

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA

AUTOMATIZACIÓN DE LA MEDICIÓN Y MONITOREO
EN TIEMPO REAL, BASADO EN IoT, DE UN
AFORADOR DE GARGANTA LARGA

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA

Presenta:

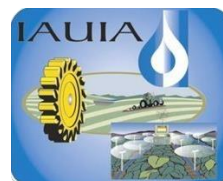
RUBÉN VELASCO HERNÁNDEZ

Bajo la supervisión de:

MAURICIO CARRILLO GARCÍA, Ph. D.



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2025



**AUTOMATIZACIÓN DE LA MEDICION Y MONITOREO EN TIEMPO REAL,
BASADO EN IoT, DE UN AFORADOR DE GARGANTA LARGA**

Tesis realizada por el C. Rubén Velasco Hernández bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERIA AGRICOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: _____

DR. MAURICIO CARRILLO GARCÍA

CODIRECTOR: _____

DR. JUAN GABRIEL BRÍGIDO MORALES

ASESOR: _____

DR. JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ

ASESOR: _____

DR. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
DEDICATORIAS	x
AGRADECIMIENTOS	xi
DATOS BIOGRÁFICOS	xii
RESUMEN GENERAL	xiii
GENERAL ABSTRACT	xiv
1 INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Objetivo General	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
1.2 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	4
1.3 LITERATURA CITADA	4
2 REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1 METODOS DE AFORO EN FLUJO A SUPERFICIE LIBRE	6
2.2 AFORADORES DE GARGANTA LARGA	6
2.3 AFORADORES DE GARGANTA LARGA, MODIFICADO PARA FLUJO CON SEDIMENTOS	12
2.4 MEDICIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL FLUJO	13
2.5 AUTOMATIZACIÓN DE LA MEDICIÓN DEL NIVEL DEL AGUA	13
2.5.1 Fundamentos de los sensores ultrasónicos	14

2.5.2	Sensores ultrasónicos en el mercado y aplicaciones hidráulicas ..	16
2.5.3	Análisis de sensor ultrasónico HC-SR04.....	18
2.6	INTERNET DE LAS COSAS (IOT)	21
2.6.1	Internet de las cosas en la agricultura y el manejo del agua.....	23
2.6.2	Arquitectura de un sistema IoT agrícola.....	26
2.6.3	Monitoreo en Tiempo Real basado en IoT aplicado al agua	27
2.7	LITERATURA CITADA	30
3	AUTOMATIZACIÓN DE LA MEDICION Y MONITOREO EN TIEMPO REAL, BASADO EN IoT, DE UN AFORADOR DE GARGANTA LARGA	37
3.1	Resumen	37
3.2	Introducción	38
3.3	Materiales y Métodos.....	39
3.3.1	Descripción del AGLFS con flujo supercrítico	39
3.3.2	Desarrollo del sistema de medición y de monitoreo, diseño del hardware.....	41
	Arquitectura y funcionamiento del sistema.....	42
	Proceso de medición de la profundidad hidráulica	44
	Monitoreo en tiempo real de las mediciones basado en IoT	47
3.3.3	Validación del sistema de medición	48
3.4	Resultados y discusión	49
3.4.1	Relación caudal-profundidad (Q-h) en el AGLFS	49
3.4.2	Del desarrollo del sistema de medición y monitoreo	52

3.4.3	Del funcionamiento y desempeño del sistema de medición.....	55
3.5	Conclusiones	60
3.6	Agradecimientos	62
3.7	Literatura citada	62
4	MEMORIAS DE TRABAJOS EXPUESTOS EN CONGRESOS INTERNACIONALES.....	66

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1. Especificaciones de los sensores utilizados.....	41
Cuadro 3.2. Componentes electrónicos del sistema de medición dadas por el fabricante	42
Cuadro 3.3. Ecuaciones de ajuste de los sensores ultrasónicos	47
Cuadro 3.4. Caudales calculados con el vertedor triangular y profundidades hidráulicas medidas con limnímetros en la entrada y sensores en la rápida	49
Cuadro 3.5. Ecuaciones h-Q obtenidas para la entrada y rápida del aforador.	51
Cuadro 3.6. Errores de la profundidad hidráulica en la rápida, entre los sensores y los limnímetros.	57
Cuadro 3.7. Errores entre los caudales estimados con los sensores y los limnímetros en la rápida y entrada del AGLFS y el del con el vertedor patrón.	57
Cuadro 3.8. Errores estadísticos medios obtenidos para todas las pruebas	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Partes y perfil del flujo con nivel de energía a través de un aforador de garganta larga. (Fuente Brigido-Morales (2022)).	8
Figura 2.2. Energía en la estación de medición y en la sección de control (Fuente Brigido-Morales (2022)).	10
Figura 2.3. Principio de medición de los sensores ultrasónicos (Fuente: Komarizadehasl et al. (2022))	15
Figura 2.4. Sensores ultrasónicos empleados en la medición del nivel del agua; a) HC-SR04, b) JN-SR04T, c) HY-SRF05, d) US-015 y e) Fiedler AMS US1200.	17
Figura 2.5. Cono y patrón de la onda ultrasónica del sensor HC-SR04 (Fuente: con Zhmud et al. (2018) y Morgan (2014)).	18
Figura 2.6. Reflejo de la onda ultrasónica en un objeto con ángulo de incidencia demasiado alto (Fuente: Zhmud et al. (2018)).	19
Figura 2.7. Representación de la geometría de propagación de las ondas sonoras del sensor ultrasónico (Fuente: Zhmud et al. (2018)).	19
Figura 2.8. Diagrama del proceso de medición del sensor HC-SR04 (Fuente: (Morgan, 2014; Zhmud et al., 2018)).	20
Figura 2.9. Aplicaciones del IoT (Fuente: Khanh et al. (2022)).	22
Figura 2.10. Aplicaciones de IoT en la agricultura para crear una agricultura inteligente (Fuente: Mandal et al. (2024))	23
Figura 2.11. categorías de las aplicaciones de IoT en la agricultura (Fuente: W. S. Kim et al. (2020))	24
Figura 2.12. Dominios y aplicaciones del IoT en la agricultura (Fuente: Farooq et al. (2020))	24

Figura 2.13. Aplicaciones, instalaciones y dispositivos en la agricultura inteligente basada en IoT (Fuente: Dhanaraju et al. (2022)	25
Figura 2.14. Capas que conforman la arquitectura del IoT (Fuente: W. S. Kim et al. (2020))	27
Figura 2.15. Diagrama de flujo sobre el posible funcionamiento de un sistema IoT para el monitoreo del agua (Fuente: Miller et al. (2023))	29
Figura 3.1. Aforador de garganta larga con rápida a la salida y dos pozos de medición, (a) modelo físico, (b) secciones (Fuente: Brigido-Morales (2022)). ..	40
Figura 3.2. a) Unidad de adquisición, de comunicación y transferencia de datos, b) diagrama general de funcionamiento del sistema IoT.	43
Figura 3.3. Diagrama eléctrico de módulos y sensores usados en el sistema de medición.	44
Figura 3.4. Representación del proceso para medir la distancia del nivel del agua y calcular la profundidad hidráulica.	46
Figura 3.5. Canal de monitoreo creado y empleado en la plataforma ThingSpeak	48
Figura 3.6. Instalación de los sensores para validación del sistema de medición	48
Figura 3.7. Curvas Q-h en la entrada y en la rápida del AGLFS, y del vertedor triangular.	50
Figura 3.8. Curvas h-Q, entrada y rápida en el AGLFS, y en el vertedor.	51
Figura 3.9. Hardware del sistema de medición y monitoreo	53
Figura 3.10. Sistema de medición desarrollado e instalado en el aforador de garganta larga.	53
Figura 3.11. Monitoreo de las variables medidas por el sistema a través de la plataforma web de IoT, numéricamente y gráficamente	54
Figura 3.12. Transferencia y descarga de información por medio de bluetooth	55

Figura 3.13. Comportamiento de la profundidad y caudal medidos por el sistema de medición con los sensores.....	55
Figura 3.14. Distribución de frecuencias de los valores obtenidos con el sistema de sensores a) profundidad hidráulica y b) caudal.....	56
Figura 3.15. Comparación de mediciones a) de la profundidad hidráulica en el tramo supercrítico del AGLFS (rápida) medida con los sensores HC-SR04 y los limnímetros de punta; b) de los caudales estimados por los diferentes métodos.	58

DEDICATORIAS

A mi amada esposa Nancy por siempre estar conmigo y ser mi apoyo, por su amor y paciencia ♥

A mis padres Sr. Leovigildo Velasco† y Sra. Asunción Hernández por la dedicación, paciencia, sacrificio y apoyo incondicional en cualquier momento

A mis hermanos por su cariño, consejos y motivación

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada que me permitió realizar mis estudios de maestría

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA), por la oportunidad brindada para realizar mis estudios de maestría y todas las facilidades otorgadas para el desarrollo de este proyecto de investigación

Al Departamento de Irrigación por las facilidades otorgadas para el uso de sus instalaciones

A los miembros de mi comité asesor, al Ph. D. Mauricio Carrillo García por la confianza, dirección y apoyo durante el desarrollo de esta investigación; al Dr. Juan Gabriel Brígido Morales, Dr. Jorge Víctor Prado Hernández y Dr. Noé Velázquez López por el asesoramiento y las recomendaciones para mejoras en las diferentes etapas de este trabajo de investigación, y por su amistad en todo el proceso

A mis compañeros y amigos de maestría y del posgrado, y a todas las personas que de manera desinteresada me brindaron su apoyo y consejos.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Rubén Velasco Hernández
Fecha de nacimiento	30 de julio de 1992
Lugar de nacimiento	San Miguel Tulancingo, Oaxaca
CURP	VEHR920730HOCLRB02
Profesión	Ingeniero en Irrigación
Cédula profesional	10885311

Desarrollo académico

Bachillerato	Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo
Licenciatura	Ingeniería en Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

AUTOMATIZACIÓN DE LA MEDICIÓN Y MONITOREO EN TIEMPO REAL, BASADO EN IoT, DE UN AFORADOR DE GARGANTA LARGA

La medición en corrientes de flujo a superficie libre es esencial para la gestión eficiente del recurso hídrico, la cual debe ser lo más exacta. Con el avance en la instrumentación electrónica y tecnología de sensores se han desarrollado sistemas más precisos y eficientes. Este trabajo presenta el diseño, desarrollo y validación de un sistema automatizado de medición y monitoreo en tiempo real, basado en tecnología IoT (Internet de las Cosas), aplicado a un aforador de garganta larga modificado para flujo con sedimentos, ubicado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Autónoma Chapingo. El sistema integra tres sensores ultrasónicos HC-SR04 para medir la profundidad hidráulica, un sensor DHT22 para temperatura y humedad relativa, un módulo RTC, un lector microSD y un microcontrolador ESP32 con conectividad WiFi y Bluetooth. Los datos se procesan, almacenan en una microSD, se visualizan en una pantalla OLED y se transmiten cada 15 segundos a la plataforma ThingSpeak, además de poder descargarse localmente vía Bluetooth. La alimentación proviene de una batería ácido-plomo recargable mediante un panel solar. Se determinaron ecuaciones experimentales para el aforador en régimen subcrítico y supercrítico, obteniendo coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.99. La validación se realizó comparando las mediciones del sistema con mediciones manuales (limnímetros) y un vertedor triangular como patrón de caudal, y como resultado se alcanzaron errores MAPE de 4.35% en profundidad, 5.44% en caudal respecto a limnímetros y 2.17% respecto al vertedor, cumpliendo con la norma NMX-AA-179-SCFI-2018. El sistema demostró precisión y robustez, siendo una alternativa técnica y económica viable para la medición, procesamiento y almacenamiento de datos hidráulicos. Su operación automática y su capacidad de monitoreo remoto permiten generar hidrogramas en tiempo real y ayudar en la toma de decisiones en la gestión del agua, contribuyendo a la modernización de la infraestructura hidráulica.

Palabras clave: aforador de garganta larga, flujo con sedimentos, sensores ultrasónicos, IoT, monitoreo en tiempo real, ThingSpeak

Tesis de Maestría en Ingeniería

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Rubén Velasco Hernández

Director: Ph. D. Mauricio Carrillo García

GENERAL ABSTRACT

IoT-BASED AUTOMATION FOR REAL-TIME MEASUREMENT AND MONITORING IN A LONG-THROATED FLUME

Accurate measurement of discharge in open-channel flows is essential for efficient water resource management. Advances in electronic instrumentation and sensor technologies have enabled the development of more precise and efficient systems. This study presents the design, development, and experimental validation of an automated, Internet of Things (IoT)-based real-time monitoring system applied to a modified long-throated flume for sediment-laden flow in the Hydraulics Laboratory of the Universidad Autónoma Chapingo. The system integrates three HC-SR04 ultrasonic sensors for measuring hydraulic depth, a DHT22 sensor for temperature and relative humidity, a real-time clock (RTC) module, a microSD card reader, and an ESP32 microcontroller with Wi-Fi and Bluetooth connectivity. The ESP32 processes the sensor data, stores it locally on the microSD card, displays it on an OLED screen, and transmits it to the ThingSpeak cloud platform every 15 seconds via Wi-Fi. Local data download is also possible via Bluetooth. The system is powered by a lead-acid battery recharged by a solar panel. Experimental stage-discharge equations were determined for both subcritical and supercritical flow regimes, achieving coefficients of determination (R^2) greater than 0.99. System validation was performed by comparing its measurements against manual readings from staff gauges and a reference triangular weir. The results showed low Mean Absolute Percentage Errors (MAPE): 4.35% for water depth, 5.44% for discharge versus staff gauges, and 2.17% for discharge versus the reference weir, complying with the Mexican standard NMX-AA-179-SCFI-2018. The system demonstrated high accuracy and robustness, presenting a technically and economically viable alternative for hydraulic data acquisition, processing, and storage. Its automated operation and remote monitoring capability enable the generation of real-time hydrographs and support decision-making in water management, contributing to the modernization of hydraulic infrastructure.

Keywords: Long-throated flume, sediment-laden flow, ultrasonic sensors, IoT, real-time monitoring, ThingSpeak

Master's Thesis in Engineering

Postgraduate in Agricultural Engineering and Integrated Use of Water, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Rubén Velasco Hernández

Advisor: Ph. D. Mauricio Carrillo García

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

De acuerdo con las Naciones Unidas la población está en aumento, superó los 8,000 millones de habitantes en 2022 y se proyecta que llegue a los 8,500 millones en 2030; 9,700 millones en 2050, hasta alcanzar un máximo de alrededor de 10,400 millones para el año de 2080 permaneciendo a ese nivel hasta el 2100 (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2022). Con el aumento de la población, uno de los recursos más demandados es el agua dulce; si bien se trata de un recurso renovable, su disponibilidad es limitada, por lo que debe gestionarse adecuadamente para garantizar su disponibilidad continua (Parra et al., 2015). De acuerdo con reportes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey, 2018), el 2.5 % del agua total del mundo es agua dulce, de la cual el 0.75 % se encuentra en aguas subterráneas y solo el 0.0072 % está contenido en lagos, ríos y pantanos. Los datos del Banco Mundial, indican que en México el promedio de agua por persona ha pasado de 4 mil m³ en el 2000 a aproximadamente 3.2 mil m³. Como consecuencia del deterioro de los cuerpos de agua, se estima que para 2030 la disponibilidad de agua en México descienda por debajo de los 3 mil m³ por habitante al año (IMCO, 2023).

