



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2026,
Volumen 10, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3

REQUERIMIENTO HÍDRICO, RENDIMIENTO Y CALIDAD DE DOS HÍBRIDOS DE PEPINO (CUCUMIS SATIVUS L.) EN CONDICIONES DE INVERNADERO

**WATER REQUIREMENT, YIELD, AND QUALITY OF TWO
CUCUMBER HYBRIDS (CUCUMIS SATIVUS L.) UNDER
GREENHOUSE CONDITIONS**

Miguel Sánchez Delgado

Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

Daniel Meza Rodriguez

Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

Antonio Celestino Enciso Gutierrez

Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

Javier Antonio Goicochea Ríos

Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

Leandro Huanca Velarde

Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3.25010

Requerimiento Hídrico, Rendimiento y Calidad de Dos Híbridos de Pepino (*Cucumis Sativus L.*) en Condiciones de Invernadero

Miguel Sánchez Delgado¹msanchez@lamolina.edu.pe<https://orcid.org/0000-0003-4441-7871>Universidad Nacional Agraria La Molina
Perú**Daniel Meza Rodriguez**20161359@lamolina.edu.peUniversidad Nacional Agraria La Molina
Perú**Antonio Celestino Enciso Gutierrez**aenciso@lamolina.edu.pe<https://orcid.org/0000-0003-1598-7912>Universidad Nacional Agraria La Molina
Perú**Javier Antonio Goicochea Ríos**jgoicochea@lamolina.edu.pe<https://orcid.org/0009-0000-9130-3688>Universidad Nacional Agraria La Molina
Perú**Leandro Huanca Velarde**lhuanca@lamolina.edu.peUniversidad Nacional Agraria La Molina
Perú

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de tres niveles de riego y estimar el coeficiente de cultivo (Kc) en la producción de dos variedades de pepino (*Cucumis sativus L.*), el híbrido Diamante F1 y la variedad Marketmore 76, bajo condiciones de invernadero. El experimento se estableció mediante un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2×3 , correspondiente a dos variedades y tres niveles de riego: P1 (50 % ETc), P2 (75 % ETc) y P3 (100 % ETc), con ocho repeticiones. Se evaluaron variables de crecimiento y producción, incluyendo altura de planta, longitud del fruto, diámetro del fruto, peso del fruto, diámetro del tallo, rendimiento y huella hídrica. Los resultados indicaron que no se observaron diferencias significativas entre tratamientos para las variables longitud, peso y diámetro del fruto, ni para el diámetro del tallo. Sin embargo, el tratamiento P1 (50 % ETc) presentó reducciones significativas en variables de crecimiento y rendimiento en comparación con P2 y P3. Por otro lado, el tratamiento P2 (75 % ETc) no mostró diferencias estadísticas con el riego completo (P3), manteniendo niveles productivos similares. Estos resultados indican que el riego deficitario moderado (75 % ETc) permite optimizar el uso del agua sin afectar significativamente el rendimiento del cultivo, constituyendo una alternativa eficiente para la producción de pepino en condiciones de invernadero.

Palabras clave: riego deficitario controlado; evapotranspiración del cultivo (ETc); productividad del agua; pepino; agricultura protegida; manejo eficiente del riego

¹ Autor principal

Correspondencia: msanchez@lamolina.edu.pe

Water Requirement, Yield, and Quality of Two Cucumber Hybrids (*Cucumis Sativus* L.) under Greenhouse Conditions

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of three irrigation levels and estimate the crop coefficient (K_c) on the production of two cucumber varieties (*Cucumis sativus* L.), the hybrid Diamante F1 and the variety Marketmore 76, under greenhouse conditions. The experiment was established using a completely randomized design with a 2×3 factorial arrangement, corresponding to two varieties and three irrigation levels: P1 (50% ETc), P2 (75% ETc), and P3 (100% ETc), with eight replications. Growth and production variables were evaluated, including plant height, fruit length, fruit diameter, fruit weight, stem diameter, yield, and water footprint. The results indicated that no significant differences were observed among treatments for fruit length, fruit weight, fruit diameter, or stem diameter. However, treatment P1 (50% ETc) showed significant reductions in growth and yield variables compared to P2 and P3. On the other hand, treatment P2 (75% ETc) did not show statistical differences compared to full irrigation (P3), maintaining similar production levels. These results indicate that moderate deficit irrigation (75% ETc) allows optimization of water use without significantly affecting crop yield, constituting an efficient alternative for cucumber production under greenhouse conditions.

Keywords: controlled deficit irrigation; crop evapotranspiration (ETc); water productivity; cucumber; protected agriculture; efficient irrigation management.

Artículo recibido 20 mayo 2026
Aceptado para publicación: 20 junio 2026



INTRODUCCIÓN

En regiones áridas y semiáridas del mundo, la agricultura depende en gran medida del riego debido a la limitada disponibilidad de precipitaciones y a la irregularidad de los caudales de los ríos. Esta situación es particularmente evidente en zonas costeras donde la producción agrícola depende casi exclusivamente del uso de sistemas de irrigación para garantizar la productividad de los cultivos. En este contexto, el manejo eficiente del agua se ha convertido en uno de los principales desafíos para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y la seguridad alimentaria global (Food and Agriculture Organization [FAO], 2023; Li et al., 2023; Wang et al., 2024). Asimismo, el incremento de la demanda de alimentos y los efectos del cambio climático han intensificado la presión sobre los recursos hídricos disponibles, lo que hace necesario desarrollar estrategias que permitan optimizar el uso del agua en la agricultura (Du et al., 2015; Kang et al., 2021). La agricultura de regadío consume aproximadamente el 70 % del agua dulce disponible a nivel mundial, lo que ha generado una creciente preocupación sobre la sostenibilidad de los sistemas productivos en escenarios de escasez hídrica (FAO, 2023). En este contexto, la adopción de tecnologías de riego eficientes se ha convertido en una alternativa clave para mejorar la productividad del agua y reducir el consumo de recursos hídricos en la agricultura (Li et al., 2023; Wang et al., 2024). Entre estas tecnologías, el riego por goteo se ha consolidado como uno de los sistemas más eficientes para el manejo del agua en cultivos hortícolas, ya que permite aplicar el agua directamente en la zona radicular de las plantas, reduciendo pérdidas por evaporación, escorrentía y percolación profunda (Awe et al., 2021; Du et al., 2022; Zhang et al., 2022).

El riego localizado también facilita la implementación de estrategias avanzadas de manejo del agua, como el riego deficitario controlado. Esta técnica consiste en aplicar cantidades de agua inferiores a los requerimientos completos del cultivo durante determinadas etapas fenológicas con el objetivo de mejorar la eficiencia del uso del agua sin afectar significativamente el rendimiento del cultivo (Du et al., 2015; Zhang et al., 2022). Diversos estudios han demostrado que el riego deficitario moderado puede incrementar la productividad del agua y reducir el consumo hídrico en sistemas agrícolas intensivos (Wang et al., 2024; Zhao et al., 2022). Asimismo, investigaciones recientes han señalado que esta estrategia puede disminuir la lixiviación de nutrientes y mejorar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Guo et al., 2025; Ma et al., 2024).



El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una de las hortalizas más importantes y ampliamente cultivadas a nivel mundial, perteneciente a la familia Cucurbitaceae. Este cultivo presenta una elevada demanda en los mercados internacionales debido a su valor nutricional, alto contenido de agua y versatilidad en la alimentación humana (Rahman et al., 2023; Singh et al., 2023). El pepino se desarrolla óptimamente en condiciones de clima cálido con temperaturas entre 18 °C y 24 °C; sin embargo, presenta una alta sensibilidad al estrés hídrico debido a su sistema radicular superficial, lo que puede provocar reducciones significativas en el crecimiento vegetativo y en el rendimiento del cultivo (Sharma et al., 2022; Wang et al., 2024).

