

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2026,
Volumen 10, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1

PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN Y MONITOREO REMOTO MULTIPARAMÉTRICO PARA MEDIR LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE: AQUAASM

**PROTOTYPE OF A MULTIPARAMETRIC REMOTE
MEASUREMENT AND MONITORING SYSTEM FOR
MEASURING DRINKING WATER QUALITY: AQUAASM**

Miguel Ángel Jiménez Reyes

Universidad Nacional Autónoma de México

Ángel Sebastián Colín García

Universidad Nacional Autónoma de México

Juan Manuel Chávez Pérez

Universidad Nacional Autónoma de México

Victoria Peña Alanis

Universidad Nacional Autónoma de México

Moisés Isaac Espinosa Espinosa

Universidad Nacional Autónoma de México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1.22743

Prototipo de un sistema de medición y monitoreo remoto multiparamétrico para medir la calidad del agua potable: AquaASM

Miguel Ángel Jiménez Reyes¹angel.jimenez.07@ciencias.unam.mx<https://orcid.org/0009-0005-0807-6645>

Facultad de Ciencias

Universidad Nacional Autónoma de México

México

Ángel Sebastián Colín Garcíaangel.s.coling@ciencias.unam.mx<https://orcid.org/0009-0002-2188-918X>

Facultad de Ciencias

Universidad Nacional Autónoma de México

México

Juan Manuel Chávez Pérezmanuelchp2707@ciencias.unam.mx<https://orcid.org/0009-0003-4786-4113>

Facultad de Ciencias

Universidad Nacional Autónoma de México

México

Victoria Peña Alanisvictoria_penalanis@ciencias.unam.mx<https://orcid.org/0009-0000-4108-9169>

Facultad de Ciencias

Universidad Nacional Autónoma de México

México

Moisés Isaac Espinosa Espinosamee@ciencias.unam.mx<https://orcid.org/0000-0001-5954-1985>

Facultad de Ciencias

Universidad Nacional Autónoma de México

México

RESUMEN

Se presenta un prototipo de un sistema de monitoreo remoto multiparamétrico para medir la calidad del agua, llamado AquaASM₂, implementado con un microcontrolador ESP32, y tres sensores: uno de pH (potencial de hidrógeno), modelo PH-4502C, uno de temperatura, modelo DS18B20 y uno de sólidos disueltos totales (SDT), modelo Metter TDS Sensor V1.0. Utiliza tecnología Wifi para transmitir información en tiempo real a una aplicación web desarrollada en lenguaje HTML (HyperText Markup Language), que permite visualizar los parámetros medidos. La precisión del sistema en las mediciones es de ± 0.1 unidades para el pH, $\pm 0.5^\circ$ en temperatura y $\pm 10\%$ en sólidos disueltos totales, lo que lo hace adecuado para aplicaciones básicas de monitoreo y análisis de la calidad del agua.

Palabras clave: agua potable; monitoreo remoto; Wifi; pH; Sólidos disueltos totales

¹ Autor principal.

Correspondencia: angel.jimenez.07@ciencias.unam.mx

Prototype of a multiparametric remote measurement and monitoring system for measuring drinking water quality: AquaASM

ABSTRACT

The present study introduces a prototype of a multiparametric remote monitoring system for measuring water quality, designated as AquaASM. The system has been implemented with an ESP32 microcontroller and three sensors: one for pH (hydrogen potential), model PH-4502C; one for temperature, model DS18B20; and one for total dissolved solids (TDS), model Metter TDS Sensor V1.0. The system utilizes Wi-Fi technology to facilitate the real-time transmission of information to a web application developed in HTML (HyperText Markup Language), which enables the visualization of the measured parameters. The system's measurement accuracy has been demonstrated to be ± 0.1 units for pH, $\pm 0.5^\circ$ for temperature, and $\pm 10\%$ for total dissolved solids. This renders the system suitable for fundamental water quality monitoring and analysis applications.

Keywords: Drinking water; remote monitoring; Wi-Fi; pH; total dissolved solids

*Artículo recibido 10 diciembre 2025
Aceptado para publicación: 17 enero 2026*



INTRODUCCIÓN

La problemática mundial de la escasez y calidad del agua nos concierne a todos, debido a que tiene un gran impacto en diversas áreas; el agua potable es esencial para todo ser viviente, como para una gran cantidad de aplicaciones industriales como la alimentaria, farmacéutica, entre otras.

Como bien se sabe, la superficie de nuestro planeta está cubierta en un 70% por agua, por un total de 1368 millones de km³ de la cual el 97.5 % es agua no potable y solamente el 2.5% es agua dulce y de esta última un 69% se encuentra congelada, el 30% se encuentra en acuíferos subterráneos, dejando solamente alrededor del 1% en la atmósfera, ríos y lagos.

Las actividades de agricultura y ganadería consumen entre un 70% y un 80% del total del agua potable del mundo (Fundación Aquae, 2021). Además, el 80% de aguas residuales, regresan a los ecosistemas sin ser tratadas (Fundación Aquae, s.f.). Dejando así la duda de si en verdad el agua que utilizamos es apta para el consumo humano.

En 2010 se reconoció como un derecho humano el abastecimiento y saneamiento del agua. Un estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2023 dio a conocer que (OMS, 2023):

- 296 millones de personas se abastecen de agua procedente de pozos y manantiales no protegidos, y
- 115 millones de personas recogían agua superficial no tratada en lagos, estanques, ríos o arroyos.

Asimismo, 2 200 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura (OMS, 2023). En México se estima que alrededor de 10 millones de personas no cuentan con servicio de agua potable.

La Comisión Nacional del Agua (Conagua) de México, señala que el país tiene un promedio de 446 mil 777 millones de metros cúbicos de agua dulce o potable, de los cuales alrededor del 70% se usa en agricultura y ganadería, el resto (20-30%) es para el consumo humano.

En 2022, de acuerdo con el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), 86% de los parámetros de calidad monitoreados, se mantuvieron dentro de los estándares normativos (IPDP CDMX, 2024a), Según la ENIGH 2022 (Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares, elaborada por

el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI), el 69.7% de la población de la CDMX tiene acceso al agua y a la infraestructura sanitaria (IPDP CDMX, 2024b).

En la Ciudad de México, 53 mil 804 viviendas carecieron de servicio de agua entubada de la red pública. Por lo tanto: 30 mil 240 viviendas hicieron uso del servicio de pipas privadas o de gobierno para cubrir su demanda básica de consumo de agua, 9 mil 369 acarrearon agua desde viviendas cercanas. 6 mil 669 viviendas contaban con un captador de agua de lluvia, 4 mil 594 usaron el agua de llave pública (o hidrante) y 2 mil 932 viviendas acarrearon agua de un pozo, río, lago o arroyo (IPDP CDMX, 2024c).

El agua contaminada o con un saneamiento deficiente puede tener consecuencias en la salud, provocando enfermedades como cólera, y otras enfermedades diarreicas; la disentería, la hepatitis A, la fiebre tifoidea, la poliomielitis y otras enfermedades. Alrededor de un millón de personas en todo el mundo ha sido expuesta a agua contaminada por heces. La diarrea infantil provocada por el consumo de agua contaminada causa la muerte de un millón de personas al año y el 25% tenían una edad menor a 5 años (OMS, 2023).

Hay diferentes parámetros que definen la calidad del agua, estos son indicadores físicos, químicos y biológicos que determinan si un cuerpo de agua es apto para un uso específico, como el consumo humano, el riego y la industria. Algunos parámetros comunes son: temperatura, pH, Sólidos Disueltos Totales (SDT, Total Dissolved Solids, TDS), oxígeno disuelto, turbidez, conductividad, presencia de coliformes y otros contaminantes como nitratos, sulfatos y metales pesados.

El prototipo propuesto se enfoca en medir y monitorear solo 3 parámetros; pH, temperatura y total de sólidos disueltos (medidos en partículas por millón; es decir, ppm). El pH se mide en una escala logarítmica de 14 unidades, donde cada unidad representa un cambio de un factor de 10 en la concentración de iones de hidrógeno. De acuerdo con la Secretaría de Salud de México, para que el agua sea potable, su pH debe estar entre 6.5 y 8.5, ver figura 1, y su TDS entre 0 y 500 ppm. Según la Norma oficial mexicana 127, el valor ideal de pH es de 6.5 a 8.5, y para TDS el límite permisible es 1000 mg/L (Secretaría de Salud, 2022). En la figura 1 se presentan las especificaciones sanitarias físicas del agua de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-2021.



Figura 1. Especificaciones sanitarias físicas del agua de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-2021. (a) pH del agua potable, (b) TDS del agua potable (Norma oficial mexicana 127).

Parámetros	Límite permisible	Unidades
Turbiedad ^a	4.0	UNT
pH	6.5 a 8.5	Unidades de pH
Color Verdadero	15	UC

^a El límite permisible para Turbiedad será de 3.0 UNT a partir del segundo año posterior a la entrada en vigor de la presente Norma.

