

Seguridad alimentaria en la industria 4.0: control y monitoreo de cultivo hidropónico mediante microcontrolador ESP-32

Brandon D. Cervantes López; Samuel Albino Campos; Bernabé Rebollo Plata; Miguel A. Guzmán Altamirano; María G. Gómez Espinoza; Estrella A. Castro García.

¹División de Ing. Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México/ITS Irapuato, Carretera Irapuato-Silao km.12.5, Col. El Copal, Irapuato, Guanajuato, CP 36821, México.

²Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Politécnica de Pénjamo, Carretera Irapuato - La Piedad km 44, El Derramadero. Pénjamo, Guanajuato, CP 36921, México

Área: Agronomía.

RESUMEN

La seguridad alimentaria es uno de los desafíos más apremiantes del siglo XXI. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), desde el informe Cumbre Mundial de la Alimentación (CMA) de 1996. Más de 820 millones de personas padecen hambre, y se estima que la población mundial alcanzará los 9.7 mil millones para 2050, exigiendo un aumento del 50% en la producción de alimentos. En México aproximadamente el 60.8% de la población presenta algún nivel de inseguridad alimentaria; siendo 34.9% leve, 15.8% moderada y 10.1% severa, subrayando la necesidad de innovaciones en la agricultura. Métodos de agricultura controlada, como la hidroponía, los invernaderos y la acuaponía, optimizan recursos como el agua y los nutrientes, promoviendo una producción sostenible y asegurando un suministro constante de alimentos.

Este estudio presenta un sistema hidropónico de raíz flotante basado en IoT, diseñado para controlar y monitorear parámetros clave del agua, como pH, temperatura y sólidos disueltos totales. El sistema cuenta con un módulo de control embebido de 32 bits con conectividad Wi-Fi y sensores que miden estas variables en tiempo real. El ajuste de pH se realiza mediante bombas dosificadoras, la temperatura se regula con un sistema de refrigeración, y la calidad del agua se gestiona mediante recirculación y filtrado.

Para el monitoreo remoto, se emplearon los protocolos NTP y MQTT, permitiendo el almacenamiento de datos en la nube y la creación de informes históricos. Se realizaron dos experimentos

con 12 semillas de lechuga romana cada uno, comparando un sistema manual y otro automático durante 9 días, en un ambiente de laboratorio sin control de factores externos a excepción del tipo de luz incidente. Al finalizar, se evaluó el tamaño promedio de las plántulas en ambos sistemas.

Los resultados parciales mostraron que las plántulas monitoreadas de forma automática crecieron más rápido: El crecimiento promedio del sistema manual fue de 77 mm, mientras que el automático alcanzó 126 mm, un incremento del 63.64%. Además, la implementación de un sistema de control automatizado en el entorno hidropónico demostró tener un impacto significativo en la estabilidad y optimización de las variables ambientales clave. Esta tecnología promete mejorar la seguridad alimentaria y optimizar la producción agrícola en México.

PALABRAS CLAVE: Hidroponía, Seguridad Alimentaria, Industria 4.0, Sistemas IoT

INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria es uno de los desafíos más apremiantes del siglo XXI. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), desde el informe Cumbre Mundial de la Alimentación (CMA) de 1996, más de 800 millones de personas en el mundo no disponen de alimentos suficientes para satisfacer sus necesidades nutricionales básicas, y se proyecta que para el año 2050 la población mundial alcanzará los 9.7 mil millones de personas (FAO, 2009), lo que requerirá un incremento del 50 % en la producción global de alimentos. Dentro del mismo, de acuerdo con la Declaración de Roma sobre la seguridad alimentaria mundial y el Plan de Acción de la Cumbre Mundial sobre la Alimentación, se establece que existe seguridad alimentaria cuando todas las personas tienen en todo momento acceso físico y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias en cuanto a los alimentos a fin de llevar una vida activa y sana (FAO, 1996). Sin embargo, con base a la información obtenida en la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición del 2021 elaborada por el Instituto Nacional de Salud Pública se registró que en México aproximadamente el 60.8% de la población presenta algún nivel de inseguridad alimentaria; siendo 34.9% leve, 15.8% moderada y 10.1% severa (INSP, 2021), lo que subraya la necesidad de implementar innovaciones tecnológicas que optimicen los procesos agrícolas y aseguren un suministro de alimentos suficiente, sostenible y accesible.

A nivel nacional, la situación alimentaria y nutricional presenta contrastes significativos. Aunque la disponibilidad energética promedio de alimentos en el país (3,145 kcal/día) supera el umbral establecido por la FAO a nivel global (2,362 kcal/día) (Urquía & Nuria, 2014), persisten deficiencias nutricionales notables, especialmente en comunidades vulnerables. Esta problemática se agrava debido a la rápida degradación de los suelos agrícolas a causa de fenómenos como la erosión y pérdida de fertilidad de los suelos, afectando directamente la autosuficiencia alimentaria del país y perpetuando ciclos de malnutrición en sectores marginados de la población (Cotler, Corona & Galeana, 2020).

Ante este panorama, la adopción de tecnologías avanzadas en la producción agrícola ha cobrado relevancia a nivel mundial. Los sistemas agrícolas inteligentes, basados en los principios de la Industria 4.0, han demostrado ser herramientas eficaces para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los cultivos mediante la integración de sensores, automatización y análisis de datos en tiempo real (Rodríguez, Paucar, Yapias, Santivañez, Campó, Ninahuaman, Alipio & Reyes, 2024). En este contexto, la hidroponía se ha consolidado como una alternativa viable a la agricultura convencional, permitiendo el cultivo intensivo de alimentos con un uso eficiente de recursos como el agua y los nutrientes (Palmitessa, Signore & Santamaria, 2024).

Estudios recientes han evidenciado que los sistemas hidropónicos pueden superar significativamente a la agricultura en suelo en términos de rendimiento y eficiencia. Barbosa (2015) encontraron que la producción de lechuga en sistemas hidropónicos puede alcanzar rendimientos 1,000 % superiores (es decir, 11 veces más) que los obtenidos mediante métodos convencionales. Un metaanálisis publicado en *Hydroponics: Current Trends in Sustainable Crop Production* (2022) reporta que la hidroponía puede generar rendimientos hasta 1,900 % mayores (20 veces más) por superficie cultivada, especialmente en especies de hoja como la lechuga. Además, Carroll et al. (2023) destacan que los sistemas hidropónicos permiten optimizar la relación entre espacio, tiempo y productividad frente al cultivo en suelo.

