





Desarrollo de dispositivo electrónico para el monitoreo de la calidad del agua en tiempo real mediante uso del Internet de las Cosas (IoT).

Development of an electronic device for real-time water quality monitoring using the Internet of Things (IoT).

Garza Contreras, U.¹ , Vázquez Ochoa, L.A.¹ , Talip Rios, I.A.A.¹ ,
Coronado Reyes, H.¹ , Paz Vázquez, D.A.²

¹ División de estudios de posgrado e investigación. Tecnológico Nacional de México Campus Cd. Victoria. Boulevard Emilio Portes Gil, 1301, Tecnológico. C.P. 87010, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

² Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. Universidad Jesuítas de Guadalajara. Anillo periférico Sur Manuel Gómez Morán, Santa María Tequepexpan, 8585, Tecnológico privado. C.P. 45604, San Pedro Tlaquepaque, Jalisco, México.

RESUMEN

Este estudio destacará la importancia de mantener la calidad del agua ante la presión sobre los recursos hídricos, esto, debido a que afecta a la salud y varias actividades productivas. El objetivo fue el desarrollar un dispositivo, usando los principios de electrometría para el monitoreo en tiempo real de los parámetros cruciales en pozos subterráneos, facilitando la toma de decisiones. Además, se realizó un estudio que consistió en diseñar y experimentar con un prototipo recopilador de datos, realizando simulaciones en las condiciones más cercanas a un pozo real. Para ello, se integraron sensores para medir pH, conductividad, sólidos disueltos, temperatura y turbidez. Estos fueron calibrados, y sus lecturas se compararon con equipo de laboratorio, esta información se transmitió a una base de datos en la nube mediante el uso de un microcontrolador recopilador de datos y un módulo inalámbrico que envía la información recopilada, el cual fue ajustado en hojas de cálculo de Excel para su análisis. Los resultados demostraron mediciones estables y precisión, de manera que afirma la confiabilidad del sistema. En conclusión, el dispositivo demostró ser una herramienta para el monitoreo continuo de la calidad del agua, recomendándose su validación en campo y la ampliación de parámetros.



Please cite this article as/Como citar este artículo: Garza-Contreras, U., Vázquez-Ochoa, L.A., Talip-Rios, I.A.A., Coronado-Reyes, H., Paz-Vázquez, D.A. (2025). Development of an electronic device for real-time water quality monitoring using the Internet of Things (IoT). *Revista Bio Ciencias*, 13, e1949. <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e1949>

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: May 4, 2024.

Accepted/Aceptado: November 11, 2025.

Available online/Publicado: December 5, 2025.

PALABRAS CLAVE: Calidad del agua, Monitoreo en tiempo real, Sensores electrónicos, Internet de las Cosas, Acuíferos.

*Corresponding Author:

Luis Antonio Vázquez-Ochoa. División de estudios de posgrado e investigación. Tecnológico Nacional de México Campus Cd. Victoria. Boulevard Emilio Portes Gil, 1301, Tecnológico. C.P. 87010, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. Teléfono: (834) 1532000 ext. 206. E-mail: luis.vo@cdvictoria.tecnm.mx

ABSTRACT

The present study will highlight the importance of maintaining water quality amid the pressure on water resources, as it affects health and various productive activities. The objective was to develop a device utilizing electrometry principles for real-time monitoring of critical parameters in underground wells, thereby facilitating decision-making. Additionally, a study was conducted involving design and experiments with a data-collecting prototype, performing simulations under conditions as close as possible to a real well. To achieve this, sensors were integrated to measure pH, conductivity, dissolved solids, temperature, and turbidity. These sensors were calibrated, and their readings were compared with those obtained using laboratory equipment. This information was transmitted to a cloud database using a data-collecting microcontroller and a wireless module, which sent the collected data. The data was then analyzed in Excel spreadsheets. The results demonstrated stable measurements and accuracy, confirming the system's reliability. In conclusion, the device proved to be a valuable tool for continuous water quality monitoring, with recommendations for field validation and parameter expansion.

KEY WORDS: Water Quality, Real-Time Monitoring, Electronic Sensors, Internet of Things, Aquifers.

Introducción

El desarrollo de nuestra sociedad ha ejercido una creciente demanda de los recursos naturales para cubrir todas las necesidades; siendo el agua fundamental y prioritaria para todas sus actividades. Esta condición ha llevado a ejercer un nivel sin precedente del estrés hídrico que se ejerce sobre los ecosistemas en los que se sustenta el suministro del agua para su uso, no solo en cantidad; sino por el deterioro de su calidad.

La cantidad y uso del agua es diferente en cada país, la agricultura, exceptuando Europa, es el ámbito que mayor porcentaje de agua es usada a nivel mundial, siendo de entre un 70 % y 90 % total, el sector público es de entre 7 % y 18 % y en una menor proporción se encuentra el sector industrial, con un porcentaje de entre 1 % y 11 % (SEMARNAT, 2019).

Según la Guía de la WHO (Organización Mundial de la Salud), el agua potable se define como aquella que puede ser consumida toda la vida sin generar ningún efecto negativo para la supervivencia (Blanco, 2015); De ello se deduce que no solo se busca tener la cantidad del agua suficiente, sino también la calidad determinante para su uso seguro.

Los acuíferos tienen la capacidad de almacenar agua, reteniendo los contaminantes suspendidos gracias a la filtración natural. Los depósitos que conforman los acuíferos en estructuras geohidrológicas son aprovechados gracias a los avanzados sistemas de extracción, que, en la zona norte de México, son de vital importancia debido a que es la principal fuente de abastecimiento de agua superficial capaz de satisfacer la demanda de agua. Sin embargo, la calidad pueda verse afectada por parámetros del pozo, siendo estos encontrados entre otros contaminantes como depósitos de metales y metaloides que en concentraciones disueltas notables pueden resultar dañinos; así mismo, los pozos y norias ubicados en zonas cercanas al mar que debido a la intrusión de agua marina afecta la composición del agua, salinizándolas, lo que puede afectar su uso para ciertas actividades.

El uso diverso que se le proporciona al agua subterránea aumenta la complejidad, ya que esta, además de la agricultura, es comúnmente usada en procesos industriales. Estos requieren ciertas características específicas del agua, que varían según el tipo de producto que se desea fabricar (Aragón *et al.*, 2022).

Durante los últimos años se ha incrementado el nivel de explotación de los acuíferos en zonas áridas y semiáridas. A nivel mundial, uno de los casos más emblemáticos que ejemplifican esta situación es el del abasto de agua en Irán, en donde 60 % del volumen de agua que se consume tiene un origen subterráneo (Mirzaei *et al.*, 2019).

En Ciudad Victoria se encuentran de manera oficial y reconocidas por la CONAGUA, dos grandes acuíferos el de "VICTORIA – CASAS" y "VICTORIA – GUEMEZ", que abarcan casi en un 100 % el territorio total del municipio, dichos acuíferos, según el método base que se explica en la NOM – 011 – CONAGUA – 2015, tienen un DMA (disponibilidad media anual de agua subterránea) negativo, con un -0.91155 hm³/año (hm³ = 1 millón de metros cúbicos) y -28.768 hm³/año respectivamente (CONAGUA, 2020).

Esto indica que no hay volumen disponible para otorgar nuevas concesiones, presentando un déficit de 1,200,593 m³ anuales (Gerencia de aguas subterráneas, 2023a) y de 30,128,354 m³ anual respectivamente (Gerencia de aguas subterráneas, 2023b) por lo que ha habido un aumento exponencial en el estrés hídrico debido a los diferentes factores, tanto internos como externos, generando cambios en la estructura química del agua en importantes puntos de recolección de agua subterránea, lo que impacta directamente al ecosistema alrededor del pozo subterráneo, provocando que el agua pierda alguno de los usos de los cuales fue asignado, tales como, consumo humano, agricultura, industrial, entre otros.

Según Blanco (2015), conforme la población incremente y con el aumento del consumo del agua, mayor influencia tendrá en la calidad de esta. A esto se suma que, debido al gran desarrollo industrial en los últimos 100 años y su alcance global, ha llevado a que el agua se contamine con múltiples tipos de elementos sólidos y que están en suspensión tanto físicos, químicos y microbiológicos.

Asimismo, la falta de registros actualizados y continuos sobre los parámetros de la calidad del agua aumenta el riesgo en la salud pública y en la fabricación de productos defectuosos, como cultivos contaminados en el ámbito agropecuario y pérdidas de productos, maquinaria y en equipo sensible.

O'Grady *et al.* (2021), mencionan que, debido al creciente riesgo del cambio en los ecosistemas, nuevos avances en las estrategias para crear sistemas de monitoreo de la calidad del agua, se pueden utilizar estrategias de monitoreo fiables para lograr comprender los procesos que afectan la calidad del agua en los acuíferos y mejorarlos, en los años recientes, el desarrollo de sensores sobre el terreno ha incrementado la obtención de información.

En los últimos años, diversos autores han utilizado las plataformas de bajo costo que se basan en tecnologías abiertas como lo son Arduino y ESP32 para el monitoreo de la calidad de agua (Fonseca *et al.*, 2022; Kelechi *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2024). Estos permiten que los dispositivos midan los parámetros físico – químicos clave como el pH, turbidez, temperatura, sólidos disueltos totales o conductividad. Sin embargo, estos casos son considerados en entornos controlados, sin la consideración del entorno complejo de los pozos subterráneos. Además, pocos trabajos se han adaptado a las normas mexicanas de calidad del agua, lo que limita su aplicación en la localidad. Por lo que existe un vacío entre la oferta tecnológica y las necesidades de las comunidades que dependen enteramente de agua subterránea para las actividades agrícolas, industriales o domésticas. Esta brecha es la que motiva el presente estudio que tiene como objetivo la propuesta de un diseño, implementación y validación de un sistema electrónico de monitoreo de calidad del agua en tiempo real que integre sensores de bajo costo con la capacidad de transmisión inalámbrica. El prototipo de este dispositivo se basa en arquitectura del Internet de las Cosas (IoT) y con validación mediante el uso de instrumentos de laboratorio certificados, siguiendo los lineamientos de normas mexicanas oficiales aplicables.