En México, la administración del recurso hídrico es responsabilidad de dependencias como la CONAGUA. Para su gestión, el territorio se divide en Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA), existen 13 RHA, integradas por 37 regiones hidrológicas; a su vez, estas regiones están integradas por alrededor de 1,471 cuencas hidrográficas, unidades territoriales definidas para una gestión integrada de los recursos hídricos. En cada una de las 37 regiones hidrológicas está contenida al menos una cuenca y, a su vez, no existe cuenca que esté en más de una región hidrológica (IMCO, 2023).

El conocimiento de la cantidad y la calidad del agua es de vital importancia para el abastecimiento de agua potable municipal e industrial, el control de avenidas, el diseño y operación de presas, la generación de energía hidroeléctrica, la

irrigación, las actividades recreativas relacionadas con el agua, la navegación fluvial, el cuidado y preservación de flora y fauna, el drenaje, el tratamiento de aguas residuales y la potabilización (CONAGUA, 2023). Las estaciones hidrométricas miden la cantidad de agua que fluye en ríos, arroyos, canales, o a la salida de las presas; al 31 de diciembre de 2022, México contaba con 812 estaciones hidrométricas en operación.

Montoya (2014) señala que entre los motivos para medir el caudal se encuentran los siguientes: a) Cuantificar los volúmenes y gastos que se deseen almacenar y controlar en las nuevas obras hidráulicas; b) Cuantificar los volúmenes de agua a cobrar para diferentes usuarios incluyendo industrias, centrales hidroeléctricas, riego para agricultura, etc., logrando con esto un mejor uso; c) Operar la red de canales para suministrar los caudales requeridos en las zonas de cultivo; d) Identificar avenidas en tiempos de eventos climáticos extremos.

Para satisfacer la necesidad de medir el agua, resulta fundamental utilizar estructuras de aforo, por ejemplo, los aforadores de garganta larga, estructuras ampliamente utilizadas en la medición de caudales en canales abiertos generalmente muy precisas cuando se operan en condiciones de flujo no sumergido, dependiendo únicamente de la profundidad del flujo para determinar el caudal (Clemmens et al., 2001).

Brigido-Morales (2022) diseñó y construyó un modelo de aforador de garganta larga, adicionándole una sección supercrítica (rápida) después de la zona de control, e incorporó un pozo de medición en la rápida. Esta adición permite continuar con las lecturas incluso cuando el flujo tenga sedimentos, lo que provocaría que el pozo de medición en la entrada se obstruya, mientras que el flujo supercrítico en la rápida favorece el arrastre de dichos sedimentos.

Aunque la medición de los niveles de la profundidad del flujo se realiza a menudo, manualmente, lo que puede llevar mucho tiempo y trabajo (Fisher & Sui, 2013), gracias al avance en tecnología aplicada a la instrumentación se ha propiciado el desarrollo de instrumentos más precisos que facilitan realizar mediciones

(Braithwaite, 2008). Además, los progresos en la tecnología de sensores y su aplicación han facilitado el monitoreo en tiempo real del nivel del agua en el campo, lo que ha contribuido a la elaboración de planes y decisiones sólidas y eficientes para la gestión del agua (Cruz et al., 2022), además de permitir el intercambio de información con las personas interesadas, basándose en un enfoque de Internet de las cosas (IoT) (Jo & Baloch, 2017)

Por lo tanto, se considera indispensable implementar este tipo de tecnologías para automatizar las mediciones y permitir el monitoreo en tiempo real de las variables necesarias para la determinación de la profundidad del flujo y el cálculo del caudal para un aforador de garganta larga diseñado para flujo con arrastre de sedimentos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Diseñar, desarrollar e implementar un sistema automatizado de medición, adquisición y procesamiento de datos, y monitoreo basado en internet de las cosas (IoT), para determinar en tiempo real y de forma remota los parámetros hidráulicos (profundidad y caudal) de un aforador de garganta larga con sección supercrítica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar, integrar y programar los componentes del hardware y software que conformarán el sistema de medición.
- Validar el funcionamiento del sistema desarrollado mediante comparación de sus mediciones con las obtenidas por métodos de aforo y dispositivos tradicionales.
- Determinar la exactitud del sistema de medición en régimen supercrítico en un aforador de garganta larga.

1.2 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Este documento de tesis está estructurado en tres capítulos: I) introducción general, II) revisión de literatura, III) artículo científico y IV) memoria de congreso. Los cuales abordan las aportaciones de este trabajo de investigación.

En el capítulo I se establece el contexto, la problemática y la justificación de la investigación, además de abordar los objetivos que guían el trabajo. En el capítulo II se presenta una revisión sobre los aforadores de garganta larga, la teoría de su funcionamiento para condiciones de flujo con agua limpia y agua con flujo de sedimentos, también se aborda sobre los sistemas automatizados para la medición de variables hidráulicas y sobre sistemas de monitoreo basados en IoT desarrollados para la medición de niveles de agua. En el capítulo III se presentan los resultados del trabajo de investigación, donde se obtuvieron ecuaciones experimentales que relacionan la profundidad hidráulica con el caudal para el modelo del aforador de garganta larga, además, se muestra el diseño, desarrollo y evaluación del desempeño de un sistema automatizado para medición y monitoreo basado en IoT que se implementó en el aforador. Finalmente, en el capítulo IV se incluye la memoria del congreso VIII Jornadas de Ingeniería del Agua (ISBN: 978-84-09-76454-9) al que se envió parte del trabajo y resultados previos de la investigación.

1.3 LITERATURA CITADA

Braithwaite, J. O. (2008). Evaluación de técnicas y métodos para aforar canales. [Tesis de Maestría] Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000636363>

Brigido-Morales, J. G. (2022). *Análisis de una propuesta de aforador de garganta larga modificado para flujo con sedimentos*. [Tesis Doctoral]. Universidad Autónoma Chapingo. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/123456789/1769>

Clemmens, A. J., Wahl, T. L., Bos, M. G., & Replogle, J. A. (2001). *Water measurement with flumes and weirs: Vol. Publication 58*. International

Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands

- CONAGUA. (2023). Atlas de Agua en México. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html (consultado 06 de noviembre de 2025)
- Cruz, K. M. S. D., Ella, V. B., Suministrado, D. C., Pereira, G. S., & Agulto, E. S. (2022). A Low-Cost Wireless Sensor for Real-Time Monitoring of Water Level in Lowland Rice Field under Alternate Wetting and Drying Irrigation. *Water*, 14(24), 4128. <https://doi.org/10.3390/w14244128>
- Fisher, D. K., & Sui, R. (2013). An inexpensive open-source ultrasonic sensing system for monitoring liquid levels. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(4), 328–334. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2343>
- IMCO, Instituto Mexicano para la Competitividad A.C. (2023). Situación del agua en México. <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/> (consultado 01 de noviembre de 2025)
- Montoya, M. G. (2014). *Modelo numérico para estimar el caudal de avenidas en ríos* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)]. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000718085>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs, P. D. (2022). *World Population Prospects 2022 Summary of Results*. https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.de.sa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf (consultado 01 de noviembre de 2025)
- Parra, L., Sendra, S., Lloret, J., & Bosch, I. (2015). Development of a Conductivity Sensor for Monitoring Groundwater Resources to Optimize Water Management in Smart City Environments. *Sensors*, 15(9), 20990–21015. <https://doi.org/10.3390/s150920990>
- U.S. Geological Survey. (2018). Where is Earth's Water? <https://www.usgs.gov/water-science-school/science/where-earths-water> (consultado 01 de noviembre de 2025)

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 METODOS DE AFORO EN FLUJO A SUPERFICIE LIBRE

De acuerdo con Carrillo-Garcia (1999) los métodos más comunes de medición de caudal en canales abiertos utilizan algún tipo de estructura hidráulica (dispositivo primario) cuya función es producir un flujo con una relación conocida entre el caudal y la altura del agua (columna) en un punto.

Las estructuras de aforo más utilizadas operan provocando flujo crítico, a través de una sección de control de dimensiones conocidas. Esta profundidad puede inducirse mediante una elevación en el fondo del canal, como en un vertedor, o a través de una contracción en las paredes laterales, como en un aforador de flujo crítico (Chow, 1988; Clemmens et al., 2001). Bajo estas condiciones, el caudal en la sección crítica está en función de la geometría de la sección y de la energía potencial aguas arriba; en consecuencia, el caudal puede determinarse a partir de la carga hidráulica medida aguas arriba de la sección de control (Clemmens et al., 2001).

Los aforadores de garganta larga y los vertederos de cresta ancha son los dispositivos primarios más aceptados para la medición del caudal tanto en canales abiertos como para arroyos naturales (Carrillo-Garcia, 1999; Wahl et al., 2005).

2.2 AFORADORES DE GARGANTA LARGA

Un aforador de garganta larga es una estructura aforadora donde se produce el régimen crítico por reducción de la sección del canal para establecer una relación biunívoca entre el caudal y la carga hidráulica aguas arriba (Bos, 1985; Carrillo-Garcia, 1999; Clemmens et al., 2001). Su diseño incluye una garganta lo suficientemente larga para generar líneas de flujo casi paralelas en la región de control (Riaz et al., 2016). Esta condición permite la aplicación de la teoría del flujo crítico para obtener lecturas de caudal, a partir de mediciones del nivel del agua, realizadas aguas arriba de la estructura, con alto grado de precisión

(Castro-Orgaz & Mateos, 2013). La geometría de la estructura modifica el régimen del flujo, transitando de régimen subcrítico aguas arriba a crítico y luego a supercrítico aguas abajo (Ramírez-Luna et al., 2010).

De acuerdo con la literatura especializada los aforadores de garganta larga presentan las siguientes ventajas (Bos, 1985, 1989; Bos et al., 1984, 1986; Clemmens et al., 2001; Wahl et al., 2005):

1. Si ocurre el régimen crítico dentro de la sección de garganta, es posible calcular la curva de calibración con un error entre 2% y máximo el 5%.
2. Es posible medir con gran exactitud un amplio rango de caudales, debido a la geometría de la sección de control, perpendicular al flujo.
3. Las pérdidas de carga son mínimas y pueden estimarse con gran exactitud.
4. Pueden diseñarse para permitir el paso de sedimentos transportados por el flujo.
5. Representan una de las soluciones más económicas para la medición precisa de caudal en condiciones hidráulicas similares.

Las variables hidráulicas en régimen crítico dependen únicamente de la geometría, entonces, la ecuación caudal-carga es resultado de la solución de ecuaciones de comportamiento aplicadas en la geometría de la estructura cuando se presenta el flujo crítico (Ramírez-Luna et al., 2010). Esta característica permite utilizar la teoría hidráulica unidimensional para determinar la relación de calibración entre el caudal circulante (Q) y la altura referida al fondo de la garganta (h), medida en el canal de aproximación aguas arriba de la garganta (Clemmens et al., 2001).

Clemmens et al. (1993) indican que los aforadores de garganta larga constan de cinco partes, donde todas debe cumplir con ciertos requerimientos; en la Figura 2.1 se muestran estas partes, así como sus características, y se describen en seguida:

1. Canal de aproximación: Origina las condiciones de flujo uniforme, generando estabilidad en la superficie del agua; condiciones que ayudan a determinar su elevación de manera precisa.
2. Transición convergente: Favorece la aceleración del flujo de forma gradual hacia la garganta sin que existan discontinuidades ni separación del flujo.
3. Garganta o sección de control: Sección de geometría constante y pendiente nula donde se desarrolla la profundidad crítica del flujo; ubicado generalmente a 2 terceras partes de la longitud de la sección.
4. Transición divergente: Puede incluirse de manera opcional en la estructura, su función principal es reducir la velocidad del flujo supercrítico procedente de la garganta, lo que propicia la recuperación de la energía; sin embargo, se puede prescindir de esta sección sin afectar el funcionamiento hidráulico.
5. Canal de descarga: Depende de las condiciones de operación del canal donde se instale el aforador, y el rango de los niveles de agua que se presenten en esta sección proporcionan la referencia hidráulica para determinar la elevación y tamaño de la sección de control.

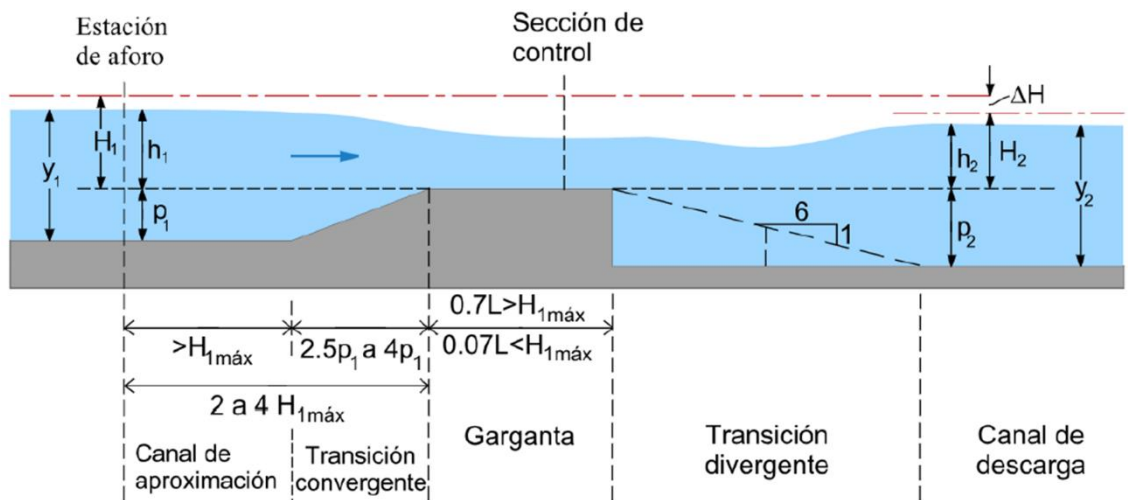


Figura 2.1. Partes y perfil del flujo con nivel de energía a través de un aforador de garganta larga. (Fuente Brigido-Morales (2022)).

Brigido-Morales (2022) describe cada variable de la siguiente manera.

- y_1 = Profundidad del flujo en la sección de aproximación, medida desde el fondo del canal.
- h_1 = Profundidad del flujo en la sección de aproximación, medida desde el fondo de la sección de control.
- H_1 = Es la carga de energía en la sección de aproximación, medida con relación al fondo de la sección de control. Es la suma de h_1 y la carga de velocidad ($\alpha v^2/2g$).
- p_1 = Altura de la garganta o sección de control con relación al fondo del canal de aproximación.
- L = Longitud de sección de control o garganta.
- h_2 = Profundidad del flujo en el canal de descarga, medida con relación al fondo de la sección de control.
- H_2 = Carga de energía en el canal de descarga, medida con relación al fondo de la sección de control. Es la suma de h_2 y la carga de velocidad ($\alpha v^2/2g$).
- y_2 = Profundidad del flujo en el canal de descarga, medida desde el fondo del canal.
- ΔH = Es la pérdida de carga de energía, la diferencia entre la carga de energía aguas arriba y carga de energía aguas abajo (H_1-H_2).

