018) Efecto de cuatro densidades de siembra en el rendimiento agrícola del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista de la Facultad de Ciencias* 7(1): 88-100. <https://portal.amelica.org/ameli/journal/115/115589012/html/>

- Capetillo-Burela A, Reynolds-Chávez MA, Zetina-Lezama R, López-Collado CJ, López-Romero G, Palma-López DJ, Ortega-Jiménez E, Osorio-Magdalena LA (2025) Resultados preliminares de efecto de la densidad de siembra en la producción vertical de frijol negro en ambiente protegido en Veracruz, México. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático* 10(19): 2375–2383. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v10i19.20794>
- Condon A (2020) Drying Times: Plant traits to improve crop water use efficiency and yield. *Journal of Experimental Botany* 71(1): 2239–2252. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa002>
- FAO (2023) La escasez de agua supone menos agua para la producción agrícola, lo cual, a su vez, se traduce en una menor disponibilidad de alimentos y pone en peligro la seguridad alimentaria y la nutrición. <https://www.fao.org/newsroom/detail/water-scarcity-means-less-water-for-agriculture-production-which-in-turn-means-less-food-available-threatening-food-security-and-nutrition/es>. Fecha de consulta: 25 de Julio de 2025.
- Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM (2011) Water Footprint Assessment Manual. Settings the Global Standard. Recuperado de https://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2025.
- Kouam E, Tsague-Zanfack A (2020) Effect of plant density on growth and yield attributes of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj- napoca* 12: 399–408. <https://doi.org/10.15835/nsb12210519>
- Lin G, Wang L, Li Y, Li J, Qian C, Zhang X, Zuo Q (2024) Optimal planting density increases the seed yield by improving biomass accumulation and regulating the canopy structure in rapeseed. *Plants* 13: 1986. <https://doi.org/10.3390/plants13141986>
- Mendoza-Pérez C, Cazares-González B, Rubiños-Panta JE, Ramírez-Romualdo JV, Ruelas Islas JDR, (2025) Greenhouse cucumber production with organic and inorganic fertilizers. *Revista de la Universidad del Zulia* 16(45): 7–22. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14599495>
- Mendoza-Pérez C, Delgadillo-Piñón ME, Rubiños-Panta JE, Exebio-García AA, Cazares-González B (2024) Evaluation of commercial biostimulants in three sowing densities of hibiscus crops grown in greenhouses. *Agro Productividad* 17(11): 165: 174. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i11.2893>
- Mendoza-Pérez C, Ramírez-Ayala C, Martínez-Ruiz A, Ojeda-Bustamante W, Ruelas-Islas J del R, Ascencio-Hernández R, López-Ordaz A, Núñez-Ramírez F (2022) Leaf area and its impact in yield and quality of greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo* 54(1): 57–69. <https://doi.org/10.48162/rev.39.065>
- Merga J (2020) Evaluation of common bean varieties (*Phaseolus vulgaris* L.) to different row-spacing in Jimma, South Western Ethiopia. *Heliyon* 6. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04822>
- Musana F, Rucamumihigo F, Nirere D, Mbaraka S (2020) Growth and yield performance of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as influenced by plant density at Nyagatare, east Rwanda. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development* 20: 16249–16261. <https://doi.org/10.18697/ajfand.92.18700>
- Nagypál V, Mikó E, Czupy I, Hodúr C (2019) Water footprint. *Analecta Technica Szegedinensia*. <https://doi.org/10.14232/analecta.2019.2.12-20>
- Núñez-Ramírez F, Mendoza-Pérez C, Rubiños-Panta, JE, Hernández-Palomo JB, Escoboza-García MI, Ruelas-Islas JDR (2023) Biostimulation of cucumber crop produced in sheltered conditions. *Agro Productividad* 16(11): 31–21. <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i11.2718>
- Postma JA, Hecht VL, Hikosaka K, Nord EA, Pons TL, Poorter H (2021) Dividing the pie: A quantitative review on plant density responses. *Plant Cell Environment* 44: 1072–1094. <https://doi.org/10.1111/pce.13968>

- Reis LS, de-Acevedo CAV, Albuquerque AW, Junior JFS (2013) Índice de área foliar e produtividade do tomate sob condicoes de ambiente protegido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 17(4): 386391.
- Rodríguez-Mendoza R, Castañeda-Castro O, Gutiérrez-Morales M (2020) Efecto de bioestimulantes foliares en la actividad fotosintética y rendimiento de frijol común. *Terra Latinoamericana* 38(1): 25-33.
- Roshdi M, Alilou M, Alilou S (2021) The effect of plant density and weed growth control methods on vegetative traits and yield of red beans. *JWSS - Isfahan University of Technology* 10: 125-138. <https://doi.org/10.47176/jcpp.10.4.36001>
- Rudzani M (2021) The effect of plant population on chlorophyll content and grain yield of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) at Dzindi irrigation scheme in South Africa. *Journal of Medicinal Plants Studies* 9(2): 24-29. <https://doi.org/10.22271/plants.2021.v9.i2a.1254>
- Zamukulu PM, Bagula EM, Mondo JM, Chuma GB, Safina FB, Cishesa TH, Lubobo AK (2023) Optimization of plant density and fertilizer application to improve biofortified common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield on Nitisols of South-Kivu, Eastern DR Congo. *Heliyon* 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17293>
- Sánchez F, Pérez J, López M (2019) Estimación de índice de área foliar y biomasa aérea de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en función de la densidad de siembra. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(8): 1631-1641.
- Shapiro SS, Wilk MB (1965) An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52(3/4): 591-611. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- SIACON (2023) Sistema de Información Agropecuaria de Consulta. <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>. Fecha de consulta: 22 de septiembre de 2025.
- Schwember AR, Muñoz LA, Gepts P, Amigo R, Méndez-Espinoza AM, Tapia G, Carrasco B, Arriagada O, Cabeza RA (2025) Response to nitrogen fertilization and irrigation management of common bean cultivars in central chile. *Scientia Agricola* 82: 1-11. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2024-0207>
- Sundar L, Lal A (2022) Effects of plant population density on the growth, survival rate and yield of common beans (*Phaseolus* spp.) cultivated under tropical climate. *Legume Research* 45(4): 469-474. <https://doi.org/10.18805/lrf-672>
- Zhang Y, Xu Z, Li J, Wang R (2021) Optimum planting density improves resource use efficiency and yield stability of rainfed Maize in semiarid climate. *Frontiers in Plant Sciences* 12: 752606. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.752606>
- Zhang F, Zhang D, Li L, Zhang Z, Liang X, Wen Q, Chen G, Wu Q, Zhai Y (2025) Effect of Planting density on canopy structure, microenvironment, and yields of uniformly Sown winter wheat. *Agronomy* 13: 870. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030870>