Material y Métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en los acuíferos de Ciudad Victoria, capital del estado de Tamaulipas, México. Esta se encuentra en una región semidesértica, con clima templado semicálido subhúmedo, las temperaturas medias anuales rondan entre los 23 y 28 °C (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2024) y precipitaciones anuales de 1100 mm (Figura 1). Los acuíferos subterráneos que se encuentran en esta región son la principal fuente de abastecimiento de agua para la población, industria y agricultura debido a que el suministro de agua superficial es limitado.

Coordenadas centrales: 23.72775582764079, -99.15029031111659

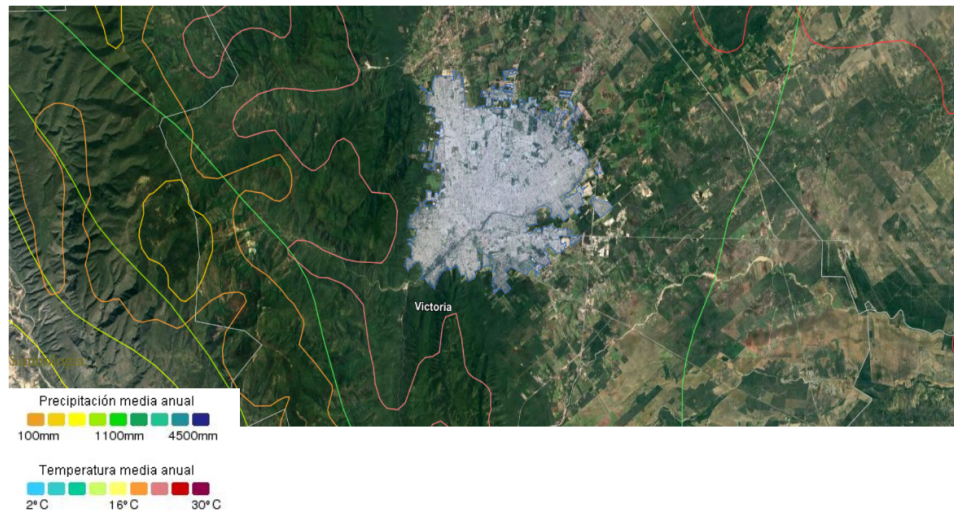


Figura 1. Precipitación media anual y temperatura media anual en Ciudad Victoria, Tamaulipas.

Fuente: INEGI, 2024.

Ubicación geográfica de los acuíferos

El acuífero Victoria – Güémez se define con la clave 2807 y este se localiza en la parte central occidente del Tamaulipas (Figura 2), esta cubre 1,947 km² de superficie. Los límites se establecen al oriente con la presa de Vicente Guerrero; la barrera impermeable de rocas arcillosas de la formación Méndez establecen el límite norte, siendo casi paralela al arroyo Guayabas y Corona, las cuales tiene una separación de 3km. La Sierra Madre Oriental se encuentra a su occidente y al sur el límite es representado por las rocas arcillosas de la formación Méndez, burdamente manifestadas de manera paralela desde la presa Vicente Guerrero hasta el río San Marcos (Gerencia de aguas subterráneas, 2023b).

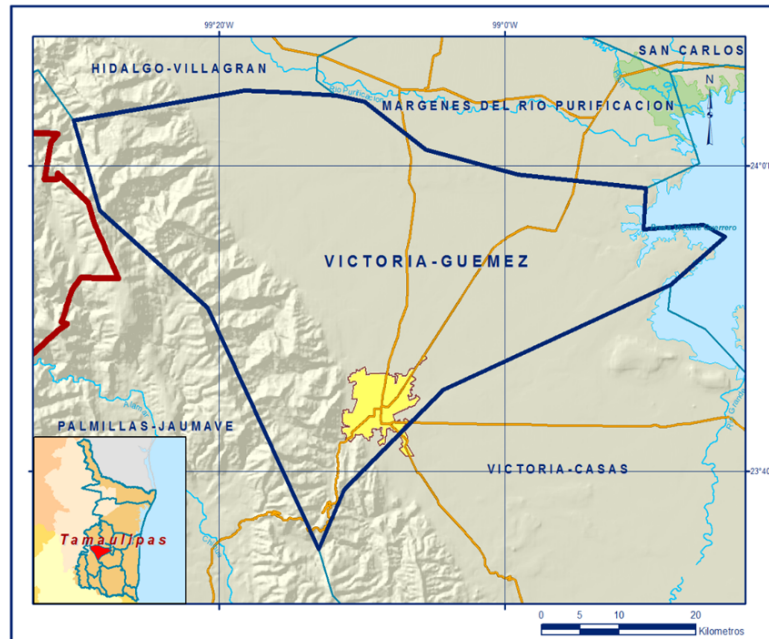


Figura 2. Acuífero Victoria – Güémez.

Fuente: CONAGUA, 2023.

Este se encuentra ocupando parte de Ciudad Victoria, el municipio de Güémez y una porción de Hidalgo. Las actividades económicas que se consideran más importantes son las de Santa Engracia, Güémez y Ciudad Victoria, debido a que existe un acelerado crecimiento en la agricultura, servicios y población; causando que haya una competencia por el uso del agua subterránea, provocando la excesiva extracción de este recurso (Gerencia de aguas subterráneas, 2023b).

El acuífero Victoria – Casa se define con la clave 2808 y este se localiza en Tamaulipas, en su porción centro – sur (Figura 3), encontrándose entre los paralelos 23° 19' y 23° 40' de latitud norte y entre los meridianos 98° 19' y 99° 14' de longitud oeste, siendo 1,907 km² la superficie que cubre, colindando con el acuífero de Jiménez Abasolo, estando al suroeste Palmillas – Jaumave, sur Llera – Xicoténcatl, al oriente de Aldama – Soto La Marina y al noreste de Victoria – Güémez (Gerencia de aguas subterráneas, 2023a).



Figura 3. Acuífero Victoria – Casa.

Fuente: CONAGUA, 2023.

Este acuífero abarca geopolíticamente 4 municipios, en su menor parte, cubriendo Victoria, Güémez y Llera; y en mayor proporción el municipio de Casas, además, en la zona oriente, se encuentra en una mínima proporción el municipio de Soto La Marina (Gerencia de aguas subterráneas, 2023a).

Hidrogeoquímica y calidad del agua

En el acuífero Victoria – Güémez, la última vez que se realizó un monitoreo fue en 54 obras subterráneas, siendo en la fecha del 19 de septiembre de 1995, en esa medición se verificó que los sólidos totales disueltos variaban de 348 a 2,416 ppm (partes por millón), en el cual predominaron valores menores a 1000 ppm (Gerencia de aguas subterráneas, 2023b).

En el acuífero Victoria – Casas, hasta el día de hoy no hay información hidrogeoquímica que se derive de haberse realizado análisis fisicoquímicos de muestras de agua subterráneas. En la calidad del agua, este se define con la concentración de TDS (sólidos totales disueltos), en el año 2006 se realizó un censo en el que se tomaron lecturas directamente en el lugar para determinar los TDS, por lo que realizase, se llegó a una conclusión que, de manera general, la concentración de sólidos totales disueltos no rebasa las 1000 ppm que se establecen en las

normas mexicanas para su consumo humano. De manera local se registran valores superiores a esta debido a focos puntuales de contaminación (Gerencia de aguas subterráneas, 2023a).

Metodología

Diseño metodológico

Para el desarrollo del dispositivo electrónico de monitoreo de calidad del agua en tiempo real, se diseñó de acuerdo con un enfoque metodológico experimental y de manera estructurada, dividido en cinco etapas principales:

1. Diseño del sistema de adquisición de datos
2. Construcción y ensamblaje del prototipo
3. Calibración de sensores y validación de mediciones
4. Transmisión y almacenamiento de datos en la nube
5. Análisis de datos

Este enfoque se llevó a cabo bajo condiciones controladas de laboratorio, con la simulación del entorno de un pozo subterráneo mediante el uso de un vaso de precipitado de 500 mL, permitiendo la repetibilidad del experimento.

Diagrama de arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema se basó en una estructura modular. Cada uno cumple con una función específica: adquisición de datos, procesamiento de señales, transferencia de datos, comunicación inalámbrica y almacenamiento de datos remoto. La Figura 4 representa el diagrama general:



Figura 4. Diagrama de arquitectura del sistema.

Fuente: Elaboración propia a partir de PowerPoint.

Este diseño permite una operación en tiempo real con potencial para integrarse en sistemas de monitoreo remoto a gran escala.

Condiciones experimentales

Las pruebas se llevaron a cabo bajo condiciones controladas, la Tabla 1 resume los parámetros a los que se realizaron las pruebas. Las lecturas se realizaron en intervalos de 5 minutos durante un periodo de 1 hora continua, permitiendo evaluar la estabilidad de las mediciones.

Tabla 1. Tabla de condiciones experimentales

Variable controlada	Valor
Temperatura ambiente	18 – 23 °C
Humedad relativa	50 – 60 %
Solución de prueba	Solución estándar de pH 7
Volumen de la muestra	500 mL
Lugar	Laboratorio de Maestría en Ingeniería Industrial

Fuente: Elaboración propia.

