

Integración de dispositivos IoT en distemas de producción acuapónica a pequeña escala

Viani Anabell Sánchez Hernández^{#1}, Jesús Emmanuel López Ramírez^{#2}, Francisco Eduardo Vázquez Carvajal^{#3}, Gisela Ramírez Pimentel^{#4}

[#]Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Zapotlanejo, Jalisco, México

¹Departamento de Innovación Agrícola Sustentable, ^{2,3,4}Departamento de Ingeniería en Informática

¹vianisanchezhernandez@gmail.com, ²jesusemanuellopezramirez@gmail.com,

³fransoa2003@gmail.com, ⁴gramirez@zapotlanejo.tecmm.edu.mx

Resumen – En la presente investigación se muestra el diseño de un invernadero inteligente basado en acuaponía, como una solución para la producción sostenible de alimentos en entornos urbanos, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 11 - Ciudades y Comunidades Sostenibles, 12 - Producción y Consumos Responsables, 13 - Acción por el Clima, de la Agenda 2030. El propósito de esta innovación, se basa en la integración de sensores de alta precisión, los cuales actúan como el sistema nervioso del ecosistema, permitiendo una transición de la agricultura tradicional a una gestión autónoma de precisión.

La importancia del uso de sensores en este sistema es fundamental, ya que la acuaponía depende del equilibrio simbiótico entre peces, bacterias y plantas. Por lo que, la hipótesis de este trabajo plantea que el monitoreo constante de variables como el pH (0-14), TDS analógico, oxígeno disuelto y temperatura (DS18B20), mejora el equilibrio biológico del ecosistema y reduce las tareas operativas que se realizan manualmente. En todo caso, estos componentes mitigan el impacto de los cambios ambientales bruscos al generar información inmediata sobre las condiciones del agua y el consumo de nutrientes.

Así mismo, la metodología utilizada hace uso de los sensores conectados al microcontrolador ESP-WROOM-32, que maneja los datos facilitando la conectividad del Internet de las Cosas (IoT) y el procesamiento de los datos. Además, se agregan los módulos de relevadores y reguladores de voltaje para automatizar las respuestas que se reciben del sistema.

Logrando con esto que, los resultados obtenidos comprueben que esta automatización eleva el rendimiento de los cultivos y mejora la productividad agrícola, porque trabaja con energía solar. En conclusión, el uso de herramientas del Internet de las Cosas (IoT) facilita la implementación de sistemas productivos estables, económicos y viables ante los problemas globales como son el cambio climático y la inseguridad de los alimentos, consolidándose como una opción escalable y sustentable.

Palabras Clave: Acuaponía, Big Data, Biogeoquímica, IoT, Monitoreo Automatizado, UI/UX

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, garantizar el abasto de alimentos y cuidar el agua son dos de las tareas más complicadas a nivel global. Por lo cual, surge la necesidad de diseñar métodos de producción eficientes siendo evidente el impacto ambiental junto con las carencias nutricionales de la población. Por un lado, la FAO [1] indica que el sector agropecuario mundial gasta cerca del 70% del agua dulce disponible. Por el otro, los balances de la FAOSTAT reflejan un panorama complicado para México: el 13.1% de los niños menores de cinco años sufre de retraso en su crecimiento, y un 7.4% enfrenta problemas de sobrepeso. Ante este escenario de malnutrición y escasez hídrica, la acuaponía es una alternativa viable no solo porque disminuye el consumo de agua, sino porque funciona como una opción sustentable para aportar nutrientes de calidad en zonas vulnerables [2].

En este contexto, la acuaponía surge como una solución disruptiva al integrar la acuicultura de recirculación con la hidroponía, logrando una reducción del consumo hídrico de lo que permite disminuir el consumo de agua hasta en un 90% en comparación con los métodos agrícolas tradicionales. Asimismo, al balancear la producción acuícola con el cultivo de hortalizas, se mitiga de manera significativa el impacto en el medio ambiente[3]. Este sistema aprovecha procesos biológicos donde las bacterias nitrificantes transforman los desechos de los peces en nutrientes asimilables para las plantas, mejorando el uso de recursos limitados [4], lo que se traduce en una disminución de los costos operativos, debido al buen aprovechamiento de los recursos y a la posibilidad de generar múltiples vías de rentabilidad mediante la doble producción del sistema [3].

Sin embargo, la estabilidad de estos ecosistemas es extremadamente frágil y depende de interacciones biogeoquímicas complejas. Un factor crítico es el consumo estequiométrico de alcalinidad durante la nitrificación; se ha demostrado que, por cada miligramo de nitrógeno amoniacal

oxidado, se consumen 7.14 mg de alcalinidad como CaCO_3 [5]. Esta dinámica puede provocar el colapso del sistema es estabilización del pH, alterando el potencial de hidrógeno (pH) y afectando la biodisponibilidad nutricional y la salud de los peces [6]. En fases de desequilibrio biológico, los niveles de nitritos (NO_2) pueden alcanzar concentraciones críticas de hasta 10 mg/L. Este fenómeno es particularmente peligroso debido a la toxicidad del nitrito, el cual interfiere con la eficiencia en la oxigenación en la sangre de los peces [7], mientras que los niveles ideales deben mantenerse cercanos a 0 mg/L, concentraciones superiores a 5 mg/L se consideran altamente tóxicas y potencialmente letales para especies de agua dulce como la tilapia y el goldfish.