(a)

Parámetros	Límite permisible	Unidades
Cianuros totales	0.07	mg/L
Dureza total como CaCO ₃	500.00	mg/L
Fluoruros como F ^{-a}	1.50	mg/L
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃)	0.50	mg/L
Nitrógeno de nitratos (N-NO ₃ ⁻)	11.00	mg/L
Nitrógeno de nitritos (N-NO ₂ ⁻)	0.90	mg/L
Sólidos disueltos totales	1000.00	mg/L
Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	400.00	mg/L
Sustancias activas al azul de metileno	0.50	mg/L

^a El límite permisible para fluoruros será de 1.50 mg/L para todas las localidades y se ajustará de conformidad con la tabla de cumplimiento gradual Tabla 3 de este inciso 5.3

(b)

Si el pH del agua potable no se encuentra en una escala neutra (6.0 - 7.0) puede generar distintas afectaciones dependiendo el uso. Para el consumo humano, van desde un cambio de sabor del agua hasta generar irritación en la piel del ser humano, entre otras. Para la industria, por ejemplo, en la agricultura; afectaría el crecimiento de las plantas, etc. El agua potable con un pH bajo (ácido: 0-5.0) favorece y acelera el proceso de disolución de metales pesados, facilitando la contaminación del líquido.

El agua puede contaminarse con bacterias debido a las condiciones del entorno en el que se encuentra. En general, muchas bacterias prefieren un pH cercano a 7 para desarrollarse, por lo que se recomienda aplicar un desinfectante adecuado con el fin de preservar la calidad del agua. Sin embargo, el artículo “*Monitoring the effect of pH on the growth of pathogenic bacteria using electrical impedance spectroscopy*” muestra que bacterias patógenas como *Escherichia coli* y *Bacillus cereus* mantienen su capacidad de crecimiento aun cuando el pH de su medio de cultivo se modifica dentro de un rango entre 5 y 9 (Razmi et al., 2023).

Por otro lado, la temperatura es uno de los parámetros más importantes que determinan la calidad del agua potable; afecta su química, que influye en la cantidad de oxígeno que se puede disolver en el líquido. Esto puede propiciar la aparición de parásitos que pueden generar enfermedades. (Global Seafood Alliance, 2018).

Es importante saber que los cambios de temperatura en el agua pueden afectar su valor de pH. A medida que la temperatura aumenta, el equilibrio del agua se desplaza y se incrementa ligeramente la concentración de iones de hidrógeno. Aunque este cambio suele ser pequeño, en presencia de ciertas sustancias disueltas, sin embargo, la variación del pH puede volverse significativa, (HANNA Instruments, s.f).

Los sólidos disueltos totales (SDT o TDS) son un indicador importante de la pureza y seguridad del agua. En la tabla 1, se presenta la escala típica de SDT y su interpretación (Somos PURA, 2025):

Tabla 1. Escala típica de SDT y su interpretación

Sólidos disueltos totales,	Interpretación
0-50	Agua ultrapura, sin minerales esenciales.
50-300	Nivel ideal para agua potable.
300-600	Se considera todavía potable, pero presenta un incremento de
600 - 1,500	Puede considerarse potable todavía, pero ya por la cantidad de
< 1.500 ppm	No apta para consumo humano porque podría tener contaminantes.

El pH y el total de sólidos disueltos son parámetros que establecen la calidad del agua para consumo humano y su uso industrial, pero dependiendo de las necesidades de cada sector y aditamentos requerido puede variar el valor de TDS. Según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-2021 el valor límite de TDS en el agua es de 1000 por mg/L para uso y consumo humano, (Secretaría de Salud, 2022).

En este documento se presenta un prototipo para determinar la calidad del agua midiendo los parámetros pH, TDS y temperatura. Con esto se puede definir, si el agua es apta para el consumo humano o animal. Este prototipo es de bajo costo, portátil y escalable. Para el sistema propuesto y con base a lo estipulado en la NOM-127-SSA-2021 para los parámetros pH y TDS se establece una clasificación de la calidad del agua, la cual es:

- No potable
- Potable



- Excelente

El prototipo desarrollado está pensado para un entorno doméstico o local. Su objetivo no solo es informar los valores de los parámetros, sino también ayudar al usuario a comprender qué significan y ofrecer posibles soluciones cuando la calidad del agua no es adecuada. El prototipo también incluye un filtro de agua modelo BYWF-2025 de la marca BOYU, el cual opera a 120 V/60 Hz de corriente alterna, con una potencia de 8 W. En la tabla 2, se presentan las características más importantes del filtro para la filtración del agua (Boyu, s.f.).

Adicionalmente, el prototipo incluye tecnología de Internet de las cosas (Internet of Thing, Iot), que permite controlar el encendido-apagado del filtro de forma remota desde la página web desarrollada para controlar el sistema propuesto.

Tabla 2 Especificaciones del filtro BYWF.

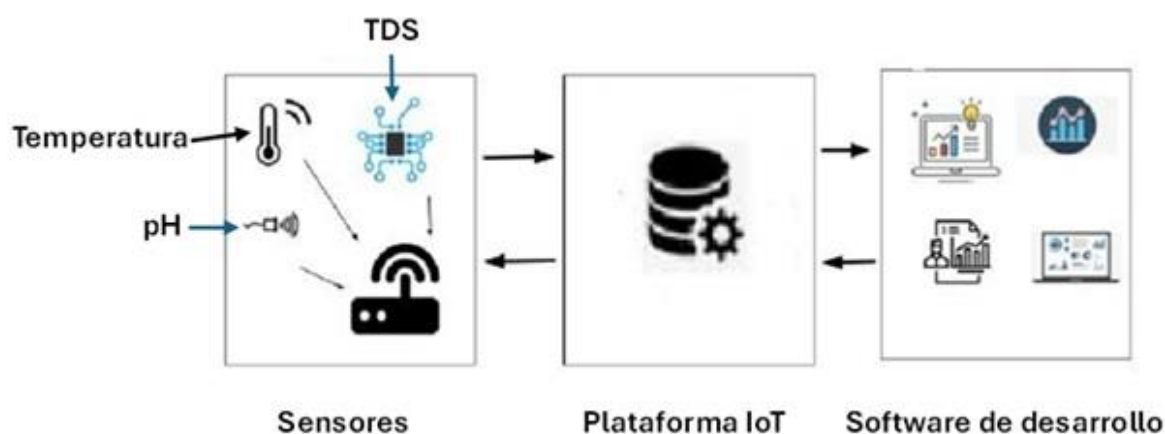
Caudal	~300 L/h
Filtrado mecánico	Captura partículas grandes mediante esponja o cartucho
Filtro químico	Carbón activado para eliminar impurezas, color y olores
Filtro biológico	Media porosa (esponja) que favorece la colonización de bacterias nitrificantes que descomponen amoníaco y nitritos.
Protección al agua (protección de los componentes electrónicos)	IPX68
Contenedor	50-100 L

METODOLOGÍA

Prototipo para la medición y monitoreo de la calidad del agua

El prototipo propuesto se basa en la arquitectura típica de Internet de las Cosas (IoT). Es decir, está formado por hardware, software y uso propio de la nube, ver figura 2.

Figura 2. Arquitectura IoT del prototipo propuesto.

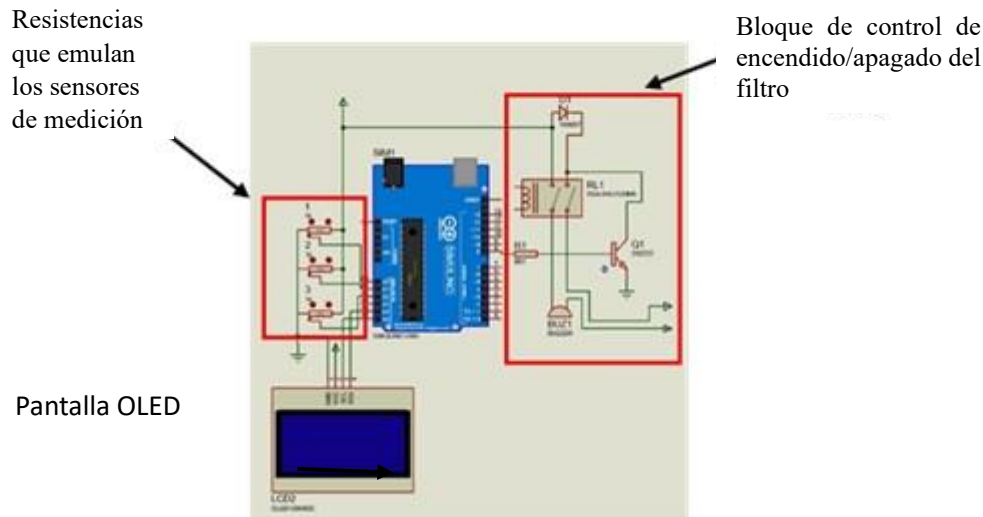


El prototipo propuesto consiste en una plataforma modular de monitoreo de calidad del agua potable, basada en tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) y computación en la nube. La propuesta fue diseñada con la flexibilidad para ser adaptada a diferentes aplicaciones de monitoreo del agua potable, incluyendo domésticas, agrícolas e industriales. El prototipo es formado por un microcontrolador ESP32 de 32 bits, que proporciona conectividad Wifi, arquitectura dual-core y múltiples pines de entrada/salida digital y analógica, lo que permite la integración simultánea de varios sensores según las necesidades, (Circuit Schools, 2022).