El manejo adecuado del riego constituye uno de los factores más determinantes para la productividad del pepino, ya que tanto el déficit como el exceso de agua pueden afectar negativamente el desarrollo de las plantas y la calidad de los frutos (Sharma et al., 2022). Investigaciones recientes han demostrado que el exceso de riego puede provocar lixiviación de nutrientes y disminuir la eficiencia del uso del agua, mientras que niveles moderados de déficit hídrico pueden mejorar la productividad hídrica sin generar pérdidas significativas en el rendimiento del cultivo (Guo et al., 2025; Wang et al., 2024; Zhang et al., 2023). Asimismo, la interacción entre el manejo del riego y la fertilización puede influir significativamente en el crecimiento, la fotosíntesis y la calidad de los frutos en pepino (Ma et al., 2024). En los sistemas de producción hortícola, el cultivo de pepino bajo condiciones de invernadero ha experimentado un notable crecimiento en las últimas décadas debido a su capacidad para mejorar el control de factores ambientales como temperatura, humedad relativa y radiación solar (Singh et al., 2023; Çeliktöpus et al., 2024). La agricultura protegida permite obtener mayores rendimientos, mejorar la calidad de los frutos y extender los periodos de producción durante todo el año, lo que incrementa la rentabilidad del cultivo (Rahman et al., 2023; Singh et al., 2023).

Diversas investigaciones han demostrado que el manejo adecuado del riego en condiciones de agricultura protegida puede mejorar significativamente la eficiencia del uso del agua en cultivos hortícolas (Behzadipour et al., 2024). En particular, el uso de sistemas inteligentes de riego basados en sensores y modelos de evapotranspiración ha demostrado optimizar el consumo de agua en cultivos de pepino bajo invernadero y mejorar la productividad hídrica (Behzadipour et al., 2024; Zhao et al., 2022).



Otra herramienta fundamental para la gestión eficiente del riego es la estimación de los requerimientos hídricos del cultivo mediante el coeficiente de cultivo (K_c). Este parámetro permite relacionar la evapotranspiración del cultivo con la evapotranspiración de referencia, facilitando la programación del riego en diferentes etapas fenológicas del cultivo (Allen et al., 2021). Diversos estudios han demostrado que los valores del coeficiente de cultivo del pepino pueden variar considerablemente dependiendo de las condiciones climáticas, del sistema de producción y del manejo agronómico aplicado (Zhang et al., 2023; Wang et al., 2024). En los últimos años, el desarrollo de tecnologías de agricultura de precisión ha permitido mejorar significativamente el manejo del riego en sistemas hortícolas. El uso de sensores de humedad del suelo, modelos de evapotranspiración y sistemas automatizados de control del riego ha demostrado ser una herramienta eficaz para optimizar la aplicación de agua y mejorar la productividad hídrica en cultivos bajo condiciones de agricultura protegida (Behzadipour et al., 2024; Zhao et al., 2022; Wang et al., 2024).

En este contexto, la evaluación de diferentes niveles de riego basados en la evapotranspiración del cultivo constituye una herramienta clave para optimizar el manejo del agua en sistemas hortícolas. Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de tres niveles de riego basados en la evapotranspiración del cultivo (ET_c) en la producción de pepino híbrido Diamante F1 y Marketmore 76 bajo condiciones de invernadero, así como determinar el coeficiente de cultivo (K_c) mediante la temperatura térmica acumulada, con el fin de generar información que permita mejorar la programación del riego y optimizar el uso del agua bajo las condiciones edafoclimáticas de La Molina, Lima, Perú.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el Centro de Investigación y Extensión en Riego (CIER), perteneciente al Departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), ubicado en el distrito de La Molina, provincia y departamento de Lima, Perú. El área experimental se encuentra geográficamente a $12^{\circ}05'00.7''$ de latitud sur y $76^{\circ}57'05.7''$ de longitud oeste, a una altitud de 235 m.s.n.m. El periodo experimental se desarrolló entre los meses de junio y noviembre. Durante este periodo se monitorearon variables climáticas mediante un termohigrómetro digital HTC-2 y un tanque evaporímetro tipo Clase A (Figura 1).



Las variables registradas incluyeron temperatura máxima y mínima del aire, humedad relativa máxima y mínima, así como evaporación diaria.

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se estimó utilizando el método del tanque evaporímetro Clase A. A partir de los registros diarios se generaron curvas de comportamiento de las variables climáticas y se calcularon promedios mensuales durante todo el periodo experimental. Las propiedades hídricas del suelo se determinaron mediante el método gravimétrico, mientras que la densidad aparente del suelo se estimó mediante el método del anillo volumétrico. El análisis físico-químico del suelo y del agua de riego se realizó en el Laboratorio de Análisis de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la UNALM. Las muestras de suelo fueron colectadas a una profundidad de 0.20 m.

Figura 1. Tanque de evaporación y sistema de riego instalado



Material vegetal

En el estudio se utilizaron semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.) correspondientes a dos materiales genéticos: el híbrido Diamante F1 y la variedad Marketmore 76. El híbrido Diamante F1 se caracteriza por presentar plantas vigorosas con predominancia de flores femeninas. Sus frutos son rectos y cilíndricos, de color verde oscuro, con una longitud promedio de 20 a 22 cm y aproximadamente 6 cm de diámetro en estado de madurez comercial. Este híbrido presenta alta productividad, con rendimientos potenciales cercanos a 70 t ha⁻¹, además de tolerancia a diversas enfermedades y virus que afectan al cultivo del pepino.

Por su parte, Marketmore 76 es una variedad de ciclo intermedio, vigorosa y con floración monoica. Sus frutos presentan color verde oscuro y su desarrollo reproductivo requiere condiciones adecuadas de luz y temperatura para garantizar una adecuada fecundación. La floración se inicia aproximadamente entre los 27 y 34 días después de la siembra (Figura 3), mientras que la cosecha comienza entre los 43 y 50 días y puede extenderse hasta los 75–90 días dependiendo de las condiciones ambientales. Para el establecimiento del experimento se utilizaron 180 macetas plásticas con capacidad de 18 L. Para la preparación del sustrato se emplearon 1890 kg de suelo preparado, 1980 kg de arena de río lavada y 120 kg de humus de lombriz.

Producción de plántulas (Almácigo)

La producción de plántulas se realizó en almácigo utilizando un sustrato compuesto por 5 kg de suelo preparado, 3 kg de humus de lombriz y 2 kg de vermiculita, con el objetivo de proporcionar condiciones adecuadas de aireación, retención de humedad y disponibilidad de nutrientes durante la etapa inicial de crecimiento. La siembra se realizó en cuatro bandejas de germinación con 72 cavidades cada una (Figura 2). En total se sembraron 144 semillas por cada material genético evaluado. Los resultados de germinación mostraron 130 plántulas emergidas en la variedad Marketmore 76 y 112 plántulas en el híbrido Diamante F1.

El porcentaje de germinación obtenido fue de 90.2 % para Marketmore 76 y 77.7 % para Diamante F1. De acuerdo con la ficha técnica de las semillas, se esperaba una tasa de germinación aproximada del 85 %, valor que fue superado por la variedad Marketmore 76, mientras que el híbrido Diamante F1 presentó un porcentaje ligeramente inferior.

Figura 2. Germinación a los 14 días de sembrado



Figura 3. Plantines con 30 días de germinadas



Preparación del sustrato

El sustrato se preparó siguiendo el sistema de enarenado, una técnica utilizada en sistemas intensivos de producción hortícola desarrollada por (Guzmán 2004) en Almería, España. Este sistema consiste en la utilización de diferentes capas de materiales que favorecen la aireación del suelo, el drenaje y el desarrollo radicular de los cultivos.