Tradicionalmente, el monitoreo de estas variables se ha realizado de forma manual, lo que limita la capacidad de respuesta ante fluctuaciones ambientales rápidas. La integración del Internet de las Cosas (IoT) representa un cambio de paradigma hacia la agricultura de precisión [8]. La presente investigación propone un sistema automatizado basado en el microcontrolador ESP-WROOM-32 y sensores de alta precisión para el monitoreo en tiempo real de pH, TDS, oxígeno disuelto y temperatura (DS18B20). Esta arquitectura no solo mejora la productividad agrícola, sino que se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 11, 12 y 13, democratizando el acceso a tecnologías de producción resilientes frente a los desafíos del cambio climático [9].

II. DESARROLLO DE CONTENIDOS

A. Planteamiento del Problema

Es importante mencionar que, con el aumento de la población y el deterioro de los recursos naturales, se presenta un obstáculo grande para la producción global de alimentos, ya que reportes de la FAO [2] señalan que la agricultura convencional absorbe el 70% de las extracciones mundiales de agua dulce, un esquema inviable ante los efectos del cambio climático. Por lo que, como respuesta a este problema, se destaca la acuaponía como un modelo de producción circular eficiente; sin embargo, llevarla a la práctica a escala urbana y residencial sigue siendo complicado debido a las dificultades técnicas que exige su control biológico.

Se puede señalar que el sistema acuapónico funciona como un ecosistema simbiótico de alta sensibilidad donde coexisten tres grupos biológicos: peces, bacterias nitrificantes y plantas. De modo que la estabilidad de este sistema depende de un equilibrio biogeoquímico vulnerable y frágil. De acuerdo con [5], los procesos como la nitrificación consumen alcalinidad de forma constante (7.14 mg de CaCO_3 por cada mg de nitrógeno amoniacal oxidado), lo que genera una acidificación progresiva del medio. Tal es el caso que, en ausencia de un monitoreo riguroso, esta dinámica provoca el colapso del sistema de estabilización, alterando el potencial de hidrógeno y afectando la biodisponibilidad de nutrientes y la salud de los peces [6].

De forma que, en los proyectos de pequeña escala, es común

que la medición de los parámetros críticos como son el pH, los sólidos disueltos totales (TDS), la temperatura y el oxígeno disuelto se haga de forma manual o esporádica. Esta falta de registros continuos impide detectar llevar un control de los cambios que pueden presentarse en las variables para ser atendidas a tiempo y esto puede generar picos de toxicidad por los nitritos (NO_2) que llegan a registrar niveles de riesgo de hasta 10 mg/L [7], ocasionando la pérdida total de los cultivos, así como los peces.

Aunque el Internet de las Cosas (IoT) facilita la automatización de procesos, su implementación y uso todavía enfrenta limitaciones en el sector productivo que afectan su funcionamiento. Tal como indican [4], la mayor parte de los agricultores batallan con los elevados costos del equipamiento comercial y con la falta de guías técnicas claras para conectar sensores de precisión en microcontroladores de bajo costo como lo es el ESP-WROOM-32.

Por lo tanto, se identificó que las carencias en las técnicas de monitoreo tradicionales colocan en riesgo el seguimiento de los sistemas de cultivo sostenibles. Para resolverlo, se planteó desarrollar y evaluar una arquitectura de Internet de las Cosas (IoT) accesible, que automatice el manejo del sistema. Este enfoque permite mantener un historial de los datos recabados de las variables y propiedades medibles (físicas y químicas) y prevenir desequilibrios biológicos que afecten el funcionamiento del sistema, vinculando la investigación directamente con las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 11 - Ciudades y Comunidades Sostenibles, 12 - Producción y Consumos Responsables, 13 - Acción por el Clima, de la Agenda 2030.

B. Justificación

En la actualidad el mundo vive una ola de evolución tecnológica, la cual ha obligado a las organizaciones a apostar hacia panoramas de procesos correspondientes a la digitalización, automatización y comercialización de bienes o servicios, esto gracias a la reciente mejora de las herramientas tecnológicas con integración de la Inteligencia Artificial, si bien, llega a brindar diversos beneficios, puede representar grandes desafíos al sector del empleo, gracias a la falta de necesidad por contratar mano de obra.

De esta manera, tomando en cuenta la mención por parte del académico David Cuenca Orozco perteneciente al Centro de Estudios en Ciencias de la Comunicación de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de la UNAM en la gaceta UNAM de título “Peligran cuatro de cada diez empleos en el mundo por avances tecnológicos y la IA”, “Los sectores en los que ya está presente la automatización son el de la maquila, el de la manufactura y el de las tecnologías de información y comunicación” [10]. Siendo este ultimo de especial interés.

