

Evaluación de diferentes sustratos y frecuencias de fertirriego en el cultivo de pimentón (*Capsicum annuum* L.)

Fimo Alemán Daza ¹; Walter Rojas Herrera ²

¹ Docente Investigador FCAyP-UMSS ² Consultor independiente

E - mail: f.aleman@umss.edu

Resumen. Se investigó el efecto de tres tipos de sustrato y cuatro frecuencias de fertirriego para pimentón híbrido, cultivado en contenedores de polietileno, en invernadero. Las frecuencias de riego se combinaron con los diferentes tipos de sustratos, generando 13 tratamientos en cuatro repeticiones. Se evaluó variables fenológicas, morfológicas y productivas, además se realizó un análisis económico. Se detectó diferencias significativas para todas las variables de respuesta. Para el rendimiento final, con el sustrato fibra de coco, en interacción con la mayor frecuencia de riego (3 veces al día), se alcanzó más de 80 t ha⁻¹, superando significativamente al resto de tratamientos. En el análisis económico, también destaca el mismo tratamiento con el que se tuvo el mayor rendimiento agronómico (sustrato fibra de coco y mayor frecuencia de riego). Se concluye que en el cultivo de pimiento híbrido bajo invernadero, es factible tanto agronómica como financieramente, aplicando sustratos a base de fibra de coco y con altas frecuencias de riego.

Palabras clave: Cultivos en invernadero; riego controlado; suelos preparados; rentabilidad de cultivos

Abstract: Evaluation of Different Substrates and Fertigation Frequencies in Bell Pepper (*Capsicum annuum* L.) Cultivation. The effect of three substrate types and four fertigation frequencies was investigated for hybrid bell pepper, grown in polyethylene pots, under greenhouse conditions. The fertigation frequencies were combined with the different substrate types, generating 13 treatments with four replications. Phenological, morphological, and yield variables were evaluated, and an economic analysis was also conducted. Significant differences were detected for all response variables. For the final yield, the coconut coir substrate, in interaction with the highest fertigation frequency (3 times a day) reached more than 80 t ha⁻¹, significantly outperforming. The economic analysis also identified this treatment as the most profitable, corresponding to the highest agronomic performance (coir substrate with the highest fertigation frequency). It was concluded that hybrid bell pepper cultivation under greenhouse conditions is both agronomically and financially feasible when coir-based substrates and high fertigation frequencies are applied.

Keywords: Greenhouse crops; controlled fertigation; growing substrates; crop profitability

Introducción

El mayor productor mundial de pimiento es China. Le siguen México, Turquía, Indonesia, India y España como el máximo productor europeo. Crece la de-

manda por el aumento de la dieta vegana y vegetariana (Díaz, 2019). En Bolivia los métodos tradicionales que se aplican a la producción del pimentón (*Capsicum annuum* L.), son poco eficientes y costosos, especialmente en cuanto a prácticas

como la fertilización y la aplicación de agua para riego, por lo que es común observar una disminución en el rendimiento, debido principalmente al mal manejo agronómico.

La producción en cultivos hidropónicos bajo condiciones controladas, son una alternativa viable para solucionar estos problemas, ya que las plantas se cultivan en soluciones nutritivas con o sin el uso de sustratos, pero haciendo un uso eficiente de los recursos agua y fertilizante (Ramos, 2006). Como muestra de esta tecnología innovadora, Viracocha y Cadena (2023), reportan rendimientos de 71 t ha⁻¹, en condiciones de invernadero.

Por otra parte, la caracterización de las propiedades físicas y químicas de los sustratos, o medios de crecimiento, es crucial para su uso efectivo y en gran medida condiciona el potencial productivo de las plantas, pues constituyen el medio en el que se desarrollarán las raíces (Ünver *et al.*, 1989). Por tanto, es necesario lograr un sustrato ideal para el cultivo, con la conjunción apropiada del suelo, aparte del componente químico o el abono orgánico como el lombricompost y compost.

A su vez, el fertirriego resulta ideal para el cultivo de pimiento, ya que su aplicación es moderada y constante en todas las fases del cultivo, a pesar de que este cultivo, soporta bien una falta puntual de agua. El riego por aspersión, no se recomienda, porque mojando las hojas y frutos, se favorece el desarrollo de hongos.

El cultivo del pimiento se considera entre sensible y muy sensible al estrés hídrico, tanto por exceso como por deficiencia de humedad. Junto con el abonado nitrogenado, el riego es el factor que más condiciona el crecimiento, desarrollo y produc-

tividad de este cultivo. Un aporte de agua irregular, en exceso o en deficiencia, puede provocar la caída de flores y frutos recién cuajados, siendo aconsejable los riegos poco copiosos y frecuentes (Nuñez, 2017).

La frecuencia de riego permite estimar el número de días transcurridas entre dos riegos consecutivos y corresponde al periodo en que el cultivo agota la lámina neta (Francisco, 2005).

Debido al crecimiento del área sembrada del cultivo de pimentón, y por ser una de las hortalizas de principal utilización a nivel mundial y a nivel local, la presente investigación establece un ensayo sobre un sistema hidropónico abierto en el que se utilizaron sustratos inertes interactuando con frecuencias de riego, contemplando un testigo con aplicación de lombricompost (humus) con manejo realizado convencionalmente; es decir, un sustrato establecido, con riego de acuerdo a los requerimientos de la planta.

Materiales y métodos

El ensayo se realizó en el periodo agrícola 2020-2021, en el invernadero de CIS-MAF/ESFOR emplazado con la cooperación del Japón, en Cochabamba. Previa verificación, observación y diagnóstico del invernadero, se hizo la preparación del lugar, la instalación eléctrica, e instalación de un sistema de riego por goteo.