En particular, el sistema hidropónico de raíz flotante ha mostrado ventajas notables al permitir el crecimiento de plantas sobre soluciones nutritivas aireadas, sin requerir sustratos sólidos. Esta técnica ha demostrado ser altamente eficiente para cultivos de hoja como la lechuga y la rúcula, al facilitar un entorno constante de humedad y nutrición. Petropoulos et al. (2016) reportaron que el cultivo de estas

especies en raíz flotante, bajo diferentes niveles de nitrógeno, produjo un incremento de aproximadamente 20 % en peso fresco y mejoras en la tasa fotosintética, demostrando su efectividad como método productivo y adaptable.

En México, la implementación de estos sistemas ha mostrado resultados prometedores. Experiencias locales indican que los sistemas hidropónicos, incluyendo los de raíz flotante, permiten mejorar el rendimiento hasta en un 5 %, además de facilitar el cultivo en zonas urbanas y periurbanas, promoviendo una producción más sostenible y descentralizada (Hydroponic Systems, 2022; González & Mendoza, 2023).

La incorporación de tecnologías emergentes, como el análisis numérico, el monitoreo remoto y el control mediante sistemas IoT, ha abierto nuevas posibilidades para optimizar el manejo de variables críticas en el crecimiento vegetal, como la temperatura, el pH del agua y la concentración de sólidos disueltos (TDS) (Ogbolumani & Mabaso, 2023). Estudios previos han reportado que los sistemas hidropónicos automatizados pueden incrementar significativamente la productividad y reducir el consumo de agua en comparación con métodos tradicionales (Pomoni, Koukou, Vrachopoulos & Vasiliadis, 2023), además de contribuir a mejorar el acceso a alimentos, su calidad nutricional y el equilibrio entre oferta y demanda (Fierro, Lozano & Gaxiola, 2023).

En este marco, el presente estudio se centra en el desarrollo y evaluación de un sistema hidropónico de raíz flotante basado en tecnología IoT, cuyo objetivo es comparar el crecimiento de hortalizas —específicamente lechuga romana— en un sistema automatizado frente a uno manual, bajo un enfoque experimental. La comparación entre ambos métodos permitirá analizar el impacto de la automatización sobre la estabilidad de las condiciones ambientales y el desarrollo de las plántulas, contribuyendo así a la generación de nuevas estrategias tecnológicas orientadas a fortalecer la seguridad alimentaria tanto en contextos locales como globales.

MARCO TEÓRICO

• Hidroponía

La hidroponía proviene del griego “*HIDRO*” (agua) y “*PONOS*” (labor o trabajo) lo cual significa trabajo en agua. Es la ciencia del cultivo de plantar sin el uso de tierra, con el cuidado de los elementos esenciales requeridos por la planta cuyo crecimiento sea normal (Beltrano & Giménez, 2015). Se presenta como una alternativa eficaz frente a desafíos globales como el cambio climático, la degradación ambiental y la pérdida de biodiversidad causada por la agricultura intensiva. Este método permite optimizar el uso del agua, un recurso cada vez más limitado, y facilita un mayor control sobre los cultivos. Gracias a su eficiencia y productividad, la hidroponía puede ser una herramienta clave para combatir el hambre y fortalecer la seguridad alimentaria, especialmente en regiones con menos recursos (Iberdrola, s.f.).

Esta técnica de cultivo forma parte de las innovaciones más destacadas dentro del ámbito de la agricultura inteligente o de precisión, la cual se apoya en el uso de tecnologías avanzadas, desde la geolocalización hasta el big data, la inteligencia artificial, el Internet de las Cosas y los drones, con el propósito de optimizar la eficiencia y aumentar la productividad de los cultivos (Iberdrola, s.f.). De acuerdo con Misha y Jain en 2015, estos sistemas resultan económicos y pueden implementarse en zonas en donde la electricidad es limitada, por lo que, en la actualidad, los procesos pueden ser controlados y operar de manera automática, la agricultura está evolucionando hacia soluciones inteligentes y automatizadas lo que implica un importante progreso en el desarrollo agrícola (Cuatusmal, 2023).

Existen diversos tipos de sistemas hidropónicos, entre los que se incluyen el sistema de mecha, raíz flotante, el riego por goteo, Inundación y drenaje, la técnica de película nutritiva (NFT), y la aeroponía, cada uno con características particulares según las necesidades del cultivo (Beltrano & Jiménez, 2015). La Figura 1 muestra los tipos de cultivos hidropónicos.

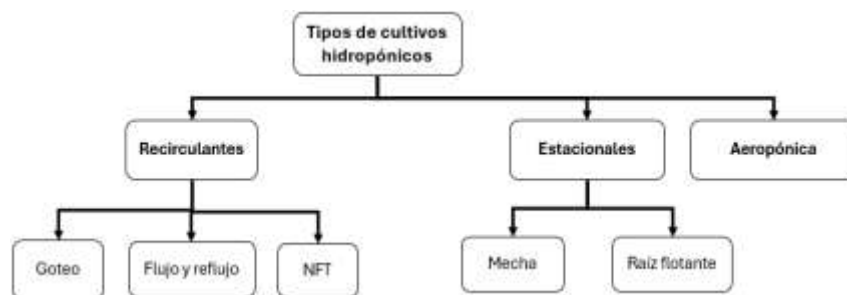


Figura 1. Tipos de cultivos hidropónicos

- **Cultivos hidropónicos estacionarios**

La característica principal de este tipo de sistemas es que la solución nutritiva permanece sin circulación activa para su distribución hacia las raíces (Brenes & Jiménez, 2016).

- **Mecha o pabilo**

Este sistema se caracteriza por su simplicidad, ya que no requiere de mecanismos externos para el transporte de la solución nutritiva. Los nutrientes llegan hasta las raíces a través de mechas o hilos absorbentes, mediante el proceso de capilaridad (Alcívar & Ibujés, 2023).



Figura 2. Sistema de cultivo por mecha

Fuente: (Alcívar & Ibujés, 2023).

- **Sistema de raíz flotante**

El sistema de raíz flotante se caracteriza por mantener las raíces de las plantas suspendidas directamente sobre una solución nutritiva, la cual contiene los elementos esenciales para su desarrollo. Para sostener las plantas, se emplean materiales como láminas de espuma flexible o “duroport” (poliestireno expandido), que permiten una adecuada sujeción sin interferir con el acceso de las raíces a los nutrientes disueltos en el agua (Ortiz, 2017).