Los datos adquiridos por los sensores de pH, temperatura y sólidos disueltos totales son transferidos al microcontrolador ESP32. Este se encarga de gestionarlos y transmitirlos hacia una base de datos en la nube utilizando Firebase Realtime Database de Google (versión gratuita) en tiempo real. Paralelamente, se almacenan localmente en el sistema de archivos SPIFFS (Serial Peripheral Interface Flash File System) del ESP32 (Llamas, 2019). Los datos son accesibles a través de la interfaz de programación de aplicaciones (Application Programming Interface, API) de la aplicación web del proyecto. Desde dónde se puede monitorear los parámetros medidos y tomar decisiones en cuanto a clasificar la calidad del agua bajo prueba. El prototipo de manera general está formado por un ESP32, una pantalla OLED (Organic Light Emitting Diode) azul, modelo SSD1315 un filtro de pecera de 20 L, BYWF-2025 de la marca BOYU, tres resistores de valores de $1k\Omega$, $2k\Omega$ y $5k\Omega$, respectivamente. Un Diodo 1N4004, un transistor 2n2222A y un Relevador de 12v modelo SRD-05VDC-SL-C. En la figura 3 se presenta el diagrama eléctrico del prototipo propuesto. Los sensores fueron sustituidos por resistencias variables de

1K Ω durante el proceso de simulación, debido a que el software de simulación Proteus 8 no cuenta con las bibliotecas de los sensores utilizados.

Figura 3: Diagrama eléctrico del sistema de monitoreo de agua.



El filtro utilizado en el prototipo tiene una pequeña bomba de agua que se alimenta con 120V y consume una corriente de 0.025 A. El bloque de control se encarga de activar o desactivar el filtro del sistema. Se utiliza un relevador que recibe una señal lógica de activación “1” lógico o desactivación, “0” lógico desde el pin 8 del Arduino. El interruptor electromecánico del relevador se cierra o se abre según la secuencia programada, permitiendo alimentar la bomba eléctrica del filtro.

La bomba funciona como un impulsor, cuando el motor se activa, este hace girar un rotor dentro del cuerpo de la bomba. Este movimiento crea fuerza centrífuga que aspira el agua a ser filtrada por la entrada, y la impulsa a través de la tubería interna del sistema de filtraje, dirigiéndose hacia el filtro para que ésta sea sometida a un proceso de filtraje. De esta forma se eliminan impurezas del agua antes de ser transferida a la salida de descarga.

La lógica general de funcionamiento del prototipo AquaASM se presenta en el diagrama de flujo de la figura 4. Cuando el prototipo se energiza y se enciende, este realiza un proceso de configuración automático que permite revisar el estatus del prototipo e inicializa los sensores de temperatura, TDS y pH. Así como también el motor del filtro. En este último caso, la señal digital que activa o desactiva el motor toma un valor de “0” lógico para que el motor esté desactivado.

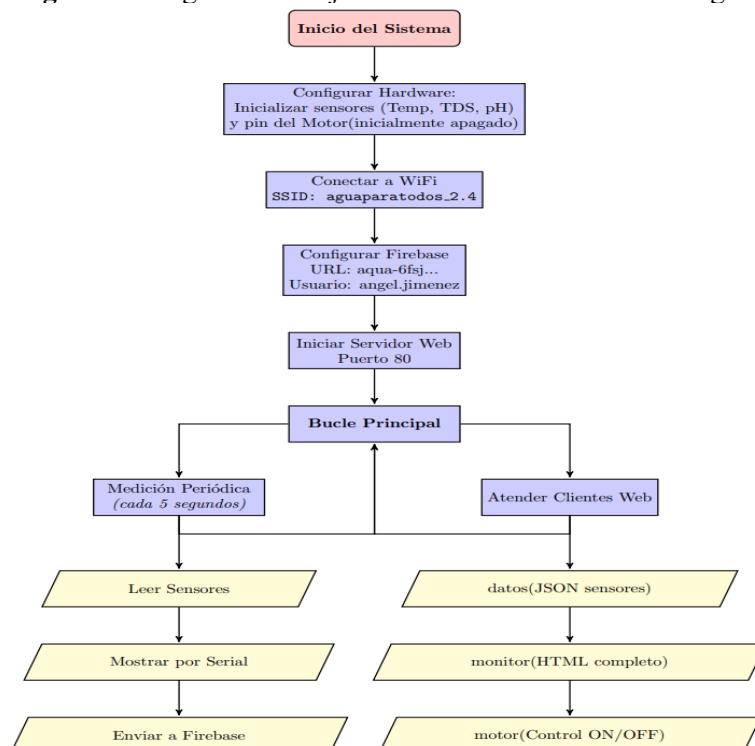
El sistema configura el hardware, donde se inicializan los sensores. Posteriormente, se ejecutan las siguientes tareas para establecer conexión con la web y la transmisión de datos a la nube asignada

1. El dispositivo se conecta a la red indicada.
2. Se establece la URL (Localizador de Recursos Uniforme) y las credenciales para enviar datos medidos a la nube.
3. Se habilita el puerto 80 del servidor web, el cual permite la comunicación con los clientes que acceden desde un navegador público.

Una vez configurado todo, el sistema entra en el bucle principal, el cual tiene 2 tareas en paralelo:

- Medición periódica (cada 5 segundos):
 1. Leer sensores
 2. Mostrar resultados en el puerto serial.
 3. Enviar datos a Firebase
- Atender clientes web:
 1. Entregar datos en formato JSON.
 2. Mostrar un monitor en formato HTML completo.
 3. Recibir y ejecutar comandos para el control del motor (Encendido/Apagado).

Figura 4: Diagrama de flujo del sistema de monitoreo de agua.



Para facilitar la supervisión in situ de una forma sencilla y directa sin necesidad de dispositivos externos, el sistema incluye una pantalla OLED (Organic Light Emitting Diode) que muestra en tiempo real las lecturas de los sensores junto con la dirección IP asignada al ESP32, lo que permite al usuario conectarse rápidamente a la interfaz web. Esta visualización local actúa como una primera capa de diagnóstico accesible y permanente. Finalmente, desde la interfaz web se pueden consultar gráficos históricos y activar manualmente el sistema de filtrado (ver Figura 5).

Figura 5: Recomendaciones mostradas en la interfaz web.

Parámetro	Valor Actual	Norma Oficial	QMS	Estado
Temperatura	21.12 °C	< 25°C	< 25°C	Cumple / Cumple
TDS	117.55 ppm	< 500 ppm	< 300 ppm	Cumple / Cumple
pH	7.32	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5	Cumple / Cumple

Recomendaciones para Uso Hospitalario.

- El agua cumple con los estándares hospitalarios.
- Realice pruebas microbiológicas periódicas según protocolo hospitalario.
- Documente todos los parámetros para auditoría de calidad.

Uso Clínico
Apta para todos los procedimientos clínicos.

Uso Alimenticio
Apta para consumo directo.

Uso Higiénico
Apta para todos los usos higiénicos.

Arquitectura del prototipo

El sistema utiliza una arquitectura de tres capas

1. Capa de sensores:

Este prototipo utiliza los siguientes sensores comerciales y de bajo costo:

Sensor de TDS (Mettler TDS Sensor V1.0): La medición de partículas por millón (ppm) es un parámetro esencial para conocer la cantidad de sólidos disueltos en el agua, como sales, minerales y metales. Este valor permite evaluar la pureza del agua y su aptitud para el consumo humano y uso industrial. Para ello se utiliza un sensor TDS, el cual mide la conductividad eléctrica del agua, ya que la presencia de estos sólidos afecta directamente dicha conductividad, siendo este el que se usará en el proyecto interpretando los datos en tiempo real (Alam & Alam, 2022), ver figura 6a.

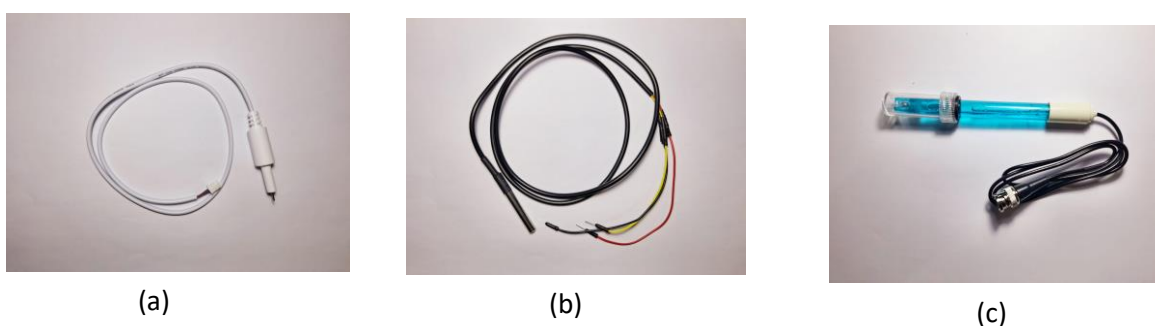
Sensor de temperatura (DS18B20): es sumergible y tienen un intervalo de medición que va desde los -55 °C hasta los 125 °C en líquidos. Además, tiene integrado un convertidor analógico/digital, por tal motivo entrega el valor de la temperatura medida en formato digital. Ver figura 6b.

