

PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE FRESA 'MONTERREY' (FRAGARIA X ANANASSA DUCH) EN HIDROPONÍA VERTICAL: INFLUENCIA SOLUCIÓN NUTRITIVA-SUSTRATO

PRODUCTIVITY OF 'MONTERREY' STRAWBERRY (FRAGARIA X ANANASSA DUCH.) IN VERTICAL HYDROPONICS: INFLUENCE NUTRIENT SOLUTION-SUBSTRATE

Autores: ¹Félix Daniel Ibadango Ruiz, ²Yamil Everaldo Cartagena Ayala, ³Aníbal Rafael Parra Burgos, ⁴Diego Manuel León Tapia y ⁵Víctor Julio Moreno Izquierdo.

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-1173-4067>

²ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2447-2769>

³ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-7633-6744>

⁴ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1286-1276>

⁵ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3372-0787>

¹E-mail de contacto: daniel_ibafel@hotmail.com

²E-mail de contacto: yamil.cartagena@iniap.gob.ec

³E-mail de contacto: arparrab@yahoo.es

⁴E-mail de contacto: dmleon1@pucesi.edu.ec

⁵E-mail de contacto: victor.moreno@iniap.gob.ec

Afiliación: ^{1*4*}Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ibarra, Escuela de Ciencias Agrícolas, (Ecuador). ^{2*3*5*}Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Estación Experimental Santa Catalina, Departamento de Manejo de Suelos y Aguas, (Ecuador).

Artículo recibido: 28 de Julio del 2026.

Artículo revisado: 30 de Julio del 2026.

Artículo aprobado: 30 de Julio del 2026.

¹Ingeniero Agropecuario, graduado de la Universidad Técnica del Norte, (Ecuador). Con cinco años de experiencia laboral. Magíster en Agronomía, mención en Sanidad Vegetal y Agroecología, graduado de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, (Ecuador).

²Ingeniero Agrónomo, graduada de la Universidad Central del Ecuador, (Ecuador). Con treinta años de experiencia laboral. Magíster en Edafología, graduada del Colegio de Postgraduados, (México). PhD en Edafología, graduado del Colegio de Postgraduados, (México).

³Ingeniero en Administración y Producción Agropecuaria, graduado de la Universidad Nacional de Loja, (Ecuador). Con cuarenta años de experiencia laboral.

⁴Ingeniero Agrónomo, graduado de la Universidad Central del Ecuador, (Ecuador). Con veinte y cinco años de experiencia laboral. Magíster en Calidad Seguridad y Ambiente, graduado de la Universidad Central del Ecuador (Ecuador). PhD en el Programa de Doctorado en Investigación Agraria y Forestal, graduado del Universidad Santiago de Compostela (España).

⁵Ingeniero Agrónomo, graduado de la Universidad Central del Ecuador, (Ecuador). Con veinte y seis años de experiencia laboral. Magíster en Ciencias de la Geo información y Observación de la Tierra, graduado de la Universidad Mayor de San Simón (Bolivia).

Resumen

Este estudio, realizado en Antonio Ante, Ecuador, evaluó el impacto de tres soluciones nutritivas y tres sustratos en el rendimiento de fresa 'Monterrey' cultivada en un sistema hidropónico vertical. En 48 m², el experimento se estructuró mediante un arreglo de parcelas divididas con nueve tratamientos con cuatro réplicas. Las variables evaluadas fueron biomasa aérea, rendimiento, eficiencia en el uso de agua, sólidos solubles totales y análisis beneficio-coste. La solución nutritiva con concentraciones de 100 (N), 90 (P), 250 (K), 60 (Ca), 30 (Mg) y 20 (S) kg ha⁻¹ (Solución 2) combinada con el sustrato 10% cascarilla de arroz, 80% fibra de coco y 10% pomina (Sustrato 2) fue la más efectiva. Este tratamiento alcanzó un rendimiento de 21,60 t

ha⁻¹, la mayor eficiencia del uso del agua (0,83 kg m⁻³) y un contenido de sólidos solubles totales de 10,82 °Brix. Asimismo, mostró la mejor relación beneficio-coste, generando USD 3,75 por cada dólar invertido. Los resultados demuestran que la combinación Solución 2 con el Sustrato 2 optimiza la productividad, calidad de fruto y rentabilidad en la producción hidropónica vertical de fresa. Esta propuesta representa una alternativa viable para que los pequeños agricultores de la región mejoren sus rendimientos y rentabilidad comparado con los cultivos tradicionales en suelo.

Palabras clave: Eficiencia del uso de agua, Análisis be Ingeniero Agrónomo, graduado de la Universidad Central del Ecuador, (Ecuador). Con veinte y seis años de experiencia laboral. Magíster en Ciencias de la Geo información y Observación de la Tierra, graduado de la

Universidad Mayor de San Simón (Bolivia). **neficio-costo, Cultivo sin suelo, Calidad del fruto, Pequeños agricultores.**

Abstract

This study, conducted in Antonio Ante, Ecuador, evaluated the impact of three nutrient solutions and three substrates on the yield of 'Monterrey' strawberry grown in a vertical hydroponic system. The 48 m² experiment was arranged in a split-plot design with nine treatments and four replications. The assessed variables included aerial biomass, yield, water use efficiency, total soluble solids, and benefit-cost analysis. The nutrient solution with concentrations of 100 (N), 90 (P), 250 (K), 60 (Ca), 30 (Mg), and 20 (S) kg ha⁻¹ (Solution 2) associated with substrate with 10% rice husk, 80% coconut fiber and 10% pumice (Substrate 2) proved most effective. This treatment achieved a yield of 21.60 t ha⁻¹, the highest water use efficiency (0.83 kg m⁻³), and a total soluble solids content of 10.82 °Brix. Furthermore, it showed the best benefit-cost ratio, generating USD 3.75 for every dollar invested. The results demonstrate that the Solution 2 with Substrate 2 combination optimizes productivity, fruit quality, and profitability in vertical hydroponic strawberry production. This approach represents a viable alternative for smallholders in the region to improve their yields and profitability compared to traditional soil-based cultivation.

Keywords: Water use efficiency, Benefit-cost analysis, Soilless cultivation, Fruit quality, Smallholders.