Este sistema destaca por su eficiencia en el uso del recurso hídrico, favoreciendo el desarrollo y crecimiento de las plantas. Asimismo, permite implementar un control fitosanitario efectivo y asegura altos estándares de inocuidad en la producción agrícola (Mendoza, 2017).



Figura 3. Sistema de cultivo por raíz flotante

Fuente: (Alcívar & Ibujés, 2023).

- **Hortalizas en sistemas hidropónicos**

Las hortalizas representan un componente esencial en la dieta humana, debido a su alto valor nutricional y su capacidad para complementar una alimentación equilibrada (Chávez & Melgar, 2016). Una de ellas es la lechuga (*Lactuca sativa L.*), perteneciente a la familia Asteraceae (anteriormente conocida como Compositae), es una de las hortalizas de hoja más cultivadas y valoradas por su calidad culinaria. Su versatilidad agronómica permite su producción en diversas condiciones, incluyendo cultivo al aire libre, bajo invernadero y en sistemas hidropónicos (Beltrano & Gimenez, 2015).

- **Industria 4.0**

La industria 4.0 se resume al Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés), se refiere a la integración de una vasta red de dispositivos interconectados a través de internet, capaces de comunicarse y compartir datos entre sí. Esta tecnología permite que una amplia variedad de objetos, desde electrodomésticos hasta infraestructuras industriales, puedan ser controlados y monitoreados mediante interfaces de conexión sencillas, lo que amplía significativamente las posibilidades de automatización y eficiencia en diversos sectores, incluida la agricultura (López & Cárdenas, 2019).

Una de las principales contribuciones del Internet de las Cosas (IoT) en el ámbito agrícola es su capacidad para facilitar el monitoreo continuo de variables ambientales y nutricionales, lo cual permite la automatización de procesos y la recopilación precisa de datos. Esta tecnología es clave para el desarrollo de cultivos en los que se pueden controlar con exactitud factores como la temperatura, la humedad, el pH y la conductividad eléctrica, optimizando así las condiciones de crecimiento y reduciendo la intervención humana (Farooq, Riaz, Abid & Cárdenas, 2020).

Según Celis en 2016 y Rojko en 2017, la adopción de tecnologías asociadas a la Industria 4.0 representa una oportunidad significativa para que México incremente su productividad y competitividad en el entorno laboral. De acuerdo con diversos analistas financieros, la implementación de estas soluciones digitales permitiría a las empresas reducir hasta un 30% sus costos en procesos de fabricación y logística, así como entre un 10% y 20% en los costos asociados a la gestión de calidad (Peralta-Abarca et al., 2020).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la investigación, se contempló un estudio de manera consecutiva, constando de dos pruebas experimentales de un sistema de cultivo hidropónico con técnica de raíz flotante durante 9 días, incorporando agua del grifo a temperatura ambiente de manera manual, siendo la fuente de hidratación para las plántulas.

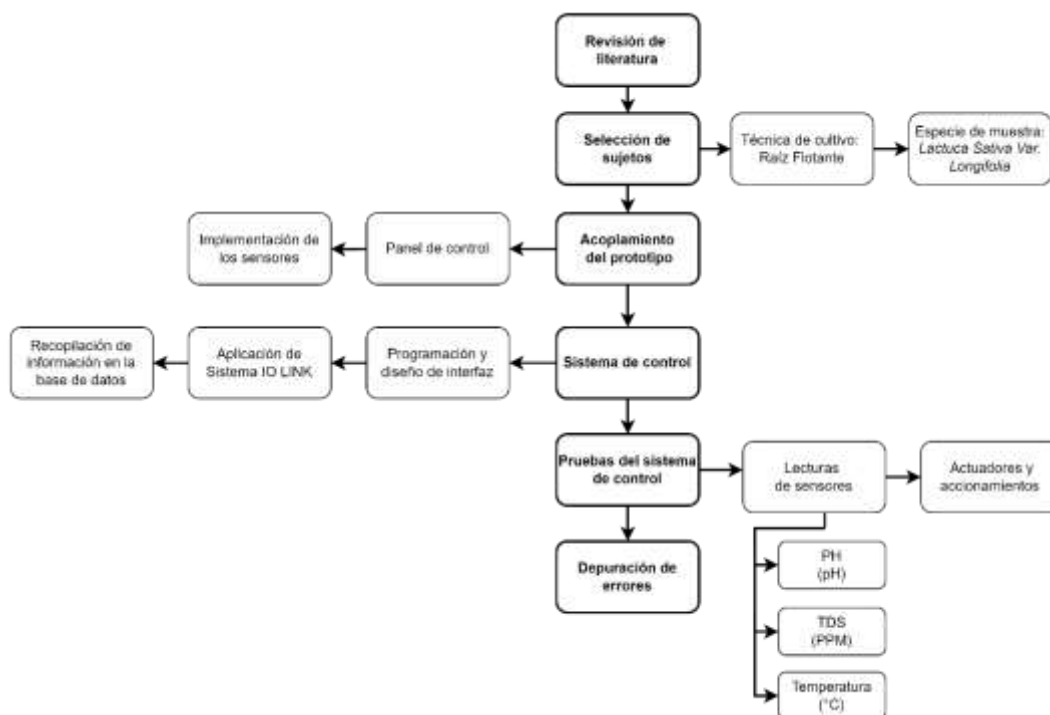


Figura 4. Diagrama de proceso metodológico del cultivo

En cada espacio se colocó una canastilla del cultivo de 1.3 cm de diámetro inferior, de 7.2 cm de largo y 3.8 cm de diámetro superior con su respectiva esponja de cultivo hidropónico fabricada con tierra de turba natural con pH neutro con la finalidad de alteraciones en la concentración del soluto al momento de cada prueba. Cada esponja contiene semillas de lechuga romana (*Lactuca Sativa Var. Longifolia*) de la marca Grandes Lagos con características de germinación especiales para almácigos con una duración de germinación entre 4 y 5 días.

Además, el sistema cuenta con iluminación de nivel autoajutable de dos modos de configuración para cultivos de frutos o vegetales; el modo de vegetal cuenta con ciclos de iluminación ultravioleta automática de día largo con 16 hrs de encendido con 8 hrs de descanso para la plántula. El

espectro de luz emitida combina tonalidades azul (400 - 500 nm), rojo y rojo de longitud alta (600 - 700 nm) y blanco (400 – 700 nm), favoreciendo en la etapa de germinación y en el crecimiento de raíces y hojas. Además, cuenta con un sistema de ventilación automática y de recirculación de agua sincronizados con ciclos de 30 min de encendido por 30 min de apagado.