Para esta investigación se establecieron tres capas principales: 12.5 cm de suelo preparado, 2 cm de abono orgánico y 12.5 cm de arena de río lavada. Adicionalmente, se incorporó una capa basal de 5 cm de grava con el objetivo de mejorar el drenaje del sistema (Figura 4). Posteriormente, las capas fueron mezcladas para obtener un medio de crecimiento homogéneo para el desarrollo de las raíces.

El sustrato final estuvo compuesto por:

- 47 % de suelo preparado
- 49 % de arena de río lavada
- 4 % de humus de lombriz

Cada mezcla se colocó en macetas con capacidad de 18 L que constituyeron las unidades experimentales. Antes del trasplante se realizó un riego intensivo del sustrato con el objetivo de eliminar sales solubles y estabilizar las condiciones de humedad del medio de cultivo.

Trasplante

El trasplante se realizó el 12 de julio de 2022 (Figura 5), aproximadamente 35 días después de la siembra. Para facilitar la extracción de las plántulas y evitar daños en el sistema radicular, el riego de los almácigos se suspendió 24 horas antes del trasplante. Durante esta etapa se aplicó el enraizador comercial RYZOOM con el fin de estimular el desarrollo radicular y reducir el estrés fisiológico asociado al proceso de trasplante, favoreciendo así el establecimiento inicial de las plantas

Poda de formación

La poda de formación se realizó una vez al mes entre los meses de septiembre y noviembre. Esta práctica consistió en la eliminación de hojas senescentes y brotes secundarios con el objetivo de mejorar la ventilación del dosel vegetal, favorecer la penetración de la radiación solar y promover el desarrollo vegetativo y reproductivo del cultivo.



Asimismo, esta práctica contribuyó a mejorar la sanidad del cultivo y a optimizar la distribución de los fotoasimilados hacia la formación y desarrollo de los frutos (Figura 6).

Figura 4. Vista de las 3 capas mezcladas



Figura 5. Trasplante



Figura 6. Poda de formación



Manejo de riego

El riego se aplicó mediante el sistema NetBow de riego por goteo, el cual permite distribuir el agua de manera uniforme alrededor de la zona radicular de las plantas. Los requerimientos hídricos del cultivo se estimaron a partir de la evapotranspiración de referencia calculada mediante el tanque evaporímetro Clase A. Con base en estos valores se programó la lámina de riego aplicada durante el experimento. Se establecieron dos intervalos de riego:

- riego diario
- riego cada dos días

La aplicación del riego se realizó durante las horas de la mañana con el fin de reducir pérdidas por evaporación. Los emisores utilizados fueron goteros autocompensados con un caudal nominal de 2 L h⁻¹, instalados a una distancia de 0.5 m entre emisores y 1 m entre líneas laterales. El sistema operó con una presión de trabajo entre 1.5 y 2 bar. El sistema hidráulico incluyó una bomba centrífuga de 0.5 HP, un filtro de malla de 1" y una válvula de aire para garantizar la estabilidad hidráulica del sistema.

Tiempo de riego

El tiempo de riego se calculó con la ecuación 1

$$T_{riego} = \frac{NR * P_{cf} * 60}{Q_{nom} * E_f * C.U. * FL} \quad (1)$$

Donde:

- Triego = tiempo de riego (min)
- NR = necesidades de riego diarias o evapotranspiración del cultivo (mm día^{-1})
- Pcf = porcentaje de cobertura foliar o porcentaje de sombreado del cultivo
- Qnom = caudal nominal del emisor (L h^{-1})
- Ef = eficiencia del sistema de riego
- CU = coeficiente de uniformidad del sistema
- FL = fracción de lavado

El porcentaje de cobertura foliar (Pcf) fue determinado mediante la proyección del área de sombreado de las plantas sobre la superficie del suelo, considerando el marco de plantación correspondiente a cada tratamiento.

El caudal nominal del emisor (Qnom) fue de 2 L h^{-1} , según la ficha técnica de los goteros autocompensados utilizados en el sistema de riego.

La eficiencia del sistema de riego (Ef) se consideró igual a 0.95, valor típico para sistemas de riego por goteo bien diseñados. El coeficiente de uniformidad (CU) fue determinado mediante dos evaluaciones de campo, una al inicio y otra durante el periodo intermedio del experimento, obteniéndose un valor promedio de 0.99.

La fracción de lavado (FL) se estableció en 0.95 con el objetivo de evitar la acumulación de sales en el sustrato.

Las necesidades de riego (NR) se calcularon a partir de la evapotranspiración del cultivo (ETc), la cual se estimó mediante la relación:

$$ET_c = E_{To} \times K_c$$

Donde:

E_{To} corresponde a la evapotranspiración de referencia

K_c es el coeficiente de cultivo.

Determinación del coeficiente de cultivo mediante temperatura térmica acumulada

El coeficiente de cultivo (K_c) fue estimado mediante el método de temperatura térmica acumulada propuesto por Fernández (2001), ampliamente utilizado para cultivos hortícolas bajo condiciones de

invernadero. Este método se basa en el cálculo del tiempo térmico diario (TT) y su acumulación a lo largo del ciclo del cultivo.

Para el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) se consideraron las siguientes temperaturas cardinales:

- temperatura base (T_b) = 12 °C
- temperatura óptima (T_{op}) = 32 °C
- temperatura umbral o máxima (T_{us}) = 42 °C

El tiempo térmico diario (TT, °C día) fue calculado utilizando las siguientes expresiones:

Caso 1: Si $T_{max} < T_{op}$ y $T_{min} < T_b$:

$$TT = \frac{(T_{max} - T_b)^2}{(2(T_{max} - T_{min}))} \quad (2)$$

Caso 2: Si $T_{max} < T_{op}$ y $T_{min} > T_b$:

$$TT = 0.5 * (T_{min} + T_{max}) - T_b \quad (3)$$

Caso3: Si $T_{max} > T_{op}$:

$$TT = \frac{1}{(T_{max} - T_{min})} * \left[\frac{(T_{op} - T_{min})^2}{2} + (T_{min} - T_b) * (T_{op} - T_{min}) + \left[(T_{max} - T_{op}) * (T_{op} - T_b) * \left(0.5 + \frac{0.5 * (T_{us} - T_{max})}{(T_{us} - T_{op})} \right) \right] \right] \quad (4)$$

Finalmente:

$$TTA = \sum_0^t TT \quad (5)$$

Donde el día 0 corresponde a la emergencia del cultivo, considerando que esta ocurre cuando se alcanzan aproximadamente 80 °C día, o en su defecto en la fecha de trasplante. El parámetro TTA representa el día actual del ciclo de cultivo. El coeficiente de cultivo (Kc) se determinó en función de la TTA utilizando las siguientes relaciones propuestas por Fernández (2001):



- Si $TTA < 180$ entonces $K_c = 0.2$
- Si $180 < TTA < 460$ entonces $K_c = K_{c_{\min}} + 0.0036 \cdot (TTA - 180)$,
- Donde, $K_{c_{\min}}$ es el K_c mínimo
- Si $TTA < 880$ entonces $K_c = K_{c_{\max}}$

Donde $K_{c_{\min}}$ y $K_{c_{\max}}$ corresponden a los valores mínimo y máximo del coeficiente de cultivo, respectivamente.

Fertilización

La fertilización se realizó mediante fertirrigación, aplicando los nutrientes disueltos en el agua de riego. Para ello, el agua utilizada fue previamente almacenada en un tanque de 5000 L, donde se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica (CE), cuyos valores se presentan en la Tabla 1. Durante el proceso de fertirrigación se monitorearon constantemente los valores de pH y conductividad eléctrica de la solución nutritiva con el fin de garantizar condiciones óptimas para la absorción de nutrientes por las plantas. Se procuró que la conductividad eléctrica de la solución nutritiva no superara los 2 ds m^{-1} , mientras que el pH se mantuvo por debajo de 7.5.