Sumário

Este estudo, realizado em Antonio Ante, Equador, avaliou o impacto de três soluções nutritivas e três substratos no rendimento de morango 'Monterrey' cultivado em sistema hidropônico vertical. Em 48 m², o experimento foi estruturado em delineamento de parcelas subdivididas com nove tratamentos e quatro repetições. As variáveis avaliadas foram biomassa aérea, rendimento, eficiência no uso da água, sólidos solúveis totais e análise benefício-custo. A solução nutritiva com

concentrações de 100 (N), 90 (P), 250 (K), 60 (Ca), 30 (Mg) e 20 (S) kg ha⁻¹ (Solução Nutritiva 2) combinada com 10% casca de arroz, 80% fibra de coco e 10% pó de coco (Substrato 2) foi a mais eficaz. Este tratamento alcançou rendimento de 21,60 t ha⁻¹, a maior eficiência no uso da água (0,83 kg m⁻³) e teor de sólidos solúveis totais de 10,82 °Brix. Ademais, apresentou a melhor relação benefício-custo, gerando USD 3,75 para cada dólar investido. Os resultados demonstram que a combinação Solução Nutritiva 2 com Substrato 2 otimiza a produtividade, a qualidade do fruto e a rentabilidade na produção hidropônica vertical de morango. Esta proposta representa uma alternativa viável para que os pequenos agricultores da região melhorem seus rendimentos e rentabilidade em comparação com os cultivos tradicionais em solo.

Palavras-chave: Eficiência do uso da água, Análise benefício-custo, Cultivo sem solo, Qualidade do fruto, Pequenos agricultores.

Introducción

En el contexto productivo de 2022, China aportó el 50% de los 12,90 millones de toneladas de fresa producidas globalmente en 524 900 hectáreas, mientras Ecuador solo contribuyó con el 0,02%; diferencia que en eficiencia fue más marcada aún: Países Bajos alcanzó 60,50 t ha⁻¹ versus 14,20 t ha⁻¹ de Ecuador (FAO, 2024). A nivel mundial se experimenta la degradación de los ecosistemas, sobre todo en lo referente a los recursos hídricos: contaminación, salinización, escasez, entre otros, los cuales atentan a la capacidad de satisfacer la demanda creciente de agua, tanto para el consumo, como para los sectores productivos; problemática que se profundiza, por ejemplo, por prácticas agrícolas inadecuadas (Gruda et al., 2023; Lakhier et al., 2025). En Imbabura, la fresa constituye uno de los tres cultivos frutales principales junto con la mora y la uvilla, siendo cultivada principalmente por minifundistas, cuyos rendimientos se mantienen bajos debido a la

susceptibilidad varietal a plagas y enfermedades, y al uso inconsistente de agroquímicos (Calle, 2016). Esta situación se agrava por el manejo empírico del cultivo (Anrango, 2017), generando elevados costos de producción, impacto ambiental negativo y riesgos para la salud de productores y consumidores (Leyva et al., 2014). Ante este escenario de baja productividad, surge la necesidad de implementar sistemas alternativos que mejoren el rendimiento, la rentabilidad y la sostenibilidad del cultivo de fresa, donde el sistema hidropónico vertical se presenta como una solución viable, habiendo demostrado su eficacia para la producción sostenible en condiciones de limitación espacial y escasez hídrica (Gómez et al., 2023); (Madhavi et al., 2023); (Gruda et al., 2023); (Lakhiar et al., 2025). Además, estos sistemas han demostrado ser una alternativa viable para incrementar la productividad de fresa (Gómez et al., 2023); (Madhavi et al., 2023).

Estudios recientes indican que los sistemas basados en sustratos superan a los sistemas de cultivo en agua en términos de rendimiento y calidad de fruto (Hutchinson et al., 2025), alcanzando rendimientos superiores a 60 t ha⁻¹ en condiciones controladas (Richardson et al., 2021); donde el control del microclima, en sistemas de agricultura vertical, permite optimizar las condiciones de crecimiento durante todo el año (Sugiyanto y Kasih, 2024). En consecuencia, este estudio se orientó a identificar la combinación óptima entre sustrato y solución nutritiva para potenciar la producción de fresa 'Monterrey' en sistemas de hidroponía vertical. El objetivo fundamental fue alcanzar elevados rendimientos y rentabilidad económica que motiven a los agricultores a adoptar esta alternativa frente a los sistemas de cultivo tradicionales.

Materiales y Métodos

La investigación se llevó a cabo en la parroquia de Atuntaqui, cantón Antonio Ante (Imbabura, Ecuador), a 2 417 metros sobre el nivel del mar (coordenadas: 0°21'33"N, 78°06'32"O). La zona presenta una media anual de precipitación de 625 mm (con picos máximos en los meses de abril y noviembre, y el mínimo en agosto) y de temperatura de 17,6 °C (con máximas entre 21,9 y 22,7; y mínimas entre 12,3 y 14 °C) (Schmidt et al., 2023).

Tabla 1. *Tratamientos utilizados en el estudio.*

Tratamiento	Código	Solución nutritiva (N, P, K, Ca, Mg, S) (kg ha ⁻¹)	Sustrato (Cascarilla de arroz, fibra de coco, pomina) (%)
T1	S1M1	250, 60, 400, 70, 50, 150	80, 10, 10
T2	S1M2	250, 60, 400, 70, 50, 150	10, 80, 10
T3	S1M3	250, 60, 400, 70, 50, 150	45, 45, 10
T4	S2M1	100, 90, 250, 60, 30, 20	80, 10, 10
T5	S2M2	100, 90, 250, 60, 30, 20	10, 80, 10
T6	S2M3	100, 90, 250, 60, 30, 20	45, 45, 10
T7	S3M1	60, 30, 30, 60, 20, 30	80, 10, 10
T8	S3M2	60, 30, 30, 60, 20, 30	10, 80, 10
T9	S3M3	60, 30, 30, 60, 20, 30	45, 45, 10

Fuente: Elaboración propia.

El diseño experimental consideró dos factores: (1) tres soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de nutrientes (S1, S2, S3) y (2) tres mezclas de sustratos con proporciones variables de cascarilla de arroz, fibra de coco y pomina (M1, M2, M3) (Tabla 1). La preparación de las soluciones nutritivas se basó en un análisis fisicoquímico del agua de riego, realizado por el Laboratorio de la Estación Experimental Santa Catalina del INIAP (Tabla 2). Los componentes del sustrato (pomina, cascarilla de arroz y fibra de coco) fueron sometidos a procesos de lavado y desinfección previos a su uso. La infraestructura hidropónica

vertical se construyó siguiendo la metodología de Carpio (2020), mediante la instalación de 10 postes de madera de 2,50 m de longitud (con 0,50 m enterrados). Como soporte superior se emplearon cuatro cañas guaduas de 12 m de longitud para la sujeción del sistema vertical. A una distancia de 1,20 x 1 m se instaló mangas verticales de color negro.