Para determinar el caudal que circula por la estructura Bos (1989) y Clemmens et al. (2001) establecen la aplicación de la ecuación de conservación de la energía para flujo ideal constante en canales abiertos. Suponiendo que entre la sección de medición (aguas arriba) y la sección de control (garganta) las líneas de corriente son rectas y paralelas (distribución hidrostática de presiones); y que las pérdidas de energía por fricción y turbulencia son despreciables es este tramo corto de flujo acelerado entre las dos secciones, y de esta forma se cumple la igualdad de energías totales descritas en la ecuación 2.1 cuyas configuración se muestra en la Figura 2.2.

$$H_1 = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \approx y_c + \frac{v_c^2}{2g} = H_c \quad (2.1)$$

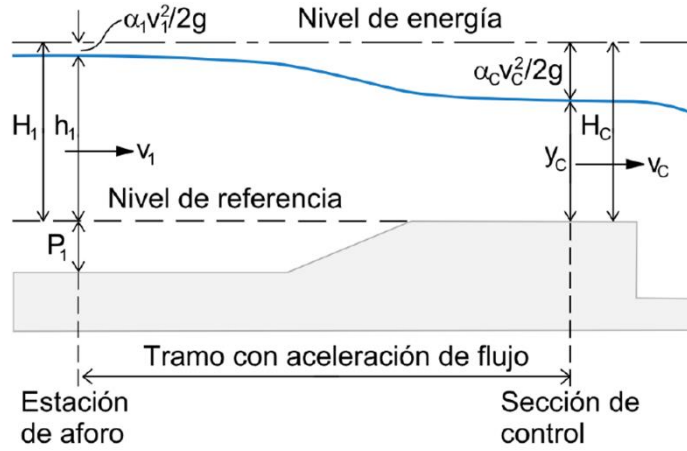


Figura 2.2. Energía en la estación de medición y en la sección de control (Fuente Brigido-Morales (2022)).

Partiendo de este principio, el flujo o caudal puede ser calculado por la ecuación 2.2.

$$Q = A_c \sqrt{2g(H_1 - y_c)} \quad (2.2)$$

Bajo el estado crítico de flujo, la energía específica, ($E = h + v^2/2g$), es mínima para un caudal dado. Entonces, si se sustituye y_c , Q se puede expresar como una función del área de la sección transversal, A_c , y el ancho superior, B_c , en la sección de control, resultando en la ecuación 2.3.

$$Q = \sqrt{\frac{gA_c}{B_c}} \quad (2.3)$$

Alternativamente, en la ecuación 2.2 se sustituye H_1 por H_c el caudal real a través de la sección de control es igual se define con la ecuación 2.4.

$$Q = A_c \sqrt{2g(H_c - y_c)} \quad (2.4)$$

Y si se conoce la relación entre H_c y y_c (por ejemplo, para secciones rectangulares, $H_c = 1.5y_c$) la ecuación 2.4 puede simplificarse a una forma potencial (ecuación 2.5):

$$Q=C_1y_c^u \quad (2.5)$$

donde C_1 es una constante y u es el exponente de caudal (1.5 para secciones rectangulares).

De esta forma, el caudal, Q , a través de la sección de control puede expresarse como una función única de la profundidad, la diferencia de elevación entre el nivel de agua en el canal de aproximación y el fondo de la sección de control o garganta.

Por su parte la NMX-AA-179-SCFI-2018: “Medición de volúmenes de aguas nacionales usados, explotados o aprovechados” (D.O.F., 2018), especifica la fórmula generalizada para determinar el gasto o caudal instantáneo Q_n en un aforador de garganta larga mediante la ecuación 2.6.

$$Q_n = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2g}{3}} C_d C_s C_v b h^{3/2} \quad (2.6)$$

Donde b es el ancho de la garganta (m); C_d es el coeficiente de descarga (adim.); C_s es el coeficiente de forma (adim.); C_v es el coeficiente de velocidad (adim.); g es la aceleración de la gravedad ($m \cdot s^{-2}$); h es la carga medida sobre la cresta del aforador (m) y Q_n es el gasto instantáneo de muestreo ($m^3 \cdot s^{-1}$). Todos los coeficientes se pueden simplificar en un solo valor numérico, dando lugar a la ecuación 2.7 similar a la ecuación 2.5, que representa la ecuación característica de vertedores rectangulares.

$$Q = C \cdot h^{3/2} \quad (2.7)$$

Como se mencionó anteriormente, una de las ventajas que tienen estos aforadores es que se pueden diseñar para el paso de sedimentos transportados por el flujo.

2.3 AFORADORES DE GARGANTA LARGA, MODIFICADO PARA FLUJO CON SEDIMENTOS

La medición exacta del caudal en ríos y/o canales con sedimentos representa un desafío hidráulico debido a la naturaleza del flujo y del transporte de sedimentos (Moradi et al., 2025). Los sedimentos tienden a depositarse y acumular en zonas de baja velocidad, como la entrada del aforador, donde se mide el nivel de agua para calcular el caudal (Castro-Orgaz & Mateos, 2013). Lo cual concuerda con Carrillo-Garcia (1999) que mencionan que la acumulación de sedimentos a la entrada de la estructura, modifica la sección transversal, pero sobre todo provocan un taponamiento del pozo de observación utilizado para la toma de datos, provocando la toma de lecturas erróneas.

Para resolver este problema, Replogle (Carrillo-Garcia, 1999) propuso el diseño de un aforador de garganta larga, utilizando el criterio de aforadores de flujo supercrítico, y agregando una rápida o sección supercrítica después de la sección de control y un segundo pozo de observación en esta nueva sección.

De manera similar Brigido-Morales (2022) estudiaron tres geometrías de aforadores (triangular, rectangular y trapecial), con el objetivo de minimizar la sedimentación, identificando la sección transversal rectangular como opción más favorable. Posteriormente Brigido-Morales et al. (2023) mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por medio de simulaciones numéricas determinaron la ubicación óptima para el segundo pozo de medición, así como la pendiente de la rápida; Sus hallazgos sugieren que las mediciones realizadas en la rápida complementen las mediciones aguas arriba de la garganta, ya que siempre se obtendrán resultados más precisos en esa sección. Finalmente concluyeron que una pendiente de 10% y la medición a la mitad de la salida supercrítica ofrece la mejor aproximación del caudal circulante permitiendo construir las curvas Q-h para estimar los caudales en un rango de 10 a 50 L·s⁻¹ con un error no mayor al 3%.

La curva Q-h del aforador para régimen supercrítico, al igual que en la sección de la entrada (subcrítico) está en función únicamente de la profundidad del flujo, ajustándose de la misma forma a la ecuación característica de vertedores.

2.4 MEDICIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL FLUJO

De acuerdo con la ecuación 2.7 ($Q=C \cdot h^n$) la determinación del caudal depende fundamentalmente de la medición precisa de la profundidad del flujo (h), la cual actúa como la variable independiente, en la relación de calibración.

Tradicionalmente, esta medición se ha realizado mediante tecnologías convencionales Basílico (2023) las clasifica en limnímetros o escalas hidrométricas y limnógrafos; que de acuerdo con Ortega-Gaucin (2012) describe los limnímetros como escalas graduadas en metros, o unidades de longitud, instaladas verticalmente desde el fondo del cauce y en un lugar visible para el observador; por su parte los limnógrafos son instrumentos automáticos que utilizan un flotador en la superficie del agua para registrar mecánicamente sobre un papel las variaciones del nivel del agua. Ambos métodos permiten obtener el caudal dada la relación existente escala-caudal.

Sin embargo, el avance en la tecnología aplicada a la instrumentación ha permitido desarrollar instrumentos más precisos y rápidos que facilitan la medición de la profundidad del flujo o de los niveles del agua para el aforo en canales (Braithwaite, 2008).

2.5 AUTOMATIZACIÓN DE LA MEDICIÓN DEL NIVEL DEL AGUA

El desarrollo rápido en las tecnologías electrónicas ha hecho posible la aplicación de una variedad de sensores disponibles ayudando con la automatización de las mediciones; además con los protocolos de telecomunicación se ha logrado el monitoreo en tiempo real del nivel del agua en campo, ayudando tanto a los agricultores como a los investigadores y a las dependencias gubernamentales a elaborar planes y tomar decisiones sólidas y eficientes para la gestión y manejo

del agua, basada en datos (Cruz et al., 2022; Fisher & Sui, 2013; Panagopoulos et al., 2021).

Para la medición automática y continua del nivel de agua, existen varios existen principalmente dos categorías de sensores: de contacto (sumergidos) y sin contacto. Los sensores de contacto, como los transductores de presión estiman el nivel de agua mediante la presión hidrostática; sin embargo, dado que deben sumergirse son susceptibles a elementos que transporte el agua como escombros o sedimentos que pueden provocar su enterramiento y alterar las lecturas de la presión. . Además, su instalación y mantenimiento implican operar dentro del canal, incrementando la complejidad y el riesgo (Masoudimoghaddam et al., 2025; Panagopoulos et al., 2021).

En cambio, los sensores sin contacto (como láser infrarrojo y ultrasonido) realizan las mediciones desde fuera del agua, evitando las dificultades asociadas a la inmersión y ofreciendo una solución más robusta para entornos con sedimentos o escombros (Catsamas et al., 2023; Ranieri et al., 2024). Entre estas opciones, el sensor ultrasónico destaca como el más comúnmente empleado para la medición de distancias (Panda et al., 2016), debido al equilibrio entre su costo, precisión y facilidad de implementación.

2.5.1 Fundamentos de los sensores ultrasónicos

La tecnología de detección ultrasónica, utilizada para medir la distancia a un objeto, ha encontrado aplicaciones útiles en áreas como sistemas automotrices, automatización industrial y en agricultura de precisión para investigación y producción agrícola, así como en la medición de nivel de fluidos (Wei, 2024). Existen dos técnicas principales de medición de distancias con sensores de alcance ultrasónico: el método pulso-eco y el método de onda continua, el primero emplea un solo transductor y receptor, el segundo utiliza un transductor y un receptor por separado y requiere equipos más caros (Aliew, 2022).

El principio de funcionamiento de detección ultrasónica se basa en el principio de tiempo de vuelo, es decir, el tiempo que tarda una onda ultrasónica (onda de

pulso) en propagarse desde el transmisor hasta su objetivo y regresar al receptor del sensor después de reflejarse (onda de eco) como se ilustra en la Figura 2.3 (Fisher & Sui, 2013; Guyard et al., 2025; Koval et al., 2016; Sahoo & Udgata, 2022; Zhmud et al., 2018), la distancia del sensor al objeto se determina por medio de la ecuación 2.8.

$$D = \frac{t \cdot v}{2} \quad (2.8)$$

Donde D es la distancia (m); t es el tiempo de vuelo de la onda (s) y v es la velocidad del sonido ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

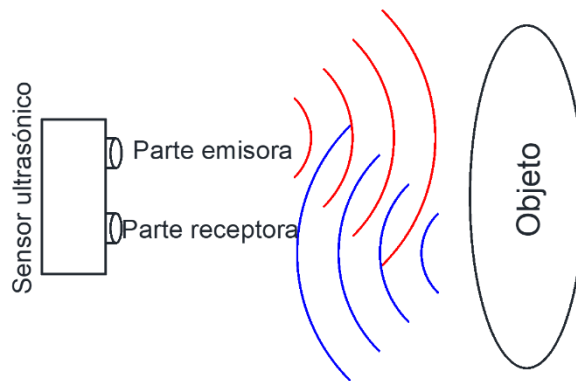


Figura 2.3. Principio de medición de los sensores ultrasónicos (Fuente: Komarizadehasl et al. (2022))

Los sensores ultrasónicos estándar asumen que la velocidad del sonido en el aire como constante ($340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) al calcular el tiempo de vuelo; sin embargo, existen factores ambientales como la lluvia, nieve, niebla, polvo y los cambios de temperatura y humedad del ambiente, que influyen significativamente en su valor y por ende en la precisión de la medición (Bohn, 1988; Ranieri et al., 2024; Sahoo & Udgata, 2022). La compensación por estos factores, especialmente por la temperatura es crucial, ya que la velocidad depende en gran medida de la temperatura del aire y es ligeramente afectada por la humedad, por lo que se puede calcular con mayor precisión, determinando la velocidad instantánea en función de dos parámetros principales (temperatura y humedad relativa) (Fisher & Sui, 2013; Panda et al., 2016; Ranieri et al., 2024; Sahoo & Udgata, 2022). La ecuación 2.9 permite la obtención de la velocidad considerando la corrección por

temperatura y humedad (Hameed et al., 2008; Komarizadehasl et al., 2022; Mvemba et al., 2018).

$$v=331.4+(0.606\cdot T) + (0.0124\cdot H) \quad (2.9)$$

donde v es la velocidad instantánea del sonido ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), la constante 331.4 es la velocidad del sonido a 0°C y 0% de humedad; T es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y H es la humedad relativa (%).

Realizar la corrección por temperatura y humedad es muy importante, de acuerdo con Kumar et al. (2023) y Panagopoulos et al. (2021) los sensores calibrados y compensados por temperatura y humedad muestran un mejor rendimiento comparado con los no calibrados o que no realizan la corrección o ajuste. Algunos fabricantes incorporan la compensación de temperatura en sus dispositivos mediante el uso de sensores de temperatura internos, mejorando la precisión de los sensores ultrasónicos.

2.5.2 Sensores ultrasónicos en el mercado y aplicaciones hidráulicas

Los sensores ultrasónicos se han adoptado como herramientas fundamentales para el monitoreo hidráulico moderno con aplicaciones que incluyen la medición de altura de ríos para sistemas de alerta temprana de inundaciones, control de sistemas automáticos para apertura y cierre de compuertas, así como la medición de descargas en canales de riego (Kumar et al., 2023; Nasution et al., 2018; Panagopoulos et al., 2021; Pereira et al., 2022)

En el mercado existe una variedad de sensores ultrasónicos empleados para medir el nivel del agua, entre los más comunes se encuentran:

HC-SR04: Es el sensor más utilizado en la medición debido a su disponibilidad y su bajo costo. Su rango de medición va de 2-400 cm con una resolución de 3 mm y requiere voltaje de entrada de 5V (Bae & Ji, 2019; T. Kim et al., 2024; Morgan, 2014; Nasution et al., 2018).

JSN-SR04T: Este sensor es una versión del HC-SR04 pero resistente al agua, diseñado para condiciones ambientales adversas, presenta mejor rendimiento con menor error absoluto medio comparado con el HC-SR04, sin embargo, su rango de medición para distancias cortas disminuye, su rango va de 20-450 cm (Kumar et al., 2023).

HY-SRF05: Es un sensor ultrasónico utilizado para medición sin contacto con precisión de 30 mm aproximadamente, operando a 40 kHz con un rango de 2-400 cm (Truong et al., 2021).

US015 : Sensor compacto con rango de 2-400 cm y resolución de 1 mm + 1%, (T. Kim et al., 2024).

Fiedler AMS US1200, US3200 y US4200: Sensores ultrasónicos que ofrecen precisión bastante alta, alcanzando valores milimétricos $<0,2\%$ del rango ± 1 mm, con rango que va de 0.15 a 4.2 m (Hemr et al., 2024; Langhammer & Česák, 2016).

Todos estos sensores (Figura 2.4) ofrecen rangos de medición desde 0.02 hasta 4.5 metros, con resoluciones de medición entre 1-3 mm y operan bajo el mismo principio de transmisión de ondas ultrasónicas pulso-eco a 40 kHz, pero varían en su robustez, precisión, costo y disponibilidad (Bae & Ji, 2019; T. Kim et al., 2024; Sahoo & Udgata, 2020).