Métodos para las determinaciones de calidad del agua

Para la toma de lecturas y determinación de la calidad de agua, se tomaron diferentes aspectos dependiendo de la región, zona de esa región y el ambiente de este, ya que dependiendo del uso que se le otorgue a la fuente de agua, ya sea agrícola, industrial o de consumo humano, se tomarán más o menos en cuenta los parámetros de este. Con este hecho, se puede concluir que la calidad del agua se define por el uso específico al cual está destinado.

Algunos de los parámetros analíticos que determinan la calidad del agua son más importantes que otros de acuerdo con el uso que se destina el agua algunos de los más comunes son (Sánchez *et al.*, 2016):

- pH
- Conductividad eléctrica
- Turbidez
- Temperatura
- Sólidos disueltos totales

La explicación de los métodos utilizados para la determinación de los parámetros de calidad del agua, así como los criterios considerados según el tipo de uso del recurso (agrícola, industrial o doméstico), se describen en detalle en el Apéndice A.

Normas mexicanas aplicables

Estas normas usan un procedimiento estandarizado y confiable que asegura la obtención de resultados en los análisis de los parámetros de calidad del agua. Estos definen lineamientos para diferentes tipos de agua, esto, para asegurar la precisión y comparabilidad tanto en pruebas de laboratorio como en campo. Además, describen sus objetivos y alcances, el principio del método de medición, las especificaciones y calibración del equipo, el procedimiento de medición, el informe de resultados y las precauciones necesarias al momento de tomar las lecturas de los parámetros de calidad del agua.

En el desarrollo del prototipo realizado en este estudio, se tomaron como base estas normas con el objetivo de garantizar mediciones confiables y comparables. La selección y calibración de los sensores electrónicos, así como la metodología de análisis y los lineamientos establecidos en estas regulaciones, mismo que nos asegura que el sistema diseñado cumpliera con estándares de calidad y precisión.

Para garantizar la confiabilidad de las mediciones realizadas, se tomaron como base los lineamientos técnicos establecidos por diversas normas mexicanas oficiales, las cuales se describen en el Apéndice B.

Además de estos parámetros para determinar la calidad del agua, se pueden realizar análisis de laboratorio en busca de ciertas sustancias químicas disueltas de las cuales se puede tener la sospecha de que contaminen la fuente de agua de acuerdo con la contaminación de los alrededores, tales como: Nitratos, hidrocarburos, amonio, cloro-etileno, cloruro de sodio, lones de cloruro, iones de sulfato, entre otros tipos de contaminantes de acuerdo con el tipo de actividad que se realice (Mancilla-Villa *et al.*, 2021).

Equipo y materiales

Es de suma importancia tener en cuenta todos los materiales adecuados, esto porque se realizarán pruebas de laboratorio exhaustivas durante largos periodos de tiempo, por lo que se necesita de equipo especializado en tomar muestras que sean precisas y exactas cada vez que se recolectan datos.

Descripción del equipo

Arduino Uno: Es una placa que contiene un microcontrolador que se basa en el chip Atmega328P que se usa ampliamente en proyectos de electrónica debido a su facilidad de uso y a su versatilidad (Mabrouki *et al.*, 2021).

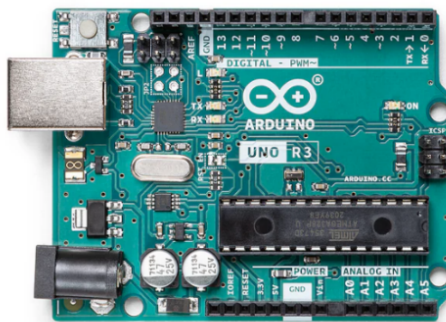


Figura 5. Arduino Uno.

Fuente: Arduino (s.f.). Arduino Uno [Imagen].

Recuperado de <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?queryID=undefined>

Sensor de pH: Sensor diseñado para medir de manera precisa el pH de soluciones líquidas. Tiene una carcasa especial que nos permitirá tomar lecturas de manera continua por largos periodos de tiempo, permitiéndonos usarlo en ámbitos industriales y de laboratorio, además de la adaptabilidad para usarse con Arduino (Mohd *et al.*, 2024).



Figura 6. Sensor de pH SEN0169-V2 por el fabricante DFRobot.

Fuente: DFRobot (s.f.). SEN0169-V2 [Imagen].

Recuperado de <https://www.dfrobot.com/product-2069.html>

Sensor de temperatura: Es un módulo que está diseñado para medir la temperatura del agua, conocido por su precisión, facilidad de uso y por su resistencia a los ambientes con altas concentraciones de humedad.



Figura 7. Sensor de temperatura DS18B20 por el fabricante DFRobot.

Fuente: DFRobot (s.f.). DS18B20 [Imagen].

Recuperado de <https://www.dfrobot.com/product-689.html>

Sensor de solidos disueltos totales: El sensor de TDS está diseñado para medir la cantidad de solidos disueltos totales, el cual es una medida de concentración de sustancias disueltas en el agua, este puede incluir minerales, sales y/o materia orgánica (Silva & Coello, 2020).

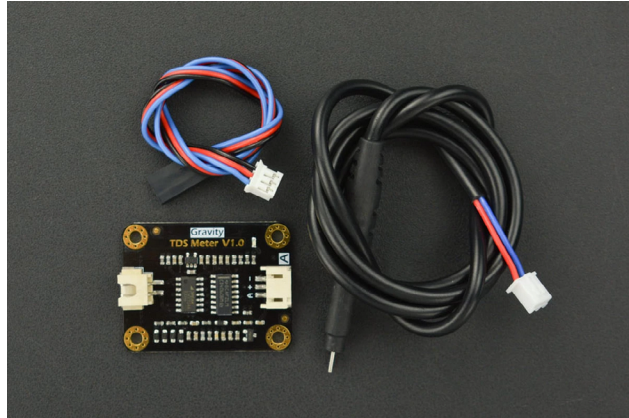


Figura 8. Sensor de TDS SEN0244 por el fabricante DFRobot.

Fuente: DFRobot (s.f.). SEN0244 [Imagen].

Recuperado de <https://www.dfrobot.com/product-1662.html>

Sensor de turbidez: El sensor de claridad del agua que mide qué tan transparente u opaca está. Su funcionamiento se basa en la detección de partículas suspendidas en el agua, midiendo cuanta luz pasa a través de ella y cómo se desvía. (Kumar *et al.*, 2024).



Figura 9. Sensor de turbidez SEN0189 por el fabricante DFRobot.

Fuente: DFRobot (s.f.). SEN0189 [Imagen].

Recuperado de <https://www.dfrobot.com/product-1394.html>

Impresora 3D Makerbot Replicator Z18: Esta ofrece un gran formato con un volumen de construcción de 30 x 30.5 x 45.7 cm, su material de impresión es el PLA (ácido poliláctico).



Figura 10. Impresora 3D Makerbot Replicator Z18.

Fuente: Makerbot (s.f.). Replicator Z18 [Imagen].

Recuperado de <https://www.makerbot.mx/3d-printers/replicator-z18/>

PLA (ácido poliláctico): Utilizado en impresión 3D por su fácil manejo, baja deformación y buena calidad de acabado, ideal para prototipos con constante exposición a la humedad debido a su derivado de recursos renovables como el almidón de maíz.



Figura 11. Material de impresión de PLA del fabricante XTZL3d.

Fuente: XTZL3d (s.f.). PLA [Imagen].

Recuperado de <https://xtzl3d.com/products/xtzl-pla-3d-printing-filament-1>

ESP32: Desarrollado por Espressif, es un microcontrolador versátil, comúnmente utilizado en proyectos de Internet de las Cosas debido a que cuenta con conectividad inalámbrica y múltiples funciones que amplían su funcionamiento.



Figura 12. Módulo de placa de desarrollo ESP32.

Fuente: DigiKey (s.f.). ESP32 [Imagen].

Recuperado de <https://www.digikey.com.mx/es/products/detail/espressif-systems/ESP32-DEVKITC-V1E/12091811>

Tabla técnica de sensores y normas asociadas

Para el manejo de sensores electrónicos compatibles con la plataforma de Arduino se tomó en cuenta la siguiente tabla comparativa para calibrar cada sensor en base a los lineamientos del fabricante y en contraste con el estándar de referencia de las normas, presentándose en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los sensores utilizados.

Parámetro	Sensor (Modelo)	Norma asociada	Rango operativo	Precisión	Fabricante	Tipo de sensor
pH	SEN0169-V2	NMX-AA-008-SCFI-2016	0 – pH	±0.1 pH	DFRobot	Electrométrico
Conductividad/ Sólidos disueltos totales	SEN0244	NMX-AA-034-SCFI-2015/ NMX-AA-093-SCFI-2018	0 – 1000 ppm	±10 %	DFRobot	Conductímetro
Temperatura	DS18B20	NMX-AA-007-SCFI-2013	-10 – 85 °C	±0.5 °C	DFRobot	Nephelométrico
Turbidez	SEN0189	NMX-AA-038-SCFI-2021	0 – 1000 NTU	± 5 %	DFRobot	Termistor digital

Fuente: Elaboración propia y datos recuperados del fabricante DFRobot.

Armado del circuito electrónico

En esta investigación se desarrolló un circuito que une los sensores de pH, temperatura, sólidos disueltos totales/conductividad eléctrica y turbidez, usando un Arduino Uno para traducir el voltaje a valores numéricos de su respectivo sensor usando los puertos analógicos y que estos se almacenen en el monitor serial para enseguida comunicarlo con otro microcontrolador encargado de almacenar los datos en una base de datos en la nube (Figura 13).