1. Sensor de pH (PH-4502C):

Es un indicador de la concentración de iones de hidrógeno en el agua, lo que determina qué tan ácida o alcalina es una solución. Para medirlo se utiliza un sensor con electrodo, el cual funciona midiendo la diferencia de potencial entre el electrodo de referencia y la solución.

La sonda emplea un electrodo de vidrio que genera un voltaje proporcional a la concentración de iones de hidrógeno presentes en el líquido analizado (Prateek & Prateek, 2023). Esta señal es enviada al microcontrolador del módulo de pH para su procesamiento. Ver figura 6c.

Figura 6: Sensores utilizados en el prototipo AquaASM, a) TDS, b) temperatura, c) pH



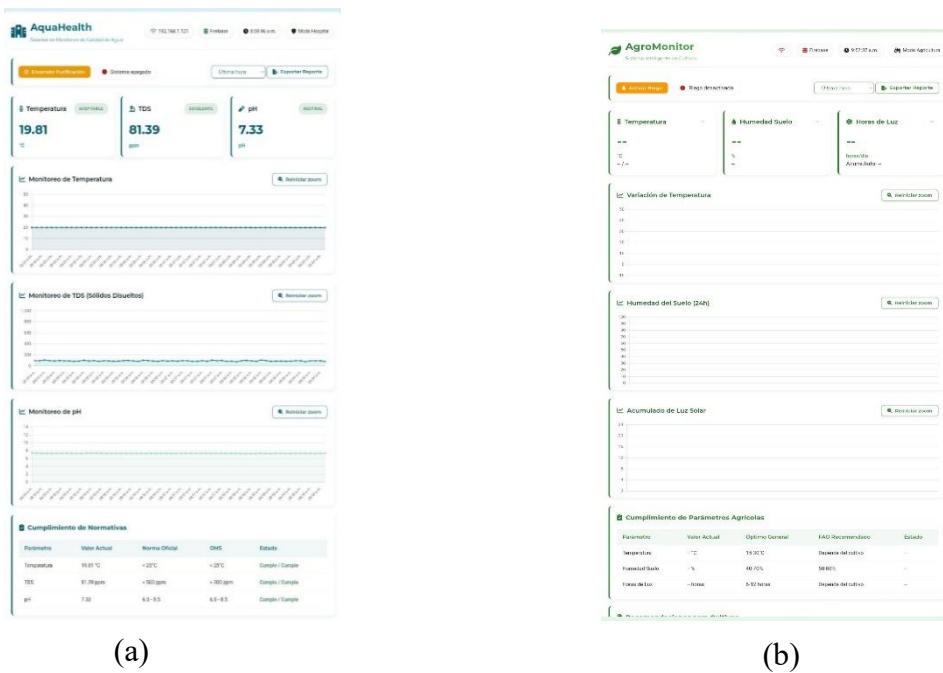
2. Capa de procesamiento:

Esta capa ejecuta algoritmos adaptables que permiten interpretar los datos recolectados del prototipo. Los criterios de evaluación están alineados con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 y las Guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que establecen los parámetros de calidad del agua destinada al consumo humano.

3. Capa de visualización: Interfaces web especiales para cada sector.

La interfaz está diseñada para visualizar los datos de temperatura, TDS y pH, en función de los estándares sanitarios establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 y las Guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS), (Secretaría de Salud, 2022). Esta interfaz puede ser ajustada para diferentes aplicaciones en donde se requiere medir la calidad del agua. Por ejemplo, en la figura 7a, se presenta una interfaz para aplicación hospitalaria, y en la figura 7b, se presenta una interfaz para aplicación agrícola. Además, se pueden adecuar las imágenes y animaciones de acuerdo con el área de aplicación. En el caso de la aplicación agrícola, la interfaz fue diseñada para visualizar datos de temperatura, humedad del suelo y horas de luz natural diaria, utilizando una paleta de colores asociada al entorno agrícola.

Figura 7. Interfaz de datos, (a) aplicación hospitalaria, (b) aplicación de agricultura.



Conexiones eléctricas

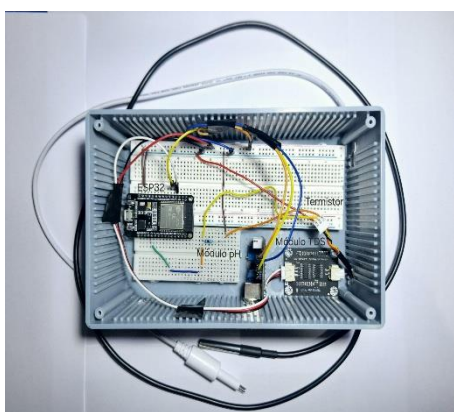
Cada sensor, en esencia, cuenta con tres conexiones: alimentación (VCC), tierra (GND) y un pin de señal encargado de transmitir los datos medidos. Los pines de VCC y GND de cada sensor se conectaron a los pines de alimentación del ESP32 (3.3 V/5 V y GND, según cada módulo). Para un mejor detalle de las conexiones revisar la Tabla 3.

En la figura 8 se muestra el esquema eléctrico correspondiente al montaje del prototipo. En la figura 8a se presenta una foto del prototipo propuesto con las conexiones entre el ESP32 y los sensores utilizados dentro de un receptáculo de plásticos. En la figura 8b se presenta el diagrama eléctrico de conexión de las resistencias variables, que emulan los sensores, y el ESP32.

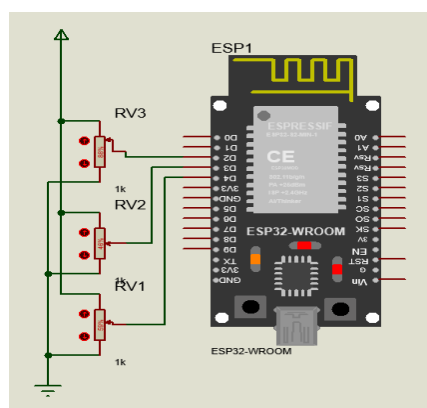
Las sondas de TDS y pH cuentan con un módulo cada uno, los cuales tienen las tareas de acondicionar las señales medidas y transmitir las a la ESP32, las especificaciones de dichos módulos se presentan en las tablas 4 y 5.

Tabla 3. Conexiones eléctricas entre el ESP32 y los sensores/módulos del prototipo.

Componente	Pin en el ESP32	Tipo de señal
Sensor de temperatura DS18B20	D2	Entrada digital
Sensor de TDS	D34	Entrada analógica
Sensor de pH (PH-4502C)	D35	Entrada analógica
Display OLED (SSD1315)	SDA, SCL	Comunicación I2C
Relevador	D12	Control digital del filtro
Transistor 2N2222	D12 (con resistencia de 1k Ω)	Activa la bobina del
GND y VCC	Pines de alimentación del	Tierra y energía



(a)



(b)

Figura 8: Prototipo del AquaASM a) Montaje de los sensores, b) Esquema del ESP32 y los resistores.

Tabla 4 Especificaciones eléctricas del módulo TDS Meter V1.0

Parámetro	Valor
Voltaje de alimentación	3.3 V – 5.5 V
Corriente de operación	3 mA – 6 mA
Salida de señal	0 V - 2.3 V
Rango de medición TDS	0 – 1000 ppm
Precisión	$\pm 10\%$ (a 25 °C)
Longitud de la sonda	60 cm

Tabla 5: Especificaciones eléctricas del sensor de pH tipo Gravity (PH-4502C)

Parámetro	Valor
Voltaje de alimentación	3.3 V – 5.5 V
Consumo de corriente	5 mA – 10 mA
Salida de señal	0 V – 3.0 V
Rango de medición	pH 0 – 14
Precisión	± 0.1 pH a 25 °C
Temperatura de operación	5 °C – 60 °C
Conector de señal	PH2.0-3P

El prototipo también cuenta con una pantalla OLED Azul 128x64 1.3 SH1106 I2C que muestra los parámetros de la temperatura, TDS y el pH, la pantalla cuenta con los siguientes pines digitales que se conectaron al ESP32: VDD conectado al pin 3.3 V, GND conectado a GND, SCL y SDA (ver figura 9a). En la pantalla se visualizan los datos de conexión a la red de internet como la dirección IP y el estado de conexión: conectado o no conectado (figura 9b). Una vez funcionando el prototipo, en la pantalla se visualizan los valores de los parámetros medidos de la temperatura, TDS y pH del agua monitoreada (ver Figura 9c).