No obstante, la mejora y adaptación tecnológica ha logrado impulsar nuevas herramientas para la comunicación del mundo

físico con el mundo digital, una de ellas, conocida como IoT (Internet de las Cosas). ¿Qué vuelve tan importante al IoT? La naturaleza del IoT es la interconexión la cual permite el intercambio de datos sin esfuerzo, logrando ofrecer ventajas significativas tanto para las organizaciones como los usuarios. Algunos de los beneficios son: mayor eficiencia en la ejecución de procesos o tareas, automatización mejorada y mejora en la toma de decisiones.

Por otro lado, aplicando el marco de evolución tecnológica se tiene que un sistema acuapónico en equilibrio ya no depende únicamente de la observación empírica, sino del desarrollo de una relación simbiótica optimizada mediante la automatización. Dado que el equilibrio del ecosistema es frágil y depende de variables críticas de la calidad del agua, la integración de herramientas de IoT se vuelve fundamental [11].

La interconexión permite el intercambio de datos en tiempo real, mitigando los desafíos de la mano de obra humana y garantizando que las variables independientes sean armonizadas, mediante una toma de decisiones mejorada. Gracias a la digitalización de los procesos de monitoreo, no solo asegura el crecimiento de plantas y organismos acuáticos, sino que inserta a la producción agroindustrial en el panorama de la eficiencia y comercialización tecnológica que demanda el mercado actual.

La presente investigación se fundamenta en la necesidad imperante de transicionar hacia modelos de producción agroalimentaria que no solo optimicen el uso de recursos finitos, sino que garanticen la estabilidad de los ecosistemas mediante la digitalización. Mientras que la agricultura convencional enfrenta rendimientos decrecientes debido al estrés hídrico y la degradación del suelo, la acuaponía emerge como una solución técnica que ofrece los siguientes beneficios:

- 1) *Control del desequilibrio químico mediante monitoreo continuo:* En este punto, la acuaponía funciona como un sistema cerrado de recirculación donde la estabilidad biológica está sujeta a la nitrificación, ya que los datos experimentales demuestran que, por cada miligramo de nitrógeno amoniacal que las bacterias procesan, se consumen 7.14 mg de alcalinidad (CaCO_3). Por lo que, este fenómeno reduce poco a poco la capacidad reguladora del agua, causando bajas imprevistas en el pH que ponen en riesgo el sistema en pocas horas. Entonces, el uso de sensores de Internet de las Cosas (IoT) elimina las deficiencias del control manual al identificar un aumento de acidez. Así, es posible actuar antes de alcanzar concentraciones críticas de nitritos (10mg/L), protegiendo a los peces de forma oportuna, algo más complicado mediante mediciones intermitentes.
- 2) *Mejorar la absorción de nutrientes:* Al integrar la medición constante de pH, TDS y temperatura, es posible supervisar de cerca las condiciones en que las plantas asimilan los nutrientes, ya que el equilibrio en la acuaponía es muy delicado; si el pH rebasa el rango recomendado, las raíces

se bloquean y dejan de absorber los elementos químicos disponibles en el agua. Por esta razón, la incorporación del microcontrolador ESP-WROOM-32 para el registro continuo de estas variables, convierte al prototipo en un proyecto de agricultura de precisión, aunque sea a pequeña escala. De este modo, los parámetros se estabilizan en valores adecuados, lo cual favorece el desarrollo de los cultivos y protege la calidad de vida de los peces sin el desperdicio de insumos.

3) *Monitoreo de agentes químicos y estabilidad del cultivo:*

La integración de estos componentes busca nivelar a un estado óptimo, el potencial de hidrógeno en los rangos recomendados para garantizar la solubilidad de los nutrientes en el agua. Esto se debe a la fragilidad del ecosistema, porque si el agua se acidifica o se alcaliniza fuera de los límites recomendados, los minerales se vuelven insolubles, impidiendo que las raíces absorban el alimento disponible, afectando directamente el crecimiento de las plantas. Por lo tanto, contar con una plataforma de Internet de las Cosas (IoT) accesible, brinda el soporte técnico necesario para asegurar que la interacción iónica entre los elementos químicos se mantenga estable a lo largo del ciclo de producción.

De esta forma, la arquitectura del Internet de las Cosas (IoT) mejora la automatización de las tareas y se convierte en la herramienta analítica necesaria para registrar el comportamiento histórico del sistema y medir, con datos reales, cómo influye el control automatizado en la estabilidad del cultivo para la producción de alimentos. Por lo tanto, la presente investigación plantea la siguiente pregunta de investigación: *¿De qué manera la implementación de un sistema de monitoreo IoT basado en el microcontrolador ESP-WROOM-32 optimiza la estabilidad del sistema acuapónico y garantiza el control de la ventana de absorción de nutrientes en sistemas acuapónicos a pequeña escala?*

C. *Objetivo*

Desarrollar y evaluar un sistema de monitoreo automatizado basado en la arquitectura IoT (Internet de las Cosas) y el microcontrolador ESP-WROOM-32, diseñado para optimizar la resiliencia ecosistémica y garantizar el control continuo de la ventana de absorción de nutrientes en un sistema acuapónico a pequeña escala.