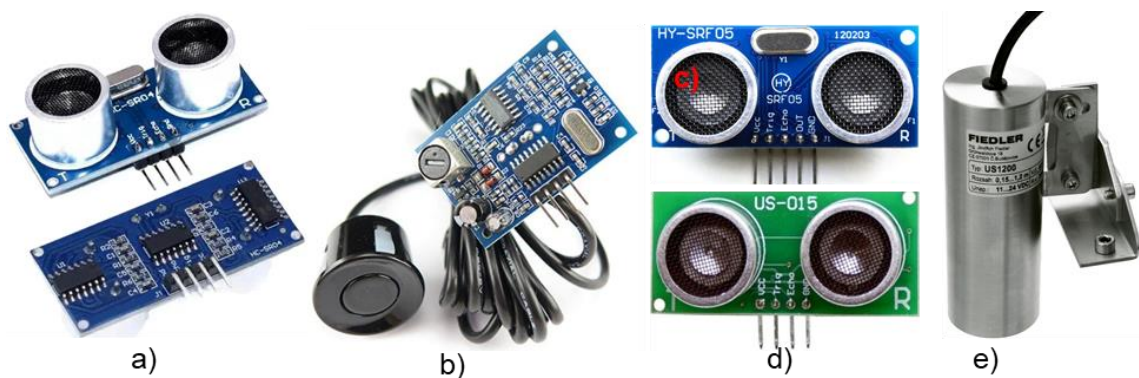


Figura 2.4. Sensores ultrasónicos empleados en la medición del nivel del agua; a) HC-SR04, b) JSN-SR04T, c) HY-SRF05, d) US-015 y e) Fiedler AMS US1200.

2.5.3 Análisis de sensor ultrasónico HC-SR04

El sensor HC-SR04 es de los sensores ultrasónicos el más empleado para la medición de distancias, debido a su bajo costo y alta disponibilidad en el mercado (Bae & Ji, 2019; T. Kim et al., 2024; Ranieri et al., 2024)

Consta de un transmisor, que genera ondas ultrasónicas a una frecuencia de 40 kHz, y un receptor que las percibe o detecta cuando rebotan en un objeto y regresan (Bae & Ji, 2019; T. Kim et al., 2024; Morgan, 2014; Sahoo & Udgata, 2022; Zhmud et al., 2018).

De acuerdo con Morgan (2014) y Zhmud et al. (2018) el sensor tiene un cono de detección, con un ángulo que varía con la distancia, el cual se propaga mediante una onda dirigida a un ángulo de 30° siendo de 15° el ángulo más efectivo de medición, por lo que los objetos ajenos que se encuentren dentro de este ángulo de medición interfieren con la determinación de la distancia al objeto deseado, la Figura 2.5 muestra el cono de propagación de la onda ultrasónica.

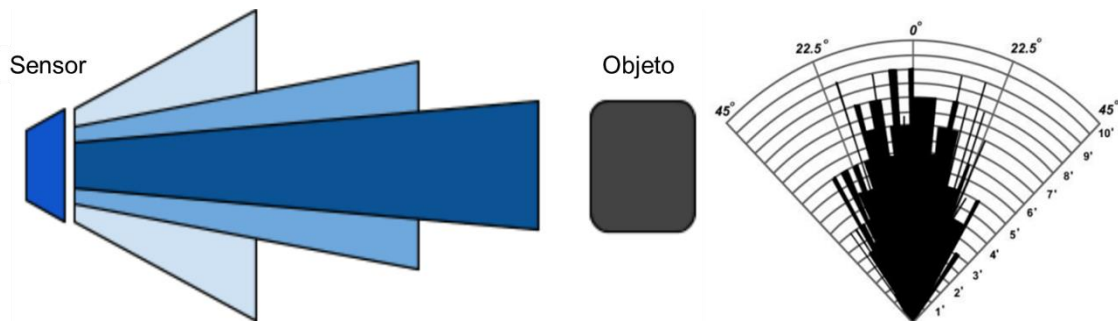


Figura 2.5. Cono y patrón de la onda ultrasónica del sensor HC-SR04 (Fuente: con Zhmud et al. (2018) y Morgan (2014),).

Por otra parte, las lecturas se ven afectadas por el ángulo de incidencia de la onda. Si el sensor apunta perpendicularmente al objeto, las mediciones serán precisas, por el contrario, si el objeto no está perpendicular al sensor y el ángulo de incidencia es demasiado grande o si la superficie de rebote no es plana, es posible que la onda sonora rebotada no regrese al sensor provocando mediciones erróneas (Morgan, 2014; Zhmud et al., 2018), este error se esquematiza en la Figura 2.6.

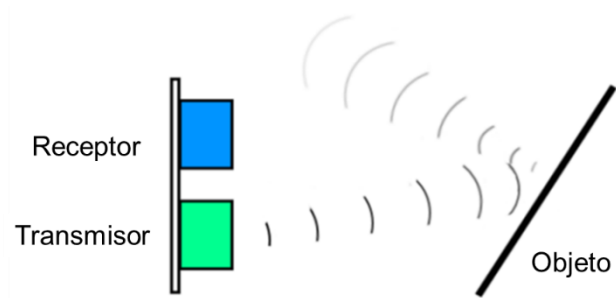


Figura 2.6. Reflejo de la onda ultrasónica en un objeto con ángulo de incidencia demasiado alto (Fuente: Zhmud et al. (2018)).

Zhmud et al. (2018), indican que es necesario considerar la trayectoria de propagación de la señal, ya que, determinar la distancia desde el sensor al objeto equivale a encontrar la altura “ h ” de un triángulo isósceles, en donde se aplica el teorema de Pitágoras, esquematizado en la Figura 2.7; dado que la base “ b ” es pequeña, influirá significativamente al medir distancias cortas y el error disminuye con distancias mayores.

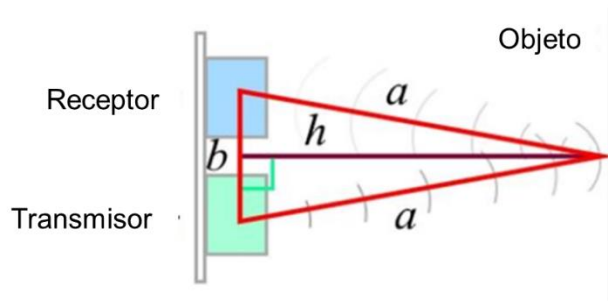


Figura 2.7. Representación de la geometría de propagación de las ondas sonoras del sensor ultrasónico (Fuente: Zhmud et al. (2018)).

Entre las especificaciones técnicas y requisitos del sensor HC-SR04 Morgan (2014) menciona que se tienen las siguientes:

- Voltaje de alimentación: 5 Vcc
- Corriente en reposo: 2mA
- Corriente en funcionamiento: 15 mA
- Rango de medición: 2-400 cm
- Ángulo efectivo de medición: $<15^\circ$
- Ángulo de medición: 30°

- Resolución o precisión: 0.3 cm
- Ancho de pulso de disparo: 10 μ s
- Frecuencia: 40 kHz
- Dimensiones: 45 x 20 x 15 mm
- Peso aproximado: 10 g

El HCSR04 tiene cuatro pines: VCC (alimentación de +5V), GND (tierra), tiene el pin TRIG (disparo) y ECHO (eco). Inicialmente ECHO y TRIG se configuran en bajo o low (0V). La secuencia de medición se inicia cuando el microcontrolador envía un pulso o señal de salida al pin TRIG poniéndolo en alto (high) durante 10 μ s, como respuesta se generan 8 pulsos o ciclos a 40 kHz emitiendo una onda ultrasónica. El receptor ECHO se desactiva un instante para no percibir la onda de salida directamente, aunque inmediatamente después se activa nuevamente, esperando recibir una señal. Después de viajar la onda en el aire y rebotar en el objeto regresa al sensor, al llegar al receptor se pone inmediatamente al pin ECHO en alto (high 5V) iniciando un temporizador, permanece en “alto” el mismo tiempo que tardo la onda de sonido en viajar hasta el objetivo, reflejarse y regresar al receptor, después de ese tiempo se vuelve a poner en “bajo” (0V). La distancia al objeto se calcula midiendo el tiempo en que el pin ECHO se mantuvo en alto y aplicando la ecuación 2.8 tal como se muestra en la Figura 2.8 (Morgan, 2014; Zhmud et al., 2018).

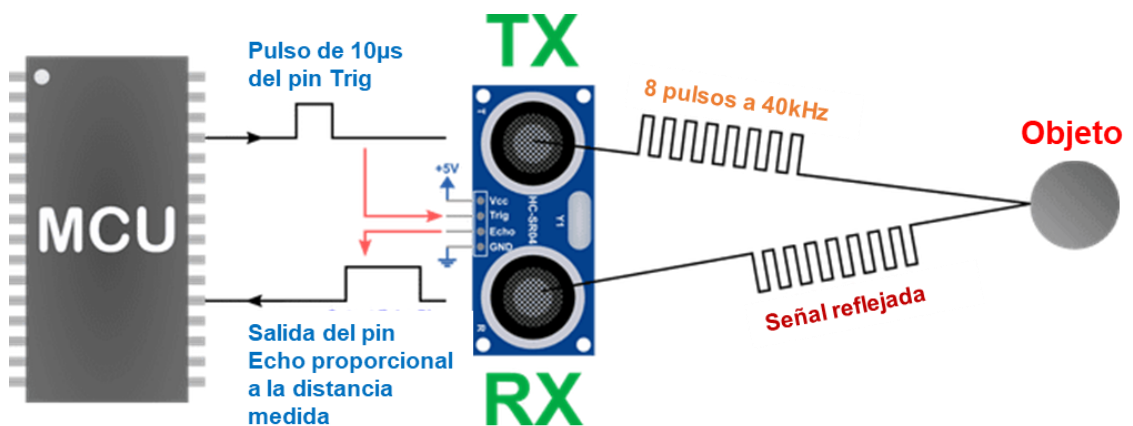


Figura 2.8. Diagrama del proceso de medición del sensor HC-SR04 (Fuente: (Morgan, 2014; Zhmud et al., 2018)).

La combinación de un costo muy bajo (aprox. \$30 pesos), y su naturaleza no invasiva hacen del HC-SR04 una opción altamente accesible para implementaciones a gran escala; otra ventaja es que se puede combinar con dispositivos de almacenamiento de datos, módulos de comunicación y demás componentes pudiendo crear sistemas de monitoreo en tiempo real. Además, por su simplicidad portabilidad y bajo consumo de energía, lo convierten en una solución atractiva para aplicaciones tanto de investigación como industriales y de campo (Bae & Ji, 2019; Panagopoulos et al., 2021; Ranieri et al., 2024; Zakaria et al., 2023).

Dentro de sus desventajas se encuentran las interferencias ambientales, como la dependencia de la temperatura y humedad, además de las limitaciones de rango de medición; pues al utilizar el sonido, cuanto mayor sea la distancia mayor es el tiempo del proceso de medición. Otra desventaja se debe a su ángulo de detección, que en espacios cerrados se pueden producir ecos indeseables. Finalmente, un factor crítico para aplicaciones hidráulicas es el efecto de la turbulencia, que provoca que los errores en las mediciones aumenten con la turbulencia creciente del agua (Morgan, 2014; Panagopoulos et al., 2021; Pereira et al., 2022).

2.6 INTERNET DE LAS COSAS (IOT)

El Internet de las Cosas (IoT), representa la evolución de la red global hacia la interconexión de dispositivos físicos con el internet (Tomsett & Leyland, 2019). La tecnología IoT conecta personas con cosas u objetos permitiendo la comunicación en tiempo real y el intercambio de datos entre sí a través una infraestructura de red, creando un puente entre el mundo físico y el digital, para compartir información y analizar datos, es decir, es un medio donde todos los objetos integrados en dispositivos, sensores, máquinas, software y personas tienen identificadores capaces de transmitir datos a través de la red de Internet para comunicarse. Este ecosistema permite el intercambio de información, facilitando el monitoreo remoto, el análisis de datos y la automatización, ayudando en un proceso de toma de decisiones más informado y eficiente o el

logro de las condiciones objetivo (Dhanaraju et al., 2022; Farooq et al., 2020; W. S. Kim et al., 2020; Quy et al., 2022; Serikul et al., 2018; Stočes et al., 2016; Zhao et al., 2010)

Las aplicaciones del IoT se han diversificado en prácticamente todos los ámbitos de la sociedad moderna (Stočes et al., 2016). Como se ilustran en la Figura 2.9 su implementación abarca sectores como la salud, el comercio, las comunicaciones, el tráfico, vehículos inteligentes, la energía, la seguridad, los hogares inteligentes, las ciudades inteligentes y la agricultura (agricultura inteligente y de precisión), todas estas aplicaciones con el fin de mejorar la eficiencia y el rendimiento en todos los objetos conectados (Dhanaraju et al., 2022; Farooq et al., 2020).

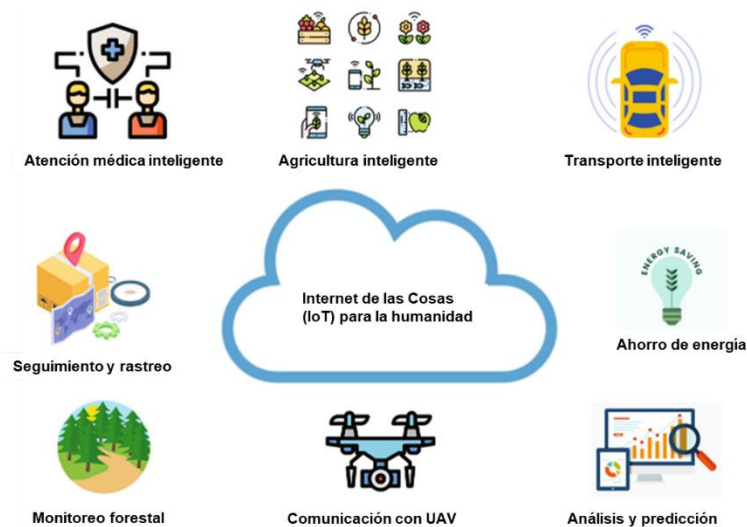


Figura 2.9. Aplicaciones del IoT (Fuente: Khanh et al. (2022)).

Su implementación en la agricultura y manejo del agua se puede considerar una solución, ya que en estos sectores existe la necesidad de un monitoreo y control continuo, permitiendo así, la conexión remota de dispositivos para lograr una agricultura inteligente mejorando la eficiencia y productividad y un uso y manejo eficiente del recurso hídrico (Dhanaraju et al., 2022; Farooq et al., 2020; Quy et al., 2022).

2.6.1 Internet de las cosas en la agricultura y el manejo del agua

Los avances en IoT y tecnologías digitales han revolucionado la agricultura permitiendo el desarrollo de sistemas inteligentes capaces de monitorear, controlar y visualizar operaciones agrícolas en tiempo real (Mandal et al., 2024). Sus principales aplicaciones en la agricultura son la agricultura inteligente, la agricultura de precisión, la ganadería y los invernaderos donde todo se sustenta en redes de sensores inalámbricos. A través de ellas se integran dispositivos de detección, maquinaria, software y herramientas de análisis para recopilar datos del entorno, facilitando la toma de decisiones informadas que mejoran la productividad y la calidad de sus productos con menor esfuerzo laboral (Farooq et al., 2020; Quy et al., 2022). La Figura 2.10 ilustra el alcance de estas aplicaciones del IoT en el sector agrícola.