Preparación de los sustratos utilizados

- **Cascarilla de arroz:** Inicialmente se sometió a calor en un recipiente (tosado), luego se remojó por 8 días en depósitos de 100 litros de agua, el primer día se desinfectó con 2000 cc de cloro comercial por 24 horas, cada día se lavó y cambió el agua. A conti-

nuación, se homogenizó la mezcla, tomando $\frac{1}{2}$ parte (del volumen total) de cascarilla de arroz (755 cm^3) y $\frac{1}{2}$ parte (de volumen total) de arena (755 cm^3), posteriormente se colocó dentro de las bolsas plásticas permeables para permitir el drenaje.

- **Fibra de coco:** La fibra se trituró en una máquina, el material obtenido se expuso en el suelo durante 10 días para su secado, seguidamente se realizó la desinfección con formol y posteriormente fue colocada a las bolsas, finalmente se realizó la mezcla con arena, $\frac{3}{5}$ de fibra de coco, $\frac{1}{5}$ de gravilla y $\frac{1}{5}$ de arena.
- **Viruta y aserrín:** Este material se obtuvo de la carpintería de ESFOR. Se la sometió a un macerado para disminuir el contenido de algunos componentes químicos (taninos y alcaloides), por 20 días, efectuándose el remojo con cambio de agua continuo, posteriormente se recogió en los contenedores para su mezcla en las proporciones: $\frac{3}{5}$ de viruta-aserrín, $\frac{1}{5}$ de gravilla y $\frac{1}{5}$ arena.
- **Compost, humus y suelo del lugar:** El compost se elaboró a partir de hojarasca y ramillas de poda, viruta más aserrín, restos orgánicos de mercado (fruta, verdura), estiércol, malezas, arbustos y ramas delgadas trituradas y agua, en el área de abonos del Centro de Investigación en Silvicultura y Manejo Forestal (CISMAF/ESFOR). Se recogió tres carretillas, se mezcló con el humus CISMAF (elaborado por lombrices californianas con restos orgánicos de mercado, estiércol de ganado vacuno, compost y viruta) y suelo del lugar. Los sustratos fueron cernidos con una malla milimétrica. El suelo del lugar se acopió en dos carre-

tillas de los predios de la ESFOR, posteriormente se mezcló con los demás sustratos, en las siguientes proporciones: $\frac{1}{2}$ suelo del lugar, $\frac{2}{5}$ compost y $\frac{1}{10}$ de humus.

Diseño del sistema de riego por goteo adecuado al ensayo

Para el diseño, se ha adecuado el procedimiento planteado por Vargas *et al.* (2021), considerando dos componentes: *diseño agronómico* y *diseño hidráulico*.

Diseño Agronómico

Necesidades hídricas o balance hídrico del cultivo de pimentón. Es indispensable conocer estas características con el fin de saber el requerimiento de agua del cultivo de pimentón, asimismo determinar cuánta agua se demandará con el diseño y si la fuente de abastecimiento cumple las necesidades de las plantas con el riego localizado. Con este fin, se debe conocer ciertos parámetros, tales como el coeficiente del cultivo (K_c) y la evapotranspiración potencial (E_{To}), para calcular la evapotranspiración del cultivo (E_{Tc}) a partir de la ecuación:

$$E_{Tc} = K_c * E_{To}$$

Cálculo de los parámetros de riego en el requerimiento del sistema. Se calculó los siguientes parámetros: necesidades netas de riego (N_n), necesidades totales de riego (N_t), necesidades diarias por planta (litros planta⁻¹), caudal medio del emisor, superficie ocupada por la planta (m^2), superficie mojada (%), área mojada por el emisor (A_e) en m^2 , número de emisores por planta (e), profundidad del bulbo mojado (P_b), lámina de riego (L_r), intervalo de riego (I_r), tiempo de riego (T_r) y caudal de diseño.

Diseño Hidráulico

Se tomó en cuenta la programación del riego (cuándo y cuánto regar) e instalación de la tubería y conectores del riego a los contenedores; se utilizó una bomba de agua, un contenedor de agua de 1 m³, todo activado con el sistema eléctrico, tal como se grafica en la Figura 1.

Establecimiento del cultivo y labores culturales

Las actividades fueron:

- Almácigo, preparación de las bandejas con 40 tubetes de 150 cc cada uno para la siembra.
- Trasplante, de plantines con 3 hojas a los contenedores.
- Fertirriego, determinación de la dosis de fertilizantes y frecuencias de riego,

aplicación del riego a las frecuencias de riego por goteo y de las dosis de solución nutritiva.

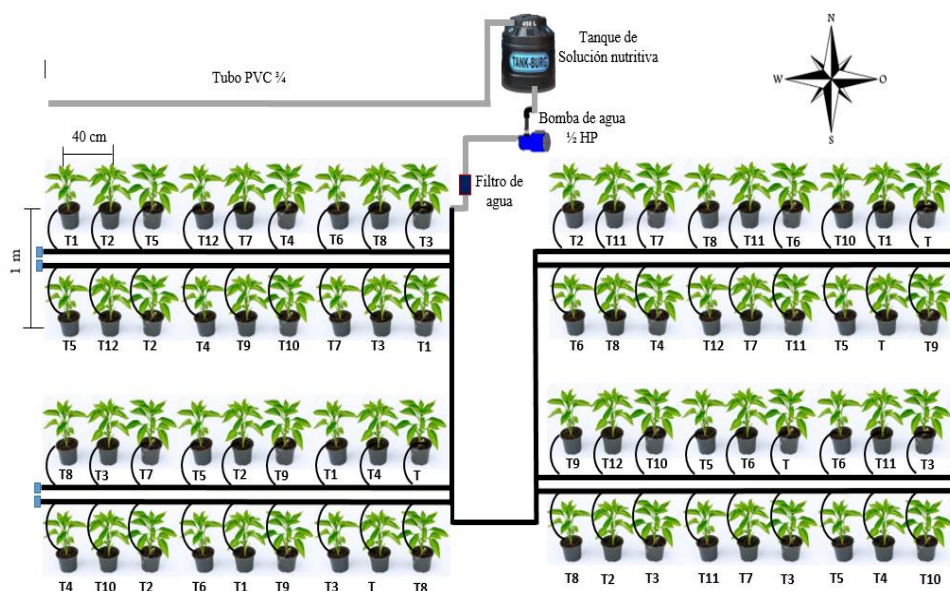
-Labores culturales, durante el desarrollo del ensayo se realizaron los riegos respectivos de acuerdo al requerimiento del cultivo y el desmalezado.