Para el desarrollo de la primera prueba, el prototipo experimental no contó con ningún aditamento de control de variables. Por lo que la recopilación de condiciones se realizó por métodos tradicionales aplicados a cultivos hidropónicos estandarizados; siendo que, para medir los valores de concentración de hidrógeno se utilizó un pHmetro digital (pH), para conocer los valores de la temperatura del sistema (°C) se utilizó un multímetro con termopar y finalmente para medir el total de sólidos disueltos se utilizó un medidor digital de TDS (PPM).

En el diseño de la segunda prueba experimental, el sistema constó de tres elementos principales: siendo estos los sensores, actuadores y la interfaz táctil, con la finalidad de implementar un lazo de control que permita el acondicionamiento automático del sistema. En primera instancia, se implementaron las entradas del sistema: Se considero un sensor de pH con electrodo para medir los valores de concentración de hidrógeno, además para determinar la temperatura (°C) del soluto se diseñó un circuito amplificador con configuración de restador, incorporado a una resistencia tipo PRTD y para determinar la concentración de solidos disueltos (PPM), se utilizó una sonda tipo TDS con la finalidad de conocer las concentraciones de nutrientes dentro del soluto. De dichas variables, bajo investigación documental se consideró una temperatura ideal entre 15 y 18 grados centígrados, con un pico máximo de 24 °C y un mínimo de 7 °C, un nivel de pH entre 6.4 y 7.2, y de concentración de solidos en referente a la calidad del agua con valores entre 750 y 1400 PPM.

Para las salidas del sistema, se integró un dispositivo de enfriamiento termoeléctrico dado por una celda Peltier y un módulo de relés, en el que, mediante un pulso de salida digital, permite el control en base a las mediciones de temperatura del sistema, de este modo, cuando el soluto se encuentre fuera del rango de temperatura ideal, se activará el dispositivo dependiendo si por fuera del límite exterior o inferior del rango. Se regulará la parte caliente o fría de la celda para aumentar o disminuir los valores de la temperatura hasta conseguir el equilibrio esperado. Siendo el mismo procedimiento para el control de las concentraciones de hidrógeno del sistema, activando una bomba reguladora que da paso al flujo

de reguladores de pH, con la finalidad de mantener el rango óptimo de germinación para las plántulas. La cantidad de sólidos disueltos se controlará con recirculación constante del sustrato.

Todo ello bajo el control de un sistema embebido de 32 bits, proporcionado por la organización *M5STACK* que cuenta con conexión wifi en el cual se implementó un protocolo IoT denominado *EzData*, que en conjunto con los protocolos NTP y MQTT permiten monitorear los valores en tiempo real del sistema y mediante el protocolo *remote +*, observar remotamente los valores reales del sensado del cultivo. El sistema *IoT EzData* almacena toda la información registrada por los sensores cada 30 min, obteniendo al día un total de 50 datos de lectura de variables.

Para dirigir la respuesta del lazo de control al rango buscado se implementó el método PID con la finalidad de acoplar la salida o actuadores a los valores deseados, incorporando en este caso las tres constantes requeridas, así como el error en base a las mediciones dadas por los sensores.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de}{dt}(t)$$

Con la recolección de datos, se aplicará el análisis estadístico comparativo incluyendo medidas de tendencia central, de dispersión y análisis de tendencias para evaluar la estabilidad del sistema comparado con el no controlado en base a la creación de lazo de control. Se realizará el estudio durante 9 días en el que se medirá el tamaño correspondiente de cada plántula cultivada mediante el uso de un calibrador vernier para cada experimento, de la raíz hasta la hoja; de ella se obtendrán su impacto en el crecimiento, y se aplicará un análisis de frecuencias para determinar la distribución y el rendimiento obtenido.

RESULTADOS

Con el registro de los 9 días muestreados, se obtiene el concentrado de datos de las variables analizadas. Para ello se obtuvo el promedio del total de los 50 datos por día, con la finalidad de mostrar la tasa de cambio en el proceso de germinación, realizándose para cada variable utilizada. Se segmentaron respecto a su control (si presentaron este mismo o no), dividiéndose en su variable medida con respecto del tiempo (en días), como se ve en la Tabla 1.

Tabla 1. Recopilación y media de datos de variables muestreados.

Días	Temperatura (°C) No Controlado	TDS (PPM) No Controlado	pH No Controlado	Temperatura (°C) Controlado	TDS (PPM) Controlado	pH Controlado
1	26.34	1187.9	7.03	21.46	1458.80	6.26
2	25.17	1244.18	7.12	21.42	1458.41	6.97
3	27.87	1123.28	7.26	21.48	1459.25	7.08
4	29.23	1027.13	7.15	21.02	1483.83	6.82
5	30.63	983.74	6.67	22.05	1434.90	6.55
6	30.6	990.39	8.24	23.47	1531.23	7.32
7	28.8	1074.13	7.16	25.11	1327.24	6.91
8	24.06	1386.18	6.94	23.91	1353.63	6.74
9	19.65	1444.63	6.76	22.11	1444.63	6.35

Para cada conjunto de muestreo se obtuvo distintos comportamientos en referencia a su control, esto se puede observar en la Figura 5 en la que dependiendo de que sistema se analice se podrá denotar la tendencia de los datos hacia curvas más pronunciadas, positivas-negativas y/o constantes