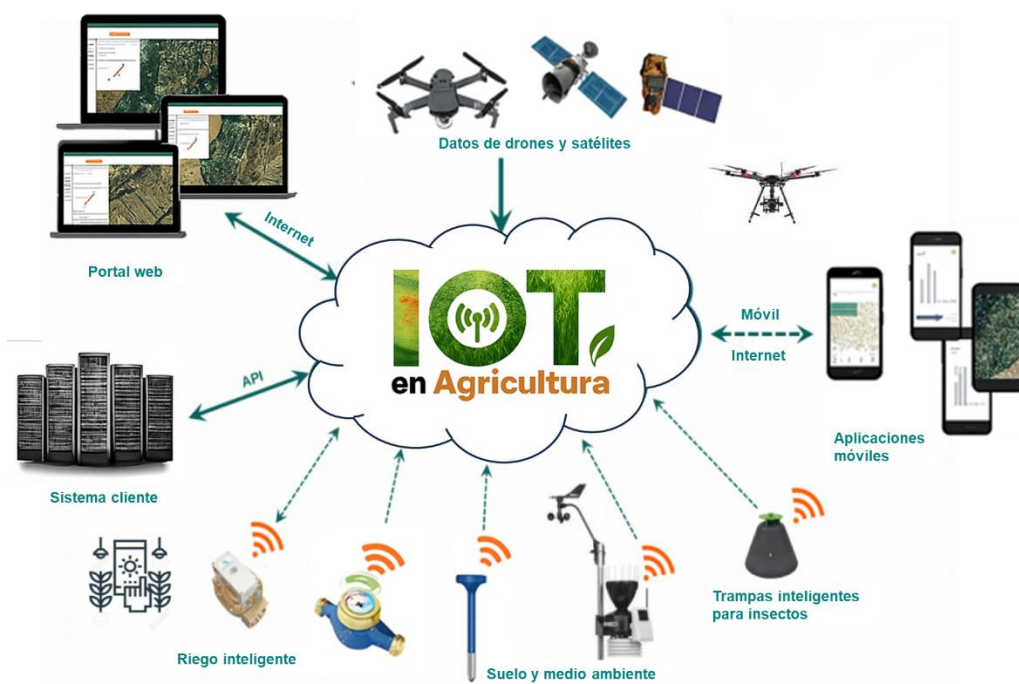


Figura 2.10. Aplicaciones de IoT en la agricultura para crear una agricultura inteligente (Fuente: Mandal et al. (2024))

Las aplicaciones de la IoT en la agricultura pueden categorizarse de diferentes maneras, W. S. Kim et al. (2020) las divide en cuatro categorías principales: (a) sistemas de gestión, (b) sistemas de monitoreo, (c) sistemas de control y (d) maquinaria no tripulada, como se muestra Figura 2.11.

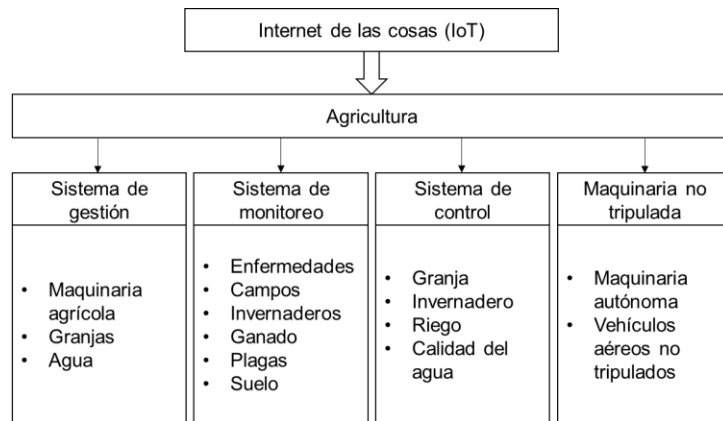


Figura 2.11. categorías de las aplicaciones de IoT en la agricultura (Fuente: W. S. Kim et al. (2020))

Por su lado Farooq et al. (2020), clasifican estas aplicaciones en tres dominios de estudio, que son la monitorización (70%), el seguimiento (5%) y el control (25%). Sus principales funciones incluyen el monitoreo y control del riego (16%), agricultura de precisión (16%), monitoreo del suelo (13%), monitoreo de la temperatura (12%), monitoreo de la humedad (11%), monitoreo y seguimiento de animales (11%), monitoreo y control del agua (7%), monitoreo de enfermedades (5%), monitoreo del aire (5%) y monitoreo de la fertilización (4%); tanto los dominios como las aplicaciones se muestran en la Figura 2.12

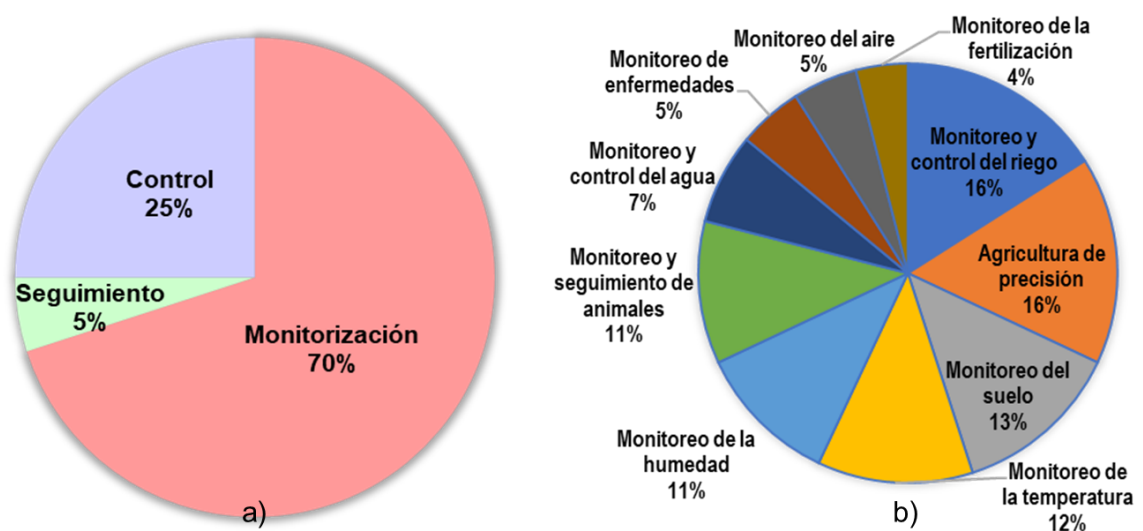


Figura 2.12. Dominios y aplicaciones del IoT en la agricultura (Fuente: Farooq et al. (2020))

La tecnología IoT depende del uso de sensores, los cuales se pueden convertir en sensores inalámbricos al conectarse a internet, generando una agricultura inteligente, permitiendo a los agricultores monitorear cultivos, animales, suelo y poder obtener información de forma remota. También con la ayuda de esta tecnología y el empleo de los sensores inalámbricos pueden realizar la evaluación del clima, el monitoreo de sequías, el riego, control de plagas y la predicción de los niveles de producción maximizando su rendimiento mediante el ajuste de su entorno, resolviendo así muchos problemas que enfrenta la agricultura convencional (Dhanaraju et al., 2022; Mandal et al., 2024). En relación con la agricultura inteligente, la Figura 2.13 muestra el orden de las principales aplicaciones, instalaciones y dispositivos.



Figura 2.13. Aplicaciones, instalaciones y dispositivos en la agricultura inteligente basada en IoT (Fuente: Dhanaraju et al. (2022))

Y respecto a la aplicación del IoT en el manejo del agua se enfocan en su calidad o contaminación mediante el monitoreo de su pH, temperatura y sustancias químicas (Farooq et al., 2020), además del riego inteligente, que de acuerdo con Dhanaraju et al. (2022), se basa en el índice de estrés hídrico del cultivo,

calculado a partir de datos de la cobertura vegetal, datos climáticos, sensores e imágenes satelitales en diferentes etapas de crecimiento. La información procedente de se relaciona para el cálculo de las necesidades hídricas, y las predicciones que utilizan los valores del índice de riego pueden utilizarse para cada parcela en función de la pendiente o la variabilidad del suelo mejorando la eficiencia en el uso del agua.

Mediante la tecnología IoT, se pueden seleccionar métodos de riego adecuados, que superan en eficiencia el método tradicional de riego por inundación, contribuyendo a resolver eficazmente el problema de la escasez de agua mejorando la resistencia de los cultivos y aumentando los rendimientos (Xu et al., 2022)

2.6.2 Arquitectura de un sistema IoT agrícola

W. S. Kim et al. (2020), indican que la arquitectura del IoT en la agricultura se puede dividir en tres capas:

- 1) **Capa de percepción para el reconocimiento:** Es la interfaz con el entorno físico, integrada por sensores, actuadores, controladores, identificación por radiofrecuencia y dispositivos instalados en diversas áreas, como el agua, granjas, cultivos, invernaderos y maquinaria agrícola, para detectar y recopilar diferentes parámetros físicos en tiempo real. La información recopilada por los sensores se procesa mediante el dispositivo integrado y se carga a la capa superior a través de la capa de red para la construcción de bases de datos y el análisis de macrodatos, la puerta de enlace local recibe los datos y los sube a la nube.
- 2) **Capa de red para la transmisión y recepción de datos:** Se encarga de la transmisión y recepción de datos; cuenta con un microprocesador o microcontrolador que procesa los datos recibidos en tiempo real desde la capa de percepción y los envía de forma remota a la capa de aplicación mediante una red de telecomunicaciones como 3G/4G/5G, Wi-Fi, Bluetooth, IEEE-802.11, NFC, GSM, ZigBee y GPRS; transmitiendo no solo distintos tipos de

datos sino también los comandos de control para que los dispositivos puedan activarse.

- 3) **Capa de aplicación para funciones agrícolas:** Es un dispositivo de procesamiento inteligente que aplica los datos procesados en la capa de red y constituye el nivel más alto de la arquitectura en la capa IoT; incluye diversos sistemas inteligentes, como la gestión de datos en la agricultura; el monitoreo y control de plantas, animales, maquinaria y granjas; la alerta temprana y el diagnóstico enfermedades y plagas; y el funcionamiento de maquinaria autónoma. Además, esta capa procesa y analiza datos, evalúa el sistema, predice tendencias futuras en el sistema, toma decisiones basadas en conjuntos de datos históricos y envía recomendaciones a los usuarios finales.

En la Figura 2.14 se muestran las diferentes capas que constituyen la arquitectura de un sistema IoT.

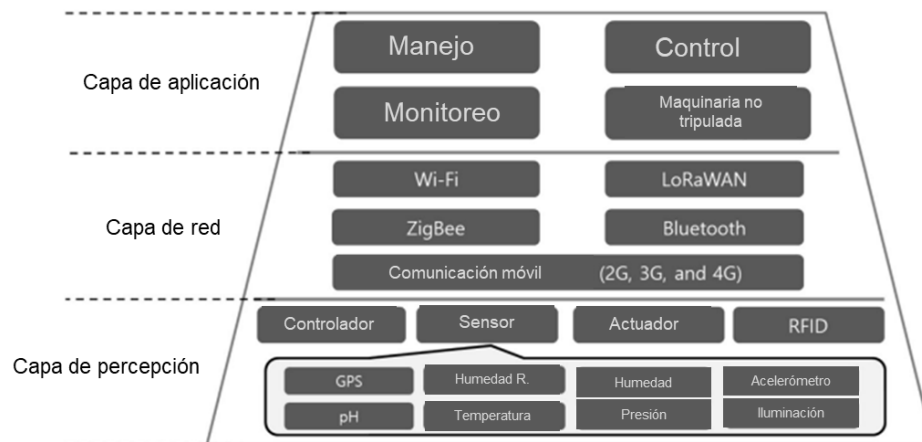


Figura 2.14. Capas que conforman la arquitectura del IoT (Fuente: W. S. Kim et al. (2020))

2.6.3 Monitoreo en Tiempo Real basado en IoT aplicado al agua

El envío de datos se realiza a través de una plataforma en la nube que permite agregar, visualizar, analizar y almacenar datos en vivo, de sensores conectados al microcontrolador y genera la salida de datos detectados en formato gráfico en la web (Pasha, 2016).

Las plataformas IoT pueden funcionar de forma compatible con muchos tipos de microcontroladores como Node MCU ESP8266, Arduino, Raspberry Pi y ESP32 a través de Internet. Las plataformas constan de tres componentes principales (Serikul et al., 2018):

- a) La aplicación, que se utiliza para controlar un dispositivo y mostrar datos en widgets;
- b) El servidor, que es un servicio en la nube responsable de todas las comunicaciones entre dispositivos inteligentes y cosas;
- c) Bibliotecas, que incluyen varios widgets como control de botones, formatos de visualización, notificaciones y gestión del tiempo que permiten a un dispositivo enviar datos obtenidos de un sensor para ser mostrado en una aplicación móvil de forma efectiva y manera conveniente.

Ante la creciente escasez de agua, se han desarrollado sistemas de gestión multi-inteligente basados en el IoT para el monitoreo y control del consumo (Q), los niveles de agua (H) en los embalses y sistemas de riego (W. S. Kim et al., 2020). Los sensores del IoT son herramientas idóneas para el monitoreo de ríos debido a su fácil instalación, bajo consumo energético y alta precisión, pueden proporcionar información completa para monitoreo y pronóstico ambiental eficaz, como es el caso de pronóstico de inundaciones (Yang & Chang, 2020). Así el IoT desempeña un papel fundamental en la captación, monitoreo y control del caudal, evaluación de las necesidades hídricas de los cultivos y optimización del suministro (Dhanaraju et al., 2022).

En los últimos años, se han realizado trabajos de investigación centrados en las redes de sensores para el monitoreo ambiental, especialmente en el ámbito de los sistemas de detección de inundaciones, tal como reportan Zakaria et al. (2023). En estos estudios emplearon varios sensores para recopilar información para el monitoreo de inundaciones, como el seguimiento de las precipitaciones o la medición del caudal de los ríos; donde el objetivo fue observar y analizar con precisión parámetros clave para mejorar la predicción de inundaciones, la alerta temprana y la gestión integral de desastre. Otro trabajo enfocado al monitoreo

hidráulico basado en IoT, presentado por Tomsett & Leyland (2019) quienes trabajaron en un Proyecto en China para el desvío del Río de Sur a Norte, en donde instalaron más de 100,000 sensores con 130 propósitos diferentes para monitorear la calidad del agua, infraestructura y seguridad, todos sus datos se suben a una infraestructura en la nube que se actualiza de forma gratuita con frecuencia de 5 minutos. Entre otros trabajos se pueden mencionar también a como Chang et al. (2018); Khan & Oberoi (2020); Sood et al. (2018) y Yang & Chang (2020), quienes realizaron trabajos de investigación para el monitoreo de ríos con el fin de predecir inundaciones mediante la recopilación de datos de sensores, que medían profundidades de inundación y otros parámetros hidrológicos como el caudal y el nivel del agua en tiempo real; todo esto enfocado al diseño de sistemas de alerta temprana de inundaciones. Por su parte Espinoza Ortiz et al. (2023) desarrollaron una sonda con sensores de bajo costo que se conectan a internet para determinar y monitorear el nivel piezométrico y temperatura del agua subterránea en pozos profundos.

Miller et al. (2023), presentan un diagrama de flujo base, presentado en la Figura 2.15 que muestra el proceso o funcionamiento de un sistema IoT para el monitoreo del agua.