Tabla 1. Caracterización del agua

PARAMETRO	VALOR	
CE (1:1)	0.6	ds/m
PH (1:1)	7.67	
ELEMENTOS		
Calcio	4.06	meq/l
Magnesio	0.77	meq/l
Sodio	0.9	meq/l
Potasio	0.07	meq/l

FUENTE: Laboratorio de agua, suelo, medio ambiente, fertirriego, UNALM

Adicionalmente, con el objetivo de mejorar la oxigenación de la solución nutritiva y favorecer la disponibilidad de oxígeno en la zona radicular, se aplicó ozono al sistema de fertirriego.

Las dosis de fertilizantes aplicadas se ajustaron de acuerdo con la etapa fenológica del cultivo, las cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Cantidades de fertilizante según etapa.

ETAPA	Polyfeed inicio y prefloración (gr)	Polyfeed desarrollo y llenado de fruto (gr)	Nitrato de calcio (gr)	Sulfato de Magnesio (gr)	Potasio (GEL)(gr)	Calcio y Boro (GEL) (gr)
ESTABLECIMIENTO	200	0	0	0	0	0
DESARROLLO	2050	0	50	50	100	20
MADUREZ	750	6150	730	300	1516	700

Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2×3 , considerando dos factores experimentales:

Factor A: variedad de pepino

- Diamante F1
- Marketmore 76

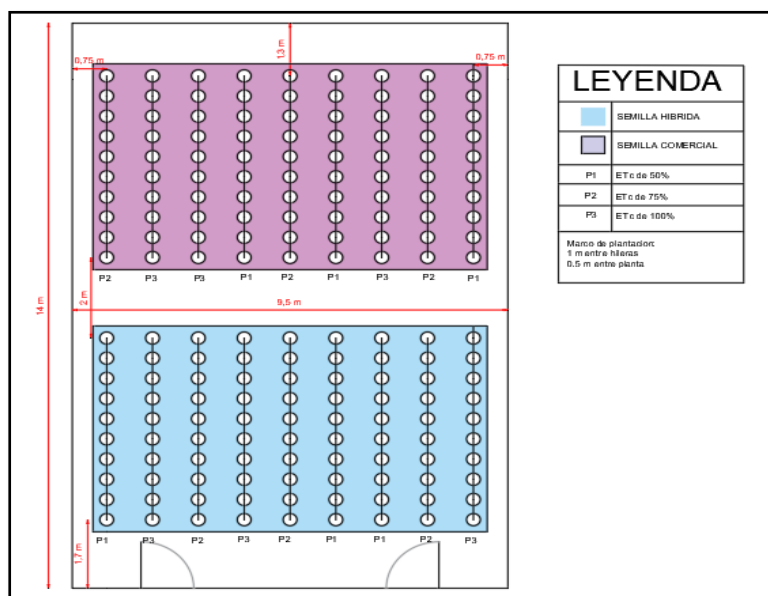
Factor B: lámina de riego

- tres niveles de aplicación basados en la evapotranspiración del cultivo

Cada tratamiento fue replicado ocho veces, resultando en un total de 48 unidades experimentales (6 tratamientos $\times$ 8 repeticiones). El experimento se instaló en condiciones de invernadero. Cada parcela experimental tuvo un área de 45 m², conformada por 9 hileras de 5 m de longitud, con una distancia de 1 m entre hileras.

La distribución espacial de los tratamientos dentro del invernadero se muestra en la Figura 7.

Figura 7: Croquis de la investigación



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperatura y Humedad Relativa dentro del invernadero

Durante el ciclo del cultivo, las condiciones microclimáticas dentro del invernadero mostraron variaciones moderadas tanto en temperatura como en humedad relativa (HR). La temperatura máxima semanal fluctuó entre 23 y 32 °C, mientras que la temperatura mínima osciló entre 12 y 14 °C, desde la etapa de almácigo en junio hasta la fase de maduración del cultivo entre octubre y noviembre (Figura 8). Estas variaciones reflejan la influencia de las condiciones climáticas externas y la limitada capacidad de regulación térmica del invernadero utilizado en el presente estudio.

Los valores registrados se encuentran dentro de los rangos reportados para el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones de agricultura protegida.

Figura 8. Registro semanal promedio de la temperatura.

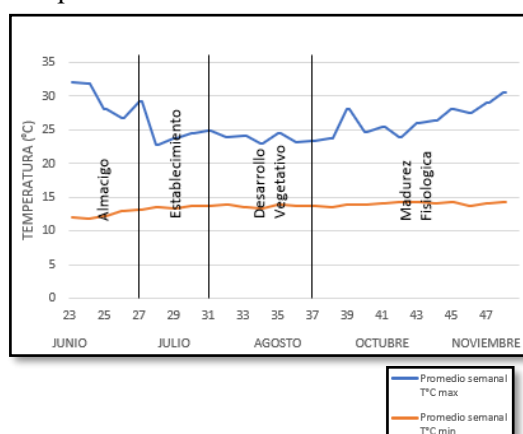
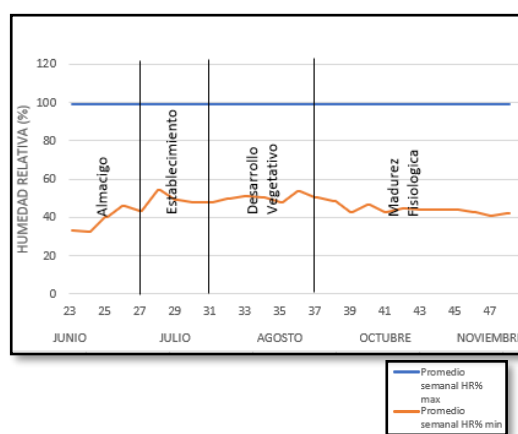


Figura 9: Registro semanal promedio de la humedad relativa



Diversos estudios indican que temperaturas diurnas entre 24 y 30 °C favorecen el crecimiento vegetativo, la fotosíntesis y el desarrollo del fruto en cultivos de pepino cultivados en invernadero (Li et al., 2023). Sin embargo, temperaturas nocturnas inferiores a 15 °C pueden reducir la actividad metabólica del cultivo y afectar negativamente el rendimiento (Zhao et al., 2022).

En relación con la humedad relativa, se observó que la HR máxima se mantuvo cercana al 99 % durante gran parte del ciclo del cultivo, lo cual indica condiciones cercanas a la saturación de vapor de agua dentro del invernadero (Figura 9). Por otro lado, la HR mínima presentó variaciones durante el periodo experimental, registrándose valores relativamente más bajos durante los meses de mayor temperatura, particularmente en junio y noviembre.

Este comportamiento confirma la relación inversa entre temperatura y humedad relativa, fenómeno ampliamente reportado en ambientes protegidos (Shamshiri et al., 2020).

Diversos estudios han demostrado que la humedad relativa es un factor determinante en el crecimiento y productividad del pepino bajo invernadero. En general, el rango óptimo de HR para este cultivo se sitúa entre 60 y 70 %, condiciones que favorecen la transpiración y la absorción de nutrientes (Valdez-Aguilar et al., 2024; Li et al., 2023). Sin embargo, durante el presente estudio se registraron valores superiores a este rango, especialmente durante el periodo nocturno, cuando la HR alcanzó valores cercanos al 99 %. La elevada humedad relativa nocturna puede reducir la transpiración de las plantas, limitar el transporte de nutrientes y favorecer la aparición de enfermedades fúngicas, lo cual puede afectar negativamente el crecimiento y la productividad del cultivo (Shamshiri et al., 2020; Zhao et al., 2022).

En este contexto, las condiciones microclimáticas registradas durante el experimento podría haber contribuido a los niveles relativamente bajos de rendimiento observados en ambas variedades de pepino evaluadas.