-Control fitosanitario, de plagas y enfermedades

-Poda de ramillas de la planta (Figura 3).

Medición de las variables de respuesta

Se midió y evaluó las variables de respuesta de la investigación, vale decir: *componentes de rendimiento y variables agronómicas*; además, se realizó un análisis financiero / económico de costos de producción, de acuerdo a la fenología del cultivo y los objetivos planteados.



Referencia: Tanque de agua (450 L) conectada a la red de agua con tubo PVC 3/4", bomba de agua de 1/2 HP, filtro de agua, tubos principales y conexiones a cada contenedor con llave de paso. T1...T12 (tratamientos con fertirriego), T (testigo)

Figura 1. Esquema de la estructura de fertirriego y la distribución de los tratamientos

Para el análisis estadístico de las variables de respuesta, se utilizó el programa SAS, comparando las medias al 95% de probabilidad. Se registró los datos del campo con sus respectivas metodologías de evaluación. Los 13 tratamientos fueron evaluados de acuerdo al diseño completamente aleatorio (DCA), con 4 repeticiones por tratamiento; los tratamientos fueron distribuidos aleatoriamente entre las unidades experimentales dentro el diseño del campo experimental.

Macro y micronutrientes aplicados

La Tabla 1, presenta los nutrientes aplicados en los tratamientos de la investigación, tanto en la etapa vegetativa (inicio de floración) como reproductiva (inicio floración hasta la madurez del fruto); asimismo, los elementos que aportó (macro y micronutrientes).

Tratamientos (sustrato * frecuencia de riego)

Los tipos de sustrato (en porcentaje) por componente y la frecuencia de riego aplicada en la investigación, respecto a sus niveles, fueron los siguientes:

Factor 1: Tipos de sustrato

S1 = Aserrín 60% + gravilla 20% + arena 20%

S2 = Cascarilla de arroz 60% + gravilla 20% + arena 20%

S3 = Fibra de coco 60% + gravilla 20%+ arena 20%

S4 = Fibra de coco 25% + cascarilla de arroz 25% +viruta-aserrín 25% + arena 25%

Factor 2: Frecuencia de riego

Fr1 = Frecuencia de riego 3 veces al día (mañana 08:00 AM, medio día 12:00 PM y tarde 18:00 por un tiempo de 1 minuto)

Fr2 = Frecuencia de riego 2 veces al día (mañana 08:00 AM y tarde 18:00 por un tiempo de 1 minuto)

Fr3 = Frecuencia de riego 1 vez al día (8:00 a.m. por un tiempo de 1 minuto)

En base a los dos factores antes detallados, se determinó los siguientes doce tratamientos, que resultan de todas las combinaciones posibles entre los 4 sustratos por 3 frecuencias de riego; además se tuvo un tratamiento testigo:

- T 1** Sustrato 1 * frecuencia de riego 1
- T 2** Sustrato 1 * frecuencia de riego 2
- T 3** Sustrato 1 * frecuencia de riego 3
- T 4** Sustrato 2 * frecuencia de riego 1
- T 5** Sustrato 2 * frecuencia de riego 2
- T 6** Sustrato 2 * frecuencia de riego 3
- T 7** Sustrato 3 * frecuencia de riego 1
- T 8** Sustrato 3 * frecuencia de riego 2
- T 9** Sustrato 3 * frecuencia de riego 3
- T 10** Sustrato 4 * frecuencia de riego 1
- T 11** Sustrato 4 * frecuencia de riego 2
- T 12** Sustrato 4 * frecuencia de riego 3

T 0 Testigo (compost + humus + suelo)

Cada tratamiento tuvo 4 repeticiones, siendo que cada unidad experimental fue una maceta.

Las variables de respuesta fueron:

- **Variables fenológicas y parámetros fenotípicos:** días a floración, altura de planta a la cosecha, diámetro del tallo y longitud y diámetro del fruto.
- **Variables de componentes de rendimiento:** número de frutos por planta, peso de frutos por planta y rendimiento de fruto.

Tabla 1. Fuentes y cantidades de fertilizantes utilizadas para preparar 1000 litros de la solución nutritiva empleada.

Producto (nutrientes)*	Fórmula	Etapa		Elemento que aporta
		Vegetativa ***	Reproductiva	
		1000 g/l ****		
Nitrato de potasio	KNO ₃	827	1267	K, N
Nitrato de calcio	Ca(NO ₃) ₂	253	433	N, Ca
Sulfato de magnesio	MgSO ₄ ·7H ₂ O	400	453	Mg, S
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	383.3	401.5	K, S
Ácido fosfórico**	H ₃ PO ₄	107	113	P
Sulfato de manganeso	MnSO ₄ ·4H ₂ O	2.3	3.4	Mn, S
Sulfato ferroso	FeSO ₄ ·7H ₂ O	57	60	Fe, S
Sulfato de cobre	CuSO ₄ ·5H ₂ O	13	13	Cu, S
Sulfato de zinc	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	9	13	Zn, S
Ácido bórico	H ₃ BO ₃	25	53	B
Bórax	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	5	7	B

*Las concentraciones de nutrimentos corresponden a las indicadas por los fabricantes. **Expresado en ml/l; *** Hasta antes; **** Por cada 1000 g del producto, expresa los g del elemento. (Fuente: Moreno, 2011).

