

Monitoreo inteligente de la calidad del agua: gestión sostenible del recurso hídrico.

Intelligent water quality monitoring: sustainable management of water resource.

Felisa Vanessa López Pineda (1).
Estudiante Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
D23271374@tuxtla.tecnm.mx.

Héctor Ricardo Hernández de León* (2). Tecnológico Nacional de México/ I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
hector.hl@tuxtla.tecnm.mx.

Andrés Eduardo de Paz Martínez (3), Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
M17270661@tuxtla.tecn.mx.edu.mx.

Miguel Ángel Guillen Ramos (4), Estudiante Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
M19270281@tuxtla.tecn.mx.edu.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en abril 07, 2025; aceptado en mayo 09, 2025.

Resumen.

El acceso al agua potable se encuentra amenazado por el crecimiento de la población, la contaminación y el cambio climático. Garantizar la calidad requiere una gestión sostenible que incluya la protección de las fuentes de agua y un monitoreo constante. Las plantas potabilizadoras realizan un proceso complejo para transformar el agua cruda en potable, asegurando su inocuidad para el consumo humano. Sin embargo, muchas de estas etapas aún dependen de métodos manuales de análisis, lo que retrasa la detección de problemas y la toma de decisiones. Para optimizar este proceso, se ha desarrollado un sistema de adquisición de datos (Figura 1) implementado internet de las cosas (IoT) que permite la recolección y análisis automatizado de datos. Con el uso de sensores, se miden los parámetros físico-químicos como el pH, turbidez, sólidos disueltos totales (TDS), conductividad y temperatura, estos datos se registran en una base de datos y se analizan para determinar la calidad del agua. Cuando los valores se desvían de los estándares establecidos en la NOM-127-SSA1-2021, el sistema emite alertas para una respuesta inmediata. Este enfoque tecnológico permite una vigilancia continua y adaptable, reduciendo tiempo de análisis y mejorando la precisión de las mediciones. Además, sienta las bases para la integración de modelos de aprendizaje automático que puedan predecir variaciones en la calidad del agua, optimizando la gestión del recurso hídrico y previniendo riesgos para la salud pública.

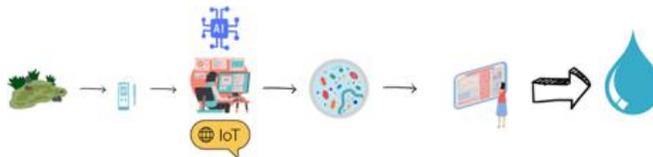


Figura 1. Sistema de adquisición de datos

Palabras claves: Agua potable, calidad del agua, IoT, NOM-127-SSA1-202, sistema de adquisición de datos.

Abstract.

Access to drinking water is threatened by population growth, pollution and climate change. Guaranteeing quality requires sustainable management that includes the protection of water sources and constant monitoring. Water treatment plants follow a complex process to transform raw water into drinking water, ensuring its safety for human consumption. However, many of these stages still depend on manual analysis methods, which delays problem detection and decision-making. To optimize this process, a data acquisition system has been developed (Figure 1) based on the implementation of the Internet of Things (IoT) that allows the collection and automated data analysis. With the use of sensors, physicochemical parameters such as pH, turbidity, total dissolved solids (TDS), conductivity and temperature. These data are recorded in a database and analyzed to determine the quality of the water. When the values deviate from the standards established in NOM-127-SSA1-2021, the system issues alerts for an immediate response. This technological approach allows continuous and adaptive surveillance, reducing analysis time and improving the accuracy of measurements. In addition, it lays the foundation for the integration of machine learning models that can predict variations in water quality, optimizing the management of water resources and preventing risks to public health.

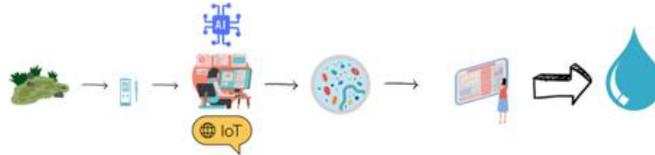


Figure 1. Data acquisition system.