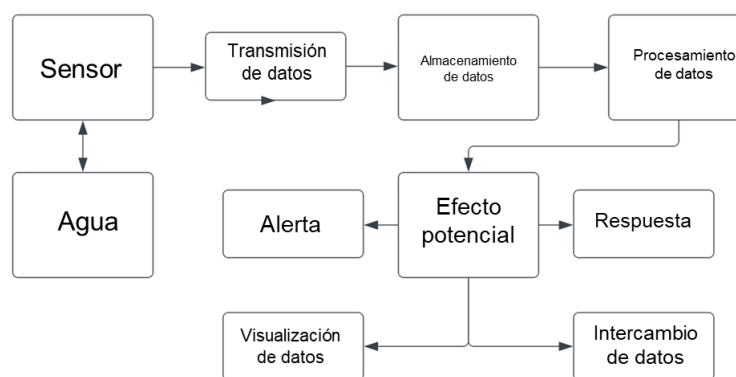


Figura 2.15. Diagrama de flujo sobre el posible funcionamiento de un sistema IoT para el monitoreo del agua (Fuente: Miller et al. (2023))

Si bien existe una amplia investigación en el desarrollo de sistemas de medición de niveles de agua con bajo costo, la revisión de literatura revela que la mayoría de los estudios se centra en la calidad del agua, la aplicación de riego inteligente

y en menor cantidad en medición de caudales o niveles de agua en ríos para prevención de desastres. Estos estudios han ayudado en monitorear y controlar variables que intervienen en la agricultura y tomar decisiones para la gestión del recurso hídrico. Sin embargo, las aplicaciones aún son limitadas, si bien existe una amplia investigación en el desarrollo de sistemas de medición de niveles de agua en ríos con sensores de bajo costo aún falta su implementación para monitoreo en tiempo real basado en IoT. Es decir, existe una brecha significativa: si bien, se estima el nivel del agua (H), no se cuantifica automáticamente el caudal (Q) circulante en tiempo real.

Esta limitación resalta la necesidad de desarrollar dispositivos de bajo costo, precisos y conectados a internet que no solo midan el nivel de agua (H) sino que automaticen la conversión a caudal (Q) en tiempo real ayudando en la toma de decisiones para el uso y manejo eficiente del recurso hídrico.

2.7 LITERATURA CITADA

- Aliew, F. (2022). An Approach for Precise Distance Measuring Using Ultrasonic Sensors. *Engineering Proceedings*, 24(1), 8. <https://doi.org/10.3390/IECMA2022-12901>
- Bae, I., & Ji, U. (2019). Outlier Detection and Smoothing Process for Water Level Data Measured by Ultrasonic Sensor in Stream Flows. *Water*, 11(5), 951. <https://doi.org/10.3390/w11050951>
- Basílico, G. O. (2023). DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA PILOTO DE UN LIMNÍMETRO DIGITAL DE BAJO COSTO. *Revista de Ingeniería Industrial y Mecánica*, 8(14). <http://revistas.unlz.edu.ar/ojs/index.php/rriym/article/view/94>
- Bohn, D. A. (1988). Environmental Effects on the Speed of Sound. *Journal of the Audio Engineering Society*, 36(4), 223–231.
- Bos, M. G. (1985). *Long-throated flumes and broad-crested weirs*. Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/78818>
- Bos, M. G., Clemmens, A. J., & Replogle, J. A. (1986). Design of long-throated structures for flow measurement. *Irrigation and Drainage Systems*, 1(1), 75–91. <https://doi.org/10.1007/BF01422979>

- Bos, M. G. (1989). *Discharge measurement structures* (Vol. 20). International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI).
- Bos, M. G., Replogle, J. A., & Clemmens, A. J. (1984). *Flow measuring flumes for open channel systems*. John Wiley and Sons Inc.
- Braithwaite, J. O. (2008). Evaluación de técnicas y métodos para aforar canales. [Tesis de Maestría] Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000636363>
- Brigido-Morales, J. G. (2022). *Análisis de una propuesta de aforador de garganta larga modificado para flujo con sedimentos*. [Tesis Doctoral]. Universidad Autónoma Chapingo. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/123456789/1769>
- Brigido-Morales, J. G., Carrillo-García, M., Prado-Hernández, J. V., & Flores-Velázquez, J. (2023). Hydraulic analysis of a long-throated flume for sediment-laden flow using CFD. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 15(2), 3–22. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2022.11.090>
- Carrillo-Garcia, M. (1999). *Sediment-resistant flume for hydrologic measurements* [Thesis of Doctor of Philosophy, University of Arizona]. <https://repository.arizona.edu/handle/10150/289054>
- Castro-Orgaz, O., & Mateos, L. (2013). Water Discharge Measurement in Agricultural Catchments Using Critical Depth Flumes Affected by Sediment Deposition. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774)
- Catsamas, S., Shi, B., Wang, M., Xiao, J., Kolotelo, P., & McCarthy, D. (2023). A Low-Cost Radar-Based IoT Sensor for Noncontact Measurements of Water Surface Velocity and Depth. *Sensors*, 23(14), 6314. <https://doi.org/10.3390/s23146314/S1>
- Chang, L. C., Chang, F. J., Yang, S. N., Kao, I. F., Ku, Y. Y., Kuo, C. L., & Amin, I. M. Z. bin M. (2018). Building an Intelligent Hydroinformatics Integration Platform for Regional Flood Inundation Warning Systems. *Water*, 11(1), 9. <https://doi.org/10.3390/w11010009>
- Chow, V. Te. (1988). *Open-Channel Hydraulics* (reimpresion). McGraw-Hill.
- Clemmens, A. J., Bos, M. Gijsberthus., & Replogle, J. A. (1993). *FLUME design and calibration of long - throated measuring flumes: version 3.0* (Vol. 54). International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). <https://edepot.wur.nl/332345>
- Clemmens, A. J., Wahl, T. L., Bos, M. G., & Replogle, J. A. (2001). *Water measurement with flumes and weirs: Vol. Publication 58*. International

Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands

- Cruz, K. M. S. D., Ella, V. B., Suministrado, D. C., Pereira, G. S., & Agulto, E. S. (2022). A Low-Cost Wireless Sensor for Real-Time Monitoring of Water Level in Lowland Rice Field under Alternate Wetting and Drying Irrigation. *Water*, 14(24), 4128. <https://doi.org/10.3390/w14244128>
- Dhanaraju, M., Chenniappan, P., Ramalingam, K., Pazhanivelan, S., & Kaliaperumal, R. (2022). Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture. *Agriculture*, 12(10), 1745. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101745>
- D.O.F. (2018). *Norma Mexicana: NMX-AA-179-SCFI-2018 Medición de volúmenes de aguas nacionales usados, explotados o aprovechados*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/714461/2_NMX-AA-179-SCFI-2018.pdf
- Espinoza Ortiz, M., Apún Molina, J. P., Belmonte Jiménez, S. I., Herrera Barrientos, J., Peinado Guevara, H. J., & Santamaria Miranda, A. (2023). Development of Low-Cost IoT System for Monitoring Piezometric Level and Temperature of Groundwater. *Sensors*, 23(23), 9364. <https://doi.org/10.3390/s23239364>
- Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Umer, T., & Zikria, Y. Bin. (2020). Role of IoT Technology in Agriculture: A Systematic Literature Review. *Electronics*, 9(2), 319. <https://doi.org/10.3390/electronics9020319>
- Fisher, D. K., & Sui, R. (2013). An inexpensive open-source ultrasonic sensing system for monitoring liquid levels. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(4), 328–334. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2343>
- Guyard, H., Prost-Boucle, S., Sudre, J., Moreau, S., Imig, A., Favreau, G., Quatela, V., & Clement, R. (2025). An open source ultrasonic flowmeter for monitoring the input/output flow rates of wastewater treatment plants. *HardwareX*, 21, e00613. <https://doi.org/10.1016/J.OHX.2024.E00613>
- Hameed, A. Q., Elameer, A. S., & Abbod, A. A. (2008). Oil Tank Prototype based on Wireless Communication-Controller System using IoT. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 6(05), 2294–2301. www.irjet.net
- Hemr, O., Kupec, P., Čech, P., & Deutscher, J. (2024). The response of forested upland micro-watersheds to extreme precipitation in a precipitation abundant year. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(4), 2627–2640. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04766-w>

- Jo, B., & Baloch, Z. (2017). Internet of Things-Based Arduino Intelligent Monitoring and Cluster Analysis of Seasonal Variation in Physicochemical Parameters of Jungnangcheon, an Urban Stream. *Water*, 9(3), 220. <https://doi.org/10.3390/w9030220>
- Khanh, Q. V., Hoai, N. V., Manh, L. D., Le, A. N., & Jeon, G. (2022). Wireless Communication Technologies for IoT in 5G: Vision, Applications, and Challenges. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022(1), 3229294. <https://doi.org/10.1155/2022/3229294>
- Khan, U. I., & Oberoi, D. S. (2020). A secure IoT based flood warning system using elliptical curve cryptography. *Indian Journal of Science and Technology*, 13(21), 2080–2093. <https://doi.org/10.17485/IJST/v13i21.73>
- Kim, T., Kim, J., & Kim, E. (2024). Ultrasonic Sensor-based Water Leveling for Three-dimensional Water Phantom: Prototype Development. *Journal of Medical Physics*, 49(3), 387–393. https://doi.org/10.4103/jmp.jmp_60_24
- Kim, W. S., Lee, W. S., & Kim, Y. J. (2020). A Review of the Applications of the Internet of Things (IoT) for Agricultural Automation. *Journal of Biosystems Engineering*, 45(4), 385–400. <https://doi.org/10.1007/s42853-020-00078-3>
- Komarizadehasl, S., Mobaraki, B., Ma, H., Lozano-Galant, J. A., & Turmo, J. (2022). Low-Cost Sensors Accuracy Study and Enhancement Strategy. *Applied Sciences* 2022, 12(6), 3186. <https://doi.org/10.3390/app12063186>
- Koval, L., Vaňuš, J., & Bilík, P. (2016). Distance Measuring by Ultrasonic Sensor. *IFAC-PapersOnLine*, 49(25), 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.026>
- Kumar, A., Sarangi, A., Singh, D. K., Dash, S., & Mani, I. (2023). Evaluation of Ultrasonic Sensor for Flow Measurement in Open Channel. *Journal of Scientific & Industrial Research (JSIR)*, 82(10), 1091–1099. <https://doi.org/10.56042/jsir.v82i10.2613>
- Langhammer, J., & Česák, J. (2016). Applicability of a Nu-Support Vector Regression Model for the Completion of Missing Data in Hydrological Time Series. *Water*, 8(12), 560. <https://doi.org/10.3390/W8120560>
- Mandal, S., Yadav, A., Panme, F. A., Devi, K. M., & Kumar S.M., S. (2024). Adaption of smart applications in agriculture to enhance production. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100431. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100431>
- Masoudimoghaddam, M., Yazdi, J., & Shahsavandi, M. (2025). A low-cost ultrasonic sensor for online monitoring of water levels in rivers and channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 102, 102777. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102777>

- Miller, M., Kisiel, A., Cembrowska-Lech, D., Durlik, I., & Miller, T. (2023). IoT in Water Quality Monitoring—Are We Really Here? *Sensors*, 23(2), 960. <https://doi.org/10.3390/s23020960/S1>
- Moradi, S., Noshahri, A. G., Barati, R., Esmaili, K., & Atashi, V. (2025). Experimental study of crump weir for sediment transport and flow measurement in sediment-laden rivers. *Scientific Reports*, 15(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00404-9>
- Morgan, E. J. (2014, noviembre 16). *HC-SR04 Ultrasonic Sensor | Alldatasheet*. <https://www.bitmi.ro/domains/bitmi.ro/files/files/bitmi-datasheet-senzor-ultrasonic-hc-sr04-2702.pdf>
- Mvemba, P. K., Band, S. K. G. G., Lay-Ekuakille, A., & Giannocco, N. I. (2018). Advanced acoustic sensing system on a mobile robot: Design, construction and measurements. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 21(2), 4–9. <https://doi.org/10.1109/MIM.2018.8327971>
- Nasution, T. H., Siagian, E. C., Tanjung, K., & Soeharwinto. (2018). Design of river height and speed monitoring system by using Arduino. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 308(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/308/1/012031>
- Ortega-Gaucin, D. (2012). *Hidrometría Básica Aplicada a la Operación de Distritos y Unidades de Riego* (1ra ed.). Instituto del Agua del estado de Nuevo León.
- Panagopoulos, Y., Papadopoulos, A., Poulis, G., Nikiforakis, E., & Dimitriou, E. (2021). Assessment of an Ultrasonic Water Stage Monitoring Sensor Operating in an Urban Stream. *Sensors*, 21(14), 4689. <https://doi.org/10.3390/s21144689>
- Panda, K. G., Agrawal, D., Nshimiyimana, A., & Hossain, A. (2016). Effects of environment on accuracy of ultrasonic sensor operates in millimetre range. *Perspectives in Science*, 8, 574–576. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.06.024>
- Pasha, S. (2016). Thingspeak Based Sensing and Monitoring System for IoT with Matlab Analysis. *International Journal of New Technology and Research (IJNTR)*, 2(6), 19–23. www.ijntr.org
- Pereira, T. S. R., de Carvalho, T. P., Mendes, T. A., & Formiga, K. T. M. (2022). Evaluation of Water Level in Flowing Channels Using Ultrasonic Sensors. *Sustainability*, 14(9), 5512. <https://doi.org/10.3390/su14095512>
- Quy, V. K., Hau, N. Van, Anh, D. Van, Quy, N. M., Ban, N. T., Lanza, S., Randazzo, G., & Muzirafuti, A. (2022). IoT-Enabled Smart Agriculture:

- Architecture, Applications, and Challenges. *Applied Sciences*, 12(7), 3396. <https://doi.org/10.3390/app12073396>
- Ramírez-Luna, J., Olvera-Aranzolo, E., Mercado-Escalante, R., Ruiz-Carmona, V. M., de León-Mojarro, B., Perea-Estrada, H., & Ortega-Armendáriz, R. (2010). MSC-AGL, sistema de apoyo a la integración de proyectos ejecutivos de aforadores de garganta larga. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1(3), 109–118. <https://doi.org/https://doi.org/10.24850/j-tyca-2010-03-07>
- Ranieri, C. M., Foletto, A. V. K., Garcia, R. D., Matos, S. N., Medina, M. M. G., Marcolino, L. S., & Ueyama, J. (2024). Water level identification with laser sensors, inertial units, and machine learning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 127, 107235. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107235>
- Riaz, W., Ahmad, Z., & Muhammad, A. (2016). A Smart Metering Approach towards Measuring Flows in Small Irrigation Outlets. *Procedia Engineering*, 154, 236–242. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.459>
- Sahoo, A. K., & Udgata, S. K. (2020). A Novel ANN-Based Adaptive Ultrasonic Measurement System for Accurate Water Level Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(6), 3359–3369. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2939932>
- Sahoo, A. K., & Udgata, S. K. (2022). A novel fuzzy inspired machine learning framework for relative humidity estimation using time-of-flight of ultrasonic sensor. *Measurement*, 195, 111035. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111035>
- Serikul, P., Nakpong, N., & Nakjuatong, N. (2018). Smart Farm Monitoring via the Blynk IoT Platform: Case Study: Humidity Monitoring and Data Recording. *International Conference on ICT and Knowledge Engineering, 2018-November*, 70–75. <https://doi.org/10.1109/ICTKE.2018.8612441>
- Sood, S. K., Sandhu, R., Singla, K., & Chang, V. (2018). IoT, big data and HPC based smart flood management framework. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 20, 102–117. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2017.12.001>
- Stočas, M., Vaněk, J., Masner, J., & Pavlík, J. (2016). Internet of Things (IoT) in Agriculture - Selected Aspects. *AGRIS On-Line Papers in Economics and Informatics*, 8(1), 83–88. <https://doi.org/10.22004/AG.ECON.233969>
- Tomsett, C., & Leyland, J. (2019). Remote sensing of river corridors: A review of current trends and future directions. *River Research and Applications*, 35(7), 779–803. <https://doi.org/10.1002/rra.3479>