Desde una perspectiva agronómica, estos resultados resaltan la importancia de implementar estrategias de manejo del microclima, tales como mejoras en la ventilación natural o ajustes en la época de siembra, con el fin de reducir los niveles excesivos de humedad relativa dentro del invernadero.

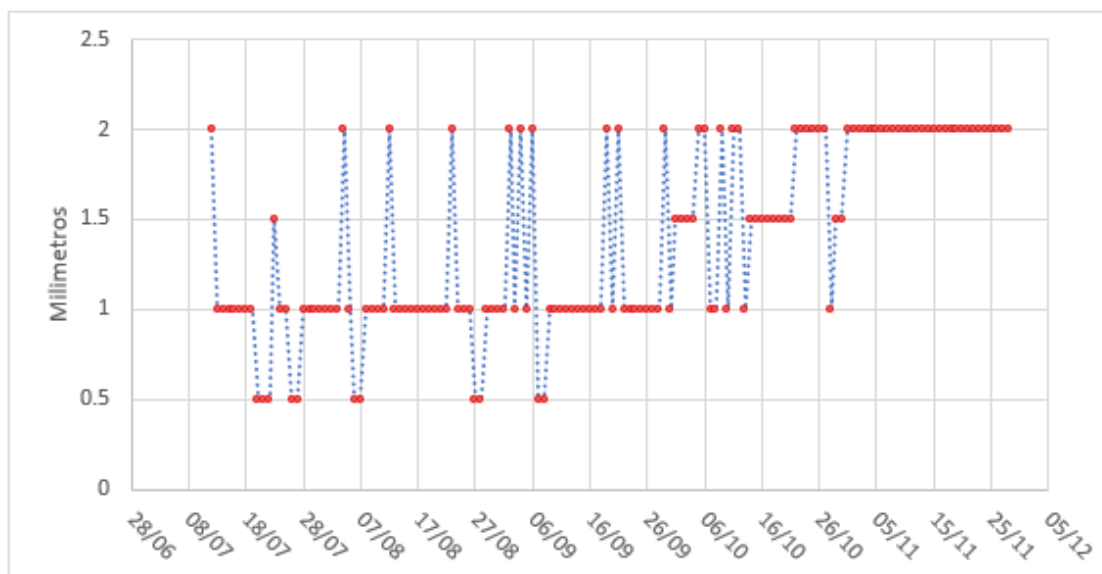
Evaporación del tanque Clase A

La evaporación diaria registrada mediante el tanque Clase A instalado dentro del invernadero presentó variaciones durante el periodo experimental (Figura 10). En general, los valores más bajos de evaporación se observaron durante los meses de invierno, mientras que los valores más altos se registraron durante la primavera. Este comportamiento está directamente relacionado con las variaciones en la radiación solar, la temperatura del aire y la humedad relativa dentro del invernadero, factores que influyen significativamente en la demanda evaporativa del sistema (Liu et al., 2020; Shi et al., 2023).

En condiciones de agricultura protegida, la evaporación del tanque Clase A constituye una herramienta ampliamente utilizada para estimar la evapotranspiración de referencia y programar el riego de manera eficiente.



Figura 10. Evaporación del tanque Clase A dentro del invernadero



Diversos estudios han reportado una estrecha relación entre la evaporación del tanque Clase A y la evapotranspiración del cultivo en sistemas hortícolas bajo invernadero, lo que permite utilizar este método como una alternativa práctica para estimar las necesidades hídricas del cultivo. En particular, se ha observado que la evaporación aumenta en periodos con mayor radiación solar y temperatura, mientras que disminuye durante periodos con menor disponibilidad de energía solar. En este contexto, las variaciones observadas en la evaporación durante el presente estudio reflejan las fluctuaciones del microclima dentro del invernadero y evidencian la importancia de considerar estos cambios para una adecuada programación del riego.

La utilización del tanque Clase A permite ajustar las láminas de riego en función de la demanda evaporativa del sistema, contribuyendo así a mejorar la eficiencia en el uso del agua en cultivos hortícolas bajo condiciones protegidas.

Coeficiente de cultivo (Kc) pepino mediante el método de temperatura térmica acumulada

El coeficiente de cultivo (Kc) para el pepino (*Cucumis sativus* L.) fue estimado mediante el método de temperatura térmica acumulada (TTA) propuesto por Fernández et al. (2001), el cual relaciona el desarrollo fenológico del cultivo con la acumulación de unidades térmicas a lo largo del ciclo productivo.

Los resultados obtenidos mostraron una duración aproximada de 140 días después del trasplante, periodo que fue subdividido en tres etapas fenológicas: establecimiento, desarrollo vegetativo y madurez.

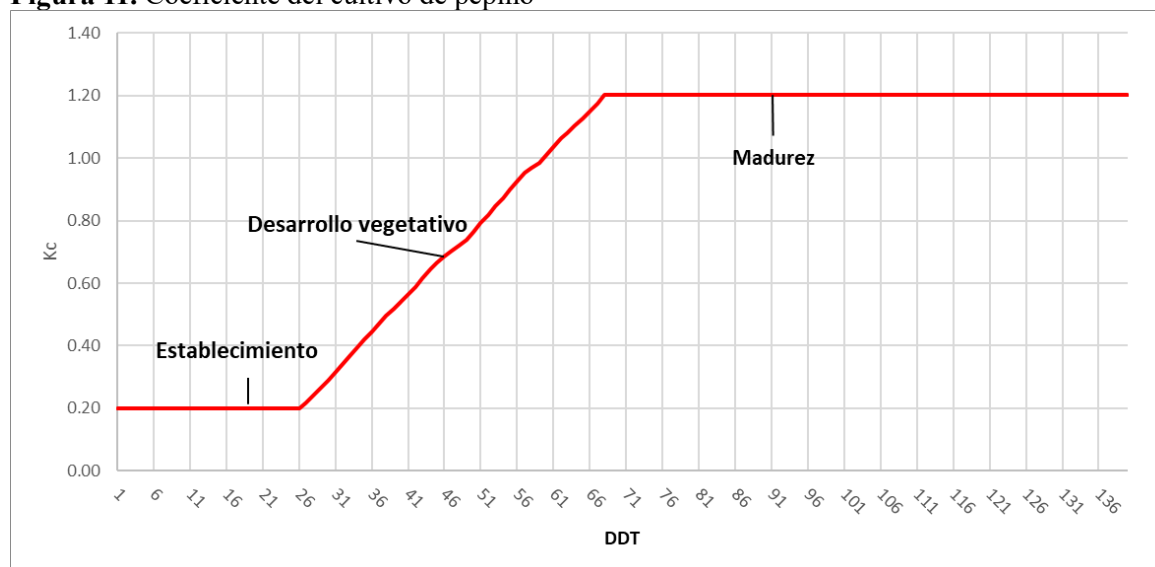
Durante la etapa de establecimiento, que se extendió hasta aproximadamente 26 días después del trasplante, el coeficiente de cultivo presentó un valor constante de $K_c=0.2$ (Figura 11). Este valor relativamente bajo se explica por la limitada cobertura foliar del cultivo durante las primeras fases de crecimiento, lo cual reduce la demanda evaporativa del sistema. Posteriormente, durante la etapa de desarrollo vegetativo, el coeficiente de cultivo mostró un incremento progresivo asociado al aumento de la biomasa aérea y de la superficie foliar activa. Este comportamiento coincide con lo reportado en estudios recientes sobre cultivos de pepino bajo condiciones de invernadero, donde el incremento del índice de área foliar conduce a mayores tasas de transpiración y evapotranspiración del cultivo (Li et al., 2023; Zhang et al., 2021).

Finalmente, durante la etapa de madurez, el coeficiente de cultivo alcanzó su valor máximo y se mantuvo relativamente estable hasta el final del ciclo productivo. Este comportamiento es consistente con investigaciones previas que indican que el K_c tiende a estabilizarse cuando el cultivo alcanza su máxima cobertura vegetal y la evapotranspiración está dominada principalmente por la transpiración del cultivo (Allen et al., 2021; Zhao et al., 2022).