Tabla 2. *Análisis químico del agua de riego. Atuntaqui, Imbabura, Ecuador.*

Análisis	Resultado
Carbonato (CO_3^{2-})	0,00 mg L ⁻¹
Bicarbonato (HCO_3^-)	333,80 mg L ⁻¹
Sulfato (SO_4^{2-})	41,30 mg L ⁻¹
Cloruro (Cl^-)	80,00 mg L ⁻¹
Boro (B)	1,60 mg L ⁻¹
Potasio (K^+)	3,63 mg L ⁻¹
Sodio (Na^+)	91,06 mg L ⁻¹
Magnesio (Mg^{++})	46,64 mg L ⁻¹
Calcio (Ca^{++})	44,52 mg L ⁻¹
pH	6,99
Conductividad eléctrica (CE)	1,06 mS cm ⁻¹
Relación Adsorción de Sodio (RAS)	2,30
Dureza	303,10

Fuente: Elaboración propia.

Cada manga, cuya altura y diámetro fueron de 120 y 19,10 cm, respectivamente, fue cosida con hilo nylon, teniendo dentro el sustrato respectivo; donde se realizaron 12 orificios, ubicados a una distancia horizontal y vertical de 20 y 30 cm, respectivamente, así como a 10 cm de la parte superior y 20 cm de la parte inferior del sistema vertical; y en donde se insertaron las plantas al momento del trasplante (12 plantas). Antes del trasplante, se adicionó un enraizante al agua de riego y se humedeció el sustrato. La colocación de las plántulas en los orificios de las mangas verticales se realizó manualmente, siguiendo el protocolo establecido por Cochi (2017). El riego se implementó mediante un sistema por goteo alimentado por cuatro tanques plásticos de 200 L -tres para las soluciones nutritivas y uno para agua- elevados a 3 m de altura sobre postes de madera para garantizar presión por gravedad. Cada tanque incluyó en su base una llave de salida, filtro y llaves de paso. Los riegos se programaron tres

veces al día (7:00, 12:00 y 16:00 h), aplicándose la fertirrigación según cada tratamiento. El volumen de agua se ajustó según la fase fenológica, manteniendo el pH entre 5,5–6,0 y la conductividad eléctrica entre 0,50 dS m⁻¹ (inicial) y 1 dS m⁻¹ (floración y fructificación), conforme a Zaragoza (2013). El control de plagas y enfermedades consistió en monitoreos periódicos y aplicaciones según Gómez (2006), complementadas con bioestimulantes foliares. Durante el ciclo se eliminaron manualmente estolones y tejidos dañados o enfermos usando tijeras de podar. La cosecha manual se realizó al alcanzar la madurez fisiológica (50% de coloración rojiza), según Cedillo et al. (2019), con recolecciones semanales escalonadas. Los frutos se clasificaron en cuatro categorías de diámetro: mayor a 40 mm (extragrande), 35–40 mm (grande), 30–35 mm (mediana) y 25–30 mm (pequeña) (Secretaría de Economía, 2002). Para conservar la calidad, la fruta se almacenó en baldes plásticos de 10 L a 13–14 °C, asegurando frutos sanos y libres de impurezas.

(1) Biomasa aérea: Se recolectó la parte aérea completa de la planta (estolones, tallos, hojas y frutos) durante la cosecha, siguiendo la metodología de Alvarado-Raya et al. (2022). El material vegetal, previamente identificado en bolsas de papel, se sometió a secado en estufa de ventilación forzada a 65 °C hasta obtener peso constante. La medición final se realizó con balanza de precisión, expresándose en gramos por planta (g planta⁻¹). (2) Rendimiento: Se cuantificó a través del pesaje individual de los frutos recolectados por planta, expresando los resultados en gramos por planta. (3) Eficiencia del uso de agua (UEA): Se calculó mediante la relación entre la producción obtenida y el volumen total de agua consumida (riego más precipitación), de acuerdo con la metodología de Pazmiño (2019). Los resultados se expresaron en kilogramos de fresa producidos

por metro cúbico de agua (kg m^{-3}). (4) Sólidos solubles totales (SST) ($^{\circ}\text{Brix}$): Semanalmente se tomaron cuatro frutos aleatorios por unidad experimental durante la cosecha. La medición se realizó con refractómetro, colocando $0,30 \text{ cm}^3$ de jugo de fruta madura en el prisma del equipo y registrando directamente los grados Brix mediante observación visual. (5) Análisis económico: La rentabilidad se evaluó mediante el método Beneficio-Costo (B/C) según Rivadeneira (2016), registrando para cada tratamiento los costos de producción y los beneficios obtenidos por los rendimientos en campo.

El procesamiento de datos incluyó pruebas de normalidad (Shapiro-Wilks) y homogeneidad de varianzas (Levene). Los datos se sometieron a análisis de varianza (ADEVA), calculándose el coeficiente de variación (CV %) para cada variable. Frente a diferencias significativas ($p < 0,05$), se aplicó la prueba de comparación de promedios de Tukey. Adicionalmente, se analizaron las relaciones entre variables mediante coeficientes de correlación de Pearson. Todo el procesamiento estadístico se ejecutó a través del paquete estadístico InfoStat v. 2017 (Di Rienzo et al., 2011).

Resultados y Discusión

La normalidad de los datos, analizada mediante Shapiro-Wilk, se cumplieron para todas las variables, a excepción de los sólidos solubles totales. Para esta variable se aplicó una transformación logarítmica ($\ln x+1$), tras lo cual se ajustó satisfactoriamente a una distribución normal. Por su parte, la prueba de homocedasticidad de Levene confirmó la homogeneidad de las varianzas en todos los casos. El análisis de varianza para biomasa reveló que la interacción sustrato $\times$ solución no fue estadísticamente significativa ($p = 0,05$). Sin embargo, ambos factores por separado

mostraron efectos altamente significativos ($p = 0,01$) sobre esta variable. Un coeficiente de variación del 9,04% indicó homogeneidad en los datos. La biomasa promedio general fue de $15,78 \text{ g planta}^{-1}$. La prueba de Tukey (5%) para el factor solución identificó dos grupos estadísticos, destacándose la solución S2 (100 (N), 90 (P), 250 (K), 60 (Ca), 30 (Mg) y 20 (S) kg ha^{-1}) con el mayor valor promedio ($18,24 \text{ g planta}^{-1}$) (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis de variables por factores y tratamientos.