- **Variables económicas:** Valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR), punto de equilibrio por unidades (PEU), precio de equilibrio (PEV), relación beneficio-costos (B/C).

El tratamiento T0 (testigo) se manejó con un sustrato de suelo del lugar 50% + compost 40% + humus 10%, con aplicación de lixiviado de humus de manera fraccionada en tres momentos del cultivo, después del trasplante, antes de la floración y a inicio de fructificación.

El resto de los tratamientos fueron trasplantados en una mezcla de los sustratos indicados, en bolsas de polietileno, aplicando las frecuencias de riego definidas. Se fertilizó mediante el fertirriego en base a una solución nutritiva específica.

Cada unidad experimental fue un contenedor de polietileno de un diámetro de 25 cm y una altura de 40 cm, equivalente a un contenedor de 19.6 litros de volumen, perforándose en la base para el drenaje.

Se tuvo 52 contenedores para tener las unidades experimentales correspondientes a los 4 sustratos interactuando con las 3 frecuencias de riego, con 4 repeticiones por tratamiento.

Modelo estadístico

El modelo estadístico utilizado fue diseño completamente aleatorio (DCA). En base a este modelo se realizó el análisis de varianza, utilizando el PROC MIXED del paquete estadístico SAS[®] (versión 8.2), para estimar los componentes de varianza de los efectos aleatorios y probar hipótesis del efecto fijo y la prueba de medias por el método de Duncan.



Figura 2. Vista general del ensayo en invernadero



Figura 3. Desarrollo del pimentón híbrido en fructificación con poda

Resultados y discusión

PARÁMETROS FÍSICOS DE LOS SUSTRATOS

El análisis de 10 parámetros físicos de los sustratos, se muestra en la Tabla 2, la cual permite apreciar las marcadas diferencias entre los 4 sustratos considerados. Estos valores fueron determinantes para explicar las diferencias encontradas en el desarrollo del pimentón, como respuesta a los sustratos en interacción con el riego. Destaca la profundidad efectiva de la raíz, que en todos los casos es la misma, mostrando la igualdad de condiciones físicas de los 4 sustratos.

BALANCE HÍDRICO

La evapotranspiración potencial, por método del “tanque de evaporación clase A”, registró como valor máximo: 49.04 mm semana⁻¹, con un promedio de 36.50 mm semana⁻¹ y valor mínimo de 31.07 mm semana⁻¹, medidos en el invernadero.

Una investigación realizada por Gómez, *et al.* 2010, refiere que la evaporación siguió una tendencia lineal creciente, con promedios diarios de 4.2 mm hasta 5.6 mm, en la época de más alta temperatura, alcanzando un acumulado de 692.5 mm en un periodo de 122 días, en el cultivo de pimentón bajo invernadero.

Tabla 2. Parámetros físicos de 4 sustratos utilizados en el cultivo de pimentón híbrido.

Parámetro	Unidad	S1	S2	S3	S4
Capacidad de campo (CC)	%	43	49	67	45
Punto de marchitez permanente (PMP)	%	28.97	15.00	12.00	13.00
Densidad aparente (Da)	g.cc ⁻¹	0.03	0.08	0.12	1.55
Densidad real (Dr)	g.cc ⁻¹	0.65	1.47	1.57	1.33
Profundidad efectiva de la raíz (Prof. Efc)	mm	487.5	487.5	487.5	487.5
Potencial de hidrogeno (pH)		5.6	7.1	6.4	6.1
Materia orgánica (MO)	%	85	90	19	80
Espacio poroso (P)	%	95.0	91.1	92.3	78.0
Velocidad de infiltración básica (VIB)	dm ³ min ⁻¹	1.98	0.19	0.02	0.19
Conductividad eléctrica (CE)	dS·m ⁻¹	0.63	1.43	0.39	0.99

VARIABLES FENOLÓGICAS Y PARÁMETROS FENOTÍPICOS

En la Tabla 3 se muestra los valores medios para cinco variables de respuesta evaluadas, donde al ANVA, en todos los casos, se detectó diferencias significativas ($p < 0.05$) para la interacción de los factores *tipo de sustratos* empleados, con la *frecuencias de riego* aplicada.

• *Días a la floración*

El periodo total del cultivo fue de casi 100 días (desde el trasplante), con extremos de 67 a 126 días, es decir con un rango de casi dos meses.

Laura (2016), evaluando variedades de pimentón en invernadero, registró un periodo de 100 a 106 días a la floración después del trasplante. En contraste, en el presente ensayo, el testigo floreció aproximadamente dos semanas antes (84 días), mientras que las plantas con cascarilla de arroz mostraron un retraso, tardando hasta 126 días.

• *Altura de planta*

Desde una perspectiva fisiológica, se destaca que en los dos tratamientos experimentales que compartieron la frecuencia de riego 2 (Fr2), este factor estimuló positivamente el crecimiento. En contraste, las combinaciones T7 (S3-Fr1) y T4 (S2-Fr1) obtuvieron tallos más cortos.

Esta diferencia resalta el impacto crítico de la frecuencia de riego; por ejemplo, al pasar de Fr2 (T8) a Fr1 (T7) sobre el mismo sustrato de fibra de coco, el crecimiento vertical se vio significativamente restringido debido al menor suministro hídrico.

Alemán *et al.* (2018), en ensayos de invernadero reportan una altura de 136 cm a los 72 días del trasplante, aproximadamente 30 días menos a los resultados encontrados, lo cual sugiere que factores ambientales o de manejo de la nutrición en su estudio, favorecieron una tasa de elongación celular más eficiente, en comparación a lo reflejado en el presente estudio.