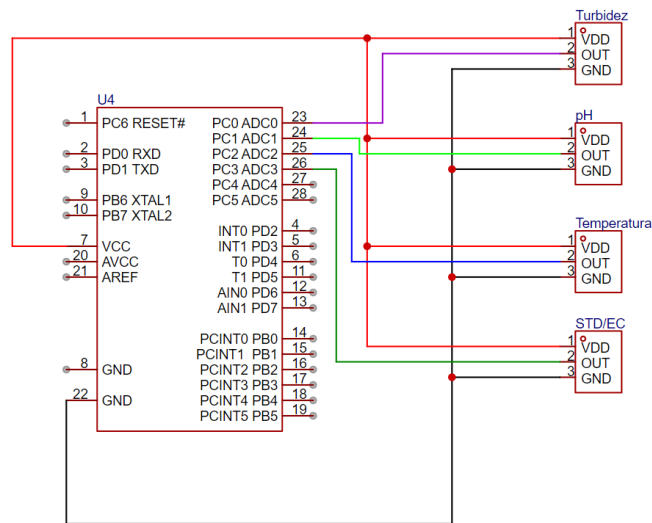


Figura 13. Esquema del Arduino Uno con los sensores de calidad de agua.

Fuente: Elaboración propia a partir de EasyEDA Pro.

Para el envío de datos por medio del Internet de las Cosas (IoT) se usó el módulo ESP32, creando el siguiente circuito con un arreglo de voltaje para reducir su valor y evitar dañar el ESP32 al estar en conjunto con el Arduino Uno, debido a que este envía señales de 5 voltios (Figura 14).

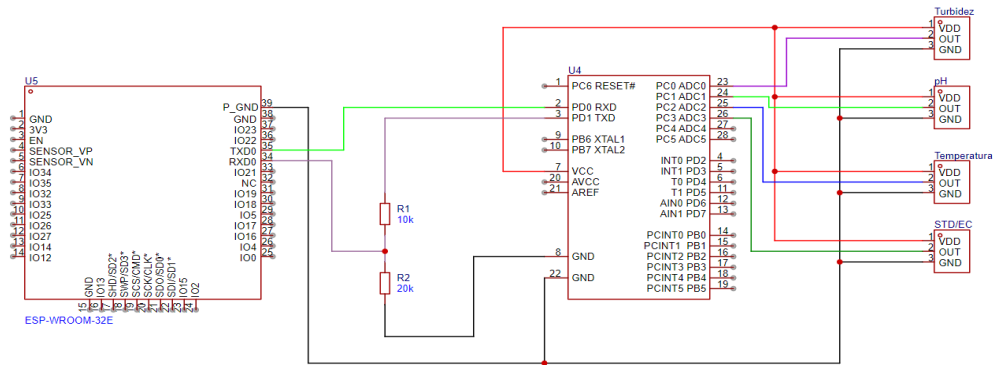


Figura 14. Esquema de la unión del ESP32 con el Arduino Uno para comunicación serial.

Fuente: Elaboración propia a partir de EasyEDA Pro.

Flujo lógico de programación

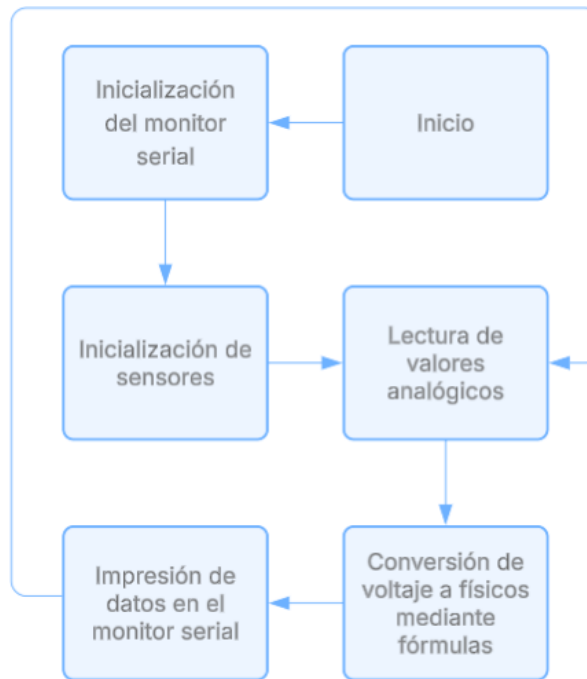


Figura 15. Diagrama de flujo del código del microcontrolador Atmega328P.

Fuente: Elaboración propia a partir de Lucidchart.

Programación del microcontrolador Atmega328P

El código fue creado en el software Arduino IDE, este lee y procesa datos de los sensores de calidad del agua (Kelechi *et al.*, 2021): pH, temperatura y sólidos totales disueltos, inicializando los sensores de TDS y pH, configurando el rango y la referencia de voltaje. En el bucle, se mide el pH al leer sus voltajes y aplicando fórmulas para obtener los valores correspondientes (Fonseca *et al.*, 2022). Se utilizó el sensor DS18B20 para la toma de temperatura, además de un dato de impresión en el monitor serial, empleando compensación de pH y TDS. Debido a que los TDS y la conductividad eléctrica (EC) están relacionados y es posible obtener el valor de otro aplicando formulas, se calcula la EC a partir del valor de TDS. Por último, se imprime en serie los valores medidos de pH, EC, TDS y temperatura para su monitoreo en tiempo real.

Programación del microcontrolador ESP32

El segundo código permite que el módulo ESP32 reciba datos desde el Arduino Uno utilizando la comunicación serial, subiendo esta información a Firebase, sirviendo como almacenamiento y monitoreo (Khan *et al.*, 2024). Se configuró la comunicación Wifi para establecer la conexión usando credenciales de red y autenticaciones específicas para ingresar a la base de datos (Sunardi *et al.*, 2023). Además, se sincronizó la hora con un servidor NTP, el cual se encarga de registrar la fecha y hora exacta al momento de enviar el dato. Como su bucle principal lee de manera continua los datos seriales, separando cada valor de cada sensor (pH, TDS, EC y temperatura), guardando estos datos en variables específicas y enviándose a Firebase en intervalos de un minuto, estos se organizan por fecha y hora usando un archivo tipo JSON, permitiendo una recopilación estructural y cronológica de las lecturas almacenadas en la nube, permitiendo el análisis y seguimiento remoto.

Programación en Python

La implementación de este código fue diseñada para facilitar la estructuración y visualización de la base de datos en Firebase, obteniendo el archivo JSON, es complicado interpretar debido a que los datos se muestran de manera lineal y no es posible usar un método para encontrar información de manera sencilla, por lo que se recurrió a un código que se desarrolló para convertir el JSON extraído de la base de datos, en un archivo Excel. Esta conversión organiza la información de parámetros de calidad del agua asociadas a la hora y fecha en que fue medido el dato; de forma que cada fecha se represente como una hoja separada en el Excel y, además, cada hoja contenga registros por hora. Esta estructura facilita el análisis y la visualización de los datos en programas de oficina.

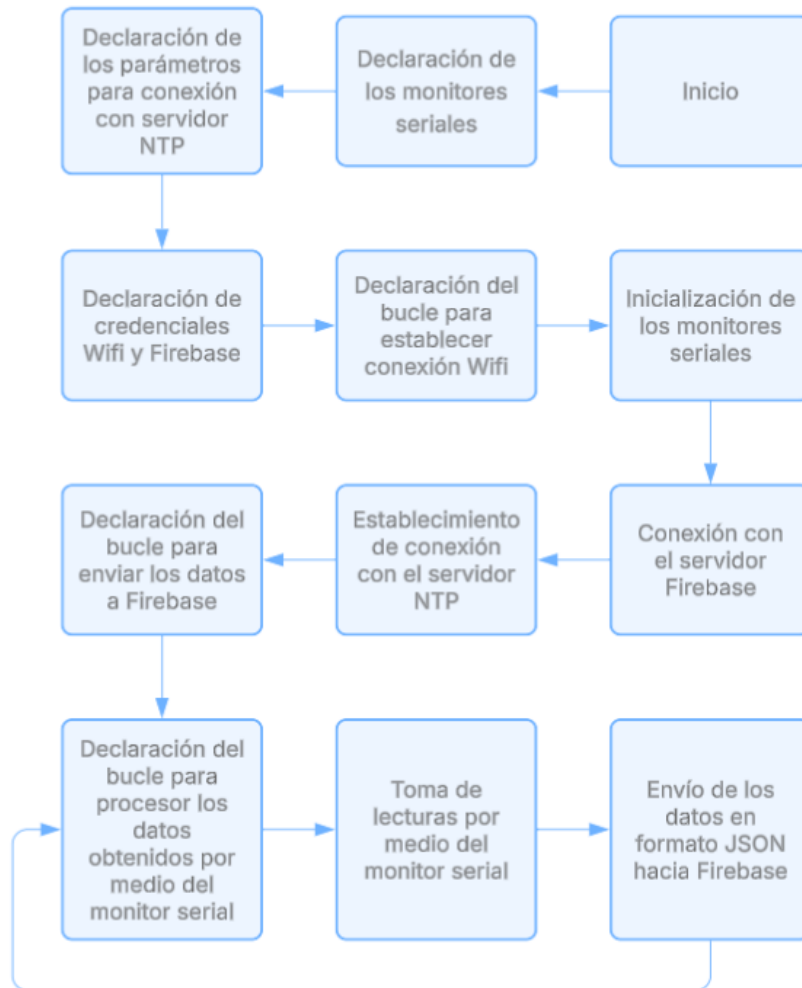


Figura 16. Diagrama de flujo del código del microcontrolador ESP32.

Fuente: Elaboración propia a partir de Lucidchart.