Factor	Biomasa	Rendimiento	UEA	SST
	g planta^{-1}	g planta^{-1}	kg m^{-3}	$^{\circ}\text{Brix}$
Solución (S)				
S1	15,31 b	165,54	0,59 b	8,93 _a
S2	18,24 a	171,45	0,70 a	9,08 _a
S3	13,74 b	178,31	0,53 b	7,26 _b
Sustrato (M)				
M1	14,13 b	138,84 b	0,54 b	8,93 _a
M2	18,55 a	200,16 a	0,71 a	8,70 _a
M3	14,66 b	176,29 b	0,56 b	7,64 _b
Tratamiento (S x M)				
S1M1	13,45	164,70	0,52	9,83
S1M2	15,80	102,23	0,61	9,20
S1M3	13,14	149,58	0,51	7,76
S2M1	17,82	179,90	0,69	8,62
S2M2	21,60	213,36	0,83	10,82
S2M3	16,22	207,22	0,62	6,66
S3M1	14,65	152,02	0,56	8,34
S3M2	17,33	198,76	0,67	7,21
S3M3	12,00	178,11	0,46	7,36

Fuente: Elaboración propia.

Similarmente, para el factor sustrato, M2 (10% cascarrilla de arroz, 80% fibra de coco, 10% pomina) registró la biomasa más alta ($18,55 \text{ g planta}^{-1}$) dentro del grupo superior. La combinación S2M2 superó a todos los tratamientos, alcanzando $21,60 \text{ g planta}^{-1}$ y

demostrando el mejor desempeño en biomasa aérea (Figura 1).

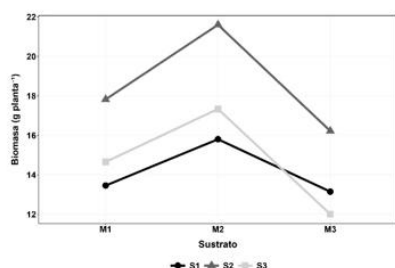


Figura 1. Interacción soluciones (S) por sustratos (M) para la variable biomasa.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de biomasa registrados a los 208 días después del trasplante superaron significativamente los 5,50 g planta⁻¹ reportados por Olvera (2016) para el mismo cultivar en sistema hidropónico abierto a los 93 días. Esta marcada diferencia puede atribuirse al mayor desarrollo vegetativo alcanzado en el presente estudio. Por otro lado, los resultados mostraron similitud con los de Alvarado-Raya et al. (2022), quienes documentaron 14,25 g planta⁻¹ en fresa a los 239 días de cultivo.

El estudio de varianza para el rendimiento identificó diferencias altamente significativas ($\alpha=0,01$) entre sustratos, mientras que el factor solución y la interacción solución $\times$ sustrato no alcanzaron significancia estadística ($p = 0,05$). El coeficiente de variación fue del 20,83%, con un rendimiento promedio de 171,77 g planta⁻¹ (equivalente a 17,2 t ha⁻¹). De las formulaciones nutritivas estudiadas, S3 (60 (N), 30 (P), 30 (K), 60 (Ca), 20 (Mg) y 30 (S) kg ha⁻¹) registró el mayor valor con 178,31 g planta⁻¹ (Tabla 3). En cuanto a los sustratos, la prueba de Tukey al 5% identificó dos grupos homogéneos, ubicándose M2 en el grupo superior con 220,16 g planta⁻¹. Al analizar la interacción entre factores, la

combinación S2M2 mostró el mejor desempeño con 213,36 g planta⁻¹ (Figura 2).

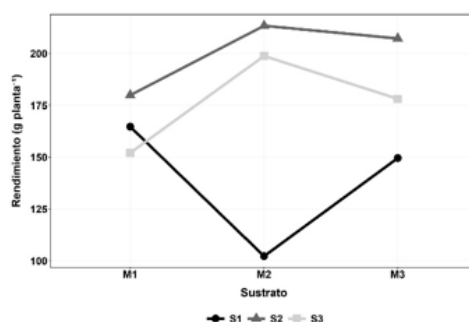


Figura 2. Interacción soluciones (S) por sustratos (M) para la variable rendimiento.

Fuente: Elaboración propia.

Estos hallazgos concuerdan con investigaciones recientes. Tang et al. (2024) reportaron que sustratos con elevada capacidad de retención hídrica, particularmente aquellos basados en fibra de coco, combinados con una adecuada fertilización, mejoran sustancialmente el rendimiento y los atributos cualitativos de la fresa. La efectividad del sustrato M2, donde predomina la fibra de coco (80%), puede atribuirse a las propiedades físicas de este material, reconocido en la literatura por su óptimo balance entre retención de humedad y porosidad en sistemas hidropónicos (Woznicki et al., 2024); (Rabbani et al., 2025). Además, estudios comparativos entre diferentes sustratos orgánicos han confirmado que las mezclas que incluyen fibra de coco presentan ventajas significativas en términos de crecimiento vegetativo y rendimiento de fruto (Zahid et al., 2021; García y Cruz, 2023). De acuerdo con Aurdal et al. (2023), la combinación de fibras naturales con componentes, como la cascarilla de arroz en la formulación de sustratos, puede generar un ambiente favorable para el crecimiento radical y una asimilación eficiente de nutrientes. Por otro lado, Baper y Hawezzy

(2025), al comparar tres sistemas hidropónicos diferentes, encontraron que el sistema NFT (Nutrient Film Technique) produjo los mayores rendimientos, aunque los sistemas basados en sustrato mostraron mejor calidad de fruto; y Verma et al. (2025), al evaluar diferentes genotipos de fresa bajo cultivo hidropónico, reportaron variaciones significativas en rendimiento dependiendo del genotipo y las condiciones de manejo. Respecto de la solución S2, que proporcionó los mejores resultados, coincide con Preciado-Rangel et al. (2020), quienes demostraron que la relación K: N es crítica para optimizar el rendimiento y calidad de fresa en condiciones sin suelo, siendo el potasio esencial para la translocación de azúcares y el desarrollo de frutos de mayor tamaño y contenido de sólidos solubles.