Keywords: Data acquisition system, drinking water, internet of Things (IoT), NOM-127-SSA1-2021, water quality.

1. Introducción.

El agua potable es un tema de salud pública, su disponibilidad está amenazada por factores como el crecimiento en la población, la contaminación y el cambio climático (Figura 2). La gestión sostenible del recurso hídrico requiere proteger los cuerpos de agua y hacer uso responsable, con vigilancia constante de la calidad.

Para lograr una gestión sostenible del recurso hídrico es importante implementar medidas que aseguren la protección de las fuentes de agua, así como el uso responsable y eficiente. La vigilancia y monitoreo constante de la calidad del agua son acciones para identificar problemas tempranos y tomar medidas correctivas.

La contaminación del agua, el cambio climático y los desastres naturales son consecuencia del continuo desarrollo industrial, la interferencia humana en los ecosistemas naturales. Analizar el proceso de potabilización es una acción que permite una gestión sostenible de los recursos hídricos (K. Szramowiat-Sala, 2023).



Figura 2. Cañón del Sumidero, río Grijalva, Chiapas.

El proceso de potabilización del agua consta de una serie de etapas y proceso de tratamiento para convertir el agua cruda, proveniente de fuentes naturales como ríos, lagos o pozos, en agua potable segura apta para consumo humano. Las fases del tratamiento del agua están conformadas de la siguiente manera: captación y pretratamiento, coagulación y floculación, sedimentación, filtración, desinfección, ajuste de pH, adición de químicos, almacenamiento y distribución.

Al realizar el proceso de producción en las plantas potabilizadoras se consideran diferentes parámetros de medición que se estudian para predecir la pureza del agua. El uso de un sistema de adquisición de datos para la recolección de la información, que implementa tecnologías como IoT, monitoreo ambiental y gestión del recurso hídrico (Palermo, 2022), realizando un análisis de los datos históricos y actuales mediante la instrumentación de sensores para medir los principales parámetros como pH, temperatura, sólidos disueltos totales (TDS), turbidez, conductividad, entre otros. Los datos obtenidos del sistema aplicando sensores se registran en una base de datos para posteriormente ser enviados para su análisis en una plataforma. El sistema emite un mensaje de alerta al usuario cuando los parámetros son inferiores a los valores estándar (Yang, 2022) establecidos en la NOM 127-SSA1-2021. La combinación de IoT y la gestión de información en la plataforma permite la recopilación de datos continuos, diversidad de tipos de datos, conectividad de dispositivos, adaptabilidad y mejora continua de la información, lo que puede ayudar a prevenir problemas de calidad del agua antes de que se conviertan en una amenaza para la salud pública (Boccardo, 2022).

El desarrollo de esta investigación busca diseñar un sistema de monitoreo para la adquisición de datos que permita analizar de forma continua la calidad del agua a partir de sensores habilitados y la integración de un conjunto de datos históricos obtenidos de una planta de potabilización, el uso de IoT permite analizar datos que brindan información para generar como trabajo futuro, un modelo de predicción mediante el procesamiento de los datos obtenidos, generando modelos de aprendizaje automático y realizar predicciones de la calidad del agua, así como ajustar continuamente a los nuevos datos reportados para mejorar el tiempo de procesamiento y la precisión de las mediciones; lo anterior para realizar una correcta toma de decisiones en el proceso de análisis de la calidad del agua (Chen, 2023).

2. Método.

Diseñar el sistema de monitoreo para la adquisición de datos requiere cumplir con estándares de tecnologías de comunicación, sensores y aplicación de plataforma para el almacenamiento continuo de los datos. El sistema se diseña y desarrolla con el objetivo de analizar el proceso de estudio de la calidad del agua y recolectar datos de forma continua a los largo de un período de tiempo establecido, lo que permite monitorear de forma continua la calidad del agua.