• *Diámetro del tallo*

Las plantas desarrolladas en el sustrato de humus + compost + suelo del lugar (T0) presentaron el mayor grosor de tallo. En orden descendente, le siguieron los tratamientos basados en fibra de coco: seguidos por las variantes de aserrín. Los tratamientos que restringieron el crecimiento del tallo fueron los compuestos por cascarilla de arroz.

• *Longitud del fruto*

El tratamiento T7 (fibra de coco + Fr1) registró el mayor valor para esta variable, seguido por el testigo T0 y el tratamiento T4 (aserrín + Fr1). En contraposición, el crecimiento longitudinal más limitado ocurrió en el tratamiento T1 (cascarilla de arroz + Fr1).

Dicho comportamiento resalta la superioridad del híbrido “Corsario” frente a variedades de polinización libre como “Yolo Wonder”, la cual promedia solo 8.4 cm en invernadero. Finalmente, los valores de T7 se aproximan a los rangos comerciales de este híbrido en Cochabamba (15 a 20 cm), validando la capacidad de la fibra de coco en esta variable tan importante a nivel comercial, como es el tamaño de fruto, en este caso en la longitud del mismo.

Tabla 3. Valores medios de aspectos fenológicos y parámetros fenotípicos en pimentón cultivado en invernadero, como respuesta a diferentes sustratos y frecuencias de riego.

Tratamiento	Días a la floración	Altura de planta (cm)	Diámetro del tallo (mm)	Longitud del fruto (cm)	Diámetro del fruto (cm)
T 0 (testigo)	84 fg	91.1 ab	17.6 a	12.0 b	10.4 b
T 1	126 a	35.9 f	7.7 h	5.2 e	3.8 f
T 2	113 bc	44.1 ef	9.1 g	7.5 de	5.9 de
T 3	106 cd	52.7 de	10.7 f	6.9 de	5.1 e
T 4	67 h	76.3 c	14.2 cd	11.4 bc	8.4 c
T 5	97 de	110.2 a	13.4 cd	9.3 cd	7.9 c
T 6	102 cde	54.7 de	13.2 de	8.8 d	6.2 d
T 7	75 gh	84.7 bc	15.0 bc	14.6 a	12.5 a
T 8	94 ef	103.4 a	12.6 e	9.0 cd	8.9 c
T 9	104 cde	63.4 d	15.9 b	8.8 d	6.0 de
T 10	98 de	51.6 de	9.0 g	7.6 de	6.5 d
T 11	105 cd	38.6 f	8.9 gh	7.2 de	5.6 de
T 12	118 ab	37.6 f	9.4 g	8.3 d	5.6 de
Promedio	99.15	64.9	12.1	9.0	7.0
Desviación estándar	16.48	25.6	3.16	2.45	16.48

Valores que comparten una misma letra, se consideran estadísticamente iguales, según la prueba de Rangos Múltiples de Duncan.

• Diámetro del fruto

El valor máximo para el diámetro de fruto se obtuvo en el tratamiento T7 (fibra de coco + Fr1) seguido por el testigo T0 (humus + compost + suelo del lugar). En el extremo opuesto, el sustrato que restringió drásticamente el crecimiento del fruto fue la cascarilla de arroz en el tratamiento T1 (S1-Fr1).

Al respecto, Canovas *et al.* (1993), señalan que el uso de poda permite obtener mayor rendimiento de diámetro y longitud de fruto debido a la concentración de una parte de los nutrientes en la zona basal de la planta. Igualmente, se afirma que para la variable diámetro del fruto, los resultados son similares a los presentados por Aguilar (2019), encontrando

diferencias entre variedades estudiadas, obteniendo un diámetro ecuatorial de fruto de 8.58 cm en la variedad California Wonder y 7.82 cm para el híbrido “Corsario”.

VARIABLES DE COMPONENTES DE RENDIMIENTO

La Tabla 4 muestra los datos medios de dos variables de respuesta ligadas al rendimiento del pimentón en las condiciones del ensayo.

El ANVA, en ambos casos, detectó diferencias significativas ($p < 0.05$) para la interacción del tipo de sustratos en combinación con las frecuencias de riego aplicadas.

Tabla 4. Valores medios de componentes de rendimiento, en pimentón en invernadero, como respuesta a diferentes sustratos y frecuencias de riego.

Tratamiento	Frutos por planta	Peso de frutos por planta (g)
T 1	4 f	107 g
T 2	7 bc	105 g
T 3	5 d	122 f
T 4	9 a	249 b
T 5	7 bc	193 c
T 6	5 de	138 de
T 7	10 a	408 a
T 8	8 ab	195 c
T 9	6 cd	190 c
T 10	7 bc	157 d
T 11	4 ef	122 ef
T 12	4 ef	108 fg
T 0 (testigo)	10 a	246 b
Promedio	7	180
Desviación estándar	2.18	85.03

Valores que comparten una misma letra, se consideran estadísticamente iguales, según la prueba de Rangos Múltiples de Duncan.

• Número de frutos por planta

Los tratamientos T7 (fibra de coco + Fr1) y el testigo T0 obtuvieron la máxima carga con 10 frutos por planta, seguidos estadísticamente por T4 (aserrín + Fr1). Por el contrario, los sustratos de cascari-lla de arroz pura (T1, T11 y T12) deprimieron el rendimiento reproductivo, registrando los promedios mínimos de 4 frutos por planta. La respuesta favorable de T7 y T4 bajo la frecuencia de riego 1 demuestra la eficiencia de la fibra de coco y el aserrín para optimizar la retención hídrica radicular. Dicha condición estimuló una mayor diferenciación floral y un cuajado eficiente. Estudios efectuados por Quiñonez *et al.* (2020), reportan hasta 7 frutos por planta, aplicando humus de lombriz.