El manejo controlado de la fertirrigación, mediante sistemas de sensores, puede optimizar aún más estos resultados. Hutchinson et al. (2024) reportaron incrementos significativos en rendimiento y calidad cuando la fertirrigación se ajusta dinámicamente basándose en las condiciones reales del sustrato y la planta. Adicionalmente, Depardieu et al. (2016) enfatizaron la importancia del manejo adecuado de la conductividad eléctrica, en sustratos orgánicos, para prevenir problemas de salinidad y optimizar la absorción de nutrientes. Las estrategias de fertirrigación, diferenciadas según el tipo de sustrato, son fundamentales para maximizar la eficiencia del uso de los nutrientes (Kusnierek et al., 2023). Los sistemas verticales, como el utilizado en este estudio, presentan ventajas adicionales en términos de eficiencia espacial. Madhavi et al. (2023) realizaron un estudio comparativo entre sistemas horizontales y verticales, encontrando que, aunque el rendimiento por planta puede ser ligeramente menor en sistemas verticales, el rendimiento por unidad de área es

significativamente mayor debido a la mayor densidad de plantación. Gómez et al. (2023) reportaron rendimientos de hasta 25 t ha⁻¹ en sistemas verticales hidropónicos bajo invernadero, destacando la importancia del control ambiental para maximizar la producción. Cabe indicar que el rendimiento promedio obtenido en este estudio fue menor en comparación con el promedio mundial (19,56 t ha⁻¹), pero superior en comparación al de Ecuador (14,20 t ha⁻¹) (FAO, 2024).

El estudio de varianza para la eficiencia en el uso del agua (UEA) identificó efectos altamente significativos ($p = 0,01$) de los factores solución nutritiva y tipo de sustrato. Por el contrario, la interacción factorial no alcanzó significancia estadística ($p = 0,05$). La homogeneidad de la información quedó demostrada por un coeficiente de variación del 9,10%. El UEA promedio fue de 0,61 kg m⁻³. Con base a Tukey, el factor solución presentó dos rangos, donde se destacó la solución S2, que, con un valor de 0,70 kg m⁻³, fue la que presentó el mayor UEA (Tabla 3). Así también, para el factor sustrato se obtuvo dos rangos, donde sobresalió el sustrato M2, con 0,71 kg m⁻³ (Tabla 3). Para los tratamientos, destacó el tratamiento S2M2, con 0,83 kg m⁻³ de UEA (Figura 3).

En comparación, Olvera (2016) obtuvo un valor de 0,47 kg m⁻³ en un sistema hidropónico abierto convencional, inferior al promedio de 0,61 kg m⁻³ alcanzado en esta investigación. Esta mayor eficiencia en el uso del agua puede atribuirse a que el suministro de riego superó los requerimientos de evapotranspiración, previniendo estrés hídrico y manteniendo un balance hídrico favorable para la transpiración, lo que evitó la reducción del rendimiento asociada a la deshidratación tisular (Deaquiz et al., 2015). En consecuencia, los hallazgos de esta investigación evidencian que el sistema

hidropónico vertical permite una utilización más eficiente del recurso hídrico comparado con sistemas convencionales de producción en suelo. Según Tang et al. (2024), la utilización de sustratos con elevada capacidad de retención hídrica, como la fibra de coco, incrementa notablemente la eficiencia en el uso del agua (EUA) al minimizar las pérdidas por drenaje y evaporación.

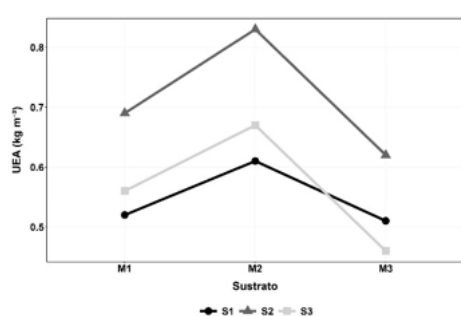


Figura 3. Interacción soluciones (S) por sustratos (M) para la variable EUA.

Fuente: Elaboración propia.

Kusnieriek et al. (2023) demostraron que estrategias de fertirrigación, ajustadas al tipo de sustrato, pueden disminuir el consumo hídrico hasta en un 30%, sin comprometer el rendimiento. Estos hallazgos son particularmente pertinentes en el marco del cambio climático y la progresiva escasez de recursos hídricos (Gruda et al., 2023). El análisis de varianza para sólidos solubles totales (SST) reveló diferencias altamente significativas ($p = 0,01$) entre soluciones nutritivas y diferencias significativas ($p = 0,05$) entre sustratos. La interacción solución $\times$ sustrato no mostró efectos estadísticamente significativos. El coeficiente de variación fue de 4,69% para una media general de 8,42 °Brix. La prueba de Tukey identificó dos grupos homogéneos para soluciones, ubicándose S2

(9,08 °Brix) y S1 (8,93 °Brix) en el grupo superior (Tabla 3). Entre los sustratos, M1 (8,93 °Brix) y M2 (8,70 °Brix) conformaron el primer grupo de significancia. El tratamiento S2M2 registró el valor más alto de SST (10,82 °Brix; Figura 4).

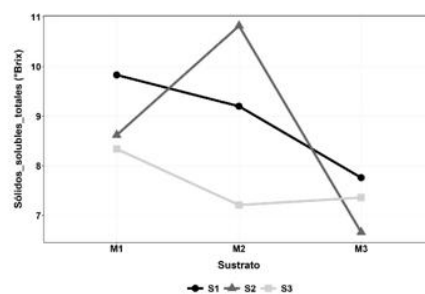


Figura 4. Interacción soluciones (S) por sustratos (M) para la variable SST.

Fuente: Elaboración propia.

Este resultado sugiere que la combinación de un sustrato rico en fibra de coco -con alta capacidad de retención hídrica- y una solución nutritiva balanceada con elevado contenido de fósforo favorece la acumulación de compuestos solubles en el fruto, coincidiendo con lo reportado por Inga (2021) respecto al papel del fósforo en la síntesis de biomoléculas. Al comparar los valores de SST con estudios previos, se observa que Olvera (2016) documentó 6,90 °Brix para la misma variedad en hidroponía abierta convencional, resultado inferior al promedio de 8,42 °Brix obtenido en esta investigación. Contrariamente, Inga (2021) reportó un contenido de sólidos solubles más elevado (11,39 °Brix) en 'Monterrey' cultivada bajo dos sistemas hidropónicos diferentes.