El esquema final del coeficiente de cultivo del pepino bajo las condiciones de invernadero evaluadas se presenta en la Figura 11, donde se observa la evolución del K_c a lo largo de las diferentes etapas fenológicas del cultivo.

Estos resultados son consistentes con estudios realizados en sistemas de agricultura protegida, donde los valores de K_c para pepino suelen variar entre 0.2 en las fases iniciales y aproximadamente 1.1–1.2 en las fases de máximo desarrollo vegetativo (Li et al., 2023).

Figura 11. Coeficiente del cultivo de pepino



En este sentido, la utilización del método basado en temperatura térmica acumulada permite estimar de manera más precisa el coeficiente de cultivo en comparación con métodos basados únicamente en el tiempo cronológico, ya que considera la influencia directa de la temperatura en el desarrollo fisiológico del cultivo. Por lo tanto, este enfoque constituye una herramienta útil para mejorar la programación del riego y optimizar el uso del agua en sistemas de producción hortícola bajo invernadero.

Requerimiento hídrico del cultivo

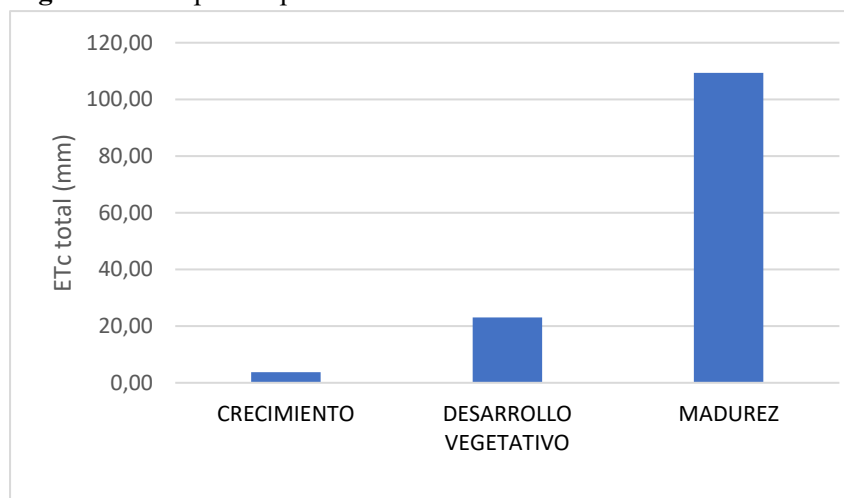
Los resultados del requerimiento hídrico del cultivo de pepino bajo condiciones de invernadero en Lima, Perú, se presentan en la Figura 12.

Los datos evidenciaron que la etapa de madurez o fructificación presentó el mayor requerimiento hídrico alcanzando un valor de 109 mm, mientras que la etapa de crecimiento o establecimiento registró el menor requerimiento, con aproximadamente 3.75 mm. Asimismo, la etapa de desarrollo vegetativo mostró un consumo intermedio, asociado al incremento progresivo de la superficie foliar y de la actividad fisiológica del cultivo.

En términos generales, el requerimiento hídrico promedio del cultivo fue de 0.98 mm día^{-1} , equivalente aproximadamente a $1.15 \text{ L planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$, lo que representa un consumo total cercano a $1540 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ por campaña. Estos valores se encuentran dentro del rango reportado para el cultivo de pepino bajo condiciones de agricultura protegida, donde la demanda hídrica depende principalmente de factores microclimáticos como la temperatura, la radiación solar y la humedad relativa (Zhao et al., 2023).

El mayor consumo de agua observado durante la fase de madurez o fructificación se explica por el incremento de la transpiración del cultivo y del desarrollo del área foliar, lo cual aumenta la evapotranspiración del sistema. Este comportamiento ha sido reportado en diversos estudios sobre cultivos hortícolas en invernadero, donde la evapotranspiración del cultivo tiende a incrementarse conforme el cultivo alcanza su máxima cobertura vegetal y su actividad fisiológica se intensifica (Liu et al., 2020).

Figura 12. Evapotranspiración del cultivo



De manera similar, investigaciones recientes han señalado que el consumo total de agua del pepino cultivado en invernadero puede variar entre 129 y 314 mm por ciclo de cultivo, dependiendo de las condiciones climáticas, el manejo del riego y el sistema de cultivo empleado (Zhao et al., 2023).

Asimismo, otros estudios han reportado requerimientos estacionales cercanos a 242 mm en invernadero, lo cual representa una reducción significativa en comparación con los cultivos establecidos en campo abierto debido al menor efecto del viento y a la reducción de la evaporación directa.

Los resultados obtenidos en el presente estudio coinciden con lo reportado por investigaciones previas, donde se señala que la etapa de fructificación del pepino presenta la mayor demanda hídrica, mientras que la etapa de establecimiento presenta el menor consumo de agua debido a la limitada cobertura foliar y menor tasa de transpiración del cultivo. Este patrón refleja la estrecha relación entre el desarrollo fenológico del cultivo y su demanda hídrica a lo largo del ciclo productivo.

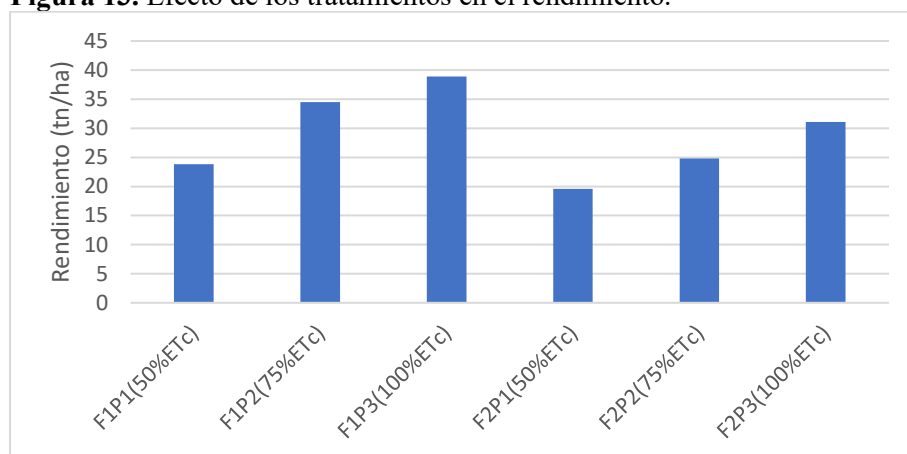
En este contexto, la estimación del requerimiento hídrico del cultivo constituye un elemento clave para la programación del riego en sistemas de agricultura protegida.

Una adecuada estimación de la evapotranspiración del cultivo permite optimizar la aplicación del agua, mejorar la eficiencia del riego y reducir pérdidas de agua en sistemas de producción hortícola bajo invernadero.

Efecto de los tratamientos de agua en el rendimiento

El efecto de los diferentes tratamientos de riego aplicados en función de la evapotranspiración del cultivo (ETc) sobre el rendimiento de frutos se presenta en la Figura 13. Los resultados mostraron diferencias claras entre los tratamientos evaluados y entre las variedades de pepino estudiadas. El mayor rendimiento se registró en la variedad híbrida Diamante F1 bajo el tratamiento P3, alcanzando aproximadamente 38.9 t ha⁻¹, mientras que el rendimiento más bajo se observó en la variedad convencional Marketmore 76 bajo el tratamiento P1, con un valor cercano a 19.58 t ha⁻¹.

Figura 13. Efecto de los tratamientos en el rendimiento.



En general, la variedad híbrida Diamante F1 presentó mayores rendimientos en todos los tratamientos de riego en comparación con la variedad convencional Marketmore 76, lo cual puede atribuirse a su mayor potencial genético de producción, mayor vigor vegetativo y mejor eficiencia fisiológica en el uso de recursos bajo condiciones de agricultura protegida.