• Peso promedio de frutos por planta

El máximo valor se registró en el tratamiento T7 (fibra de coco + Fr1), seguido estadísticamente por T4 (aserrín + Fr1) y el testigo. Los tratamientos T8, T5 y T9 exhibieron un comportamiento intermedio, mientras que los sustratos de cascari-lla de arroz pura (T1 y T2) limitaron severamente el desarrollo, con las medias más bajas para esta variable.

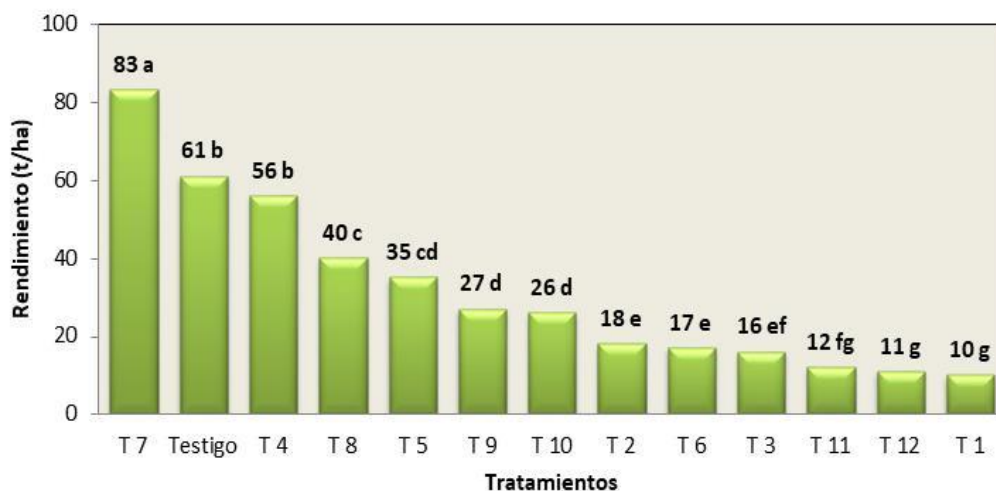
Elizondo y Monje (2017), en una evaluación de rendimiento de genotipos de pimiento, cultivados bajo invernadero en Costa Rica, reportan entre 131g a 243 g de peso de fruto por planta, entre primera y segunda clase de calidad de fruto.

• Rendimiento de fruto

La Figura 4 grafica los valores promedio para el rendimiento del pimentón híbrido, como respuesta a la aplicación de los tratamientos evaluados.

El valor máximo se registró en el tratamiento T7 (fibra de coco + Fr1) con más de 80 t ha⁻¹, seguido en orden descendente por el testigo T0 con 20 t menos que el T7 y el tratamiento T4 (aserrín + Fr1) con una media de 56 t ha⁻¹, no existiendo diferencias estadísticas significativas entre estos dos últimos tratamientos. Los menores rendimientos se concentraron en los sustratos con cascari-lla de arroz pura, específicamente en T12 y T1, los cuales promediaron únicamente niveles de producción cercanos a las 10 t ha⁻¹.

Ríos (2015), en un estudio del efecto de niveles de lombriz bajo carpa solar, reporta de 107 a 114 t ha⁻¹ como resultado de aplicación media de humus, logrando un 53% más que el testigo del presente estudio.



Valores que comparten una misma letra, se consideran estadísticamente iguales, según la prueba de Rangos Múltiples de Duncan.

Figura 4. Valores medios del rendimiento en fruto, en pimentón híbrido cultivado en invernadero, como respuesta a diferentes sustratos y frecuencias de riego.

Por otra parte, Elizondo y Monje (2017), en una investigación de 15 genotipos de pimentón en invernadero, con fertirriego, lograron un rendimiento comercial de 44 a 77 t/ha.

Un estudio reportado por Moreno *et al.* (2011), sobre fenología y rendimiento de un híbrido de pimentón en cultivo hidropónico, indica que tuvo buena calidad de fruto, con peso promedio individual de 178.7 g, así como mayor anchura (9.2 cm) y longitud (7 cm), comportándose como frutos de primera calidad, dentro del mercado local; a su vez, reporta el mayor rendimiento de 190 t ha⁻¹, y por parcela con 115 t ha⁻¹; el menor rendimiento fue de 57 t ha⁻¹, en algunos casos, rendimientos próximos a los reportados por la presente investigación.

Es importante hacer notar, a la luz de los resultados obtenidos, que el rendimiento final del pimentón, muestra una tendencia inversamente proporcional a la precocidad del cultivo, así, la siguiente figura

muestra el análisis de correlación para estos dos parámetros.

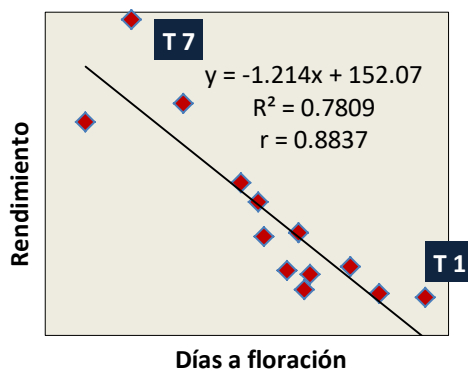


Figura 5. Correlación entre el rendimiento con los días a floración en pimentón cultivado en invernadero.

El mayor rendimiento agronómico se obtuvo con el tratamiento, en el cual, el periodo de desarrollo fue menor; mientras que ante un periodo mayor crecimiento -como en el caso del tratamiento 1-, el rendimiento de frutos, por unidad de superficie, fue marcadamente menor.