D. *Hipótesis*

La implementación de una arquitectura de monitoreo IoT, permite estabilizar la ventana de absorción de nutrientes y prevenir el colapso del sistema de acuaponía de pequeña escala; de tal manera que, al mantener el pH y el oxígeno disuelto dentro de rangos óptimos de forma continua, se incrementa la resiliencia biológica del ecosistema, reduciendo drásticamente la tasa de mortalidad por picos de toxicidad de nitritos y optimizando la biodisponibilidad iónica para el crecimiento vegetal en comparación con los métodos de gestión manuales.

E. Metodología

La presente investigación emplea un enfoque experimental y cuantitativo, centrado en el diseño e implementación de una arquitectura de monitoreo continuo para el prototipo acuapónico. El estudio se divide en las siguientes fases operativas:

1) *Arquitectura del sistema de monitoreo IoT*: La robustez del sistema de monitoreo se fundamenta en la integración de periféricos de grado industrial y una estructura de procesamiento distribuido. La selección de cada componente responde a la necesidad de mitigar la latencia en la toma de decisiones y garantizar la estabilidad biológica del sistema.

• Instrumentación y periféricos de medición

- Sensor de pH Analógico (rango 0-14): Este dispositivo permite la monitorización continua de la acidificación metabólica derivada de la nitrificación. Su función principal es garantizar que el sistema permanezca dentro de la ventana de absorción óptima para las plantas y evitar el colapso del sistema tampón ante el consumo estequiométrico de alcalinidad (ver figura 1).

Sensor: Sensor de pH Analógico



Variable Crítica: Potencial de Hidrógeno

Rango/Modelo: 0 - 14 pH

Función Científica y Control: Monitoreo de la acidificación metabólica y control de la ventana de absorción.

Figura 1. Sensor de pH para monitoreo de acidificación (autor propio).

- Sensor TDS Analógico: Implementado para la inferencia de la concentración iónica y la tasa de mineralización de nutrientes en el agua. Este sensor es clave para verificar la estabilidad iónica del ecosistema y asegurar que la carga de sólidos disueltos (PPM) sea adecuada para el desarrollo vegetal (ver figura 2).

Sensor: Sensor TDS Analógico



Variable Crítica: Sólidos Disueltos

Rango/Modelo: mg/L (PPM)

Función Científica y Control: Inferencia de la concentración iónica y tasa de mineralización de nutrientes.

Figura 2. Sensor TDS para inferir la mineralización de nutrientes y la estabilidad iónica (autor propio).

- Sensor de Temperatura Digital (DS18B20): Sensor sumergible diseñado para la vigilancia de la cinética enzimática y el metabolismo de las bacterias nitrificantes (Nitrosomonas y Nitrobacter). Dado que la temperatura afecta directamente la tasa de crecimiento bacteriano, su monitoreo 24/7 es esencial para la homeostasis del sistema (ver figura 3).

Sensor: Sensor Temperatura Digital Sumergible



Variable Crítica: Temperatura

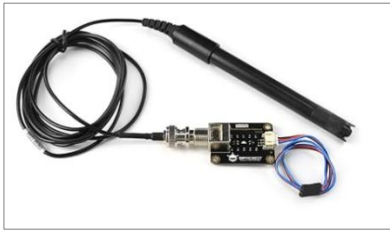
Rango/Modelo: DS18B20

Función Científica y Control: Vigilancia de la cinética enzimática y metabolismo de las bacterias nitrificantes.

Figura 3. Sensor de Temperatura, esencial para vigilar la cinética enzimática de las bacterias nitrificantes (autor propio).

- Sensor Kit Gravity de Oxígeno Disuelto (OD): Vital para asegurar niveles de oxígeno superiores a 2.0 mg/L, evitando así la inhibición de las enzimas críticas Amonio Monooxigenasa (AMO) y Nitrito Oxidoreductasa (NXR). Su control constante previene la acumulación de compuestos tóxicos como los nitritos (NO₂) (ver figura 4).

Sensor: Sensor Kit Gravity Analógico



Variable Crítica: Oxígeno Disuelto

Rango/Modelo: mg/L (O₂)

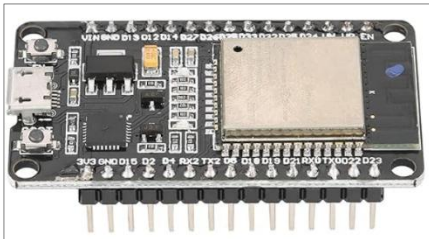
Función Científica y Control: Prevención de la inhibición de las enzimas AMO y NXR (mantenimiento > 2.0 mg/L).