Está integrado por componentes que permiten la recolección, almacenamiento y transmisión de los datos. Se integran sensores como: temperatura, turbidez, sólidos disueltos totales y pH (Tabla 1), que son seleccionados para garantizar la confiabilidad de las mediciones.

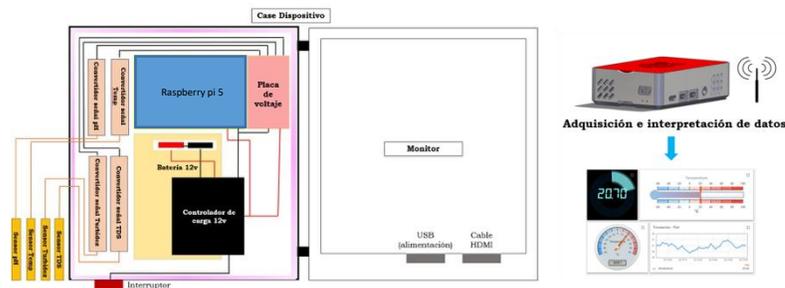
Tabla 1. Sensores de medición.

No.	Tipo de sensor	Unidad	Rango de medición	Sensor
01	Temperatura	Centigrado	0-100	
02	Turbidez	Nefelométrica	0-4000	
03	Sólidos disueltos totales (TDS)	Partes por millón	0-2000	
04	pH	Potencial de Hidrógeno	0-14	

Para la medición de la conductividad se realiza la siguiente operación: $\text{conductividad} = 2 * \text{valor de TDS}$. Esta relación es una simplificación universalmente precisa debido a la variable en la composición de los sólidos disueltos totales en el agua (Barros, 2020).

$$\text{Conductividad} = 2 * \text{Valor TDS}$$

El sistema de monitoreo para la adquisición de datos (Figura 3) cuenta con una serie de componentes electrónicos interconectados alámbrica y conectividad inalámbrica a IoT mediante conexión Wi-Fi, llevando a cabo los procesos de registro y almacenamiento con una tarjeta Raspberry Pi 5 y sensores; sin embargo, el sistema puede trabajar en dos modalidades, en línea o fuera de línea, para comodidad del usuario en función de las necesidades que se presente.

**Figura 3.** Esquema del sistema de monitoreo para la adquisición de datos.

En la arquitectura del sistema se usa el lenguaje Python para la programación de la Raspberry Pi 5. El trabajo de programación es para el uso de sensores como temperatura, turbidez, sólidos disueltos totales (TDS), conductividad y pH, lo que permite obtener mediciones de cada parámetro, alojando los datos de forma local y en una plataforma en donde se almacena la información continua. El parámetros de conductividad es obtenido por medio de una conversión

Para el desarrollo del proyecto de investigación (Figura 4) se realizó la calibración de los sensores, la programación de la tarjeta, la conexión electrónica y la configuración de la conexión Wi-Fi. El usuario puede interactuar mediante un display que muestra el sistema, se interactúa mediante un teclado táctil, que permite la ejecución del sistema de monitoreo para la recolección de datos.