Este comportamiento es reflejo de la decisiva incidencia de los factores aplicados, sobre el comportamiento fenológico de la especie cultivada y su consecuente incidencia en la producción, en este caso del pimentón, bajo las condiciones del presente ensayo, incluso superando barreras fisiológicas que llevarían a pensar, *a priori*, que el rendimiento agronómico está relacionado de manera directamente proporcional a la duración del ciclo del cultivo.

ANÁLISIS DE COSTOS PARCIALES DE PRODUCCIÓN

• Costos de producción

La Tabla 5 presenta un desglose de los costos en fijos y variables para la producción de pimentón hidropónico (sistema abierto -sin incluir costos del invernadero-), determinando que los costos fijos alcanzaron más de 80% y los variables al menos el 20%.

Tabla 5. Costos de producción

Costos	Bs	%
Fijos	5,013	82.27
Variables	1,080	17.73
Totales	6,093	100

En la Tabla 6, se muestra los beneficios brutos de campo (Bs planta⁻¹), que corresponde el valor del fruto en el mercado, multiplicado por los rendimientos ajustados. Para el total de los costos que varían (Bs planta⁻¹), se sumaron los insumos y materiales que se utilizaron en cada uno de los sistemas de siembra; este costo se restó a los beneficios brutos y se

obtuvieron los datos de beneficios netos (Bs planta⁻¹).

El mayor beneficio neto se obtuvo con el tratamiento T7 (sustrato 3 + frecuencia de riego 1) con 17.40 Bs planta⁻¹. En contraste, el tratamiento T12 (sustrato 4 + frecuencia de riego 3), registró la mayor pérdida económica con -1.06 Bs planta⁻¹ (Tabla 6).

• Punto de equilibrio

Las ventas necesarias para que el productor opere sin pérdidas ni ganancias, debe ser de 486.7 kg, siendo el precio de 17 Bs kg⁻¹; si las ventas del cultivo están por debajo de esta cantidad, el productor pierde, y por arriba de la cifra mencionada son utilidades para el productor. Con esta cantidad de ventas, con el producto se obtiene Bs 8,419.98, que representa el punto de equilibrio monetario.

Los supuestos empleados en la estimación del punto de equilibrio fueron: el precio unitario Bs 17.30, el costo variable unitario Bs 7.00 y el costo fijo total Bs 5,013.00 en los meses de marzo y abril (Tabla 4). Los precios del pimentón son reportados periódicamente por los diarios locales (*Opinión* y *Los Tiempos*) y cadenas de televisión (*Unitel* y *Red Uno*).

• Análisis económico de presupuesto parcial de los tratamientos

Los mayores beneficios netos en Bs por planta, se alcanzaron con los tratamientos T7, T4 y el testigo (T0) con Bs 17.4; 8.3 y 5.0, respectivamente, relacionados directamente con los rendimientos.

Tabla 6. Beneficio neto parcial (Bs planta⁻¹)

Rubros	Tratamientos												
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T0
Rendimiento bruto (kg·Plta ⁻¹)	0.40	0.70	0.65	2.23	1.39	0.68	4.07	1.60	1.08	1.05	0.49	0.43	2.45
Rendimiento ajustado (kg·Plta ⁻¹)	0.39	0.68	0.63	2.16	1.35	0.66	3.94	1.55	1.05	1.02	0.47	0.42	2.38
Beneficio bruto (Bs Plta ⁻¹)	2.06	3.62	3.34	11.52	7.19	3.50	21.00	8.25	5.59	5.45	2.53	2.24	12.6 ₈
Costos que varían semi-llas (Bs·Plta ⁻¹)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Costo de sustratos (Bs·Plta ⁻¹)	2.50	2.50	2.50	2.60	2.60	2.60	3.00	3.00	3.00	2.70	2.70	2.70	7.00
Llenado del sustrato (Bs·Plta ⁻¹)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Total de costos variables (Bs/Plta ⁻¹)	3.10	3.10	3.10	3.20	3.20	3.20	3.60	3.60	3.60	3.30	3.30	3.30	7.60
Beneficio neto (Bs Plta ⁻¹)	-1.04	0.52	0.24	8.32	3.99	0.30	17.40	4.65	1.99	2.15	-0.77	-1.06	5.08

• *Análisis de resultados financieros (Beneficio / costo, VAN y TIR)*

La relación Beneficio-Costo (B/C), se estimó con base en todos los flujos de caja del proyecto (la división de VAN = 3,430 y el flujo neto para el año “0” - 3,164). Del análisis de este indicador se obtiene un beneficio de 1.08 Bs por cada 1 Bs invertido.

• *Valor actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR)*

Se obtuvo un *valor actual neto* (VAN) de Bs 3,430, valor superior a cero y una *tasa interna de retorno* (TIR) de 39% (Tabla 7); por lo tanto, la investigación de cultivo de pimiento en condiciones de invernadero, es factible realizar tanto financiera como económicamente.

Se establece que el período de recuperación de la inversión del cultivo de pimiento en invernadero, es de 3 a 4 años; es decir, se recupera la misma en un tiempo aceptable (Tabla 7).

Conclusiones

El análisis estadístico del estudio evidenció diferencias estadísticas significativas en las variables agronómicas y de rendimiento por el efecto interactivo evaluado.

- Respecto a los sustratos, se determinó que la mezcla con 60% de fibra de coco, es la opción óptima para maximizar el rendimiento agronómico y comercial del cultivo; este soporte garantizó una retención hídrica del 67% a capacidad de campo, logrando frutos de 14.6 cm de longitud, 12.5 cm de diámetro y 408 g por planta. Como alternativa, el aserrín demostró viabilidad y economía a nivel local, mientras que la cascarilla de arroz limitó el desarrollo por su baja retención y alta porosidad. El tratamiento testigo de suelo, compost y humus, fue altamente competitivo, alcanzando tallos de gran vigor con 17.6 mm y un rendimiento de 61 t ha⁻¹.