Figura 4. Sensor de Oxígeno Disuelto para evitar la inhibición de las enzimas AMO y NXR (autor propio)

2) *Infraestructura de Procesamiento y Gestión de Datos:* Para garantizar la integridad de la información y superar las restricciones de hardware, el diseño transita de una unidad de control aislada hacia una arquitectura de gestión masiva y distribuida:

- **Capa de Adquisición y Control Periférico:** El núcleo de procesamiento local reside en el microcontrolador ESP-WROOM-32, el cual actúa como nodo periférico para la lectura y digitalización de las señales analógicas de los sensores. Para maximizar la eficiencia de las conexiones y facilitar el mantenimiento, se implementa una Placa de Expansión ESP32, la cual centraliza el cableado de los sensores hacia los pines GPIO del controlador (ver figura 5 y figura 6).

Microcontrolador: Unidad de Procesamiento



ESP-WROOM-32

Procesador principal, conectividad Wi-Fi/Bluetooth, digitalización de sensores.

Figura 5. Unidad de procesamiento ESP-WROOM-32 (autor propio).

Placa de Expansión: Capa de Interconexión



Placa de Expansión ESP32

Centralización de cableado, fácil acceso a pines

GPIO.

Figura 6. Placa de Expansión ESP32 (autor propio).

- **Gestión Energética y Actuación:** La estabilidad del suministro eléctrico para los sensores y el controlador se asegura mediante un Regulador de Voltaje Ajustable (convertidor Elevador DC-DC), que estabiliza el voltaje de entrada (4.5V-32V) a los 5V constantes requeridos por la lógica del sistema. Asimismo, se integra un Módulo Relevador de 1 Canal (5V 10A) para la gestión de actuadores externos (como bombas de aire o agua), permitiendo una respuesta automatizada ante alertas críticas (ver figura 7).

Regulador DC_DC: Gestión Energética



Convertidor Elevador DC-DC (4.5V-32V a 5V-35V)

Estabilización de voltaje para sensores y lógica

Figura 7. Regulador de Voltaje Ajustable, convertidor Elevador DC-DC 4.5V-32V a 5V-35V (autor propio).

- **Capa de Almacenamiento y Análisis:** Los datos digitalizados por el ESP32 se transmiten hacia una unidad Raspberry Pi, la cual opera como servidor de base de datos local. Por lo que, la automatización del registro de los datos de forma continua, no solo asegura el almacenamiento de datos a lo largo del tiempo, sino que optimiza la interpretación del comportamiento del sistema. Ya que esta ventaja permite identificar a tiempo picos de toxicidad por nitritos (NO₂) de hasta 10 mg/L, siendo una concentración crítica que coincide con las fases de alteración biológica documentadas en las pruebas del sistema (ver Figura 8).

Relevador 1 Canal: Módulo de actuación



Relevador 5V 10A

Control automatizado de bombas y actuadores de

potencia

Figura 8. Modulo relevador de un canal de 5V, 10A, utilizado en el prototipo (autor propio).

3) *Evaluación de funcionalidad del desempeño de los sensores:* Con el propósito de realizar una comparación entre el funcionamiento de la arquitectura del Internet de las Cosas (IoT) contra el manejo tradicional, se elaboraron los siguientes criterios de evaluación:

- Control de las actividades microbianas: Se realizó el seguimiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) con el objetivo de evitar el crecimiento de organismos heterótrofos que interfieran con el proceso de las bacterias nitrificantes.
- Monitoreo de las bacterias: El circuito se diseñó para operar mediante un regulador de voltaje ajustable y convertidores DC-DC (convertidor de potencia que transforma corriente continua de un nivel de tensión a otro) acoplados a un sistema fotovoltaico, lo que garantiza el funcionamiento de los sensores ante interrupciones en el suministro eléctrico comercial.
- Control del diagnóstico de toxicidad por medio de alertas: Actualmente, se trabaja en la programación de alertas en tiempo real, diseñadas para identificar concentraciones de nitritos (NO_2) que lleguen a los 10 mg/L, resultando estas ligadas con los desajustes biológicos del ecosistema.

4) *Validación de la Resiliencia Operativa Procesamiento y Visualización:* Los datos recolectados se transmiten sin esfuerzo mediante protocolos de interconexión IoT. La información es procesada para generar análisis históricos que permiten correlacionar variables como la temperatura y la conductividad eléctrica con sucesiones ecológicas en el sistema. La visualización se realiza a través de una interfaz móvil y una aplicación de escritorio, permitiendo una toma de decisiones proactiva que mitigue la necesidad de mano de obra constante y reduzca el riesgo de error humano.