- Truong, T. P., Nguyen, D. T., Huynh, T., & Thai Duong, B. (2021). Design and Implementation of an IoT-based River Water Salinity Monitoring System Using MSP432. *Journal of Physics: Conference Series*, 1878(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012023>
- Wahl, T. L., Clemmens, A. J., Replogle, J. A., & Bos, M. G. (2005). Simplified design of flumes and weirs. *Irrigation and Drainage*, 54(2), 231–247. <https://doi.org/10.1002/ird.160>
- Wei, Y. (2024). Applications of Ultrasonic Sensors: A Review. *Applied and Computational Engineering*, 99(1), 144–148. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/99/20251773>
- Xu, J., Gu, B., & Tian, G. (2022). Review of agricultural IoT technology. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 6, 10–22. <https://doi.org/10.1016/J.AIIA.2022.01.001>
- Yang, S. N., & Chang, L. C. (2020). Regional Inundation Forecasting Using Machine Learning Techniques with the Internet of Things. *Water*, 12(6), 1578. <https://doi.org/10.3390/w12061578>
- Zakaria, M. I., Jabbar, W. A., & Sulaiman, N. (2023). Development of a smart sensing unit for LoRaWAN-based IoT flood monitoring and warning system in catchment areas. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 3, 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.005>
- Zhao, J. C., Zhang, J. F., Feng, Y., & Guo, J. X. (2010). The study and application of the IOT technology in agriculture. *Proceedings - 2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, ICCSIT 2010*, 2, 462–465. <https://doi.org/10.1109/ICCSIT.2010.5565120>
- Zhmud, V. A., Kondratiev, N. O., Kuznetsov, K. A., Trubin, V. G., & Dimitrov, L. V. (2018). Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics. *Journal of Physics: Conference Series*, 1015(3), 032189. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032189>

3 AUTOMATIZACIÓN DE LA MEDICIÓN Y MONITOREO EN TIEMPO REAL, BASADO EN IoT, DE UN AFORADOR DE GARGANTA LARGA

3.1 Resumen

La medición en corrientes de flujo a superficie libre es esencial para la gestión eficiente del recurso hídrico, la cual debe ser lo más exacta. Con el avance en la instrumentación electrónica y tecnología de sensores se han desarrollado sistemas más precisos y eficientes. Este trabajo presenta el diseño, desarrollo y validación de un sistema automatizado de medición y monitoreo en tiempo real, basado en tecnología IoT (Internet de las Cosas), aplicado a un aforador de garganta larga modificado para flujo con sedimentos, ubicado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Autónoma Chapingo. El sistema integra tres sensores ultrasónicos HC-SR04 para medir la profundidad hidráulica, un sensor DHT22 para temperatura y humedad relativa, un módulo RTC, un lector microSD y un microcontrolador ESP32 con conectividad WiFi y Bluetooth. Los datos se procesan, almacenan en una microSD, se visualizan en una pantalla OLED y se transmiten cada 15 segundos a la plataforma ThingSpeak, además de poder descargarse localmente vía Bluetooth. La alimentación proviene de una batería ácido-plomo recargable mediante un panel solar. Se determinaron ecuaciones experimentales para el aforador en régimen subcrítico y supercrítico, obteniendo coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.99. La validación se realizó comparando las mediciones del sistema con mediciones manuales (limnímetros) y un vertedor triangular como patrón de caudal, y como resultado se alcanzaron errores MAPE de 4.35% en profundidad, 5.44% en caudal respecto a limnímetros y 2.17% respecto al vertedor, cumpliendo con la norma NMX-AA-179-SCFI-2018. El sistema demostró precisión y robustez, siendo una alternativa técnica y económica viable para la medición, procesamiento y almacenamiento de datos hidráulicos. Su operación automática y su capacidad de monitoreo remoto permiten generar hidrogramas en tiempo real y ayudar en la toma de decisiones en la gestión del agua, contribuyendo a la modernización de la infraestructura hidráulica.

Palabras clave: aforador de garganta larga, flujo con sedimentos, sensores ultrasónicos, IoT, monitoreo en tiempo real, ThingSpeak

Tesis de Maestría en Ingeniería
Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Rubén Velasco Hernández
Director: Ph. D. Mauricio Carrillo García

3.2 Introducción

La medición precisa del caudal es fundamental para lograr una gestión eficiente de los recursos hídricos, el control de inundaciones y el mantenimiento de cuerpos de agua, aunque su determinación representa un desafío técnico (Bae & Ji, 2019; Pereira et al., 2024). Para afrontar este reto se emplean estructuras aforadoras adecuadas (Palacios & Exebio, 2012), por ejemplo, los aforadores de garganta larga son estructuras idóneas para estimar el caudal a partir de la medida de la profundidad del flujo, ajustándose a la ecuación 3.1 que es característica de vertedores (Clemmens et al., 2001):

$$Q = k \cdot h^n \quad (3.1)$$

donde Q es el caudal ($L \cdot s^{-1}$), h es la profundidad del flujo (cm) y k es una constante dependiente de la geometría de la estructura y variables de flujo, y n es el exponente de la ecuación general de vertedores.

Tradicionalmente, la medición de la profundidad de flujo (h) realizan de forma manual, un proceso laborioso y propenso a errores que limita la confiabilidad de los datos (Fisher & Sui, 2013). Los avances en instrumentación y tecnología de sensores, han permitido desarrollar sistemas más precisos y eficientes, capaces de lograr el monitoreo en tiempo real del nivel del agua, ayudando a elaborar planes y toma de decisiones sólidas y eficientes en la gestión eficiente del agua (Braithwaite, 2008; Cruz et al., 2022). En particular los sensores ultrasónicos se utilizan comúnmente como métodos accesibles para medir distancias sin contacto, operando sobre el principio de tiempo de vuelo de un pulso de sonido que se transmite hacia un objeto para ser reflejado hacia el sensor (Fisher & Sui, 2013).

La adquisición de datos en tiempo real permite obtener una respuesta rápida y precisa para prevenir, reducir o controlar efectos del agua (Rocchi et al., 2019); sin embargo, no se puede asegurar el monitoreo continuo y eficiente libre errores. Los recientes avances en tecnología han mejorado la adquisición de datos y las técnicas de análisis, así como los modos de intercambio de información con las

personas interesadas, basándose en un enfoque de Internet de las cosas (IoT) (Jo & Baloch, 2017); una tecnología que conecta las personas con cosas y permite la comunicación en tiempo real y el intercambio de datos. El IoT se utiliza para registrar, analizar y evaluar datos importantes para la toma de decisiones, además, se puede combinar de forma compatible con teléfonos inteligentes (Serikul et al., 2018).

Si bien, existen investigaciones previas sobre la medición de variables hidráulicas, son escasos los trabajos que abordan la automatización integral de la toma de datos y el monitoreo en tiempo real como se presenta en este trabajo. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue el desarrollo de un sistema automatizado para medir variables hidráulicas en un aforador de garganta larga con flujo de agua con arrastre de sedimentos (AGLFS), implementando un sistema de monitoreo en tiempo real basado en IoT, con capacidad de almacenamiento y supervisión remota de datos.

3.3 Materiales y Métodos

El estudio se desarrolló en tres etapas: la primera permitió encontrar la curva de calibración o ajuste que relaciona el caudal con la profundidad hidráulica en las secciones de entrada y sección supercrítica (rápida) de un modelo de AGLFS, la segunda consistió en diseñar y desarrollar el sistema de medición y monitoreo, y la tercera fue la evaluación y validación experimental del sistema desarrollado mediante pruebas en el AGLFS, el procedimiento se describe en los siguientes apartados.

3.3.1 Descripción del AGLFS con flujo supercrítico

El AGLFS utilizado fue diseñado y construido para condiciones de flujo supercrítico. Construido en acrílico en un canal basculante alimentado por una bomba hidráulica; ubicado en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH). La estructura consta de una sección de entrada o de aproximación, de una garganta (sección de control), una rápida a la salida y dos pozos de medición, se muestra en la Figura 3.1. Para la medición manual del

caudal cuenta con limnómetros de punta a nivel de la superficie para medir las profundidades en el régimen supercrítico y subcrítico. Además, aguas abajo del aforador se tiene un vertedor triangular como patrón referencia o de medida.

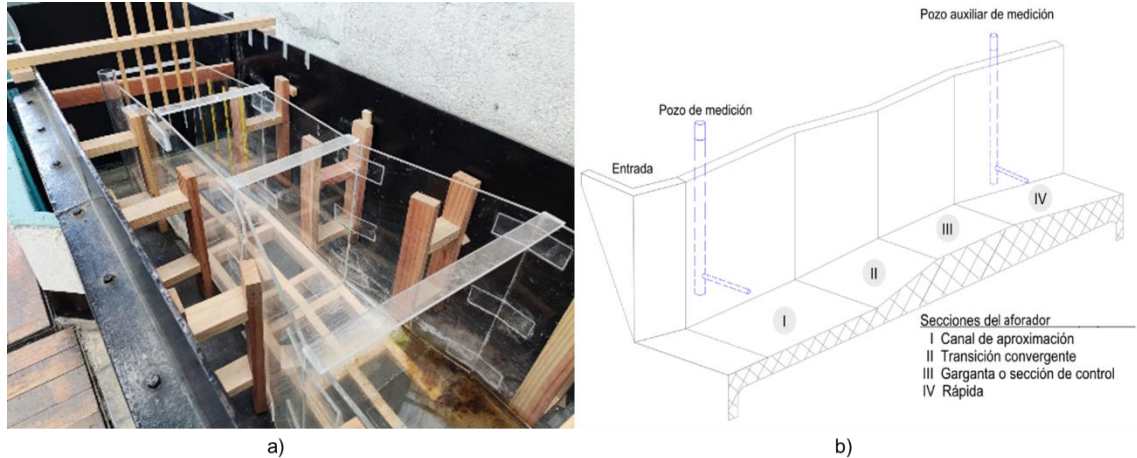


Figura 3.1. Aforador de garganta larga con rápida a la salida y dos pozos de medición, (a) modelo físico, (b) secciones (Fuente: Brigido-Morales (2022)).

De acuerdo con Brigido-Morales et al. (2023) el AGLFS es de geometría rectangular (por su mejor desempeño) fue diseñado para inducir flujo supercrítico y consta de las siguientes secciones : un canal de aproximación (0.5 m de longitud, 0.40 m de ancho y 0.4 m de profundidad), una transición convergente centrada al eje y que se eleva de forma gradual 0.05 m por encima del fondo (0.3 m de largo, 0.25 m de base y 0.35 m de profundidad), una sección de control o garganta (0.35 m de longitud, 0.25 m de ancho y 0.35 m de profundidad) y una rápida con 0.25 m de base, 0.35 m de profundidad y longitud horizontal de 0.5 m con pendiente del 10%.

La relación teórica entre el caudal (Q) y la profundidad del flujo (h) en el aforador, previamente determinada con WinFlume® y de simulaciones hidráulicas en ANSYS® (Brigido-Morales et al., 2024) está dada por la Ecuación 3.2 (entrada del aforador) y la Ecuación 3.3 (mitad de la rápida):

$$Q=0.04 \cdot h^{1.5378} \quad (3.2)$$

$$Q=1.8382 \cdot h^{1.3155} \quad (3.3)$$

donde Q es el caudal ($L \cdot s^{-1}$) y h es la profundidad del flujo (cm).

Para validar experimentalmente estas relaciones y/o determinar la relación real entre el caudal y la profundidad del flujo, se midió simultáneamente las profundidades del flujo, con limnímetros de punta en la entrada del AGLFS en régimen subcrítico y con sensores ultrasónicos en la rápida en régimen supercrítico, bajo diferentes caudales. Se calculó el caudal con la ecuación 3.4 correspondiente al vertedor triangular de aguas abajo, por lo que se determinó de forma simultánea la carga sobre la cresta del vertedor.

$$Q = 0.0136 \cdot h^{2.5125} \quad (3.4)$$

donde Q es el caudal ($L \cdot s^{-1}$) y h es la profundidad con respecto a la cresta del vertedor (cm)

Con los valores del caudal y profundidad del flujo, se obtuvieron las curvas caudal-profundidad (Q-h). experimentales que sirvieron como base para la automatización.

3.3.2 Desarrollo del sistema de medición y de monitoreo, diseño del hardware

El sistema de medición y monitoreo se compone de dos unidades principales: 1) la de adquisición, comunicación y transferencia de datos, y 2) la de alimentación. Consta de sensores para medir y calcular en tiempo real la profundidad del flujo (cm), la temperatura ($^{\circ}C$) y la humedad relativa (%). Las especificaciones y características de los componentes y sensores utilizados en el desarrollo del sistema se enlistan en el Cuadro 3.1 y Cuadro 3.2.

Cuadro 3.1. Especificaciones de los sensores utilizados

Componente	Rango de medición	Precisión	Resolución	Voltaje	Corriente
HC-SR04	2-400 cm	± 3 mm		5 Vcc	15 mA
DHT22	-40 $^{\circ}C$ a 125 $^{\circ}C$.	± 0.5 $^{\circ}C$	0.1 $^{\circ}C$.	3.3 a 5.5 Vcc	2.5 mA
	0% hasta 100%	$\pm 2\%$	0.10%		

Cuadro 3.2. Componentes electrónicos del sistema de medición dadas por el fabricante

Componente	Modelo	Descripción
Microcontrolador	ESP32-WROOM-32 SMD	Placa de desarrollo de 38 pines, con Módulo Wifi de 802.11n @ 2.4 GHz y Bluetooth; 30 pines GPIO, que incluyen: 3 UART, 3 SPI, 2 I2C (2 I2S), Convertidor ADC de 12 canales, Convertidor DAC de 2 canales.
Pantalla OLED	SSD1312	Display Oled I2C de 2.4", tiene una resolución de 128×64 píxeles. Utiliza el protocolo de comunicación I2C (Inter-Integrated Circuit).
Reloj RTC	DS3231	Lleva el registro de fecha y hora en tiempo real, su voltaje de alimentación: es de 3.3V a 5V DC, Interfaz de comunicación: I2C.
Lector de microSD		Permite insertar una tarjeta micro SD y comunicarse con microcontroladores mediante el protocolo SPI (MOSI, MISO, SCK y CS).
Batería recargable Panel solar	BR-1209	Batería sellada de ácido-plomo de 12Vcc 9Ah. Fotocelda solar de 50W, 18V y 2.78A.
Controlador de carga	YJSS30	Controlador PWM de 30A, permite la conexión de paneles solares de 12 V y 24 V, recargar baterías de ácido-plomo y alimentar cargas conectadas al controlador, tiene dos puertos USB de salida de 5 Vcc y 2A.

Arquitectura y funcionamiento del sistema

El sistema tiene tres sensores ultrasónicos HC-SR04, que miden la distancia del sensor a la superficie del agua, un sensor DHT22 que mide la temperatura y humedad relativa del ambiente, y una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ESP32; con un módulo de reloj, un módulo para microSD; y una pantalla OLED.

El funcionamiento del sistema es de la siguiente manera:

1. El microcontrolador ESP32 inicializa los sensores de acuerdo con el código programado.
2. Los sensores miden o calculan las variables de profundidad hidráulica, temperatura y humedad relativa.

3. Los sensores comunican en tiempo real al microcontrolador los valores medidos.
4. El microcontrolador muestra los datos en la pantalla OLED, y los almacena en la micro SD con su marca de tiempo generada por un módulo RTC o mediante la red Wifi.
5. El módulo Wifi de la ESP32 le posibilita conectarse a internet y al mismo tiempo que guarda los datos recopilados los envía a la plataforma IoT (ThingSpeak) cada 15 segundos subiéndolos a la nube. También por medio del Bluetooth se puede conectar con un dispositivo móvil y a través de una aplicación de adquisición de datos disponible se descarga el archivo generado con los datos de medición.
6. Los datos se pueden visualizar y monitorear por el usuario, a través de internet en una interfaz web y/o por una aplicación móvil.