Tabla 7. Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) del cultivo de pimienta

Detalle	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Flujo de inversión (Bs)	3,164.00	0.00	0.00	0.00	0.00	648.13
Flujo de producción (Bs)	0.00	1,019.63	1,342.86	1,682.24	2,038.60	2,412.77
Flujo neto (Bs)	-3,164	1,020	1,343	1,682	2,039	3,061
					VAN	3,430
					TIR	39%

- En cuanto al riego, la frecuencia de tres aplicaciones cortas diarias resultó óptima. Este fraccionamiento mantuvo una humedad radicular constante sin generar estrés. Además, estimuló la precocidad floral a los 67 días en aserrín y 75 días en fibra de coco, dicho manejo, aseguró el mayor cuajado, registrando 10 frutos por planta en fibra y testigo.
- Por otra parte, el sistema de fertirriego por goteo en la ESFOR, fue eficiente; donde el uso de contenedores de 19.6 litros y emisores calibrados, suplió la demanda exacta. El balance hídrico del cultivo acumuló una evapotranspiración total de 692.5 mm a lo largo de un ciclo completo de evaluación que se extendió por 122 días. El diseño hidropónico abierto maximizó el uso eficiente del agua y fertilizantes.
- El análisis financiero confirmó la rentabilidad del sistema con una relación B/C de 1.08. La combinación de fibra de coco y la frecuencia de tres riegos, logró un récord de rendimiento de pimentón, llegando a 83 t ha⁻¹. Esta producción excepcional, junto al testigo, optimizó la estructura de costos directos; al maximizar el volumen por superficie, se diluyeron los costos fijos y variables.
- Se concluye que el éxito del pimentón híbrido bajo invernadero, requiere la integración de sustratos de alta retención hídrica, combinados con un suministro de riego fraccionado.

Referencias citadas

- Alemán, R., Domínguez, J., Rodríguez, Y., Soria, S., Torres, R., Vargas, J., Brava, C., y Alba, J. (2018). Indicadores morfofisiológicos y productivos del pimienta sembrado en invernadero y a campo abierto en las condiciones de la Amazonía Ecuatoriana. *Centro Agrícola*, 45(1), 14-23.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852018000100002
- Canovas, F., Magna, J. J., y Boukhalfa, A. (1993). Cultivos sin suelo: Hidroponía. *Técnicas de producción de frutas y hortalizas en los cultivos protegidos del Sureste español*. Instituto de la Caja Rural de Almería.
- Díaz, I. (2019). Los pimientos vinieron de América y conquistaron el mundo. *Revista Distribución y Consumo*, 3(29), 98-99.

- Elizondo-Cabalceta, E., y Monge-Pérez, J. (2017). Evaluación de rendimiento y calidad de 15 genotipos de pimiento (*Capsicum annuum* L.) cultivados bajo invernadero en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 30(4), 3–7.
- Santa Olalla Mañas, F. M. de, y López Fuster, P. L. (2005). *Agua y agronomía*. Grupo Mundi-Prensa.
- Uribe C., H., y Martínez, I. (s.f.). [Título del artículo ausente en origen]. *Tierra Adentro*. <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/ta/NR25606.pdf>
- Gómez, A., Rojas, H., Vallejo, F., y Estrada, E. (2010). *Determinación del requerimiento hídrico del pimentón en el municipio de Candelaria, departamento del Valle del Cauca* [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL.
- Laura, B. (2016). *Evaluación del comportamiento agronómico de tres variedades de pimentón (*Capsicum annuum* L.), aplicando abono líquido bajo invernadero en la estación experimental de Cota Cota - La Paz* [Tesis de grado, Universidad Mayor de San Andrés]. Facultad de Agronomía - UMSA.
- Moreno, E., Mora, R., Sánchez del Castillo, F., y García, V. (2011). *Fenología y rendimiento de híbridos de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) cultivados en hidroponía* [Reporte de investigación, Universidad Autónoma Chapingo].
- Núñez, J. (2017). *Uso de abono orgánico en el crecimiento de plántulas de pimiento (*Capsicum annuum*)* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi].
- Quiñonez, J., Tandazo, J., y Arias, J. (2020). Producción de pimiento (*Capsicum annuum* L.) mediante la aplicación de abonos orgánicos. *Journal of Science and Research*, 5(2), 48–55.
- Ramos G., F., y de Luna J., A. (2006). Evaluación de tres variedades de chile (*Capsicum annuum* L.) en cuatro concentraciones de una solución hidropónica bajo invernadero. *Investigación y Ciencia*, 14(34), 22–29.
- Ríos, P. (2015). *Efectos de tres niveles de humus de lombriz en tres variedades de pimiento (*Capsicum annuum* L.) bajo carpa solar en el Centro Experimental de Cota Cota* [Tesis de grado, Universidad Mayor de San Andrés]. Facultad de Agronomía-UMSA.
- Ünver, I., Ataman, Y., Çanga, M. R., y Munsuz, N. (1989). Buffering capacities of some mineral and organic substrates. *Acta Horticulturae*, 238, 83–89.
- Vargas-Rodríguez, P., Dorta-Armaignac, A., Fernández-Hung, K., y Méndez-Jocik, A. (2021). Consideraciones para el diseño racional de sistemas de riego por goteo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 30(4), Artículo e05.
- Viracocha-Mamani, P. M., y Cadena-Miranda, F. A. (2023). Incorporación de *Trichoderma harzianum* para la reducción del ataque de la tristeza del pimiento (*Phytophthora capsici*). *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales (RIIARN)*, 10(3), 56–63.

Agradecimientos

Agradecemos al Centro de Investigación en Silvicultura y Manejo Forestal/ESFOR, por apoyar en la investigación con el invernadero japonés y otros medios e insumos para desarrollar esta labor.