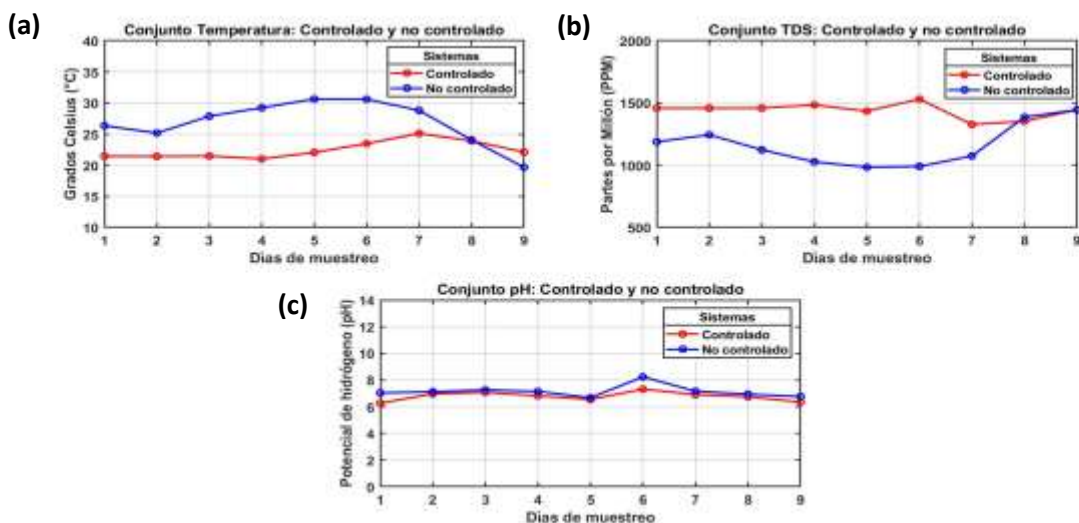


Figura 5. (a) Conjunto Temperatura: Controlado y no controlado; (b) Conjunto TDS: Controlado y no controlado; (c) Conjunto pH: Controlado y no controlado

Para identificar la tendencia de los valores medidos, se aplicó un modelo de regresión lineal a las variables experimentales, con la finalidad de aproximar una relación de dependencia entre días y cada conjunto muestreado. Las pendientes resultantes indican el cambio promedio por día de cada variable como se observa en la Tabla 2. Una pendiente cercana a cero reflejara estabilidad y tendencia constante de los datos, mientras que una pendiente positiva o negativa sugiere un aumento o disminución progresivo, respectivamente.

Tabla 2. Pendientes resultantes mediante regresión lineal.

Variable	Pendiente (m)	Interpretación
Temp No Controlado (°C)	-0.4477	Disminuye con el tiempo (inestabilidad)
Temp Controlado (°C)	0.3297	Aumenta levemente con el tiempo (estabilidad)
TDS No Controlado (PPM)	21.9647	Aumenta rápidamente (sin regulación)
TDS Controlado (PPM)	-9.7940	Con tendencia a estabilizarse
pH No Controlado	-0.0122	Ligera disminución
pH Controlado	-0.0028	Casi constante (mayor estabilidad)

De acuerdo con el análisis de la Tabla 2 se muestra que el sistema con el lazo de control logró una mayor estabilidad en temperatura, pH y TDS. Las pendientes del sistema sin el lazo de control denotan una inclinación más pronunciada, lo que se traduce en cambios abruptos y con mayor dispersión de datos que en comparación con el lazo de control, son valores más constantes debido a su cercanía con una pendiente ideal (de valor cero). Estos mismos resultados son delimitados con las medidas de tendencia central y dispersión de la Tabla 3, en las cuales se refleja una mayor variabilidad en el sistema sin lazo de control.

Tabla 3. Media y medidas de dispersión para los datos muestreados.

Parámetro	Media No Controlado	Desviación Estándar No Controlado	Media Controlado	Desviación Estándar Controlado	Mínimo No Controlado	Máximo No Controlado	Mínimo Controlado	Máximo controlado
Temperatura (°C)	26.93	3.56	22.45	1.4	19.65	30.63	19.65	30.63
TDS (PPM)	1162.40	168.15	1439.10	62.8	983.74	1444.63	1434.90	1531.23
pH	7.15	0.45	6.78	0.34	6.67	8.24	6.26	7.32

Aplicando un análisis estadístico comparativo entre las condiciones controladas y no controladas para evaluar el impacto del sistema automatizado, los diagramas de caja muestran visualmente la variabilidad de las mediciones.

Para el caso de la temperatura, contiene una mayor concentración de datos en referencia al método controlado; con menos dispersión y dando un comportamiento más constante. Siendo la temperatura promedio de 22.45 °C con una desviación estándar de 1.4, y pendiente de 0.3297. Para el sistema sin lazo de control, su modo de distribución de datos muestra que la temperatura presentó fluctuaciones más marcadas, alcanzando un máximo de 30.63 °C y un mínimo de 19.65 °C, lo que afectó en la estabilidad del entorno de crecimiento.

En el sistema controlado, la menor variabilidad de los datos permitió un ambiente más estable, reduciendo el estrés hídrico en las plántulas y favoreciendo una germinación uniforme. La estabilidad

térmica en el sistema controlado contribuyó a una mejor absorción de nutrientes y a una menor evaporación del agua, favoreciendo el desarrollo de las plantas.

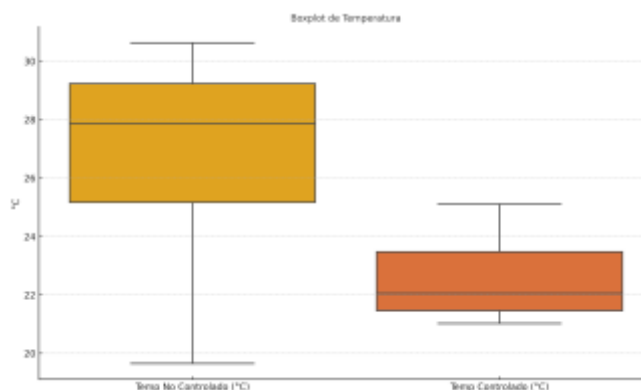


Figura 6. Diagrama de caja de Temperatura (°C)

Para el comportamiento de las Partes Por Millón (TDS) del soluto, se observa que para el método controlado tiende a un rango más elevado de medición con respecto al no controlado, siendo la media de 1439.10 PPM, con una constante pendiente negativa de -9.7940. Para el lazo del sistema sin control mantiene un menor rango respecto al valor de su medición, dando una media inferior al sistema controlado de 1162.40 PPM, con una pendiente de curva positiva de 21.9647, como se observa a su Figura 7. Ambos datos sugieren una absorción uniforme de nutrientes; sin embargo, la desviación estándar de 168.15 PPM así como el valor de la pendiente indican fluctuaciones más pronunciadas en comparación con el sistema automatizado. Estas variaciones pueden afectar la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plántulas y dificultar su crecimiento homogéneo.