Figura 4. Sistema de monitoreo para la adquisición de datos

3. Desarrollo.

La potabilización del agua consta de una serie de pasos para convertir el agua cruda, proveniente de fuentes naturales, en agua potable segura y apta para consumo humano. El proceso de tratamiento de potabilización inicia en la fase de captación y pretratamiento; el proceso inicia en la recolección de agua cruda desde un cuerpo de agua natural (ríos, lagos, arroyos o pozos), el siguiente paso es el pretratamiento, la remoción de los sólidos (orgánicos o inorgánicos). A continuación, la fase de coagulación y floculación, en este paso se añade un coagulante (sulfato de aluminio o policloruro de aluminio) que ayuda a unir pequeñas partículas y sólidos suspendidos para formar flóculos más grandes. Lo siguiente es la sedimentación, el agua pasa a través de grandes tanques de sedimentación donde los flóculos más grandes se asientan en el fondo de los tanques de sedimentación; el agua bruta se mueve hacia la siguiente etapa, mientras que los sólidos sedimentados se eliminan como por ejemplo el lodo. Se prosigue con la filtración, el agua bruta se somete a una etapa de filtración a través de diferentes medios, como por ejemplo arena. La desinfección es uno de los últimos pasos, para asegurar que el agua esté libre de microorganismos y el agua sea segura para consumo humano. Finalmente se almacena y distribuye, una vez completado el proceso de potabilización, el agua tratada se almacena en tanques para ser distribuida a través de una red de tuberías hacia los hogares y otros sitios en donde se requiere agua potable.

El proceso de potabilización del agua (Figura 5) es amplio y elaborado, el cuidado que se requiere en el manejo, uso de químicos y control de los parámetros requeridos para la obtención del agua potable, es un arduo trabajo, el cual se realiza en la mayoría del proceso de forma manual en tiempos prolongados de análisis. Por lo que se denota la importancia de la implementación de un sistema de monitoreo continuo para el estudio de la calidad del agua (S.T. Chen, 2021).



Figura 5. Proceso de potabilización.

Para identificar la calidad del agua, durante el proceso de potabilización, es necesario realizar una serie de procedimientos, en donde se analizan los distintos parámetros y se evalúa el rango en el que se encuentran; realizar evaluaciones manuales de los rangos de los parámetros físicos-químicos para identificar la situación que guarda el agua durante el proceso de potabilización implica un tiempo de reacción prolongado para el análisis de las muestras, por lo que este trabajo de investigación propone diseñar un sistema de monitoreo que realice el análisis de forma continua y automática para evitar catástrofes que puedan dañar la salud de la población.

Los parámetros que se analizan para el estudio de la calidad del agua en el país son físico, químicos y biológicos, en donde se establecen rangos de mediciones según la Organización Mundial de la Salud por sus siglas OMS y en específico en México a través de la norma NOM 127-SSA1-2021. En el estado del arte los parámetros (Kurniawan, 2020) comúnmente estudiados son: temperatura, turbidez, conductividad, color verdadero, oxígeno disuelto, sólido disuelto total, pH y E-Coli. En el desarrollo de esta investigación, el sistema de monitoreo para la adquisición de datos de la calidad del agua, considera los parámetros físicos-químicos, contemplando sensores de temperatura, turbidez, total de sólidos disueltos (TDS), pH y conductividad eléctrica. Los datos obtenidos de los sensores se registran en una base de datos y se analizan para identificar el estado del agua, generando alertas para el usuario como buena, mala o regular. El sistema genera una alerta al usuario cuando no se cumple con el rango establecido en la NOM 127-SSA1-2021. Con este sistema se propone una solución para el análisis, recolección y procesamientos de los datos con una mejora en los tiempos de trabajo, lo que ayuda a prevenir problemas de la calidad del agua.

Para la revisión y evaluación de las mediciones se realizó un estudio de cotejo de los parámetros contra lo descrito en la NOM 127-SSA1-2021 y revisión de los especialistas en el área del estudio de la calidad del agua. Se efectuó una validación cruzada con los datos obtenidos del sistema y el análisis de muestras procesados por los especialistas, obteniendo datos en un menor tiempo y con un menor margen de error.

Durante el proceso de experimentación del sistema de adquisición de datos, se realizaron pruebas in situ en el río Grijalva y en una planta de potabilización (Figura 6), exponiendo el sistema a un ambiente no controlado, dando como resultado un correcto funcionamiento del sistema fuera de línea (Figura 7), los datos recolectados se almacenan de forma correcta en la memoria del sistema y detecta los estados del agua. Durante el proceso de experimentación en el río se presentaron problemas de conectividad a internet, debido a la ubicación geográfica en el río en donde se realizaron los test; sin embargo, en la planta de potabilización las pruebas funcionaron de forma correcta, enviando los datos recolectados a la plataforma, emitiendo las alertas y almacenando la información, se tiene contemplado realizar más pruebas en el río Grijalva y brindar una solución a la conexión de internet.