F. Materiales y métodos

La investigación se basa en la implementación del prototipo acuapónico automatizado de pequeña escala. El sistema de gestión utiliza una arquitectura de procesamiento dual: un microcontrolador ESP-WROOM-32 (ver figura 5) para la adquisición periférica de datos y una Raspberry Pi para el almacenamiento masivo y análisis histórico de la información. Para la estabilidad eléctrica, se emplea un regulador de voltaje ajustable DC-DC y una placa de expansión que centraliza la conexión de los sensores. Para llevar a cabo esto se utilizan dos tipos de variables, las cuales son:

1) *Variables Interdependientes (Parámetros Físicoquímicos):*

Estas variables representan el estado metabólico del ecosistema y son monitoreadas para prevenir el colapso del

sistema acuapónico:

- Potencial de Hidrógeno (pH): Monitorea la acidificación metabólica y la ventana de absorción.
- Oxígeno Disuelto (OD): Vital para evitar la inhibición de las enzimas nitrificantes ($> 2.0 \text{ mg/L}$).
- Temperatura: Regula la cinética enzimática y la tasa de crecimiento bacteriano.
- Sólidos Disueltos Totales (TDS): Indica la mineralización de nutrientes y la carga iónica del agua.
- Sales y Conductividad Eléctrica (CE): Variables asociadas a la salinidad y la nutrición vegetal.

2) *Variables Independientes y Factores de Riesgo:* Se definen como los elementos externos que pueden alterar la homeostasis del estanque acuapónico:

- Carga Orgánica y Alimento: El exceso de restos de comida incrementa la DBO y desplaza a las bacterias nitrificantes.
- Contaminantes Externos: Presencia de agentes químicos, metales pesados o patógenos que pueden inhibir la actividad microbiana o afectar la salud de los peces.
- Variabilidad Ambiental: Fluctuaciones de luz solar y temperatura exterior que impactan la fotosíntesis y el balance térmico.
- Intervención Humana: Frecuencia de mantenimiento, dosificación de alcalinidad (CaCO_3) y calidad del agua de reposición.

III. RESULTADOS

A. Desempeño del monitoreo en tiempo real

La implementación de la arquitectura IoT permitió una captura de datos con una fidelidad superior al monitoreo manual, eliminando los periodos de latencia de supervisión. Las siguientes figuras ilustran el comportamiento del sistema bajo condiciones operativas reales:

- Interfaz de monitoreo remoto (Dashboard): Esta captura (ver figura 9) muestra la visualización en tiempo real de las variables críticas (pH, TDS, Temperatura y OD) integrada en la aplicación móvil. Se observa la centralización de datos (pH: 6, Temperatura: 23°C , TDS: 110 ppm) permitiendo una supervisión proactiva y cómo el sistema centraliza los datos provenientes del ESP32, permitiendo una supervisión proactiva sin necesidad de presencia física en el invernadero.



Figura 9: Interfaz de monitoreo remoto (Dashboard) (autor propio).

- Registro de temperatura media: La gráfica (ver figura 10) presenta el comportamiento de la temperatura, manteniéndose en un promedio de 23°C. Este seguimiento es esencial para asegurar que el metabolismo de las bacterias nitrificantes no se detenga por cambios bruscos de clima.

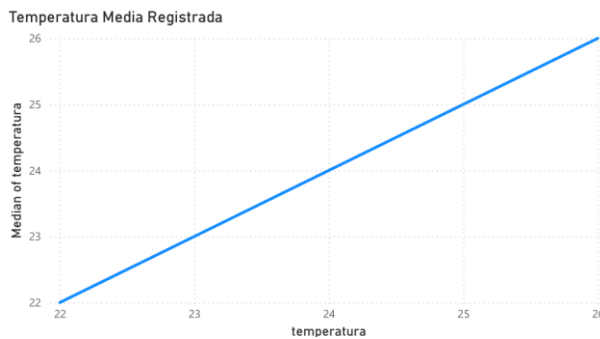


Figura 10: Registro de temperatura media (autor propio)

- Registro histórico de TDS y estabilidad iónica: La gráfica (ver figura 11) muestra la fluctuación de los Sólidos Disueltos Totales (TDS) a lo largo de un ciclo de 24 horas. Estos datos validan la tasa de mineralización de nutrientes y la estabilidad de sales necesarias para la fase hidropónica del sistema acuapónico.

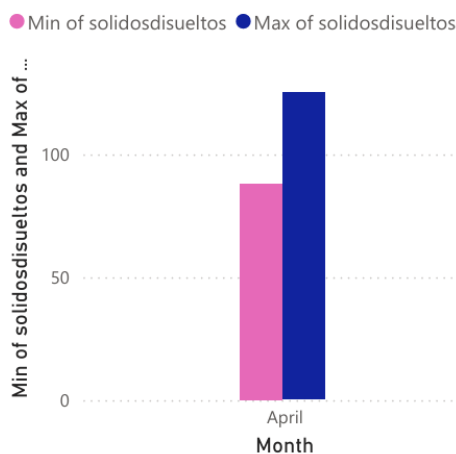


Figura 11: Solidos Disueltos Minimios y Maximios durante el mes (autor propio)

- Dinámica del pH y ventana de absorción: En esta gráfica

(figura 12) se aprecia el control preventivo del sistema sobre el pH. El monitoreo continuo permitió detectar tendencias de acidificación antes de alcanzar el punto crítico de 5.8, asegurando que el parámetro se mantuviera en el rango óptimo de 6.8 a 7.0 para maximizar la biodisponibilidad de nutrientes.