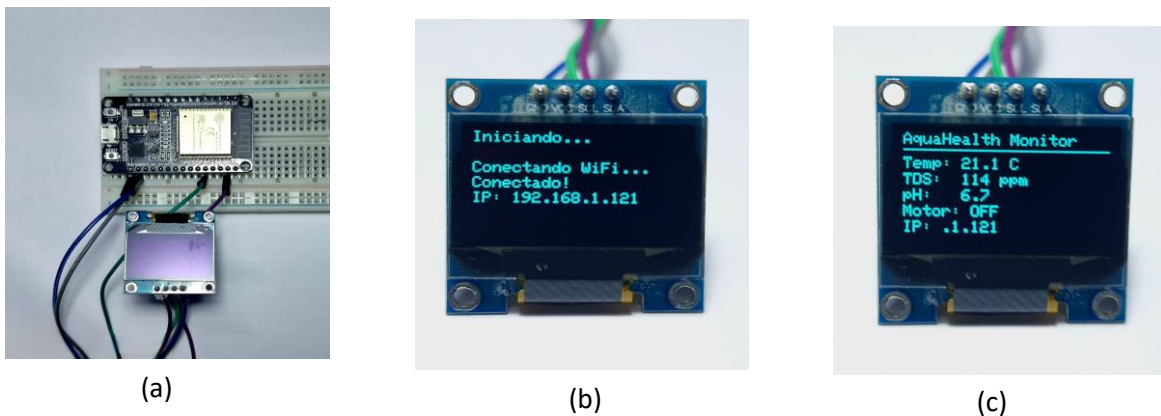


Figura 9. Display OLED del prototipo, (a) Montaje, (b) Mensaje de conexión a la red, y (c) Visualización de las mediciones.

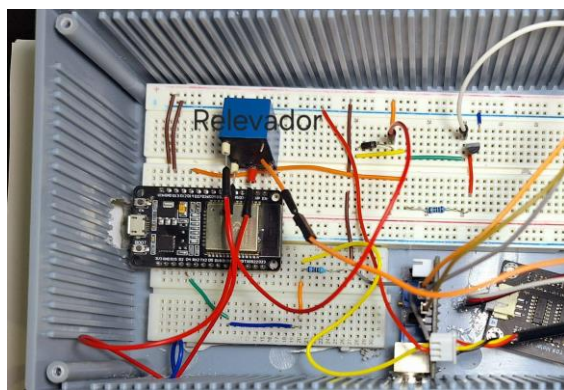
Además de los sensores, el sistema de monitoreo de agua cuenta con un filtro (su ficha técnica se puede apreciar en la Tabla 6), que trabaja en conjunto con el sensor de TDS para reducir los sólidos totales disueltos en los líquidos, el filtro se activa desde la interfaz web de AquaASM.

El filtro opera con corriente alterna de 110 a 120 V. Para activarlo o desactivarlo se utilizó un relevador controlado por el ESP32. El cable de fase de la alimentación del filtro se conectó al terminal COM (Común) del relevador, mientras que uno de los cables del filtro se conectó al terminal NO (normalmente abierto). Las especificaciones aparecen en la tabla 6. Se usó un transistor 2N2222 en configuración de conmutador para obtener una corriente de colector de 20mA para energizar la bobina del relevador.

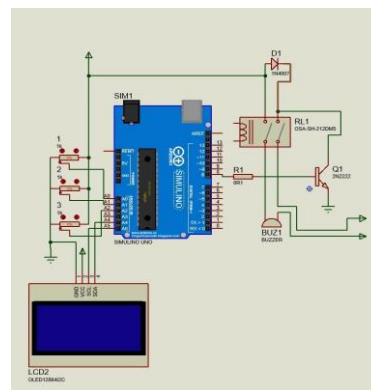
Tabla 6: especificaciones del filtro 06-External filter

Característica	Valor
Modelo	06-External filter
Tipo	Filtro externo
Voltaje de operación	110–120 V AC
Frecuencia	60 Hz
Potencia	3 W
Altura máxima (Hmax)	0–60 cm
Caudal máximo (Qmax)	0–250 (L/h)
Longitud del cable	1.5 m
Temperatura máxima del agua	35 °C
Grado de protección	IPX8

El pin D12 se conectó a la base del transistor a través de una resistencia de 1 k Ω . De esta manera, cuando el pin D12 envía una señal alta, el transistor permite el paso de corriente entre colector y emisor, activando la bobina del relevador. Un extremo de la bobina del relevador se conectó al colector del transistor y el otro extremo a una fuente de 5 V. (ver Figura 10).



(a)



(b)

Figura 10. Prototipo de monitoreo de agua, (a) Conexión del relevador con el ESP32, y (b) Esquemas eléctricos del prototipo.

El diodo 1N4007 se conectó en paralelo con la bobina del relevador, conectado en polaridad inversa: el cátodo se conectó al pin de 5 V (lado positivo de la bobina) y el ánodo al colector del transistor (lado negativo de la bobina). Esto permite que el diodo conduzca la corriente inversa generada por la bobina al apagarse, protegiendo así el transistor (ver Figura 11).

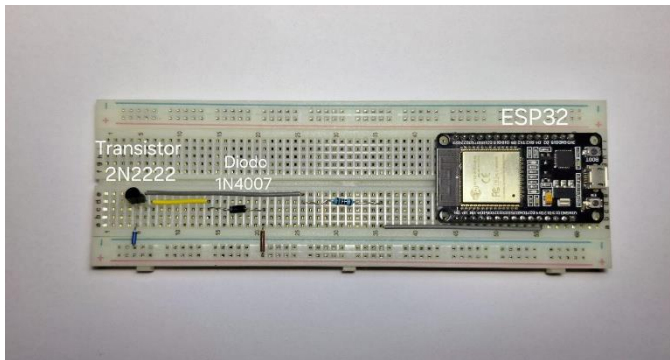


Figura 11: Arreglo que protege el transistor del prototipo.

Programación del sistema

El sketch desarrollado para controlar el prototipo incluye las bibliotecas que permiten la conectividad con la red Wifi seleccionada y configurar un servidor. Estas bibliotecas son WiFi.h para la conexión a la red Wifi, y WebServer.h para conectarse al servidor.

En el caso del sensor de temperatura DS18B20, este cuenta con un convertidor analógico-digital interno y entrega directamente la lectura en grados Celsius. Por tal motivo, no requiere aplicar expresiones matemáticas adicionales para obtener el valor de temperatura. En contraste, los sensores de TDS y pH entregan valores en voltaje, los cuales deben convertirse a unidades físicas mediante las siguientes expresiones:

Para el sensor de sólidos disueltos

$$TDS(ppm) = \left(\frac{Lectura_{ADC} V_{ref}}{4095} \right) \times K \quad (1)$$

Donde $Lectura_{ADC}$: es el valor entregado por el convertidor analógico-digital del ESP32, V_{ref} : es el voltaje de referencia del ADC, el valor 4095 corresponde a la resolución de 12 bits de ADC ($2^{12}-1$) y K un factor de conversión empírico proporcionado por el fabricante del sensor (DFRobot, s. f.). Esta relación lineal es válida bajo condiciones de calibración estándar (Horowitz & Hill, 2015).

Para el sensor de pH:

$$pH = 7 + \frac{V_{ref} - V_{medido}}{m} \quad (2)$$

Donde V_{medido} es el voltaje entregado por la sonda de pH, V_{ref} es el voltaje de referencia del sensor cuando la solución es neutra (pH=7), m corresponde a la pendiente de la recta de calibración (≈ 59 mV por unidad de pH a 25 °C, de acuerdo con la ecuación de Nernst) (Wang, 2000; Analog Devices, 2021). La ecuación de Nernst establece que el voltaje del electrodo de pH cambia en aproximadamente 59 mV por unidad de pH a 25 °C (Wang, 2000). En la práctica, la pendiente (m) se ajusta empíricamente mediante calibración con soluciones buffer (Analog Devices, 2021).

Gran parte del programa está destinado a la interfaz web desarrollada utilizando los lenguajes HTML (principal estructura visual), CSS (estilo visual mejorado) y JavaScript (actualización dinámica y control del filtro). La lógica de la interfaz se resume en el siguiente diagrama de flujo de la Figura 12.

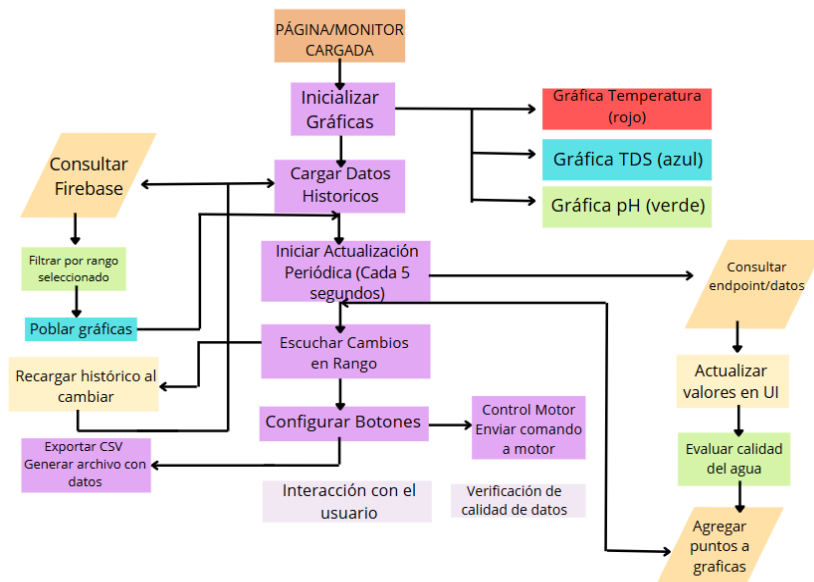


Figura 12: Diagrama de flujo de la interfaz web del prototipo AquaASM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados Simulados

Tanto los diagramas de circuito eléctrico como los datos simulados presentados a continuación se trabajaron en el software de simulación electrónica Proteus 8, Professional versión 8.17 (Labcenter Electronics, 2025).