Por otro lado, los valores de SST obtenidos en esta investigación son similares a los documentados por Zahid et al. (2021), que encontraron que el tipo de sustrato influye significativamente en los parámetros de calidad

del fruto, incluyendo SST, firmeza y contenido de antocianinas. La interacción entre la solución nutritiva y el sustrato es determinante para la calidad final del fruto (Preciado et al., 2020). García y Cruz (2023) evaluaron diferentes sustratos alternativos para el cultivo sin suelo de fresa y reportaron que las mezclas que incluyen materiales orgánicos como fibra de coco y cascarilla de arroz tienden a producir frutos con mayor contenido de SST y mejor perfil nutricional.

Tabla 4. Prueba de correlación de Pearson para las variables evaluadas.

Variable 1	Variable 2	Pearson	p-valor
Biomasa	Rendimiento	0,49	0,0621
Biomasa	UEA	1,00	<0,0001
Biomasa	SST	0,47	0,0749
Rendimiento	UEA	0,49	0,0658
Rendimiento	SST	-0,19	0,5711
UEA	SST	0,48	0,0725

Fuente: Elaboración propia.

De las pruebas de correlación (Tabla 4), tomando en consideración que un coeficiente de Pearson igual a cero indica la falta de asociación, mientras que cuando se acerca a 1 o -1 es mayor la intensidad de asociación (Coyne y Thompson, 2006) -donde el p-valor es la probabilidad asociada a la prueba de hipótesis de correlación nula (sin correlación) (Di Rienzo et al., 2011)-, se observó que el mayor coeficiente obtuvo biomasa vs. UEA (1,00) (Figura 5), y el menor coeficiente rendimiento vs. sólidos solubles totales (-0,19). Las demás pruebas resultaron con coeficientes cercanos a 0,50, ej. biomasa vs. rendimiento (0,49). Estos resultados son concordantes con la investigación de Cerero et al. (2023), donde al evaluar el cultivo de fresa, en sistemas hidropónicos con mezclas de sustratos, todos los parámetros de crecimiento, exceptuando la longitud radical ($< \pm 0,2$), mostraron una

correlación elevada ($\geq 0,73$). El análisis económico (Tabla 5) identificó al tratamiento S2M2 -compuesto por la solución nutritiva S2 (100 (N), 90 (P), 250 (K), 60 (Ca), 30 (Mg) y 20 (S) kg ha⁻¹) y el sustrato M2 (10% cascarilla de arroz, 80% fibra de coco, 10% pomina)- como el más rentable. Esta combinación registró la menor inversión por hectárea y generó el mayor beneficio neto, consecuencia directa de su superior rendimiento productivo.

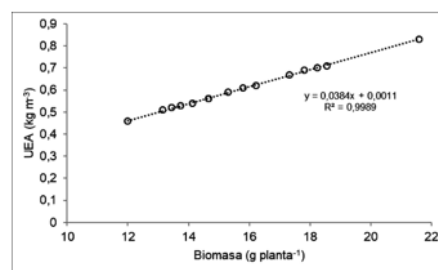


Figura 5. Gráfico de dispersión y línea de tendencia lineal entre biomasa-UEA.

Fuente: Elaboración propia.

Así, alcanzó la mejor relación beneficio-costos (B/C = 3,75), indicando que por cada dólar invertido se obtuvieron USD 3,75 de retorno. Este resultado es alentador considerando que los sistemas hidropónicos requieren una inversión inicial mayor que los sistemas convencionales. Ries (2024) analizó la viabilidad económica de la producción de fresa en sistemas de agricultura vertical interior, encontrando que, a pesar de los costos elevados de energía e infraestructura, el sistema puede ser rentable cuando se optimizan las estrategias de iluminación y fertilización.

La sostenibilidad económica de los sistemas hidropónicos verticales depende de múltiples factores, incluyendo el acceso a mercados de alto valor, el aprovechamiento eficiente de

recursos y la capacidad productiva durante todo el año (Madhavi et al., 2023). Para los pequeños agricultores de Imbabura, la implementación de este sistema hidropónico vertical constituye una alternativa promisorio que podría potenciar sus ingresos económicos y fortalecer la seguridad alimentaria en la región.

Tabla 5. Costos y beneficios por tratamiento.

Tratamiento	Costo (USD ha ⁻¹)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Beneficio (USD ha ⁻¹)	Relación B/C
S1M1	19 552,50	16,50	54 450,00	2,78
S1M2	18 981,41	18,00	59 400,00	3,13
S1M3	19 029,69	15,20	50 160,00	2,64
S2M1	19 297,95	10,30	33 990,00	1,76
S2M2	18 726,86	21,30	70 290,00	3,75
S2M3	18 775,13	19,90	65 670,00	3,50
S3M1	20 395,08	15,00	49 500,00	2,43
S3M2	19 823,99	20,70	68 310,00	3,45
S3M3	19 872,27	17,80	58 740,00	2,96

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

El estudio permitió identificar que la solución nutritiva S2 (100 (N), 90 (P), 250 (K), 60 (Ca), 30 (Mg) y 20 (S) kg ha⁻¹) fue la más efectiva para optimizar la productividad de fresa 'Monterrey', al registrar los mejores valores en biomasa aérea, eficiencia en el uso del agua, contenido de sólidos solubles totales y rentabilidad económica. Entre los sustratos evaluados, M2 (10% cascarilla de arroz, 80% fibra de coco, 10% pomina) demostró superioridad en el sistema hidropónico vertical, mostrando el mejor desempeño en rendimiento, biomasa, eficiencia hídrica y relación beneficio-coste. La combinación S2M2 se estableció como el tratamiento óptimo, alcanzando una relación beneficio-coste de 3,75, lo que se traduce en un retorno de USD 3,75 por cada dólar invertido. Esta configuración representa la alternativa más eficiente y económicamente

viable para la producción hidropónica vertical de fresa en las condiciones evaluadas.