Figura 6. Pruebas en río Grijalva y planta de potabilización.

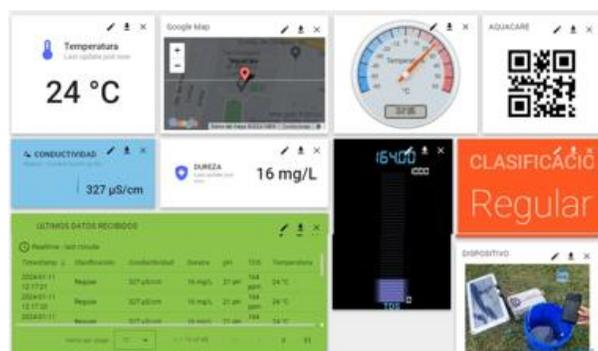


Figura 7. Panel del sistema de adquisición de datos

Conclusiones.

El diseño del sistema de adquisición de datos es una herramienta que brinda un aporte al proceso de análisis del agua y monitoreo continuo de los parámetros físicos-químicos para identificar la calidad del agua que se recolecta en ríos y es procesada en plantas de potabilización. El funcionamiento del sistema es flexible y de fácil aplicación, el funcionamiento es intuitivo, los sensores se sumergen en el agua y el sistema realiza la lectura de los parámetros, en este caso temperatura, turbidez, TDS, conductividad y pH, la información se almacena en la memoria interna, para posterior realizar un análisis de los parámetros y determinar el tipo de calidad de agua. Las etiquetas usadas en el sistema muestran si la calidad del agua es buena, mala o regular. El sistema emite alertas para notificar al usuario del tipo de agua que se analiza.

Las pruebas realizadas al sistema de adquisición demuestran robustez al no presentar fallos en las pruebas realizadas tanto en el río Grijalva como en la planta de potabilización. Sin embargo, existen situaciones como algunos fallos en la conectividad de wifi, lo que no permite realizar pruebas online. Aún se analizan alternativas de solución para contar con estabilidad en la conectividad y no sufrir de pérdida de información.

Como trabajos futuros se contempla instalar el sistema de adquisición de datos en una planta de potabilización, recopilar datos de los parámetros físicos-químicos y diseñar un dataset que procese mediante un algoritmo de machine learning (B. K. Jha, 2020) y realiza predicciones de la calidad del agua (I. Kurniawan, 2020) en un tiempo estimado, esto con la intención de optimizar los tiempos de respuesta en el proceso de toma de decisiones ante una contingencia.

Créditos.

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento recibido de este proyecto, al Sistema Municipal de Agua Potable a través de la planta de potabilización “Ciudad del agua” brindando asesoría de expertos en el estudio de la calidad del agua potable y al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez por el apoyo recibido durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Referencias bibliográficas.

B. K. Jha (2020), “Cloud-Based Smart Water Quality Monitoring System using IoT Sensors and Machine Learning,” *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 3403–3409, Jun. 2020, doi: 10.30534/ijatcse/2020/141932020.

I. Kurniawan, G. Hayder, and H. M. Mustafa (2020), “Predicting Water Quality Parameters in a Complex River System,” *Journal of Ecological Engineering*, vol. 22, no. 1, doi: 10.12911/22998993/129579.

L. Barros, T. Siepmann, and S. Drexler (2020), “Correlations between TDS and electrical conductivity for high salinity formation brines characteristic of south Atlantic pre salt basins”, *Journal Water SA*. Doi: 10.17159/wsa/2020,v46.i4.9073

L. Yang and A. Shami (2022), “IoT data analytics in dynamic environments: From an automated machine learning perspective,” *Eng Appl Artif Intell*, vol. 116, doi: 10.1016/j.engappai.2022.105366.