Debido a que Proteus no tiene las bibliotecas correspondientes a los sensores de pH, TDS, temperatura y ESP 32 utilizados en el proyecto, durante el proceso de simulación se sustituyeron los sensores por potenciómetros montados en un Arduino uno, bajo las siguientes condiciones;

- El sensor de temperatura solo mide dentro del intervalo de -55°C a 125°C . Esto equivale a un nivel de voltaje mínimo de 0V y máximo de 5V, respectivamente.
- El sensor de pH solo mide dentro del intervalo de 0 a 14 unidades de pH. Esto equivale a un nivel de voltaje mínimo de 0V y máximo de 5V, respectivamente.
- El sensor de TDS solo mide dentro del intervalo de 0, a 9990 ppm. Esto equivale a un nivel de voltaje mínimo de 0V y máximo de 5V, respectivamente.

En la simulación se colocó un voltímetro y un amperímetro entre los sensores para poder analizar el voltaje y la corriente que estos entregan al variar los parámetros del 0 al 100%. Con estos datos en mente, se simuló el circuito de la figura 13, consiguiendo con los resistores variables los niveles de voltaje mínimo y máximo para cada sensor utilizado. Se utilizaron resistores variables de $1\text{K}\Omega$. Cada resistencia variable que emula el comportamiento de los sensores del prototipo forma un divisor de tensión que varía de 0V a 5V que alimenta a un puerto analógico seleccionado A0, A1, A2, respectivamente. Arduino convierte estos niveles de voltaje en valores digitales de 10bits (0-1023). El sketch de Arduino desarrollado para este prototipo interpreta los valores digitales leídos y los despliega en el display OLED en formato de temperatura, TDS y pH, respectivamente. En las tablas 7, 8 y 9 se presentan los valores de voltaje y corriente medidos de acuerdo con el circuito eléctrico de la figura 13, correspondientes a la emulación de temperatura, TDS y pH respectivamente. Los niveles de voltaje leídos en los puertos A0, A1 y A2 corresponden a lo esperado tal como se observa en las tablas.

Por otro lado, la corriente registrada en el sistema fue mínima, del orden de centésimas de μA , lo cual es coherente con el hecho de que los potenciómetros están conectados a entradas analógicas de alta impedancia del microcontrolador, alrededor de $100\text{M}\Omega$.

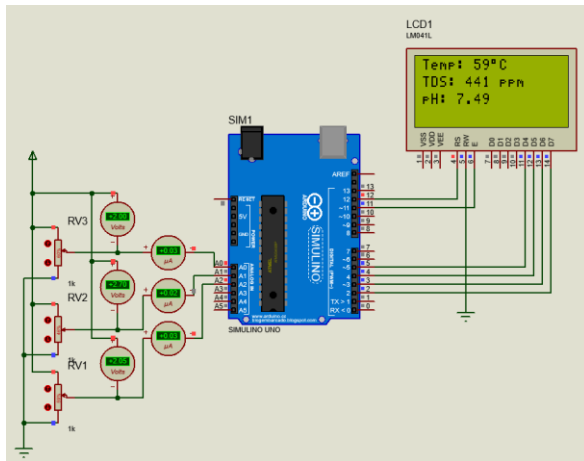


Figura 13: Circuito para valores de voltaje y corriente.

En la tabla 7 se presentan los valores simulados para el sensor de temperatura.

Tabla 7: Datos simulados del sensor de temperatura

Tasa	Voltaje (V)	Corriente (μA)	Temp (C°)
100	0	0.05	125
80	1	0.04	89
60	2	0.03	53
40	3	0.02	17
20	4	0.01	-19
0	5	0.00	-55

En la tabla 8 se presentan los valores simulados para el sensor de pH.

Tabla 8: Datos simulados del sensor de pH

Tasa	Voltaje (V)	Corriente (μA)	pH
100	0	0.05	14
80	1	0.04	11.2
60	2	0.03	8.4
40	3	0.02	5.6
20	4	0.01	2.8
0	5	0.00	0

En la tabla 9 se presentan los valores simulados para el sensor de TDS.

Tabla 9: Datos simulados del sensor de TDS

Tasa	Voltaje (V)	Corriente (μA)	TDS (ppm)
100	0	0.05	9990
80	1	0.04	7997
60	2	0.03	5995
40	3	0.02	4003
20	4	0.01	2001
0	5	0.00	0

En cada tabla se presenta las variaciones de voltaje y corriente en función de la manipulación del potenciómetro (expresado como una tasa del 0 al 100%), así como el valor correspondiente del parámetro medido. De esta forma, las tablas nos permiten observar la relación entre la señal analógica generada y los datos que se obtendrían de un sensor real bajo las mismas condiciones.

Durante la simulación se observó que al variar la posición de los potenciómetros representada como una tasa del 0 al 100%, el voltaje de salida en el pin central cambia de forma lineal, desde un valor mínimo de 0 V hasta 5 V. Esta variación refleja el comportamiento esperado en sensores análogos, como los de temperatura, pH y TDS, cuyos valores también respondieron proporcionalmente a la modificación de la tasa.

Finalmente, el uso de instrumentos virtuales como el voltímetro y el amperímetro permitió verificar que las señales generadas estaban dentro de los intervalos esperados, confirmando que la simulación representa adecuadamente el comportamiento básico de los sensores bajo condiciones controladas. Además de presentar un consumo de energía bajo, lo cual es ideal para el uso de una batería pequeña, dejando fuera el filtro (dado que se tiene que conectar a un voltaje de 120 V), para el cuerpo principal del prototipo.

Resultados Experimentales

Una vez que todo estaba correctamente conectado, se realizaron pruebas con tres marcas comerciales de agua embotelladas de venta común en la Ciudad de México, bajo distintas condiciones. Durante la fase de pruebas, el sistema de monitoreo de calidad del agua, basado en el microcontrolador ESP32, midió parámetros como la temperatura, la concentración de sólidos disueltos totales (TDS) y el pH. El objetivo fue comparar las mediciones del prototipo con las obtenidas mediante instrumentos de referencia aceptados en el mercado, como un termómetro de mercurio para la temperatura y tiras reactivas para el

pH, marca universal test paper. Estas últimas tienen la propiedad de cambiar de color, al reaccionar con el pH de la sustancia dependiendo si es base o ácido, permaneciendo del mismo color si la sustancia es base, no se obtiene un valor numérico. Considerando que una sustancia se considera neutra si tiene un pH entre 6 y 8, entonces, no se espera un cambio de color en las tiras medidoras de pH. En la figura 14, se presenta la escala de pH que mide el grado de acidez de una sustancia.



Figura 14. Escala del pH (epa.gov, 2026)

Los sensores respondieron correctamente al analizar muestras de tres marcas distintas de agua embotellada comerciales en la Ciudad de México, cada una con características fisicoquímicas propias. La lectura del sensor de temperatura (DS18B20) se mantuvo estable, con una variación menor a $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ bajo condiciones controladas. El sensor de TDS registró diferencias claras en la concentración de sólidos disueltos entre marcas, con valores que oscilaron entre 120 y 150 ppm. El sensor de pH también detectó variaciones sutiles, con valores que reflejan la acidez o alcalinidad relativa de cada muestra. Los datos obtenidos fueron procesados en tiempo real por el ESP32, permitiendo clasificar la calidad del agua según umbrales previamente definidos. En la figura 15 se presenta la configuración utilizada para la medición de los parámetros para la muestra 1. En la tabla 10 se presentan los valores medidos de los parámetros indicados.



Figura 15: Toma de datos de la muestra 1.

Tabla 10. Datos obtenidos con el prototipo para la primera muestra.

Muestra 1				
Temp. °C (mercurio)	Temp. °C (sensor)	TDS(ppm)	pH	Cambio de color (tira reactiva)
23.5	23.5	120	7.04	no
23.7	24	122	6.9	no
23.8	24	121	7.1	no
24.0	23.9	122	6.8	no
24.1	24	119	7.0	no

La figura 16 y tabla 11 muestran la configuración utilizada en el proceso de medición de la muestra de agua comercial 2 y los datos obtenidos del dicho proceso, respectivamente.



Figura 16. Toma de datos de la muestra 2

Tabla 11. Datos obtenidos con el prototipo para la segunda muestra.