Referencias Bibliográficas

- Alvarado, H., Rivera, R., Ramírez, A., Escamilla-García, P., & Estrada-Chavira, M. (2022). Interrelaciones en biomasa final de plántulas de fresa (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) 'Festival' en un sistema hidropónico vertical. *Tecnociencia Chihuahua*, 16(3), e991.
<https://doi.org/10.54167/tch.v16i3.991>
- Anrango, D. (2017). Evaluación del impacto ambiental provocado por el proceso de producción de frutilla (*Fragaria dióica*) en la comunidad de Inti Huaycopungo, parroquia González Suárez (provincia de Imbabura) [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
<https://repositorio.puce.edu.ec/>
- Aurdal, S., Woznicki, T., Haraldsen, T., Kusnierek, K., Sønsteby, A., & Remberg, S. (2023). Wood fiber-based growing media for strawberry cultivation: Effects of incorporation of peat and compost. *Horticulturae*, 9(1), 36.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae9010036>
- Baper, S., & Hawezzy, S. (2025). Yield and fruit quality of two strawberry cultivars (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) under three types of hydroponic systems. *PolyTechnic Journal*, 12(2), 185–194.
<https://doi.org/10.59341/2707-7799.1850>
- Calle, D. (2016). Identificación y caracterización de los sistemas de comercialización primarios de la producción agropecuaria de agriculturas familiares campesinas en la provincia de Imbabura [Tesis de pregrado]. Universidad Central del Ecuador. <https://www.dspace.uce.edu.ec/>
- Carpio, A. (2020). Evaluación del rendimiento y características del fruto en el cultivo de fresa (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) cv. Camarosa, con diferentes combinaciones de sustratos, bajo sistema hidropónico en mangas verticales [Tesis de pregrado]. Universidad Católica de Santa María.
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/>

- Cerero, L., Velasco, V., Sandoval, M., Ruiz, J., & Valle, J. (2023). Cultivo de fresa (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) en sistemas hidropónicos con mezclas de sustratos. *Acta Agronómica*, 72(1), 70–77.
<https://doi.org/10.15446/acag.v72n1.110426>
- Cochi, R. (2017). Evaluación del comportamiento agronómico de la frutilla (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) en cultivos verticales bajo dos densidades de plantación y tres niveles de humus de lombriz en la estación experimental de Cota Cota [Tesis de pregrado]. Universidad Mayor de San Andrés. <https://books.google.com/>
- Coyne, M., & Thompson, J. (2006). *Math for Soil Scientists*. Delmar Cengage Learning.
- Deaquiz, Y., Álvarez, J., & Pinzón, L. (2015). Efecto de diferentes láminas de riego sobre la producción y calidad de fresa (*Fragaria* sp.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 8(2), 192–205.
<https://doi.org/10.17584/rcch.2014v8i2.3213>
- Depardieu, J., Prémont, F., Boily, C., & Caron, J. (2016). Sawdust and bark-based substrates for soilless strawberry production: Irrigation and electrical conductivity management. *PLOS ONE*, 11(4), e0154104.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154104>
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. (2011). *InfoStat*. Centro de Transferencia InfoStat, Universidad Nacional de Córdoba.
- García, D., & Cruz, R. (2023). Evaluation effects of alternative substrates for soilless cultivation of strawberry (*Fragaria* × *ananassa*). *NEXO Revista Científica*, 36(6), 556–568.
<https://doi.org/10.5377/nexo.v36i06.17439>
- Gómez, J. (2006). Descripción del comportamiento de insectos y enfermedades asociadas al cultivo de fresa (*Fragaria* spp. L.) en el municipio de La Sabana, departamento de Madriz [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Agraria.
<https://repositorio.una.edu.ni/>
- Gómez, A., Amante, A., & Hernández, I. (2023). Strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) production in a vertical hydroponic greenhouse system. *Agro Productividad*, 16(5), 75–82.
<https://doi.org/10.32854/agrop.v16i5.2540>
- Gruda, N., Machado, R., & Van Os, E. (2023). Is soilless culture a sustainable form of agriculture? *Horticulturae*, 9(11), 1190.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae9111190>
- Hutchinson, G., Nguyen, T., Rubio, Z., Nemali, K., & Ferrarezi, R. (2024). Sensor-controlled fertigation management for higher yield and quality in greenhouse hydroponic strawberries. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1469434.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1469434>
- Hutchinson, G., Rubio, Z., Nemali, K., & Ferrarezi, R. (2025). Substrate system outperforms water-culture systems for hydroponic strawberry production. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1469430.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1469430>
- Inga, C. (2021). Evaluación de cuatro variedades de frutilla (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) en dos sistemas semi hidropónicos [Tesis de pregrado]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
<https://dspace.esPOCH.edu.ec/>
- Kusnieriek, K., Sønsteby, A., & Woznicki, T. (2023). Performance of wood fibre as a substrate in hydroponic strawberry production under different fertigation strategies. *Acta Horticulturae*, 1309, 315–322.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1309.42>
- Lakhiar, I., Syed, T., Zhang, C., Shaikh, S., Rakibuzzaman, M., & Vistro, R. (2025). Soilless agricultural systems: Opportunities, challenges, and applications for enhancing horticultural resilience to climate change and urbanization. *Horticulturae*, 11(6), 568.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae11060568>
- Leyva, J., García, L., Bastidas, P., Astorga, J., Bejarano, J., Cruz, A., Martínez, I., & Betancourt, M. (2014). Uso de plaguicidas