K. Szramowiat-Sala (2023), “Artificial Intelligence in Environmental Monitoring: Application of Artificial Neural Networks and Machine Learning for Pollution Prevention and Toxicity Measurements”.

P. Boccadoro, V. Daniele, P. Di Gennaro, D. Lofù, and P. Tedeschi (2022), “Water quality prediction on a Sigfox-compliant IoT device: The road ahead of WaterS,” *Ad Hoc Networks*, vol. 126, doi: 10.1016/j.adhoc.2021.102749.

P. Chen, B. Wang, Y. Wu, Q. Wang, Z. Huang, and C. Wang (2023), “Urban river water quality monitoring based on self-optimizing machine learning method using multi-source remote sensing data,” *Ecol Indic*, vol. 146, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109750.

S. A. Palermo et al. (2022), “Smart Technologies for Water Resource Management: An Overview. doi: 10.3390/s22166225.

S. T. Chen, S. S. Lin, C. W. Lan, and T. I. Chou (2021), “Design and development of a LoRa based Water Quality Monitoring System,” in *ISPACS 2021 - International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems: 5G Dream to Reality, Proceeding*. doi: 10.1109/ISPACS51563.2021.9651127.

Información de los autores.



Felisa Vanessa López Pineda. Su formación académica inicial es en Informática, egresada del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Cuenta con una maestría en Administración, un Doctorado en Pedagogía con especialidad en Ambientes Virtuales de Aprendizaje (AVA) y, actualmente, es Doctorante en Ciencias de la Ingeniería, donde desarrolla el proyecto de investigación “Sistema de monitoreo y pronóstico de la calidad del agua potable basado en IoT y técnicas de aprendizaje automático”. Ha cursado diversos diplomados en el Tecnológico Nacional de México, entre ellos “Agua limpia y saneamiento” y “Ciencia de datos”. Recientemente, realizó una estancia de investigación en la Universidad de Antioquia, en Medellín, Colombia, donde participó en el curso “Inteligencia computacional”. Actualmente, colabora como vicepresidenta de la rama estudiantil del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG) en el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y vicepresidenta del Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE).



Héctor Ricardo Hernández de León. Es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Politécnico Nacional, tiene estudios de Maestría y Doctorado en Ciencias en Sistemas Automáticos por el Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de la ciudad de Toulouse, Francia. Es miembro del SNI-I, perfil deseable SEP-PRODEP, responsable del Cuerpo Académico en "Automatización de Procesos" SEP-PRODEP. En el 2017, recibió el PREMIO Estatal de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación. Desde el 2019, es SENIOR MEMBER por la Asociación Internacional de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE. El área de interés es el control, supervisión y diagnóstico de fallas de procesos industriales, así como la Inteligencia Artificial aplicada a sistemas basados en datos. Tiene una patente otorgada del IMPI relacionado con biorreactores. Actualmente es Profesor Investigador en los programas académicos de Ingeniería, Maestría y Doctorado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.



Andrés Eduardo De Paz-Martínez. Ingeniero en sistemas computacionales egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, maestro en ciencias de la ingeniería mecatrónica. Participo en INNOVATEC 2023 y 2024, siendo integrante de uno de los equipos que obtuvo dos años consecutivos el galardón a nivel nacional en el evento de innovación. Actualmente es docente en la carrera de ingeniería en sistemas computacionales en la Universidad Valle de México (UVM).



Miguel Ángel Guillen-Ramos. Originario de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en la carrera de ingeniería electrónica. Participó en el evento nacional de ciencias básicas 2022(ENECEB) en la etapa nacional, así como en el INNOVATEC 2023 y 2024, ambas en instancias nacionales. Actualmente es maestrante del posgrado en ciencias de la ingeniería mecatrónica.