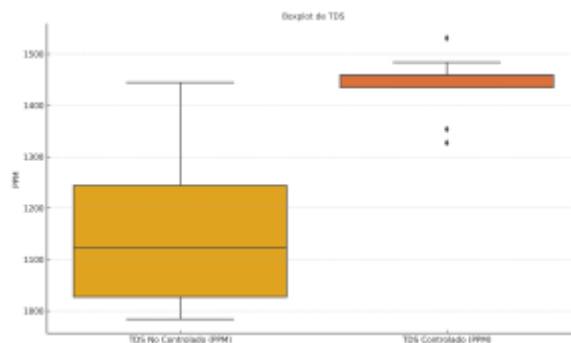


Figura 7. Diagrama de caja de TDS (PPM)

El comportamiento del nivel de acidez (pH) presenta una tendencia similar en ambos métodos usados. El sistema con lazo de control mantuvo valores más estables, con una media de 6.78, una desviación estándar de 0.34 y pendiente de curva negativa casi constante de -0.0028, favoreciendo un entorno óptimo para la absorción de nutrientes. En contraste, en el sistema no controlado se observaron mayores fluctuaciones, con valores entre 6.67 y 8.24, lo que podría haber impactado negativamente la eficiencia metabólica de las plantas.

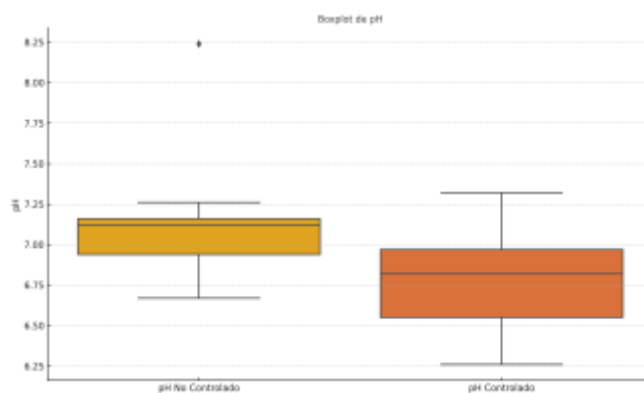


Figura 8. Diagrama de caja de pH

Una vez obtenidas las interpretaciones de la variabilidad en las mediciones de los parámetros analizados, se realizó una prueba t de Student (con varianzas no asumidas iguales) a cada variable medida, que permita determinar si las diferencias observadas son estadísticamente significativas. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la prueba t de Student

Variable	t-Statistic	P-Value	Diferencia Significativa
Temperatura (°C)	-3.5135	0.0053	Sí
TDS (PPM)	4.625	0.0009	Sí
pH	-1.9515	0.07	No

Análisis estadístico del crecimiento de las plantas

Para la comparación del crecimiento de las plantas, se analizó el total de las 12 muestras, obteniendo de ellas la altura correspondiente en milímetros, como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparativa de tamaño en las muestras

Muestra de plántula	Cultivo sin control (mm)	Cultivo controlado (mm)
I	71.42	17.13
II	102.07	87.64
III	60.81	93.33
IV	66.23	123.52
V	72.64	119.49
VI	70.18	130.19
VII	62.52	152.27
VIII	92.83	136.57
IX	89.45	142.29
X	67.84	138.02
XI	76.01	132.07
XII	114.93	0

Aplicando un análisis comparativo de los dos grupos: el de cultivo sin control automatizado (grupo A) y el de control automatizado (Grupo B), se puede denotar un mayor crecimiento del Grupo B, teniendo un mayor incremento en su desarrollo en comparación con el Grupo A. Lo cual denota que la estabilidad térmica y la regulación de nutrientes jugaron un papel clave, favoreciendo una mayor eficiencia en la producción agrícola.

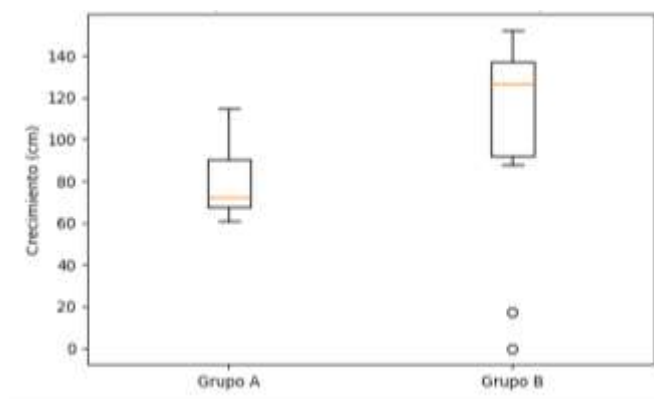


Figura 9. Comparación de crecimiento entre grupos.

Al analizar la distribución de crecimiento de ambos grupos en la Figura x, se denota una mayor concentración de datos en el Grupo A, teniendo un crecimiento más uniforme en comparación con el Grupo B, el cual tiene una distribución más ancha y desplazada a la derecha lo que sugiere un mayor crecimiento promedio respecto al grupo sin control. El hecho de que las curvas se superpongan indica que hay algunos valores de crecimiento comunes entre ambos grupos, aunque en diferentes proporciones.

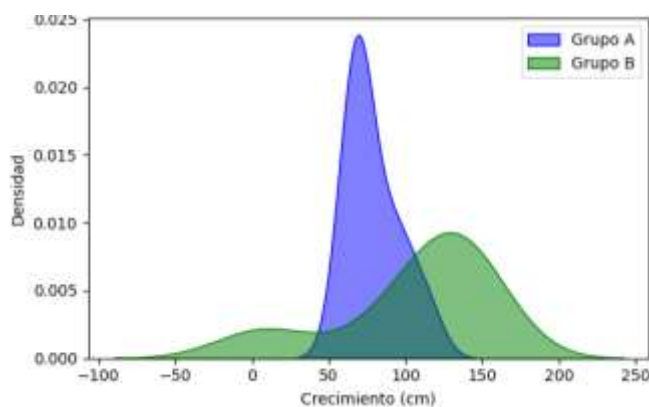


Figura 10. Comparación de crecimiento entre grupos.

Con la finalidad de evaluar estos datos de crecimiento promedio, fueron analizados estadísticamente mediante una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y una prueba t de Student para muestras independientes, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, con la finalidad de observar si existen diferencias significativas en el crecimiento. Los resultados se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 6. Comparativa de tamaño en las muestras

Grupos	t-Statistic	P-Value	Diferencia Significativa
Grupos muestreados (A y B)	-1.800	0.0856	No

Análisis de vitalidad y pigmentación de las lechugas

Realizando una inspección de a las muestras cultivadas entre ambos grupos, es en donde se encuentran las mayores diferencias. El Grupo B se denota una mayor proliferación, siendo notable al presenciar dichas mismas con una mayor generación de hojas de mucha más elongación, una pigmentación más viva, así como raíces más incrustadas, invadiendo el total del espacio de la esponja usada, como se puede observar en la Figura 11.