Resultados similares han sido reportados en estudios recientes donde los híbridos de pepino cultivados en invernadero presentan rendimientos significativamente superiores a las variedades tradicionales debido a su mayor capacidad fotosintética y mejor adaptación a sistemas intensivos de producción (Zhang et al., 2022; Li et al., 2023). Asimismo, se observó que los tratamientos con mayor reposición de evapotranspiración del cultivo tendieron a producir mayores rendimientos, lo cual evidencia la importancia de un suministro hídrico adecuado durante el ciclo productivo.

Investigaciones recientes han demostrado que el manejo del riego basado en el 100% de la evapotranspiración del cultivo generalmente conduce a los mayores rendimientos en pepino cultivado bajo invernadero, debido a que garantiza un balance hídrico óptimo en la zona radicular y evita condiciones de estrés hídrico que puedan limitar la producción de biomasa y frutos (; Zhao et al., 2023). De manera similar, otros estudios han reportado que los tratamientos de riego cercanos al 100% de ETc producen rendimientos superiores en comparación con estrategias de riego deficitario, aunque en algunos casos niveles moderados de reducción del riego (por ejemplo, 75% de ETc) pueden mantener rendimientos relativamente altos mientras mejoran la eficiencia en el uso del agua (Liu et al., 2020). Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en cultivos hortícolas bajo condiciones de agricultura protegida, donde la respuesta del rendimiento al riego depende tanto del genotipo como de las condiciones microclimáticas del invernadero. Los resultados obtenidos en el presente estudio coinciden con lo reportado en la literatura reciente, donde se señala que la optimización del riego basada en la evapotranspiración del cultivo constituye una estrategia eficaz para maximizar el rendimiento del pepino en sistemas de producción bajo invernadero. En este contexto, el uso de variedades híbridas combinado con un manejo adecuado del riego puede contribuir significativamente a mejorar la productividad y la eficiencia en el uso del agua en sistemas de agricultura protegida.

Efecto de los tratamientos de agua en el crecimiento de la planta

Los resultados obtenidos evidencian que los diferentes tratamientos de agua influyeron significativamente en el crecimiento de las plantas de pepino. Como se muestra en la Tabla 3, la variedad híbrida presentó mayores alturas de planta en comparación con la variedad convencional bajo los mismos tratamientos de riego.

Tabla 3. Efecto de los tratamientos en el crecimiento del pepino

Tratamientos	R (t ha⁻¹)	ADP (cm)
F1P1	23.82	196.83
F1P2	34.5	211
F1P3	38.9	249.67
F2P1	19.58	168.58
F2P2	24.8	171.67
F2P3	31.1	182

Nota: R = Rendimiento; ADP = Altura de planta.

En particular, las alturas promedio registradas para la variedad híbrida en los tratamientos P1, P2 y P3 fueron de 196.83, 211 y 249.67 cm, respectivamente, valores superiores a los obtenidos en la variedad convencional (168.58, 171.67 y 182 cm, respectivamente).

Estos resultados sugieren que la respuesta al manejo del agua depende tanto del nivel de riego aplicado como del genotipo cultivado. Diversos estudios recientes han demostrado que el suministro adecuado de agua favorece significativamente el crecimiento vegetativo del pepino, incrementando variables como la altura de planta, el área foliar y la biomasa acumulada. En este sentido, (Ma et al., 2024) señalaron que la disponibilidad adecuada de agua mejora el metabolismo del carbono y del nitrógeno en plantas de pepino, lo que se traduce en un mayor crecimiento vegetativo y mayor rendimiento del cultivo. De manera similar, Zhang et al. (2024) reportaron que el manejo eficiente del riego en cultivos de pepino bajo condiciones de invernadero mejora el crecimiento de las plantas y optimiza la eficiencia en el uso del agua sin afectar negativamente la productividad.

Asimismo, estudios recientes indican que el manejo del riego mediante sistemas tecnificados, como el riego por goteo o estrategias de fertirrigación, puede incrementar significativamente la altura de planta y los componentes del rendimiento del pepino (Behzadipour et al., 2024). De igual manera, (Khalifa et al. 2024) encontraron que mayores niveles de suministro hídrico incrementan el crecimiento vegetativo del cultivo, reflejado en mayores alturas de planta y mayor desarrollo foliar. En consecuencia, los resultados obtenidos en este estudio confirman que el suministro de agua es un factor determinante en el crecimiento del pepino, evidenciando una relación directamente proporcional entre la disponibilidad hídrica del suelo y la altura de las plantas, lo cual coincide con lo reportado en investigaciones recientes sobre manejo del riego en cultivos hortícolas.

Efecto de los tratamientos de agua en la calidad del fruto.

Los tratamientos de riego aplicados influyeron en los principales atributos de calidad del fruto de pepino, como el peso promedio del fruto, el diámetro y la longitud, tal como se presenta en la Tabla 4. En general, se observó que los mayores valores de estas variables se registraron en los tratamientos con mayor disponibilidad hídrica y en la variedad híbrida, lo cual evidencia la importancia del manejo del agua en el desarrollo y calidad del fruto.

El mayor peso promedio de fruto se registró en el tratamiento P3 de la variedad híbrida (233.2 g), seguido del tratamiento P2 de la misma variedad (211.8 g), mientras que el menor peso promedio se observó en el tratamiento P1 de la variedad convencional (170.9 g). Estos resultados sugieren que una mayor disponibilidad de agua favorece el desarrollo y llenado del fruto. En relación con el diámetro del fruto, el tratamiento P3 de la variedad híbrida presentó el mayor valor (4.60 cm), mientras que el menor diámetro se registró en el tratamiento P1 de la variedad convencional (4.07 cm). Estos resultados coinciden con lo reportado por Bhogi et al., (2025), quienes encontraron que una mayor disponibilidad de agua en sistemas de riego por goteo incrementa el diámetro del fruto debido a una mayor expansión celular durante el desarrollo del cultivo.

Respecto a la longitud del fruto, el mayor valor se obtuvo en el tratamiento P3 de la variedad híbrida (17.49 cm), mientras que el menor valor se observó en el tratamiento P1 de la variedad convencional (15.9 cm). Estudios recientes han demostrado que el manejo adecuado del riego favorece el crecimiento longitudinal del fruto debido a un mayor desarrollo celular y a una mayor disponibilidad de agua para los procesos fisiológicos de la planta Li et al. (2024).

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que el suministro adecuado de agua es un factor determinante en la calidad del fruto de pepino, ya que influye directamente en el peso, diámetro y longitud del fruto. Asimismo, los resultados sugieren que la variedad híbrida presenta una mayor capacidad de respuesta al manejo hídrico en comparación con la variedad convencional, lo cual coincide con lo reportado en estudios recientes sobre manejo del riego en cultivos hortícolas (Khalifa et al. (2024); Li et al. (2024)).

El mayor peso promedio de fruto se registró en el tratamiento P3 de la variedad híbrida (233.2 g), seguido del tratamiento P2 de la misma variedad (211.8 g), mientras que el menor peso promedio se observó en el tratamiento P1 de la variedad convencional (170.9 g). Estos resultados sugieren que una mayor disponibilidad de agua favorece el desarrollo y llenado del fruto.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten concluir que el manejo del riego influye significativamente en el crecimiento y rendimiento del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones de invernadero, evidenciándose que niveles severos de restricción hídrica afectan



negativamente el desempeño productivo del cultivo. En particular, el tratamiento correspondiente al 50 % de la evapotranspiración del cultivo (ETc) generó reducciones significativas en variables relacionadas con el crecimiento vegetativo y el rendimiento, confirmando que una disminución excesiva en la disponibilidad de agua limita el desarrollo adecuado de las plantas. Por otro lado, el tratamiento con aplicación del 75 % de la ETc mostró un comportamiento estadísticamente similar al tratamiento de riego completo (100 % ETc), manteniendo niveles de producción comparables sin afectar variables de calidad del fruto como longitud, diámetro y peso. Estos resultados demuestran que la aplicación de un riego deficitario moderado constituye una estrategia técnicamente viable para optimizar el uso eficiente del recurso hídrico, reducir la huella hídrica del cultivo y avanzar hacia sistemas de producción agrícola más sostenibles, especialmente en contextos donde la disponibilidad de agua representa una limitante productiva.