Muestra 2				
Temp. °C (mercurio)	Temp. °C (sensor)	TDS(ppm)	pH	Cambio de color (tira reactiva)
25.0	25	110	7.1	no
25.3	25.4	130	7.0	no
24.5	24.5	117	7.1	no
25.4	25.5	118	7.2	no
23.9	24	114	7.0	no

La figura 17 y tabla 12 muestran la configuración utilizada en el proceso de medición de la muestra de agua comercial 3 y los datos obtenidos del dicho proceso, respectivamente.



Figura 17: Toma de datos de la muestra 3.

Tabla 12. Datos obtenidos con el prototipo para la tercera muestra

Muestra 3				
Temp. °C (mercurio)	Temp. °C (sensor)	TDS(ppm)	pH	Cambio de color (tira reactiva)
25.4	25.5	90	7.2	no
24.9	25	92	6.8	no
25.1	25.2	87	7.0	no
25.0	24.9	93	7.4	no
25.2	25.1	92	7.1	no

Las mediciones de temperatura de referencia se tomaron con un termómetro de mercurio, y al compararlas con las obtenidas con el sensor DS18B20 del prototipo se observó que las variaciones fueron mínimas. Esto permite concluir que el sensor de temperatura funciona correctamente.

Como ya explicamos arriba, las tiras reactivas de pH cambian de color ante una sustancia base o ácida, en nuestras mediciones, no se notó un cambio aparente como para concluir si el pH era muy alto o bajo, por lo que solo con estas tiras reactivas podemos decir si están en un rango de 6 a 8, en la escala de pH.

Para el sensor de TDS se requieren instrumentos de laboratorio más especializados, con los cuales no se contaba en el momento de la prueba para realizar una comparación directa. Debido a que no son de fácil acceso, debido a su costo. Sin embargo, el comportamiento observado y los valores registrados se mantuvieron dentro de los rangos indicados por el fabricante bajo las condiciones de prueba presentadas, lo que representa un funcionamiento adecuado de los mismos.

También se verificó la activación y desactivación del filtro de manera automatizada cuando las condiciones del agua monitoreada no cumplieron con los parámetros necesarios para considerarse potable, es decir, cuando el estado del agua cambió de “aceptable” a “no potable”. El filtro permaneció

encendido hasta que los sensores registraron nuevamente valores dentro de los rangos óptimos para considerarse agua potable. Esta lógica de control evita el encendido y apagado intermitente (*flickering*), prolongando así la vida útil del sistema.

La interfaz web, alojada en el sistema de archivos SPIFFS (un sistema de archivos diseñado para memorias flash SPI NOR en dispositivos embebidos) del ESP32, fue accesible desde un navegador mediante la dirección IP local del dispositivo. La página mostraba los datos en tiempo real mediante gráficos actualizables que facilitaban el seguimiento de las condiciones del agua. También incluía un botón de control manual del filtro, que permitía al usuario activar o desactivar el sistema independientemente del estado del agua. A continuación, se presentan algunos ejemplos de la interfaz web. En la cual se muestran la medición de los 3 sensores a tiempo real, además de una gráfica para cada parámetro para analizar cómo y qué tiempo cambia, figura 18. En las figuras 19, 20 y 21 se muestran las gráficas de los datos medidos con los sensores de temperatura, pH y TDD en tiempo real, respectivamente.



Figura 18. Parte superior de la interfaz web, en donde se encuentra el botón de activación del filtro

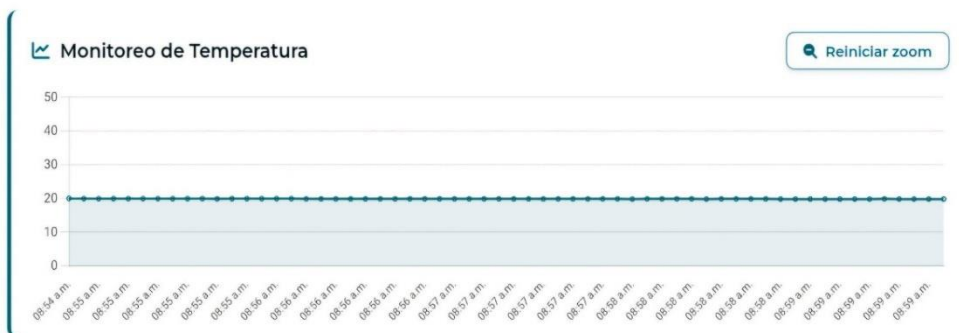


Figura 19: Interfaz web con la gráfica de temperatura.

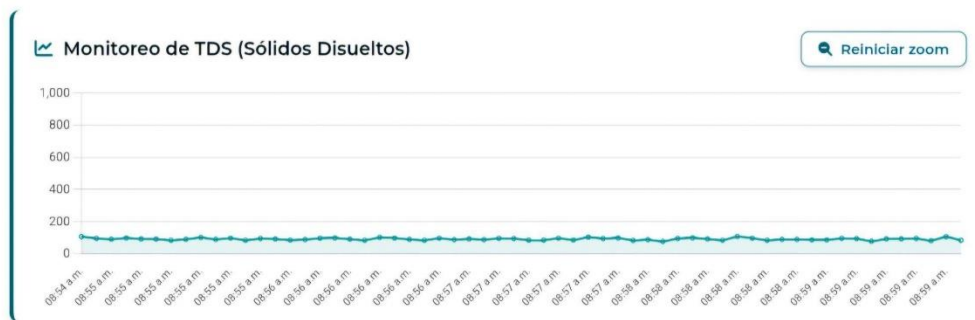


Figura 20: Interfaz web con la gráfica de TDS.

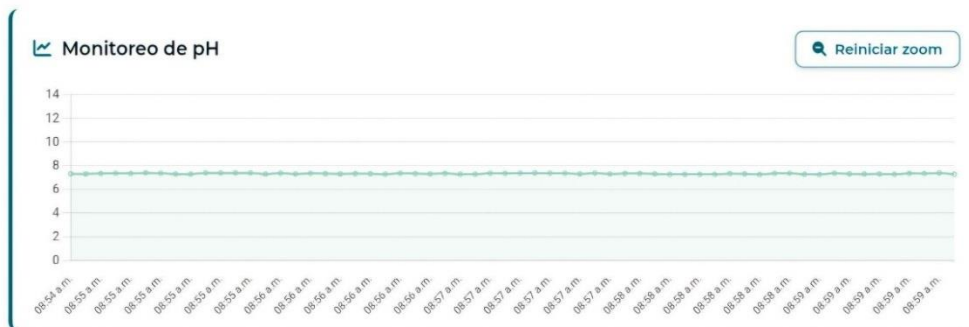


Figura 21: Interfaz web con la gráfica de pH.

En condiciones de prueba, la actualización de los datos en la interfaz se mantuvo fluida, con un retraso promedio inferior a 1 segundo desde la toma de lectura hasta la visualización. Las gráficas permitieron identificar de manera visual el comportamiento de la calidad del agua en tiempo real. Este sistema permite observar y analizar cualquier cambio en los parámetros bajo estudio del agua en tiempo real y también tener un historial de dicho comportamiento.

Con los criterios expuestos en la introducción, se establecieron umbrales de clasificación de la calidad del agua, que permitieron al sistema emitir un diagnóstico automático y activar un filtro en caso de detectar condiciones no ideales. Esta acción fue especialmente útil cuando la calidad del agua se clasificó como no potable, asegurando una respuesta inmediata del sistema. Además, se incluyó un botón de control manual desde la interfaz web, ofreciendo flexibilidad al usuario para activar el filtro de forma remota (ver Figura 18).

Resultados Experimentales: Agua de lluvia

Además de las pruebas realizadas con agua embotellada, se efectuó una medición experimental utilizando agua de lluvia recolectada durante aproximadamente 30 minutos. Los valores registrados por el sistema se presentan en la tabla 13:

Tabla 13. Comparación de valores registrados con la NOM-127 y OMS.

Parámetro	Valor medido	Norma Oficial (NOM-127-SSA1-2021)	OMS
Temperatura	10.81 °C	< 25 °C	< 25 °C
TDS	0.00 ppm	< 500 ppm	< 300 ppm
pH	7.31	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5

La muestra de agua de lluvia mostró una temperatura baja (10.81 °C), consistente con las condiciones ambientales durante la recolección. El valor de TDS fue 0.00 ppm, lo que a primera vista sugiere la ausencia total de sólidos disueltos. Sin embargo, este resultado debe interpretarse con cautela: la literatura indica que el agua de lluvia contiene trazas de iones disueltos (generalmente algunos ppm), por lo que el valor cero probablemente refleja el límite de detección del prototipo y no una ausencia absoluta de sólidos. Este efecto se debe a la sensibilidad limitada del sensor TDS, acentuada por el uso de materiales prácticos y económicos, así como por la falta de compensación de temperatura en la lectura.