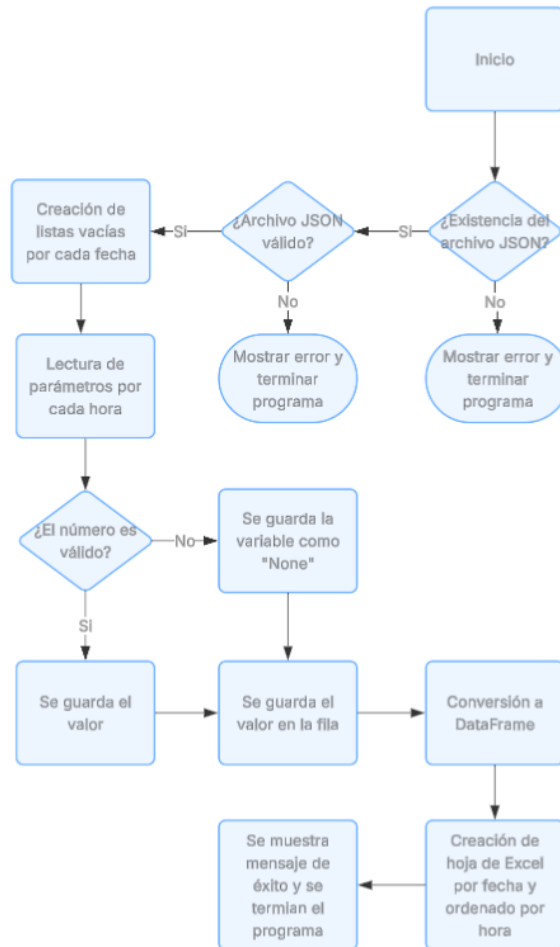


Figura 17. Diagrama de flujo del código en Python.

Fuente: Elaboración propia a partir de Lucidchart.

Procesamiento de datos y análisis

Una vez realizado el almacenamiento de datos y su transformación en hojas de cálculo de Excel. Se procede a realizar análisis estadístico mediante los siguientes indicadores:

- Error absoluto promedio
- Error relativo (%)
- Desviación estándar

Para realizar la comparativa de datos, se utilizaron sensores de la marca HANNA Instruments, en la Tabla 3 se muestran las especificaciones de dichas herramientas de acuerdo con los proveedores:

Tabla 3. Especificaciones técnicas del medidor de pH y temperatura modelo HI98127.

Intervalo de pH	-2 a 16 pH
Resolución de pH	0.1 pH
Exactitud de pH	± 0.1 pH
Intervalo de temperatura	-5.0 a 60.0°C / 23.0 a 140.0°F
Resolución de temperatura	0.1°C/ ± 1 °F
Exactitud de temperatura	± 0.5 °C/ ± 1 °F

Fuente: Datos recuperados de <https://hannainst.com.mx/medidor-de-bolsillo-phep-4-de-ph-3-temperatura-con-hi98127>

Diseño y fabricación del soporte para los sensores

Para la elaboración del diseño en 3D del soporte para los sensores se tomaron en cuenta las medidas de los sensores. Además, para el tamaño de la circunferencia de la base, se tomó en cuenta la circunferencia de la columna hidráulica para facilitar la inmersión y extracción del dispositivo, las siguientes figuras son los planos que se obtuvieron como resultado de la creación del diseño.

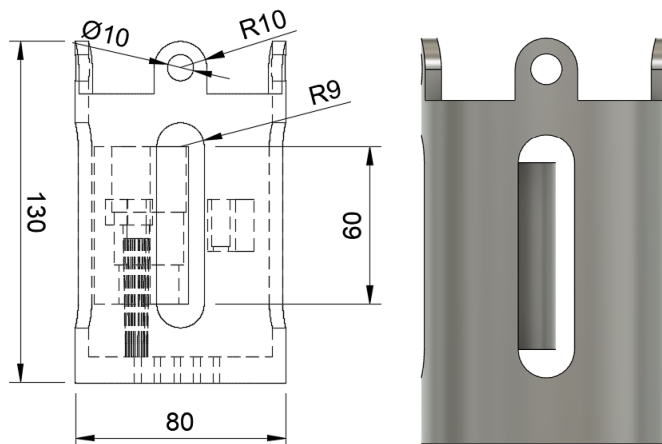


Figura 18. Medidas y orientación frontal de diseño.

Fuente: Elaboración propia a partir de Autodesk Fusion.

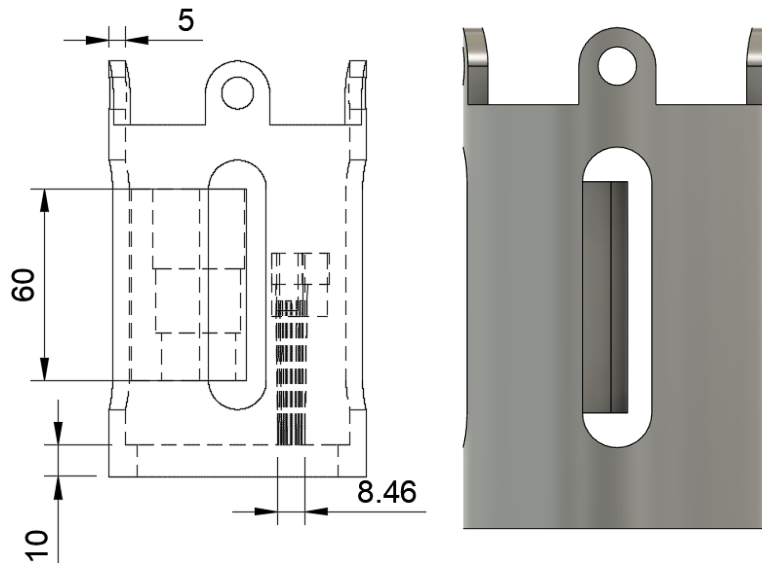


Figura 19. Medidas y orientación izquierda del diseño.

Fuente: Elaboración propia a partir de Autodesk Fusion.

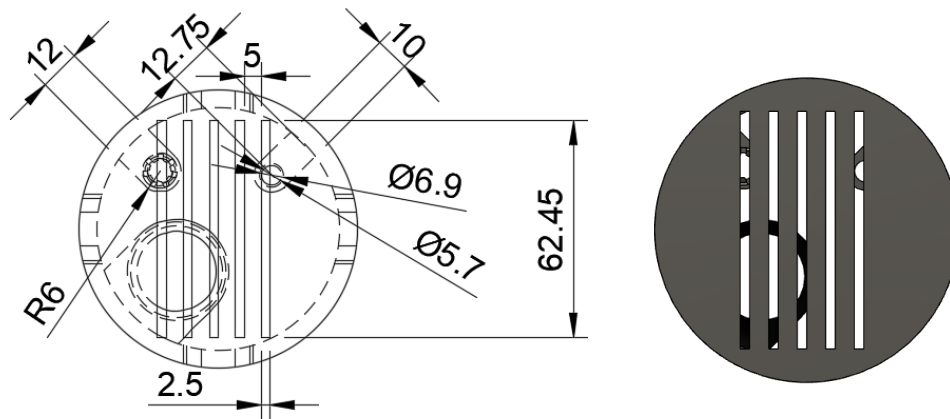


Figura 20. Medidas y orientación inferior del diseño.

Fuente: Elaboración propia a partir de Autodesk Fusion.

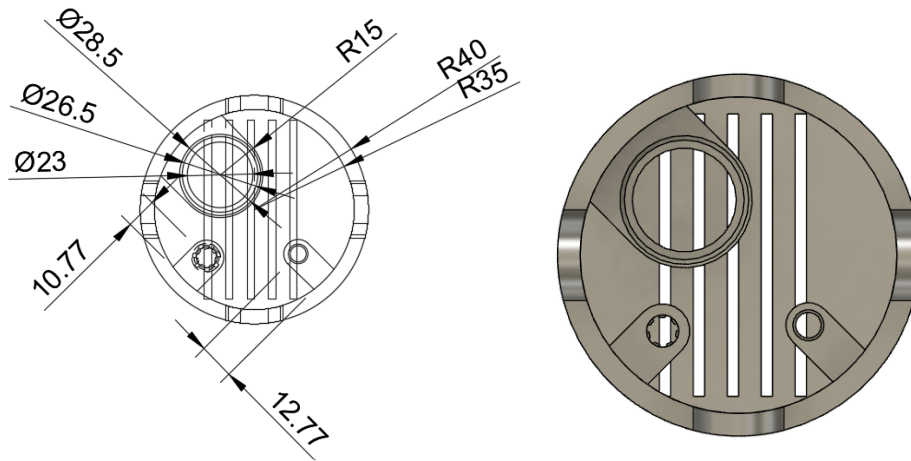


Figura 21. Medidas y orientación superior del diseño.

Fuente: Elaboración propia a partir de Autodesk Fusion.

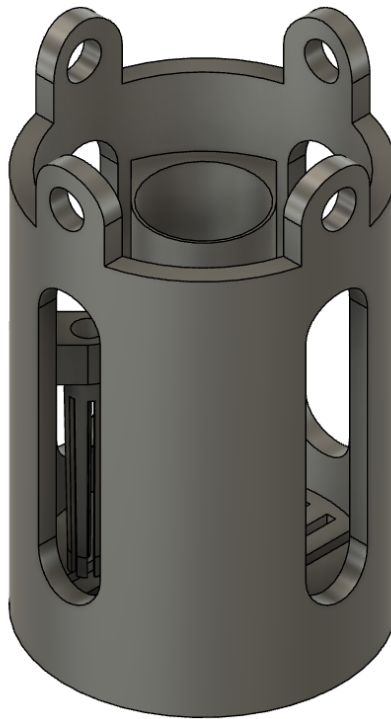


Figura 22. Resultado final del diseño en vista isométrica.

Fuente: Elaboración propia a partir de Autodesk Fusion.