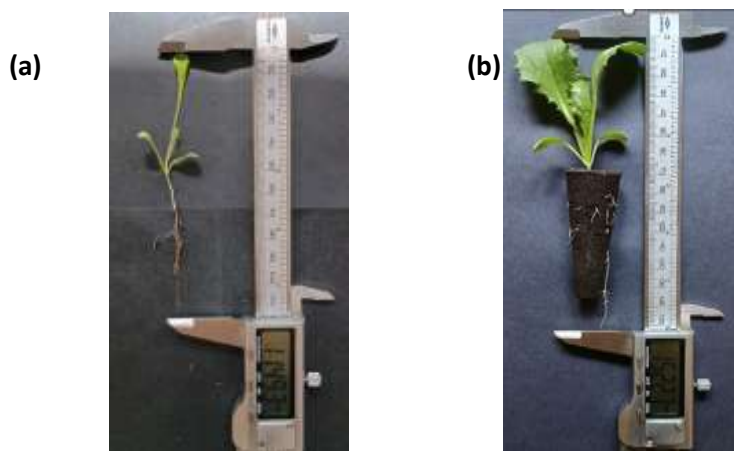


Figura 11. (a) Muestra significativa de plántulas en sistema no controlado; (b) Muestra significativa de plántulas en sistema controlado

Estos resultados concuerdan con estudios previos que indican que los sistemas hidropónicos automatizados permiten mantener condiciones ambientales más estables, reduciendo el estrés de las plantas y optimizando la absorción de nutrientes (Smith & Lee, 2021; Jones, 2022).

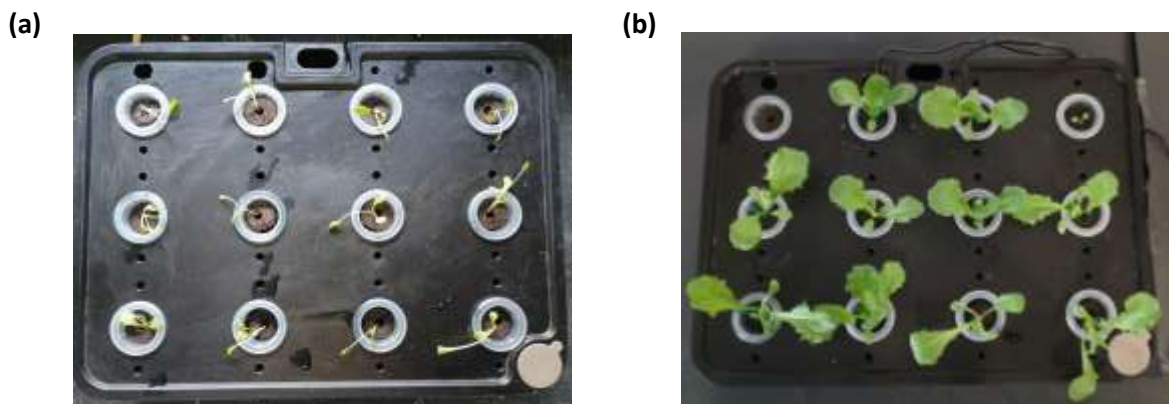


Figura 12. (a) Muestra total de plántulas en el sistema no controlado; (b) Muestra total de plántulas en sistema controlado.

DISCUSIÓN GENERAL

La implementación de un sistema de control automatizado en el entorno hidropónico demostró tener un impacto significativo en la estabilidad y optimización de las variables ambientales clave. A través del análisis comparativo de las condiciones controladas y no controladas se observaron diferencias marcadas en la distribución, tendencia y significancia estadística de las variables temperatura, pH y sólidos disueltos totales (TDS).

Los diagramas de caja revelaron que el sistema controlado presentó una menor dispersión en todas las variables, lo cual indica un entorno más estable para el desarrollo de las plántulas. En contraste, el sistema no controlado mostró una mayor variabilidad, especialmente en la temperatura, la cual en varios momentos excedió los límites considerados óptimos para el crecimiento vegetal.

El análisis de tendencias, mediante regresión lineal, evidenció que en el sistema controlado la pendiente de cambio diario fue cercana a cero, indicando estabilidad. En cambio, en el sistema no controlado se detectaron tendencias de incremento o decremento sostenido, lo que refleja la ausencia de mecanismos de regulación y mayor exposición a condiciones fluctuantes.

Estos resultados fueron respaldados por la prueba t de Student, donde se verificó que las diferencias en temperatura ($p = 0.0053$) y TDS ($p = 0.0009$) entre ambos sistemas fueron estadísticamente significativas. Aunque el pH mostró una tendencia favorable en el sistema controlado, no alcanzó significancia estadística ($p = 0.0700$), aunque se mantuvo dentro del rango óptimo en la mayoría de los casos. Además, la presentación de las hortalizas en el sistema controlado con respecto al

sistema no controlado evidencia un mayor rendimiento de crecimiento obteniendo un 63.64% para la germinación comparado con el grupo A.

Analizando estudios similares, como el de Abu Sneineh y Shabaneh (2023), que utilizaron un ESP32 y la plataforma Blynk para controlar un sistema hidropónico con TDS promedio de 1779 ppm y pH en torno a 6.82, los resultados obtenidos en este trabajo (TDS promedio 1439 ppm, pH 6.78) muestran una efectividad comparable, aunque con valores más ajustados al rango nutricional óptimo para lechuga.

En conjunto, los hallazgos de este estudio validan el uso de sistemas automatizados como una solución eficaz para mejorar el control de variables críticas en cultivos hidropónicos, logrando una mayor estabilidad, mejor trazabilidad de datos y potencial para escalar aplicaciones agrícolas con base tecnológica.

CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que la automatización en sistemas hidropónicos, mediante el uso de microcontroladores como el ESP32 y sensores de bajo costo, permite mantener condiciones ambientales más estables y controladas en comparación con métodos tradicionales sin regulación activa. Se observó que el sistema controlado logró valores más consistentes de temperatura, pH y TDS, evidenciados tanto en su menor dispersión como en las pendientes cercanas a cero observadas en el análisis de tendencias. La prueba t de Student confirmó diferencias estadísticamente significativas en temperatura y TDS, lo que refuerza la eficacia del sistema automatizado. Esto es reforzado con crecimiento obtenido en la etapa de germinación en la cual las diferencias en entre alturas, pigmentación, generación de raíces y hojas fungieron como el factor clave para la comparativa. La comparación con estudios similares mostró que el sistema propuesto se alinea con los estándares actuales de monitoreo inteligente en hidroponía, destacando por mantener los parámetros dentro de los rangos ideales para el desarrollo de lechuga romana.