- en un valle agrícola tecnificado en el noroeste de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(3), 247–261. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v30n3/v30n3a2.pdf>
- Madhavi, B., Kim, N., Basak, J., Choi, G., & Kim, H. (2023). Comparative study of strawberry growth and fruit quality parameters in horizontal and vertical production systems. *Horticulture, Environment and Biotechnology*, 64(3), 381–393. <https://doi.org/10.1007/s13580-022-00494-8>
- Olvera, L. (2016). Evaluación agronómica y fisiológica de fresa en un sistema hidropónico tipo revólver [Tesis de maestría]. Colegio de Posgraduados. <https://repositorio.colpos.mx/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). FAOSTAT: Cultivos y productos de ganadería – Fresa 2022. <https://www.fao.org/faostat/>
- Pazmiño, J. (2019). Efecto del recubrimiento comestible de tres concentraciones de colágeno en la conservación de fresa (*Fragaria × ananassa* Weston) [Tesis de pregrado]. Universidad Central del Ecuador. <https://www.dspace.uce.edu.ec/>
- Preciado, P., Reyes, J., Ramírez, S., Salas-Pérez, L., Fortis-Hernández, M., Murillo-Amador, B., & Troyo-Diéguez, E. (2020). Interactive effects of the potassium and nitrogen relationship on yield and quality of strawberry grown under soilless conditions. *Plants*, 9(4), 441. <https://doi.org/10.3390/plants9040441>
- Rabbani, M., Kim, M., Zebro, M., & Choi, K. (2025). Effects of growing substrates on the growth, yield, and quality of strawberry cultivars grown in a pot hydroponic system. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 43(1), 54–68. <https://doi.org/10.7235/hort.20250054>
- Richardson, M., Arlotta, C., & Lewers, K. (2021). Yield and nutrients of six cultivars of strawberries grown in five urban cropping systems. *Scientia Horticulturae*, 289, 110775. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110775>
- Ries, J. (2024). Improving indoor strawberry production in vertical farming through enhanced lighting and fertilization strategies [Doctoral dissertation, University of Hohenheim]. ProQuest Dissertations Publishing. <https://www.proquest.com/>
- Rivadeneira, D. (2016). Evaluación de tres dosis de zeolita para optimizar el rendimiento del cultivo de fresa (*Fragaria × ananassa*), en el cantón Tulcán, provincia del Carchi [Tesis de pregrado]. Universidad Politécnica Estatal del Carchi. <https://repositorio.upec.edu.ec/>
- Secretaría de Economía. (2002). Norma Oficial Mexicana NMX-FF-062-SCFI-2002. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano: Fruta fresa (*Fragaria × ananassa* Duch.) – Especificaciones y método de prueba. <https://studylib.es/doc/6736068/nmx-ff-062-scfi-2002-productos-alimenticios>
- Schmidt, P., Castro-Llanos, F., Gutierrez, N., & Bunn, C. (2023). ACLIMATAR: Climate adaptation planning tool for cocoa, coffee and tea farming. <https://adaptation.aclimatar.org/>
- Sugiyanto, E., & Kasih, T. (2024). Microclimate control in strawberry production with hydroponic system in indoor vertical farming. *Journal of Sustainable Agriculture*, 5(3), 215–228. <https://doi.org/10.46799/jsa.v5i3.1077>
- Tang, X., Li, Y., Fang, M., Li, W., & Li, Y. (2024). Effects of different water storage and fertilizer retention substrates on growth, yield and quality of strawberry. *Agronomy*, 14(1), 205. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010205>
- Verma, P., Singh, S., Upadhyay, P., Singh, S., & Bakshi, M. (2025). Evaluation of agromorphological and yield traits in strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) genotypes under hydroponic cultivation. *Erwerbs-Obstbau*, 67(2), 145–156. <https://doi.org/10.1007/s10341-025-01583-5>

Woznicki, T., Kusnierek, K., Vandecasteele, B., & Sønsteby, A. (2024). Reuse of coir, peat, and wood fiber in strawberry production. Zahid, N., Maqbool, M., Hamid, A., Naz, S., Zaman, W., Bano, I., Ahmad, M., Ullah, S., & Anwar, S. (2021). Changes in vegetative and reproductive growth and quality parameters of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) cv. Chandler grown at different substrates. *Journal of Food Quality*, 2021, 9996073.
<https://doi.org/10.1155/2021/9996073>

Frontiers in Plant Science, 14, 1307240.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1307240>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © Félix Daniel Ibadango Ruiz, Yamil Everaldo Cartagena Ayala, Aníbal Rafael Parra Burgos, Diego Manuel León Tapia y Víctor Julio Moreno Izquierdo.

Declaraciones éticas y editoriales del artículo

Contribución de los autores (Taxonomía CRediT)

Félix Daniel Ibadango Ruiz: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio.
Yamil Everaldo Cartagena Ayala: curación y organización de los datos, participación en la recolección de información, validación de los resultados obtenidos y elaboración de representaciones gráficas y visualización de los datos.
Aníbal Rafael Parra Burgos: provisión de recursos académicos y materiales para el desarrollo del estudio, apoyo en la administración del proyecto investigativo y revisión editorial del manuscrito antes de su publicación.
Diego Manuel León Tapia: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio.
Víctor Julio Moreno Izquierdo: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con la investigación presentada, la autoría del manuscrito ni la publicación del presente artículo.

Declaración de financiamiento

La presente investigación no recibió financiamiento específico de agencias públicas, comerciales o de organizaciones sin fines de lucro. En caso de existir financiamiento institucional o externo, este deberá ser declarado explícitamente por los autores en esta sección.

Declaración del editor

El editor responsable certifica que el proceso editorial del presente artículo se desarrolló conforme a los principios de integridad científica, transparencia y buenas prácticas editoriales. El manuscrito fue sometido a un proceso de evaluación mediante revisión por pares doble ciego, garantizando la confidencialidad de la identidad de los autores y revisores durante todo el proceso de dictamen académico. Asimismo, el editor declara que el artículo cumple con los criterios científicos, metodológicos y éticos establecidos por la revista.

Declaración de los revisores

Los revisores externos que participaron en la evaluación del presente manuscrito declaran haber realizado el proceso de revisión de manera objetiva, independiente y confidencial. Asimismo, manifiestan que no mantienen conflictos de interés con los autores ni con la investigación evaluada, y que sus observaciones y recomendaciones se fundamentan exclusivamente en criterios científicos, metodológicos y académicos.

Declaración ética de la investigación

Los autores declaran que la investigación se desarrolló respetando los principios éticos de la investigación científica, garantizando la confidencialidad de los datos y el respeto a los participantes del estudio. En los casos en que la investigación involucre seres humanos, los procedimientos deben ajustarse a los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki y a las normativas institucionales correspondientes.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que el uso de herramientas de inteligencia artificial, en caso de haberse utilizado durante el proceso de investigación o redacción del manuscrito, se realizó únicamente como apoyo técnico para mejorar la claridad del lenguaje o el análisis de información, manteniendo siempre la responsabilidad intelectual sobre el contenido del artículo. Las herramientas de inteligencia artificial no fueron utilizadas como autoras del manuscrito ni sustituyen la responsabilidad académica de los investigadores.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los resultados de esta investigación estarán disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia, respetando las normas éticas y de confidencialidad establecidas por la investigación.