Resultados y Discusión

El dispositivo que se diseñó para el monitoreo en tiempo real de la calidad del agua en pozos subterráneos se sometió a pruebas experimentales en condiciones en las cuales tuvimos el control, en estas, se evaluaron principalmente dos parámetros críticos: el pH y la temperatura. La recopilación de datos se realizó en un vaso de precipitado de 500 mL, lo que nos permitió contrastar las mediciones obtenidas por los sensores comerciales con los sensores de laboratorio. La información registrada se tradujo utilizando el código en Python, este lo organizó en una hoja de datos en Excel, facilitando su análisis comparativo.

Resultados experimentales

Durante la experimentación, se llevaron a cabo varios ensayos, estos datos se estructuraron en una matriz de experimentación sobre el pH y temperatura. Los resultados preliminares muestran que:

Medición de pH: El uso del sensor SEN0169-V2 mostró una respuesta estable dentro del rango esperado para agua subterránea. Las mediciones realizadas se mantuvieron próximas a un valor medio de pH 7, siendo estas variaciones entre 0.02 y 0.17 unidades, obteniendo error absoluto promedio de 0.114 unidades de pH y un valor de error relativo del 1.66 %, lo que se considera bajo, considerando que los sensores de uso comercial tienen una precisión típica de ± 0.1 a ± 0.2 pH. Al calcular la desviación estándar se obtuvo un valor de 0.056, indicando que las mediciones fueron consistentes.

Medición de temperatura: Con la experimentación del sensor DS18B20, las lecturas de temperatura mostraron una desviación estándar de 0.38, sugiriendo que las lecturas fueron consistentes durante el periodo de pruebas. Se obtuvo un valor de error absoluto promedio de 0.065 °C y un error relativo de 0.28 % siendo menor que la precisión típica de ± 0.5 °C de los sensores comerciales, lo que se traduce en una baja variabilidad, lo que permite su compatibilidad para uso en entornos reales.

Al momento en que se procesaron los datos que se realizaron mediante el script en Python, realizándose la extracción de información de la base de datos y organizándose la información en un Excel, permitió construir una base de datos de manera cronológica, Estructurando la información por fecha y hora nos confirmó la consistencia en las mediciones, permitiendo identificar las tendencias y desviaciones en tiempo real para su análisis.

Discusión

La hipótesis central del desarrollo de este dispositivo plantea que mediante un sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en tecnología Arduino y ESP32 puede ofrecer mediciones confiables y estables, comparándose con dispositivos de medición de laboratorio para lograr su aplicación en pozos subterráneos en tiempo real, con la condición de que se realicen los ajustes necesarios para adaptarse a las situaciones de campo.

Los resultados obtenidos en un entorno controlado respaldan esta hipótesis, ya que las lecturas del dispositivo muestran una estrecha correlación con los datos de laboratorio, indicando que el prototipo cumple con los estándares establecidos por las normas mexicanas en materia de calidad del agua. La estabilidad observada en las lecturas de pH y temperatura indica que la calibración inicial de los sensores es confiable y que el sistema podría implementarse en escenarios de campo real, como en la vigilancia de pozos subterráneos. Además, la estructuración de datos en hojas de cálculo en Excel facilita el análisis, permitiendo detectar variaciones y tendencias que podrían alertar sobre problemas en la calidad del agua del acuífero mediante el muestreo de pozos subterráneos vinculados a zonas claves.

Tabla 4. Matriz de experimentación del pH.

Fecha y Hora	Lugar/ Condición	Sensor de pH HI98127 (Sensor de Laboratorio)	Sensor de pH SEN0169-V2 (Sensor comercial)	Error
8 de Octubre del 2024 - 11:05	Laboratorio MII - utilizando una solución reguladora de pH 7	6.9	7	0.1
8 de Octubre del 2024 - 11:10	Laboratorio MII - utilizando una solución reguladora de pH 7	6.9	6.92	0.02
8 de Octubre del 2024 - 11:15	Laboratorio MII - utilizando una solución reguladora de pH 7	6.9	6.97	0.07
8 de Octubre del 2024 - 11:20	Laboratorio MII - utilizando una solución reguladora de pH 7	6.9	7	0.1
8 de Octubre del 2024 - 11:25	Laboratorio MII - utilizando una solución reguladora de pH 7	6.9	7	0.1
8 de Octubre del 2024 - 11:30	Laboratorio MII - utilizando una solución reguladora de pH 7	6.9	6.97	0.07
8 de Octubre del 2024 - 11:35	Laboratorio MII - utilizando una solución reguladora de pH 7	6.8	7	0.2
8 de Octubre del 2024 - 11:40	Laboratorio MII - utilizando una solución reguladora de pH 7	6.8	6.97	0.17
8 de Octubre del 2024 - 11:45	Laboratorio MII - utilizando una solución reguladora de pH 7	6.8	6.97	0.17
8 de Octubre del 2024 - 11:50	Laboratorio MII - utilizando una solución reguladora de pH 7	6.8	6.97	0.17
8 de Octubre del 2024 - 11:55	Laboratorio MII - utilizando una solución reguladora de pH 7	6.8	6.97	0.17
8 de Octubre del 2024 - 12:00	Laboratorio MII - utilizando una solución reguladora de pH 7	6.8	6.87	0.07
8 de Octubre del 2024 - 12:05	Laboratorio MII - utilizando una solución reguladora de pH 7	6.8	6.87	0.07

Fuente: Elaboración propia a partir de Excel.

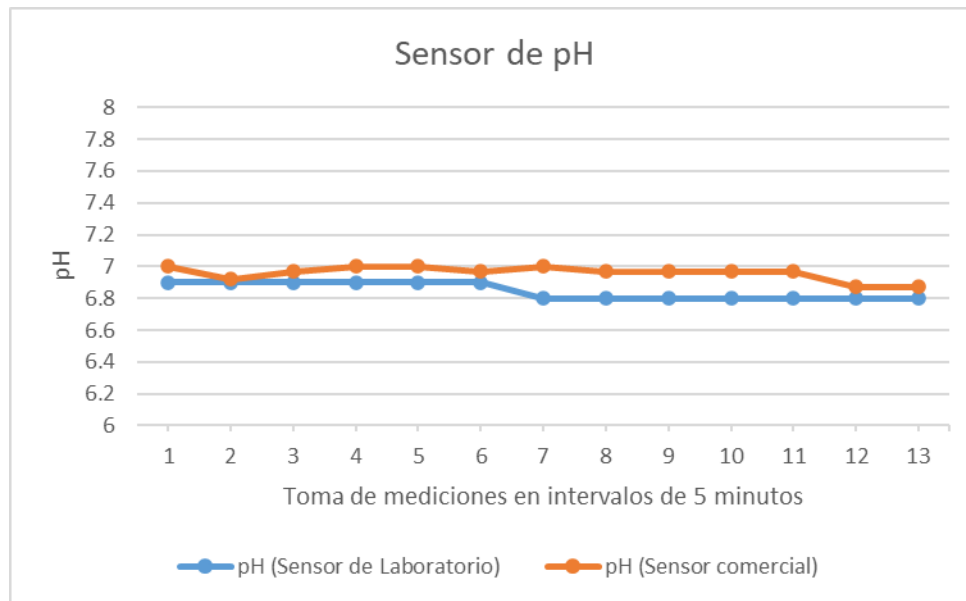


Figura 23. Gráfica de resultados de comparación.

Fuente: Elaboración propia a partir de Excel.

No obstante, el dispositivo cuenta con limitaciones importantes. La experimentación se realizó en un entorno controlado, lo que garantiza la replicabilidad, pero no refleja la complejidad y variabilidad de un pozo subterráneo real. Factores como la heterogeneidad del acuífero, la presencia de contaminantes específicos según la zona de toma de muestra y condiciones ambientales variables pueden afectar la precisión de las mediciones. Además, por falta de recursos económicos, no fue posible obtener sensores para los demás sensores que se desarrollaron para el prototipo, por lo que no cuenta con un respaldo confiable más que las especificaciones técnicas del proveedor para justificar las mediciones tomadas para los sensores de sólidos totales disueltos y la turbidez. Por lo que para aplicaciones futuras, como el monitoreo remoto de pozos en zonas rurales o de difícil acceso, base de datos para estudios hidrológicos o complemento para programas gubernamentales de gestión del agua, es necesario realizar ajustes técnicos para lograr su aplicación en campo, como lo son el encapsulamiento y resistencia a condiciones, debido a que la constante exposición a la humedad, variaciones térmicas, presión del pozo y la posibilidad de contaminantes pueden dañar los componentes electrónicos del dispositivo; alimentación energética autónoma, implementando sistemas de gestión de energía por medio de baterías y paneles solares, considerando que el dispositivo se encuentra en ubicaciones sin acceso a electricidad; y la implementación de módulos de comunicación más robustos, siendo algunas alternativas al Wifi tradicional, la comunicación LoRa por ejemplo, ya que cuenta con un sistema de comunicación por radio frecuencia de larga distancia, garantizando una mayor cobertura de trasmisión de datos en tiempo real. Por

esta razón, se recomienda realizar pruebas piloto en campo para validar y realizar los ajustes técnicos necesarios al sistema bajo condiciones reales.

Tabla 5. Matriz de experimentación de temperatura.