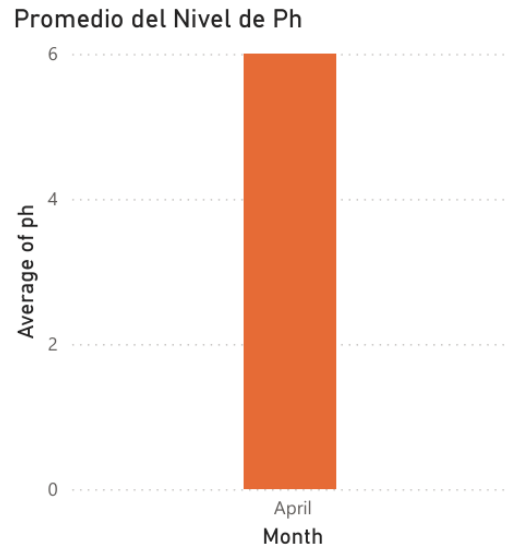


Figura 12: Promedio del nivel de pH (autor propio)

Los resultados demuestran que la transición a una gestión proactiva basada en IoT mitigó el riesgo de colapso bioquímico. Al integrar la determinación cuantitativa de las cantidades de reactivos y productos involucrados en una reacción química, basado en ecuaciones químicas balanceadas del consumo de alcalinidad (7.14 mg de CaCO_3), el sistema fue capaz de predecir la caída del sistema acuapónico y alertar al usuario a través del relevador de actuación para restablecer la homeostasis. Por lo tanto, al evaluar los métodos tradicionales frente a la infraestructura basada en la Raspberry Pi y el ESP32, la capacidad de reacción del hardware ante el uso de los sensores justifica su implementación, siendo el resultado final un prototipo acuapónico diseñado para optimizar los recursos energéticos, mientras conserva el equilibrio biológico del sistema en pequeña escala.

IV. CONCLUSIONES

Se concluye que los resultados de esta investigación evidencian que la incorporación de herramientas de Internet de las Cosas (IoT) en la acuaponía mejorando el manejo del cuidado de los cultivos al sistematizar con uso de sensores el control de sus variables. Es decir, el monitoreo constante permite regular las condiciones fisicoquímicas requeridas para la asimilación de nutrientes, detectando a tiempo las alteraciones importantes en el pH por la pérdida de alcalinidad, resultando esto como un fenómeno difícil de diagnosticar mediante muestreos manuales o esporádicos. Por tal motivo, la capacidad de adelantarse y detectar compuestos nocivos, como los es el incremento de

nitritos, resguarda la calidad de vida de los peces y promueve el desarrollo correcto de la biomasa vegetal.

Por otra parte, el desarrollo de este proyecto demuestra que hacer uso de hardware de bajo costo y alta eficiencia, específicamente el ESP32 y la Raspberry Pi, mejora la implementación de la agricultura de precisión en espacios urbanos, ya que el desempeño del prototipo SORA, mediante la lectura de los parámetros, valida que la automatización de monitoreo de variables, disminuye los descuidos operativos del cuidado humano y favorece el aprovechamiento del recurso hídrico.

Como líneas de trabajo futuro, el prototipo se encuentra en una fase de implementación se sensores de Internet de las Cosas (IoT). Por lo consiguiente, el desarrollo de las siguientes etapas metodológicas contempla mejoras y ajustes en el procesamiento de los registros históricos de los datos en un servidor local, para proyectar correlaciones biológicas de mayor complejidad, buscando que este sistema permanezca activo y registrando cualquier cambio como un modelo de prevención basado en las tendencias previas del ecosistema.