En conclusión, la incorporación de tecnologías IoT y control embebido en la agricultura hidropónica representa una solución viable, reproducible y escalable para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y productividad de los cultivos sin suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcívar Moncayo, T. A., & Ibujés Coronel, C. J. (2023). *Desarrollo de un sistema hidropónico automatizado para zonas urbanas* [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional UPS. Recuperado de: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25781>
- Barbosa, G. L. (2015). *Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods*. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 12*(6), 6879–6891. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>
- Beltrano, J., & Gimenez, D. O. (2015). *Cultivo en hidroponía*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Brenes-Peralta, L., & Jimenez-Morales, M. F. (2016). *Manual de producción hidropónica para hortalizas de hoja en sistema NFT (Nutrient Film Technique)*. 26. Recuperado de: <http://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6581/manual-hidroponia-NFT.pdf?sequence=1>
- Carroll, P. A., Buss, G. P., & Griffith, M. A. C. (2023). *The Comparative Performance of Soil-Based Systems with Hydroponics*. *Agricultural Sciences, 14*(08), 1087–1097. Recuperado de: <https://doi.org/10.4236/as.2023.148069>
- Cotler, H., Corona, J. A., & Galeana-Pizaña, J. M. (2020). *Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación*. Investigaciones Geográficas/Investigaciones Geográficas - Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, 101. Recuperado de: <https://doi.org/10.14350/rig.59976>
- Cuatusmal Riascos, D. V. (2023). *Desarrollo de un sistema hidropónico tubular para la producción de hortalizas como apoyo al fortalecimiento de autosuficiencia de la mujer rural en el Contadero* [Artículo de investigación, Universidad Mariana]. Repositorio Institucional Universidad Mariana. Recuperado de: <https://repositorio.umariana.edu.co/handle/20.500.14112/28030>
- Fierro, E., Lozano, D., & Gaxiola, S. C., (2023). *Inseguridad alimentaria en México: análisis de dos escalas en 2020*. Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional, 33 (61), e231282. Publicación electrónica 26 de junio de 2023. Recuperado de: <https://doi.org/10.24836/es.v33i61.1282>
- González, J. A., & Mendoza, E. (2023). *Potential of vertical hydroponic agriculture in Mexico*. *Sustainability, 9*(1), 140. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/su9010140>

Hydroponic Systems. (2022). *Growers in México report that Hydroponic Systems' Spacers improve crop quality and yield by up to 5%*. Recuperado de: <https://hydroponicsystems.eu/growers-in-mexico-report-that-hydroponic-systems-spacers-improve-crop-quality-and-yield-by-up-to-5/>

Iberdrola. (s.f.). *¿Qué es la hidroponía y cuáles son sus ventajas?* Iberdrola. Recuperado de: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-hidroponia-y-ventajas>

Instituto Nacional de Salud Pública. (2021). *Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2020 sobre Covid-19. Morelos, México*. INSP. [Archivo PDF]. Recuperado de: https://ensanut.insp.mx/encuestas/ensanutcontinua2021/doctos/informes/220804_Ensa21_digital_4ago.pdf

López Garzón, W., & Cárdenas López, J. (2019). *Tecnología internet of things (IoT) y el big data*. *Mare Ingenii*, 1(1), 73–79. <https://doi.org/10.52948/mare.v1i1.183>

M. S. Farooq, S. Riaz, A. Abid, T. Umer, and Y. B. Zikria, “*Role of iot technology in agriculture: A systematic literature review*”, *Electronics*, vol. 9, no. 2, p. 319, 2020. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/electronics9020319>

Mendoza A. (2017). *Cultivo de lechuga (Lactuca sativa L.) hidropónica en sistema recirculante “NTF” tipo piramidal con 3 niveles de aireación*. Facultad de Agronomía. Arequipa- Perú. Universidad nacional de San Agustín.

Ogbolumani, O., & Mabaso, B. (2023). *An IoT-Based Hydroponic Monitoring and Control System for Sustainable Food Production*. *Journal of Digital Food, Energy & Water Systems*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/377021115_An_IoT-Based_Hydroponic_Monitoring_and_Control_System_for_Sustainable_Food_Production

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1996). *Declaración de Roma sobre la Seguridad Alimentaria Mundial*. FAO. Recuperado de: <https://www.fao.org/4/w3613s/w3613s00.htm>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2009). *Alimentar al mundo en 2050*. FAO. [Archivo PDF]. Recuperado de: <https://www.fao.org/4/k6021s/k6021s.pdf>

Ortiz, S. (2017). *Producción y calidad de forraje verde hidropónico de tres variedades de alfalfa (Medicago sativa)*. 1–65.

Palmitessa O. D., Signore A., & Santamaria P. (2024). *Advancements and future perspectives in nutrient film technique hydroponic system: a comprehensive review and bibliometric analysis*. Front. Plant Sci. 15:1504792. Recuperado de: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2024.1504792/full>

Petropoulos, S. A., Karkanis, A., & Danalatos, N. G. (2016). *Yield and quality of lettuce and rocket grown in floating culture system*. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 44*(2), 603–612. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/311645264_Yield_and_Quality_of_Lettuce_and_Rocket_Grown_in_Floating_Culture_System

Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Vasiliadis, L. (2023). *Una revisión de la hidroponía y la agricultura convencional basada en el consumo de energía y agua, el impacto ambiental y el uso del suelo*. Energies, 16 (4), 1690. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/en16041690>

Rodríguez, P. C., Paucar, L. o. C., Yapias, R. M., Santivañez, G. Q., Campó, W. C., Ninahuaman, R. H. J., Alipio, A. L., & Reyes, R. S. (2024). *Implicaciones del modelo industria 4.0 en la agroindustria: revisión sistemática*. Kanyú, 2(I), 65-82. Recuperado de: <https://doi.org/10.61210/kany.v2i1.75>

Urquía & Nuria. (2014). *La seguridad alimentaria en México*. Salud Pública de México, 56 (Supl. 1), s92-s98. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036-36342014000700014&lng=es&tlng=es.