En cuanto al pH (7.31), se encuentra en la zona neutral y dentro de los intervalos permitidos por la NOM y la OMS. Cabe destacar que el agua de lluvia suele presentar un carácter ligeramente ácido debido a la disolución de CO₂ atmosférico; el valor obtenido podría deberse a una ligera desviación del sensor, a la falta de calibración en la zona baja del pH o bien a trazas de minerales arrastrados durante la recolección. En conjunto, los tres parámetros cumplen con los límites establecidos por la normativa mexicana y la OMS, lo que clasifica esta muestra de agua de lluvia como “apta”. Sin embargo, los resultados ponen de manifiesto algunas limitaciones del sistema, especialmente en la medición de TDS a valores ultra bajos. Este detalle evidencia que el dispositivo, aunque funcional y confiable en rangos medios y altos, no es lo suficientemente sensible para cuantificar con precisión sólidos disueltos en aguas de muy baja mineralización.

Asimismo, debe señalarse que la evaluación realizada no contempla contaminantes microbiológicos, los cuales son frecuentes en el agua de lluvia debido al arrastre de partículas atmosféricas y posibles contaminaciones durante la recolección (Frías, 2018).

Una de las conclusiones fue que, debido a estos contenidos y a la posibilidad de contaminación biológica, el agua de lluvia solo puede ser utilizada de manera segura en tareas como lavar automóviles, ciertos tipos de ropa o para riego. Para considerarla apta para consumo humano es necesario someterla a procesos más complejos de filtración y desinfección, como el uso de lámparas de ozono o luz ultravioleta, además de sistemas de purificación adicionales.

CONCLUSIONES

El desarrollo de un sistema de monitoreo multiparamétrico de la calidad del agua basado en el ESP32 demostró que es posible construir una herramienta funcional, económica y versátil para evaluar parámetros esenciales como el pH, la temperatura y la concentración de sólidos disueltos (TDS). Además, el módulo fue alimentado con una corriente mínima. Esto representa un ahorro energético para el sistema, además de que lo hace perfecto para que sea un dispositivo portátil y fácil de alimentar que se puede utilizar en diferentes regiones remotas del país.

La calidad del agua depende de múltiples parámetros fisicoquímicos (los cuales se abordaron en la introducción), cuyo control es fundamental para determinar la idoneidad para el consumo humano, el riego agrícola o el uso industrial. En este prototipo se prioriza la medición de tres variables clave: la temperatura, la concentración de sólidos disueltos totales (TDS) y el pH.

Estos parámetros permiten tener una estimación básica pero significativa del estado del agua, ya que alteraciones importantes en cualquiera de ellos pueden representar riesgos sanitarios o limitar su uso.

A través de la integración de sensores confiables, una lógica de control automatizada y una interfaz web en tiempo real, el proyecto cumplió exitosamente con los objetivos planteados: detectar cambios relevantes en las condiciones del agua y responder de manera inmediata mediante la activación de un filtro.

Los sensores utilizados (para temperatura, de TDS y de pH) fueron probados con soluciones preparadas en condiciones controladas. El objetivo de estas pruebas fue verificar su operación adecuada dentro de sus rangos operativos. Como se muestra en las tablas de resultados, los sensores detectaron variaciones coherentes ante cambios en la composición del agua, lo que indica que su comportamiento fue confiable durante las pruebas. La estabilidad del sensor de temperatura y la sensibilidad del sensor de TDS al

agregar sal, así como la detección de cambios de pH al añadir vinagre o bicarbonato, respaldan la funcionalidad del sistema de medición.

La estabilidad de las mediciones y la rápida respuesta del sistema validan su potencial para aplicaciones en entornos domésticos o educativos. Sin embargo, también se identificaron áreas de mejora, como la dependencia de redes Wifi-específicas y la limitada capacidad de análisis frente a otros contaminantes. A pesar de ello, el proyecto constituye una base sólida sobre la cual es posible construir versiones más robustas y escalables, contribuyendo así a la creciente necesidad de tecnologías accesibles para el monitoreo ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EPA Environmental Protection Agency, 2026. Recuperado de https://www3.epa.gov/acidrain/education/site_students_spanish/phscale.html
- Fundación Aqueae. (2021, 22 de septiembre). 5 000 litros de agua, 1 kilo de arroz: El uso del agua en la agricultura. Fundación Aqueae. Recuperado de <https://www.fundacionaqueae.org/wiki/5-000-litros-de-agua-1-kilo-de-arroz-el-uso-del-agua-en-la-agricultura/>
- Fundación Aqueae. (s.f.). *Aguas residuales: Datos y usos*. Fundación Aqueae. Recuperado de <https://www.fundacionaqueae.org/aguas-residuales-datos-usos/>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2023, 13 de septiembre). Agua para consumo humano. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- IPDP CDMX. (2024a). Calidad de agua tratada. Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). <https://indicadores.cdmx.gob.mx/group/06-agua-limpia-y-saneamiento>
- IPDP CDMX. (2024b). Acceso integral al agua y al saneamiento básico. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). <https://indicadores.cdmx.gob.mx/group/06-agua-limpia-y-saneamiento>
- IPDP CDMX. (2024c). Viviendas que no cuentan con abastecimiento de agua entubada. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). <https://indicadores.cdmx.gob.mx/group/06-agua-limpia-y-saneamiento>



Secretaría de Salud. (2022, 22 de marzo). NORMA Oficial Mexicana 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_popup.php?codigo=5650705

Razmi, N., Lazouskaya, M., Pajcin, I., Petrovic, B., Grahovac, J., Simic, M., Willander, M., Nur, O., & Stojanovic, G. M. (2023). Monitoring the effect of pH on the growth of pathogenic bacteria using electrical impedance spectroscopy. *Results in Engineering*, 20, 101425. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101425>

Boyu. (s.f.). *Filtros de cascada BOYU WF compactos* [Descripción del producto]. Recuperado de <https://boyu.com.mx/producto/filtros-de-cascada-boyu-wf-compactos/>

Global Seafood Alliance. (2018, 17 de diciembre). Temperatura del agua en acuicultura – *Responsible Seafood Advocate*. <https://www.globalseafood.org/advocate/temperatura-del-agua-en-acuicultura/>

HANNA Instruments. (s.f.). La temperatura afecta el pH del agua. <https://www.hannacolombia.com/blog/post/39/la-temperatura-afecta-el-ph-del-agua>

Somos PURA. (2025, enero). Entendiendo las ppm de TDS. <https://sospura.mx/entendiendo-las-ppm-de-tds/>

BBVA México & BBVA. (2024, 20 de febrero). Filtro de agua y cuáles son sus beneficios. *BBVA México*. <https://www.bbva.mx/educacion-financiera/blog/que-es-un-filtro-de-agua.html>

Santos, R., & Santos, R. (2024, 5 de agosto). Getting Started with the ESP32 Development Board. *Random Nerd Tutorials*. <https://randomnerdtutorials.com/getting-started-with-esp32/>

Prateek, & Prateek. (2023, 12 de julio). pH sensor. *JustDoElectronics*. <https://justdoelectronics.com/ph-sensor/>

Alam, M., & Alam, M. (2022, 22 de agosto). TDS Sensor & Arduino interfacing for water quality monitoring. *How to Electronics*. <https://how2electronics.com/tds-sensor-arduino-interfacing-water-quality-monitoring/>

Circuit Schools. (s.f.). ¿Qué es ESP32, cómo funciona y qué se puede hacer con él? <https://www.circuitschools.com/what-is-esp32-how-it-works-and-what-you-can-do-with-esp32/>



- Llamas, L. (2019, 7 de agosto). Cómo usar el SPIFFS del ESP8266/ESP32 con el Arduino IDE. *Luis Llamas*. <https://www.luisllamas.es/como-usar-el-spiffs-del-esp8266-con-el-arduino-ide/>
- Labcenter Electronics. (2025). *Proteus 8 Professional* [Software].
- Pérez, C., León, F. M., & Delgadillo, G. R. (2013). *Tratamiento de aguas* [Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán]. https://portal.cuautitlan.unam.mx/manuales/tratamientodeaguas_manualprac.pdf
- Junta Estatal de Control de Recursos Hídricos de California. (s.f.). Folleto informativo 3.1.2.0: Temperatura. *Programa de Monitoreo de Ambientes Acuáticos Superficiales (SWAMP)*. https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3120sp.pdf
- World Health Organization. (2022). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., incorporating the 1st and 2nd addenda). World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/978924004506>
- United Nations. (s.f.-b). Agua. *Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/global-issues/water>
- Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The Art of Electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Wang, J. (2000). *Analytical Electrochemistry* (2nd ed.). Wiley-VCH.
- Analog Devices. (2021). *Understanding and Using pH Electrodes*. Retrieved from <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/understanding-and-using-ph-electrodes.pdf>
- DFRobot. (n.d.). *Gravity: Analog TDS Sensor/Meter for Arduino*. Retrieved July 9, 2025, from https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_TDS_Sensor__Meter_For_Arduino_SKU__SEN0244
- DFRobot. (n.d.). *Gravity: Analog pH Sensor / Meter Kit V2*. Retrieved July 9, 2025, from https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_pH_Sensor_Meter_Kit_V2_SKU__SEN0161-V2
- Frías, L. (2018, 15 de octubre). *El agua de lluvia no sirve para beber*. Gaceta Digital UNAM. Órgano informativo de la Universidad Nacional Autónoma de México. <https://www.gaceta.unam.mx/el-agua-de-lluvia-no-sirve-para-beber/>