Fecha y Hora	Lugar/ Condición	Sensor de temperatura HI98127 (Sensor de Laboratorio)	Sensor de temperatura DS18B20 (Sensor Comercial)	Error
8 de Octubre del 2024 - 11:05	Laboratorio de biomédico - utilizando una solución reguladora de pH 7	23.5	23.56	0.06
8 de Octubre del 2024 - 11:10	Laboratorio de biomédico - utilizando una solución reguladora de pH 7	23.6	23.5	0.1
8 de Octubre del 2024 - 11:15	Laboratorio de biomédico - utilizando una solución reguladora de pH 7	23.5	23.44	0.06
8 de Octubre del 2024 - 11:20	Laboratorio de biomédico - utilizando una solución reguladora de pH 7	23.5	23.37	0.13
8 de Octubre del 2024 - 11:25	Laboratorio de biomédico - utilizando una solución reguladora de pH 7	23.4	23.31	0.09
8 de Octubre del 2024 - 11:30	Laboratorio de biomédico - utilizando una solución reguladora de pH 7	23.4	23.31	0.09
8 de Octubre del 2024 - 11:35	Laboratorio de biomédico - utilizando una solución reguladora de pH 7	23.4	23.31	0.09
8 de Octubre del 2024 - 11:40	Laboratorio de biomédico - utilizando una solución reguladora de pH 7	23.2	23.25	0.05
8 de Octubre del 2024 - 11:45	Laboratorio de biomédico - utilizando una solución reguladora de pH 7	23.3	23.25	0.05
8 de Octubre del 2024 - 11:50	Laboratorio de biomédico - utilizando una solución reguladora de pH 7	23.1	23.19	0.09
8 de Octubre del 2024 - 11:55	Laboratorio de biomédico - utilizando una solución reguladora de pH 7	23.2	23.19	0.01
8 de Octubre del 2024 - 12:00	Laboratorio de biomédico - utilizando una solución reguladora de pH 7	23.2	23.19	0.01
8 de Octubre del 2024 - 12:05	Laboratorio de biomédico - utilizando una solución reguladora de pH 7	23.2	23.19	0.01

Fuente: Elaboración propia a partir de Excel.

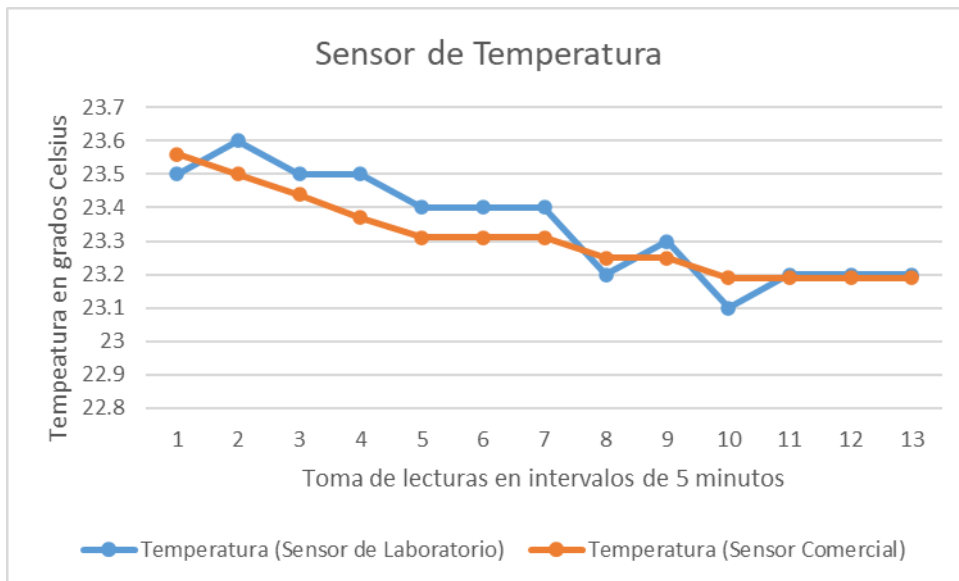


Figura 24. Gráfica de resultados de comparación.

Fuente: Elaboración propia a partir de Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Hora	EC	TDS	temperatura	Turbidez	pH						
2	00:00:18	323.61	194.17	26	774.13	7.29						
3	00:01:18	323.61	194.17	26	774.13	7.21						
4	00:02:18	323.61	194.17	26	774.13	7.21						
5	00:03:18	321.54	192.92	26	743.11	7.21						
6	00:04:18	323.61	194.17	26	774.13	7.11						
7	00:05:18	323.61	194.17	26	774.13	7.21						
8	00:06:18	323.61	194.17	26	774.13	7.21						
9	00:07:18	323.61	194.17	26	774.13	7.21						
10	00:08:18	323.61	194.17	26	774.13	7.21						
11	00:09:18	321.54	192.92	26	774.13	7.29						
12	00:10:18	321.54	192.92	26	774.13	7.24						
13	00:11:18	323.61	194.17	26	758.65	7.24						
14	00:12:18	323.61	194.17	26	758.65	7.21						
15	00:13:18	323.61	194.17	26	774.13	7.21						
16	00:14:18	324.01	194.41	25.94	774.13	7.24						
17	00:15:18	324.01	194.41	25.94	758.65	7.21						
18	00:16:18	324.01	194.41	25.94	774.13	7.24						
19	00:17:18	324.01	194.41	25.94	758.65	7.21						
20	00:18:18	321.93	193.16	25.94	774.13	7.27						
21	00:19:18	321.93	193.16	25.94	774.13	7.24						
22	00:20:18	321.93	193.16	25.94	774.13	7.21						
23	00:21:18	326.09	195.65	25.94	820.25	7.21						
24	00:22:18	321.54	192.92	26	774.13	7.21						
25	00:23:18	324.01	194.41	25.94	774.13	7.21						
26	00:24:18	324.01	194.41	25.94	758.65	7.21						
27	00:25:18	323.61	194.17	26	774.13	7.21						

Figura 25. Resultados de la conversión de un archivo JSON a un archivo de Excel.

Fuente: Elaboración propia a partir de Excel.

Conclusiones

El dispositivo desarrollado para las mediciones de calidad del agua en acuíferos de Tamaulipas obtuvo resultados cuya precisión y exactitud de las mediciones cumplen satisfactoriamente las expectativas del uso de las obras de alumbramiento o pozos de aguas subterráneas, siendo una herramienta accesible tanto en materia económica como funcional para el monitoreo en tiempo real de parámetros analíticos de la calidad de agua subterránea en pozos. La estrecha relación entre las mediciones del dispositivo desarrollado y los sensores de laboratorio comerciales y certificados, junto con la capacidad de emisión y transmisión de datos y la estructuración de datos en la nube mediante un archivo de fácil manipulación, confirma la viabilidad de su desarrollo en acuíferos de Tamaulipas que se encuentran en condición de sobreexplotación del recurso hídrico, añadiendo peso en la implementación de esta herramienta tecnológica para la gestión de este recurso. Como parte de continuidad de este proyecto, es el establecimiento de una red de telemetría que someterá al prototipo desarrollado a la operación en condiciones reales y bajo variables no controladas como en el laboratorio; lo que puede resultar en la ampliación tanto del rango de parámetros monitoreados y como de otras mediciones electrométricas de la calidad del agua de acuerdo a las capacidades de los sensores.

Contribución de los autores

Identificación del campo de aplicación y conceptualización del trabajo (UGC, LAVO). Aplicación al campo de la ingeniería y desarrollo metodológico (UGC, LAVO). Manejo de software (UGC). Desarrollo de programas (UGC, IAATR). Análisis de circuitos electrónicos (UGC, IAATR). Manejo de datos (UGC). Bases experimentales al campo de la hidrología subterránea y validación del ensayo experimental (UGC, LAVO). Análisis de resultados (UGC, LAVO). Escritura y preparación del manuscrito (UGC, LAVO). Redacción, revisión y edición (UGC, LAVO, HCR, DAPV). Adquisición de fondos (UGC, LAVO).

Financiamiento

La compra y adquisición de todas las necesidades para el desarrollo del prototipo, fueron financiadas con el presupuesto asignado a la división de estudio de posgrado e investigación con acuerdo de la secretaría de recursos hidráulicos para el desarrollo social del estado de Tamaulipas, quienes son la parte interesada de su desarrollo y pretenden aplicarlo en la red de pozos de agua subterránea a cargo de esta secretaría para la toma de decisiones en los acuíferos del Estado que se encuentran en una condición de sobreexplotación.

Declaraciones éticas

Se declara que el contenido de este documento y el desarrollo integral del proyecto que se describe ha sido desarrollado completamente dentro del seno académico de la maestría en ingeniería industrial del Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria, estando en proceso de registro su propiedad intelectual tanto del prototipo desarrollado, como de los programas que le aplican.

Declaración de consentimiento informado

Se obtuvo el consentimiento informado de todos los sujetos involucrados en el estudio.

Agradecimientos

A la Secretaría de Recursos Hidráulicos para el Desarrollo Social del Estado de Tamaulipas, al Tecnológico Nacional de México Campus Cd. Victoria y a la coordinación de la maestría en Ingeniería Industrial de este campus por el apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Apéndices

Apéndice A. Métodos para las Determinaciones de Calidad del Agua

NMX-AA-008-SCFI-2016

Este método utiliza el método electrométrico que se basa en la medición de la diferencia de potencial generada por electrodo sensible a iones de hidrógeno en la solución. Es obligatoria en el monitoreo ambiental y en el cumplimiento de normas, en los que se encuentra la NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales para industrias reguladas.

NMX – AA – 093 – SCFI – 2018

La conductividad se mide en función de la capacidad del agua para transportar corriente eléctrica, relacionándose directamente con la cantidad de iones disueltos en la solución. Es esencial en estudios hidrogeológicos, evaluación de contaminación y cumplimiento de normas, entre las que se encuentra la NOM-011-CONAGUA-2015, que establece el método base para

determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales y del subsuelo, para su explotación, uso o aprovechamiento para el agua subterránea. Se complementa el parámetro de sólidos disueltos totales (TDS), usando factores de conversión para obtener los datos.

NMX – AA – 038 – SCFI – 2021

Se basa en el principio nefelométrico, donde un haz de luz pasa a través de la muestra y se mide la dispersión total, lo que genera un valor que es proporcional al nivel de partículas suspendidas en la solución, expresándose en NTU. Esta norma es importante en el monitoreo de agua potable, aplicado en normas, incluyendo la NOM-127-SSA1-2021, evaluando los tratamientos de agua y cumplimiento ambiental.