Los resultados obtenidos indican que el riego deficitario moderado constituye una estrategia viable y sostenible para optimizar el manejo hídrico en la producción de pepino bajo condiciones de agricultura protegida.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alhaj Hamoud, Y., Shaghaleh, H., Shefei, B., Wang, J., Alhaj Hamoud, A., & Abdelsalam, N. R. (2023). Effects of alternate partial root-zone nitrogen fertilization on soil nitrogen distribution, absorption and utilization of apple seedlings. *Agricultural Water Management*, 279, 108173. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108173>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Howell, T. A., & Jensen, M. E. (2021). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6), 899–920. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>
- Awe, G. O., Reichert, J. M., & Wendroth, O. (2021). Drip irrigation and nutrient management improve crop productivity and water use efficiency. *Agronomy*, 11(4), 703. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040703>
- Behzadipour, F., Ghasemi-Nejad-Raeini, M., & Taki, M. (2024). Optimizing water use efficiency in greenhouse cucumber cultivation using smart irrigation systems. *PLOS ONE*, 19(10), e0311699. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311699>



- Bhogi, B., Babu, B. M., Adivappar, N., Premanand, B. D., & Roti, V. (2025). Influence of drip irrigation and plastic mulch on crop growth and yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *International Journal of Plant & Soil Science*, 37(7), 112–124.
- Çeliktöpez, E., Erkan Can, M., & Eriş, H. (2024). Optimizing cucumber growth: integrating smart irrigation with various fertilization strategies in greenhouse conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 53(1), 14332. <https://doi.org/10.15835/nbha5311432>
- Du, T., Kang, S., Zhang, J., & Davies, W. J. (2015). Deficit irrigation and sustainable water-resource strategies in agriculture for China's food security. *Journal of Experimental Botany*, 66(20), 6153–6169. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv313>
- Food and Agriculture Organization. (2023). The state of the world's land and water resources for food and agriculture: Systems at breaking point. FAO.
- Fernández, M. D., Orgaz, F., Fereres, E., López, J. C., Céspedes, A., Pérez, J., Bonachela, S., & Gallardo, M. (2001). Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español. Almería, España: Editorial FIAPA / Caja Rural de Almería.
- Guzmán, M. (2004). El enarenado de Almería. En M. Urrestarazu Gavilán (Ed.), *Tratado de cultivo sin suelo* (3ª ed., pp. 503-529). Mundi-Prensa Libros.
- Guo, Y., Wang, S., Li, D., Nie, J., Gao, L., & Sui, X. (2025). Deficit irrigation improves water use efficiency in greenhouse cucumber production. *Nitrogen*, 6(1), 18. <https://doi.org/10.3390/nitrogen6010018>
- Kang, S., Hao, X., Du, T., Tong, L., Su, X., Lu, H., & Li, X. (2021). Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment. *Agricultural Water Management*, 179, 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.022>
- Khalifa, A. B. A., Hamid, E. H. M., Ahmed, S. B., & Saeed, A. B. (2024). Effect of drip irrigation intervals and fertigation frequency on yield and yield components of cucumber under greenhouse conditions. *Asian Research Journal of Agriculture*, 17 (4):542-49. <https://doi.org/10.9734/arja/2024/v17i4559>



- Li, Y., Zhang, H., Chen, X., & Liu, X. (2023). Effects of irrigation management on crop yield and water productivity: A global analysis. *Field Crops Research*, 294, 108847. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108847>
- Liu, H., Yin, C., Hu, X., Tanny, J., & Tang, X. (2020). Microclimate characteristics and evapotranspiration estimates of cucumber plants in a solar greenhouse. *Water*, 12(8), 2275.
- Li, X., Zhang, M., Liu, H., et al. (2024). Impact of irrigation systems on water saving and yield of greenhouse and open field cucumber production. *Agricultural Water Management*, 302, 108974. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108974>
- Liu, H., Yang, J., Zhang, Y., & Li, X. (2020). Deficit irrigation strategies to improve water use efficiency of greenhouse cucumber production. *Scientia Horticulturae*, 265, 109229. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109229>
- Ma, X., Tan, Z., Cheng, Y., Wang, T., Cao, M., Xuan, Z., & Du, H. (2024). Water–nutrient coupling strategies improve carbon and nitrogen metabolism and yield of cucumber under drip irrigation. *Land*, 13(7), 958. <https://doi.org/10.3390/land13070958>
- Masria, E. A., Elgandy, A. M., Elbagoury, K. F., & Wasif, E. A. (2021). Management of irrigation water for cucumber crop using drip irrigation systems under greenhouse conditions. *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences*, 29(3), 835–844. <https://doi.org/10.21608/ajs.2021.79143.1387>
- Rahman, M. H., Okubo, A., Sugiyama, S., & Mayland, H. (2023). Organic matter management improves soil health and crop productivity. *Sustainability*, 15(7), 11234. <https://doi.org/10.3390/su150711234>
- Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. M. (2020). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A review. *Biosystems Engineering*, 199, 1–26.
- Sharma, N., Singh, S., & Kaur, R. (2022). Water use efficiency and yield response of cucumber under different irrigation regimes. *Scientia Horticulturae*, 295, 110857. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110857>



- Shi, W., Zhang, X., Xue, X., Feng, F., Zheng, W., & Chen, L. (2023). Analyzing evapotranspiration in greenhouses: A lysimeter-based calculation and evaluation approach. *Agronomy*, 13, 3059. <https://doi.org/10.3390/agronomy13123059>
- Singh, R., Kumar, S., & Sharma, A. (2023). Protected cultivation of vegetables for improving productivity and water use efficiency. *Agricultural Systems*, 213, 103742. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2023.103742>
- Valdez-Aguilar, L. A., Hernández-Velázquez, E., Hernández-García, R., Pérez-Rodríguez, P., & Alvarado-Camarillo, D. (2024). Relative humidity and nutrient solution concentration affect cucumber (*Cucumis sativus* L.) yield, quality and nutrient status. *Terra Latinoamericana*, 42, 1968. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1968>
- Wang, X., Li, Y., Zhang, H., & Chen, S. (2024). Irrigation management strategies for improving yield and water productivity in vegetable crops. *Agronomy*, 14, 1187. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061187>
- Zhang, H., Wang, X., Li, Y., & Chen, S. (2022). Effects of deficit irrigation on crop yield and water productivity: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 261, 107366. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107366>.
- Zhang, Y., Li, P., Ren, X., & Sun, H. (2023). Irrigation scheduling based on evapotranspiration improves water productivity in greenhouse vegetable production. *Agricultural Water Management*, 279, 108191. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108191>
- Zhang, Y., Liu, H., Wang, X., & Chen, J. (2024). Deficit irrigation improves water use efficiency in greenhouse cucumber production. *Hydrology*, 11(1), 18.
- Zhao, W., Liu, J., Wang, Y., & Huang, G. (2022). Water-saving irrigation strategies for sustainable vegetable production in arid regions. *Water*, 14(9), 1436. <https://doi.org/10.3390/w14091436>
- Zhao, S., Yan, H., Zhang, C., Li, M., Deng, S., Liang, S., & Jiang, J. (2023). Estimation of cucumber evapotranspiration in greenhouse conditions using crop coefficient models. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 41(8), 849–857.