V. REFERENCIAS

- [1] fao.org, «Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura,» FAOSTAT, 2024. [En línea]. Available: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/FS>. [Último acceso: 28 abril 2026].
- [2] C. Somerville, M. Cohen, E. Pantanella, A. Stankus y A. Lovatelli, Small-scale aquaponic food production – Integrated fish and plant farming, F. a. A. O. o. t. U. Nations, Ed., Roma: FAO, 2014, p. 288.
- [3] gob.mx, «Acuaponía, una alternativa sustentable para la producir plantas y peces,» Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 29 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/acuaponia-una-alternativa-sustentable-para-la-producir-plantas-y-peces>. [Último acceso: 28 abril 2026].
- [4] W. . F. Bernal Suarez, L. A. Páez Guevara, L. P. Villamil Moreno y E. R. Riaño Castillo, «Sistema automatizado soportado en IoT para monitoreo de calidad de agua en sistemas acuapónicos,» *Scielo - Scientific Electronic Library Online*, vol. 15, n° 1, pp. 194-204, 15 Octubre 2024.
- [5] J. Michael Ebeling, M. Burton Timmons y J. John Bisogni Jr., «Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems,» *ELSEVIER*, vol. 257, n° 1-4, pp. 346-358, 30 Junio 2006.
- [6] P. Antoniou, J. Hamilton, B. Smets, J. Kirchman, W. Gunther, L. P. Atkinson y J. M. Wanner, «Effect of temperature and ph on the effective maximum specific growth rate of nitrifying bacteria,» *ELSEVIER*, vol. 24, n° 1, pp. 97-101, Enero 1990.
- [7] R. Sallenave, «Important Water Quality Parameters in Aquaponics Systems,» College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences, New Mexico State University, Octubre 2016. [En línea]. Available: https://pubs.nmsu.edu/_circulars/CR680/. [Último acceso: 1 Mayo 2026].
- [8] M. Flores Iwasaki, G. A. Guadalupe, M. Pachas Caycho, S. Chapa Gonza, R. C. Mori Zabarburi y J. C. Guerrero Abad, «Internet of Things (IoT) Sensors for Water Quality Monitoring in Aquaculture Systems: A Systematic Review and Bibliometric Analysis,» *AgriEngineering*, 13 Marzo 2025.
- [9] C. E. Álvarez Moreno, A. Ruiz García, J. A. García Martínez, M. Cervantes Silva y B. Yamileth Flores , «Diseño y Evaluación de un Sistema de Monitoreo basado en IOT para la Producción Acuapónica de Lechuga,» *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 10, n° 1, pp. 13454 - 13472, 2026.
- [10] R. Gutiérrez Alcalá , «Peligran cuatro de cada diez empleos en el mundo por avances tecnológicos y la IA,» *Gaceta UNAM*, 24 Febrero 2025. [En línea]. Available: <https://www.gaceta.unam.mx/peligran-cuatro-de-cada-diez-empleos-en-el-mundo-por-avances-tecnologicos-y-la-ia/>. [Último acceso: 30 Abril 2026].
- [11] A. A. Cifuentes, A. K. Leguizamón, J. A. Zambrano y M. Á. Landines, «Factores clave y tendencias en los sistemas acuapónicos: revisión de literatura,» *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia.*, 12 Diciembre 2023.

Biografía Autor(es)

¹ Viani Anabell Sánchez Hernández, estudiante del Tecnológico Nacional de México y en el Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Zapotlanejo, Jalisco; cursa la carrera de Innovación Agrícola Sustentable; ganadora del primer lugar nacional en el concurso de programación de videojuegos Dx E 2017, primer lugar estatal en la Olimpiada IBO 2022, medalla de bronce en Expo-Ciencias Jalisco 2024, y medalla de plata alta en Expo-Ciencias Jalisco 2025. Cuenta con participación en Expo-Ciencias Nacional Tampico, Tamaulipas 2025. Ha formado parte de programas de intercambio cultural con el Summer Camp de IENA, trabajando en el estado de Nueva York, USA, en un campamento para personas con necesidades especiales durante los veranos de 2024 y 2025. Habla inglés y francés. Correo electrónico: vianisanchezhernandez@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-0130-6794>

² Jesús Emmanuel Lopez Ramirez, estudiante del Tecnológico Nacional de México y en el Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Zapotlanejo, Jalisco; cursa la carrera de Ingeniería en Informática, tiene participación en ExpoCiencias Jalisco 2024, logrando obtener una medalla de bronce y participo en ExpoCiencias Jalisco 2025, logrando obtener una medalla de plata, además, cuenta

con participación en ExpoCiencias Nacional Tampico Tamaulipas 2025, formo parte del programa Chavos que Inspiran impulsado por BBVA GEN-2016-2026. Correo electrónico: jesusemanuellopezramirez@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-4341-5344>

³ Francisco Eduardo Vázquez Carvajal, estudiante del Tecnológico Nacional de México y en el Instituto José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Zapotlanejo; cursa la carrera de Ingeniería en Informática, participó en ExpoCiencias Jalisco 2025 logrando obtener una medalla de plata, además, cuenta con participación en ExpoCiencias Nacional Tampico Tamaulipas 2025, tuvo la oportunidad de participar en un congreso de jóvenes en Lisboa Portugal 2023. Correo electrónico: fransoa2003@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-7721-9207>

⁴ MSC. Gisela Ramirez Pimentel, es docente investigadora con Perfil Deseable y es encargada del Área de Investigación del Tecnológico Nacional de México y en el Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Zapotlanejo, Jalisco; tiene maestría en Sistemas Computacionales y una maestría en Internet de las Cosas (IoT), cuenta con más de 4 años de experiencia como Software Developer y 3 años de experiencia como Helpdesk. Cuenta con 11 certificaciones que respaldan su perfil profesional. Participó como evaluador y asesor de proyectos en eventos de Innovación Tecnológica a nivel nacional e internacional. Correo electrónico: gramirez@zapotlanejo.tecmm.edu.mx; <https://orcid.org/0000-0003-3730-2910>