NMX – AA – 007 – SCFI – 2013

La medición de temperatura se realiza por medio de sensores térmicos calibrados que utilizan el principio de transducción térmica asegurando que los valores representen las condiciones reales de la muestra. Es importante para estudios ambientales, evaluaciones de calidad del agua y procesos industriales. Estos equipos deben calibrarse con patrones certificados.

NMX – AA – 034 – SCFI – 2015

Establece el método gravimétrico que consiste en la filtración, evaporación del filtrado y en pesar el residuo seco, lo que representa el valor de la concentración de sólidos totales disueltos en el agua. Esencial para la determinación de la cantidad de sales, minerales, aniones o cationes disueltos que puedan ser consecuencias de la intrusión marina, fertilizantes o actividad industrial en la zona.

Apéndice B. Normas Mexicanas Aplicables

NMX – AA – 007 – SCFI – 2013

Esta norma establece los lineamientos para la medición de la temperatura del agua en distintos tipos de cuerpos de agua, permitiendo asegurar la precisión y comparabilidad en laboratorio y campo. Su principio de medición se basa en el uso de sensores térmicos, los cuales registran la variación de temperatura mediante cambios en la resistencia eléctrica o señales digitales.

Para este prototipo se utilizó el sensor DS18B20, un termistor digital de alta precisión que permite medir la temperatura del agua con una resolución ajustable en programación. Su calibración y uso se basaron en los lineamientos de la norma, lo que garantiza que las mediciones sean confiables para la evaluación de la calidad del agua en pozos subterráneos.

NMX – AA – 008 – SCFI – 2016

Esta establece los lineamientos para la medición del pH en distintos tipos de agua, permitiendo asegurar precisión y estabilidad. El principio de medición de los dispositivos de medición de pH se basa en el uso de electrodos potenciométricos, estos determinan la actividad de los iones hidrógeno en la muestra.

Para este prototipo, se utilizó el sensor SEN0169-V2 de DFRobot, un electrodo de pH de alta precisión, adecuado para aplicaciones en campo. Su calibración y uso se basaron en las especificaciones de la norma y del fabricante, garantizando que las mediciones sean confiables.

NMX – AA – 034 – SCFI – 2015

Esta norma establece los lineamientos para la medición de los TDS en el agua, asegurando la precisión y estabilidad. Su principio de medición se basa en la relación entre la conductividad eléctrica y la concentración de sólidos disueltos.

Para este prototipo, se utilizó el sensor SEN0244 de DFRobot, que estima los TDS a partir de la conductividad eléctrica. Su calibración y uso se basaron en los lineamientos de la norma, de manera que nos garantiza datos confiables.

NMX – AA – 093 – SCFI – 2018

Esta norma establece los lineamientos para la medición de la conductividad eléctrica en el agua, condición que nos asegura precisión y estabilidad. Su principio de medición se basa en la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, determinada por la concentración de iones disueltos en el agua.

Para este prototipo se utilizó el sensor SEN0244 de DFRobot, aplicando una fórmula para transformar los valores de los TDS a conductividad eléctrica. Su calibración y uso se basaron en la norma, mismo que nos asegura mediciones confiables.

NMX – AA – 038 – SCFI – 2001

Esta norma establece los lineamientos para la medición de la turbidez en el agua para garantizar la precisión y estabilidad. Su principio de medición se basa en la dispersión de la luz, donde la intensidad de la luz dispersada por partículas en suspensión se compara con una referencia estandarizada.

Para este prototipo, se utilizó el sensor SEN0189 de DFRobot, este emplea un fotodetector y una fuente de luz infrarroja para cuantificar la turbidez. Su calibración y uso se basaron en la norma para asegurarnos de obtener datos confiables.

Referencias

- Aragón Cruz, A., López Hernández, J. R., & Ávila Flores, O. (2022). Agua subterránea en Norteamérica, un caso de estudio: Riesgo de contaminación y uso de los manantiales en San Simón Almolongas, Oaxaca, México. Norteamérica, *Revista Académica del CISAN-UNAM*, 17(1). <https://doi.org/10.22201/cisan.24487228e.2022.1.522>
- Blanco de la Torre, F. (2017). Capítulo primero: Los recursos hídricos en el mundo: cuantificación y distribución. En *El agua: ¿fuente de conflicto o cooperación?* (pp. 21–70). Instituto Español de Estudios Estratégicos & Ministerio de Defensa. https://www.ieee.es/Galerias/fichero/cuadernos/CE-186_Agua.pdf
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2020). Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas (SIGACUA). <https://sigagis.conagua.gob.mx/aprovechamientos/>
- Fonseca-Campos, J., Reyes-Ramirez, I., Guzman-Vargas, L., Fonseca-Ruiz, L., Mendoza-Perez, J. A., & Rodriguez-Espinosa, P. F. (2022). Multiparametric system for measuring physicochemical variables associated to water quality based on the Arduino platform. *IEEE Access*, 10, 69700–69714. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3187422>
- Gerencia de Aguas Subterráneas. (2023a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Victoria-Casas (2808), estado de Tamaulipas. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html
- Gerencia de Aguas Subterráneas. (2023b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Victoria-Güemez (2807), estado de Tamaulipas. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía.] (2024, noviembre 9). Temperatura media anual. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx?ag=280410001>
- Khan, M. W., Martin, J., & Lim, M. (2024). Instrumentation of low-cost IoT-agnostic data-capturing platform with enhanced sampling and bandwidth capabilities for subsurface characterization. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 73, 3002710. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3472889>
- Kumar, J., Gupta, R., Sharma, S., Chakrabarti, T., Chakrabarti, P., & Margala, M. (2024). IoT-Enabled Advanced Water Quality Monitoring System for Pond Management and Environmental Conservation. *IEEE Access*, 12, 58157–58167. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3391807>
- Kelechi, A. H., Alsharif, M. H., Anya, A. C., Bonet, M. U., Uyi, S. A., Uthansakul, P., Nebhen, J., & Aly, A. A. (2021). Design and implementation of a low-cost portable water quality monitoring system. *Computers, Materials & Continua*, 69(2), 2405–2424. <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.018686>
- Mabrouki, J., Azrour, M., Dhiba, D., Farhaoui, Y., & El Hajjaji, S. (2021). IoT-Based Data Logger for Weather Monitoring Using Arduino-Based Wireless Sensor Networks with Remote Graphical Application and Alerts. *Big Data Mining and Analytics*, 4(1), 25–32. <https://doi.org/10.26599/BDMA.2020.9020018>
- Mancilla-Villa, O. R., Anzaldo-Cortes, B. N., Guevara-Gutiérrez, R. D., Hernández-Vargas, O., Palomera-García, C., Figueroa-González, Y., Ortega-Escobar, H. M., Flores-Magdaleno, H., Can-Chulim, Á., Cruz-Crespo, E., Sánchez-Bernal, E. I., Olgún-López, J. L., & Mendoza-

- Saldivar, I. (2021). Calidad del agua subterránea para uso agrícola en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, México. *Terra Latinoamericana*, 39, e745, 1–12. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.745>
- Mirzaei, A., Saghafian, B., Mirchi, A., & Madani, K. (2019). The groundwater–energy–food nexus in Iran’s agricultural sector: Implications for water security. *Water*, 11(1835). <https://doi.org/10.3390/w11091835>
- Mohd Jais, N. A., Abdullah, A. F., Mohd Kassim, M. S., Abd Karim, M. M., Abdulsalam, M., & Muhadi, N. A. (2024). Improved accuracy in IoT-based water quality monitoring for aquaculture tanks using low-cost sensors: Asian seabass fish farming. *Heliyon*, 10, e29022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29022>
- O’Grady, J., Zhang, D., O’Connor, N., & Regan, F. (2021). A comprehensive review of catchment water quality monitoring using a tiered framework of integrated sensing technologies. *Science of the Total Environment*, 765, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142766>
- Secretaría de Economía. (2013). NMX-AA-007-SCFI-2013: Análisis de agua – Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5330532&fecha=23/01/2014#gsc.tab=0
- Secretaría de Economía. (2015). NMX-AA-034-SCFI-2015: Análisis de agua – Medición de sólidos y sales disueltas en agua naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5433394&fecha=18/04/2016#gsc.tab=0
- Secretaría de Economía. (2016). NMX-AA-008-SCFI-2016: Análisis de agua – Medición de pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5452147&fecha=09/09/2016#gsc.tab=0
- Secretaría de Economía. (2018). NMX-AA-093-SCFI-2018: Análisis de agua – Medición de la conductividad eléctrica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5555012&fecha=25/03/2019
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015). NOM-011-CONAGUA-2015: Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015#gsc.tab=0
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). Informe de la situación del medio ambiente en México (Edición 2018). SEMARNAT.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021). NOM-001-SEMARNAT-2021: Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación (NOM-001-SEMARNAT-2021). Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022
- Secretaría de Salud. (2021). NOM-127-SSA1-2021: Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0
- Sánchez, J. A., Álvarez, T., Pacheco, J. G., Carrillo, L., & González, R. A. (2016). Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*,

7(4), 75–96. <https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1260>

Silva Torres, D. A., & Coello Hurtado, J. I. (2020). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real de sensores de temperatura, turbidez, TDS y PH para la calidad del agua utilizando la tecnología LoRaWAN [Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Electrónico, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional UPS. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19627>

Sunardi, A. Yudhana, & Furizal. (2023). Tsukamoto Fuzzy Inference System on Internet of Things-Based for Room Temperature and Humidity Control. *IEEE Access*, 11, 6209–6227. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3236183>