En la Figura 3.2 se muestra la unidad de adquisición, comunicación y transferencia de datos, también el diagrama de funcionamiento que sigue el sistema para medir y monitorear las variables.

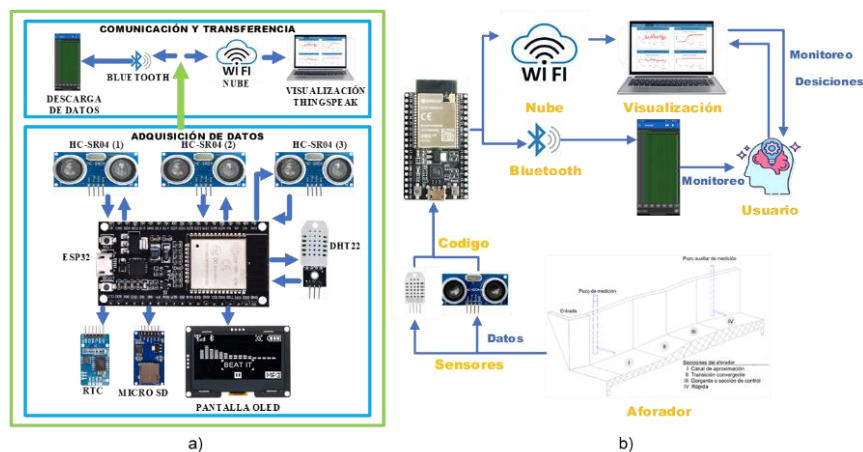


Figura 3.2. a) Unidad de adquisición, de comunicación y transferencia de datos, b) diagrama general de funcionamiento del sistema IoT.

Toda la energía requerida por el sistema se suministra por la unidad de alimentación, compuesta por una batería de ácido-plomo de 12V y 9Ah, que es recargada por un panel solar de 50W, 18V y 2.78A mediante un controlador de carga que cuenta con dos salidas USB donde se conecta la placa ESP32.

En la Figura 3.3 se muestra un esquema del diagrama eléctrico de la conexión de los sensores y módulos a la ESP32, así como las dos unidades que conforman el hardware. La electrónica se encapsuló en un gabinete metálico, donde la pantalla OLED muestra las variables de interés; del cual se extrajeron los cables de conexión con los sensores y la alimentación con el panel solar.

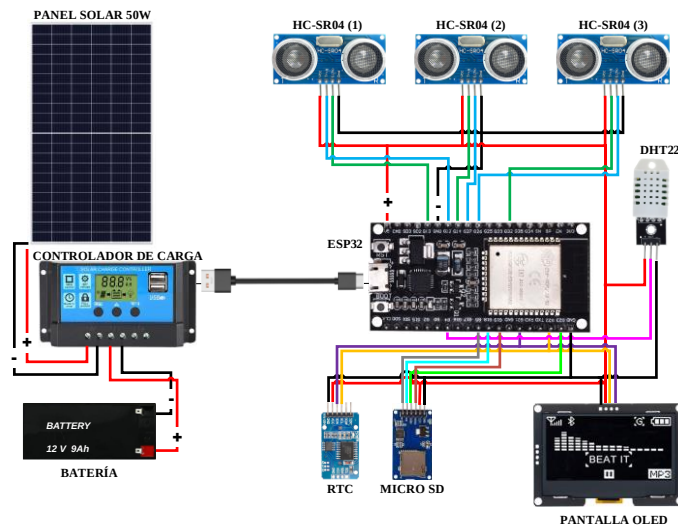


Figura 3.3. Diagrama eléctrico de módulos y sensores usados en el sistema de medición.

Proceso de medición de la profundidad hidráulica

Para medir el nivel de la profundidad del flujo, se utilizaron sensores ultrasónicos, comúnmente utilizado para la medición de distancias (Panda et al., 2016), se eligió el sensor ultrasónico HC-SR04, de los cuales se emplearon tres, por su bajo costo, disponibilidad y porque funciona sin contacto, lo que reduce problemas de mantenimiento y se evita la contaminación o daños causados por el contacto directo con el agua (Ranieri et al., 2024; Zakaria et al., 2023). Morgan (2014), menciona que este sensor mide distancias por medio de dos transductores: un micrófono y un altavoz. Su altavoz genera pulsos de alta frecuencia que rebotan en los objetos cercanos y son reflejados hacia el sensor y captados por el micrófono. Este sensor tiene cuatro pines: VCC, GND, TRIG y ECHO. El pin TRIG envía una onda ultrasónica pasando a estado alto (activarse) durante 10 μ s; después de enviar la onda sónica, el pin ECHO pasa a estado alto, y permanece así hasta que la onda vuelva a golpear el sensor, se calcula la

distancia usando el tiempo en que el pin ECHO permanece en alto, que es el tiempo que el sonido pasó viajando y con la velocidad del sonido, se determina la distancia a la que se encuentra el objeto. Para calcular la distancia hasta donde rebota la señal se parte de la ecuación 3.5:

$$\text{Distancia} = \frac{\text{tiempo} \cdot \text{velocidad del sonido}}{2} \quad (3.5)$$

Sin embargo Bohn (1988); Ranieri et al. (2024) y Sahoo & Udgata (2022) mencionan que el rendimiento del sensor puede verse afectado por factores climáticos como la lluvia, nieve, niebla, polvo y los cambios de temperatura y humedad del ambiente. Esto se debe a que la velocidad del sonido, que normalmente se asume constante, pero varía por las condiciones climáticas, ya que depende en gran medida de la temperatura del aire y es ligeramente afectada por la humedad, por lo que Fisher & Sui (2013); Panda et al. (2016); Ranieri et al. (2024) y Sahoo & Udgata (2022), indican que la velocidad del sonido se puede calcular con mayor precisión, determinando la velocidad instantánea en función de dos parámetros principales, la temperatura y la humedad relativa; entonces se calcula mediante la ecuación 3.6, haciéndole una corrección por temperatura y humedad según Hameed et al. (2008); Mvemba et al. (2018) y Komarizadehasi et al. (2022).

$$v=331.4+(0.606 \cdot T) + (0.0124 \cdot H) \quad (3.6)$$

donde v es la velocidad instantánea del sonido ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 331.4 es la velocidad del sonido a 0°C y 0% de humedad; T es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y H es la humedad relativa (%).

Para realizar la corrección es necesario contar con estas variables. El sensor DHT22 se usa para medir la temperatura y humedad relativa del ambiente, en un solo punto.

De acuerdo con Guyard et al. (2025), el sensor ultrasónico se coloca sobre la estructura aforadora, a una distancia mayor que la zona muerta de medición del

sensor. La profundidad hidráulica se obtiene al restar la distancia medida por el sensor a la altura de instalación del sensor o posición de la superficie de emisión ultrasónica del sensor respecto al fondo o rasante de la estructura, se emplea la ecuación 3.7.

$$h = D - d \quad (3.7)$$

donde h es la profundidad hidráulica (cm), D es la altura a la que está instalado el sensor (cm) y d es la distancia medida por el sensor al nivel del agua (cm).

En la Figura 3.4 se muestra un esquema del proceso de medición.

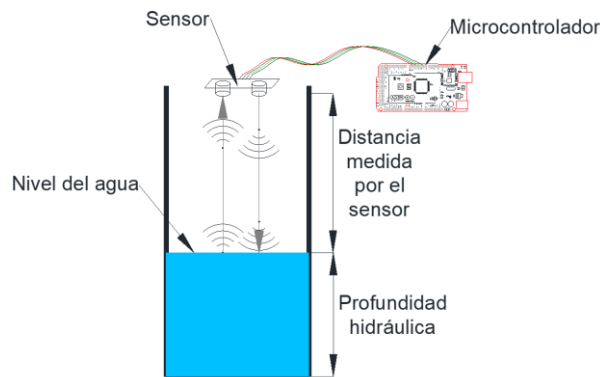


Figura 3.4. Representación del proceso para medir la distancia del nivel del agua y calcular la profundidad hidráulica.

Se realizó la calibración de los sensores ultrasónicos HC-SR04, comparando sus mediciones de distancia y profundidad con las obtenidas por una sonda de presión HOBO, modelo MX2001-01-SS-S, que tiene una precisión con error típico de $\pm 0.05\%$, 0.5 cm de agua, y una resolución < 0.02 kPa, 0.21 cm de agua (HOBO, 2025). Se usó un tanque a diferentes cargas o profundidades hidráulicas, comparando los valores de los sensores ultrasónicos y los de la sonda. Con los datos se obtuvo una línea de ajuste que relaciona la profundidad calculada para cada sensor HC-SR04 y la medida con la sonda. Las ecuaciones de ajuste se presentan en el Cuadro 3.3, las cuales se incorporaron en la programación del código de funcionamiento.

Cuadro 3.3. Ecuaciones de ajuste de los sensores ultrasónicos

Sensor	Ecuación	R ²
Sensor 1 HC-SR04	$h = -2.7079 + 1.0231 \cdot h_{\text{sen1}}$	R ² = 0.9984
Sensor 2 HC-SR04	$h = -2.9102 + 1.0315 \cdot h_{\text{sen2}}$	R ² = 0.9985
Sensor 3 HC-SR04	$h = -3.2212 + 1.0335 \cdot h_{\text{sen3}}$	R ² = 0.9980

El código para el funcionamiento del dispositivo se programó en lenguaje C++ usando el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) de Arduino®, que permite descargarlos o subirlos al microcontrolador y poder calcular las variables (h, T, H.R y Q) (Fisher & Sui, 2013; Torrente, 2013). En la programación se definió que el valor empleado como verdadero fuera el promedio de la profundidad determinada por los tres sensores ultrasónicos, se estableció este valor como el real y se usó posteriormente para calcular el caudal.

Monitoreo en tiempo real de las mediciones basado en IoT

El monitoreo en tiempo real de las variables medidas por los sensores (h, T, H.R. y Q) se realizó mediante tecnología de Internet de las cosas (IoT); que permite acceder a datos e información en tiempo real en cualquier lugar con acceso a internet (Miller et al., 2023). El envío de datos se hizo a través de la plataforma IoT ThingSpeak, plataforma en la nube que permite agregar, visualizar, analizar y almacenar datos en vivo, procedentes de sensores conectados al microcontrolador y genera la salida de datos detectados en formato gráfico en la web (Pasha, 2016).

En la plataforma se creó un canal, mostrado en la Figura 3.5, para visualizar el comportamiento de los datos de las variables medidas, mediante un gráfico (dashboard) y un widget. El envío de los datos de temperatura, humedad relativa, profundidad hidráulica promedio y caudal calculado se realizó cada 15 segundos, conectando la ESP32 a Internet mediante su módulo Wifi, pudiendo acceder a través de la web o de una aplicación móvil a la plataforma Thingspeak.



Figura 3.5. Canal de monitoreo creado y empleado en la plataforma ThingSpeak

3.3.3 Validación del sistema de medición

Para evaluar el sistema desarrollado y validar su funcionamiento se realizaron pruebas experimentales; se instalaron los sensores ultrasónicos en la parte superior de la estructura a la mitad de la rápida, para medir la profundidad hidráulica; se hicieron circular varios caudales por el AGLFS. En la Figura 3.6 se presenta la instalación de los sensores junto con los limnímetros de punta; se midió la distancia desde la rasante de la estructura hasta los sensores, este valor se utilizó en la programación, a la cual se le resta la distancia medida por el sensor en tiempo real hasta la superficie libre del agua, aplicando la ecuación 3.7.

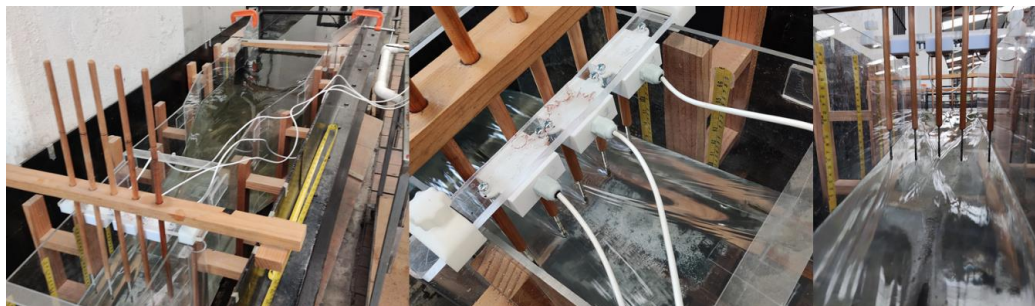


Figura 3.6. Instalación de los sensores para validación del sistema de medición

Las mediciones de los sensores se compararon con las hechas manualmente con los limnímetros, se empleó como patrón de aforo el vertedor triangular, instalado, en el canal de recirculación del agua del laboratorio, aguas abajo del aforador, donde se midió la carga sobre la cresta del vertedor y se calculó el caudal con la ecuación 3.4 para cada prueba.

Para determinar la confiabilidad y exactitud de los resultados, se calcularon tres indicadores estadísticos de error: error absoluto medio (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el error porcentual medio absoluto (MAPE), para su cálculo mediante las Ecuaciones 3.8, 3.9 y 3.10 respectivamente, se utilizó el promedio de las mediciones para cada prueba (Sammen et al., 2020) . ,

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_{ref,i} - Y_{sen,i}| \quad (3.8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{ref,i} - Y_{sen,i})^2} \quad (3.9)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Y_{ref,i} - Y_{sen,i}|}{Y_{ref,i}} \times 100 \quad (3.10)$$

donde $Y_{ref,i}$ es el de referencia, y $Y_{sen,i}$ es el valor medido o calculado y N es el número de mediciones.

3.4 Resultados y discusión

3.4.1 Relación caudal-profundidad (Q-h) en el AGLFS

En el Cuadro 3.4 se presentan los caudales determinados con la ecuación 3.4, a partir de las cargas del vertedor. También se incluyen los valores de profundidad hidráulica medidas en la entrada y en la rápida, correspondientes a cada caudal. La profundidad hidráulica en la entrada se obtuvo al restar 5cm a la profundidad del flujo medida con el limnómetro, valor que es la altura del umbral de la garganta o sección de control. Se toma esta altura debido a que el Software WinFlume® considera el fondo de la garganta como el nivel de referencia para medir la profundidad hidráulica (Brigido-Morales et al., 2024).

Cuadro 3.4. Caudales calculados con el vertedor triangular y profundidades hidráulicas medidas con limnómetros en la entrada y sensores en la rápida

Caudal (L·s ⁻¹)	Carga en el vertedor (cm)	Profundidad hidráulica (cm)	
		Entrada	Rápida
6.76	11.82	6.27	2.25
11.18	14.44	8.60	3.63

Caudal (L·s ⁻¹)	Carga en el vertedor (cm)	Profundidad hidráulica (cm)	
		Entrada	Rápida
15.73	16.54	10.67	4.53
20.78	18.48	12.87	6.02
25.03	19.90	14.70	7.34
31.04	21.68	16.80	8.65
36.25	23.06	18.83	9.85
40.33	24.06	20.40	10.85
45.04	25.14	21.83	11.72
49.01	26.00	23.13	12.60
51.90	26.60	24.10	13.14
57.77	27.76	26.20	13.68
66.28	29.32	28.73	15.31

En la Figura 3.7 se presentan todas las curvas obtenidas Q-h, considerando el caudal como variable independiente y la profundidad como variable dependiente. Sin embargo, interesa expresar el caudal como variable dependiente en función de la profundidad como variable independiente, por lo tanto, las curvas se invirtieron y se obtuvo las ecuaciones h-Q, mostradas en la Figura 3.8 donde se incluyen todas las curvas, comparando su comportamiento.

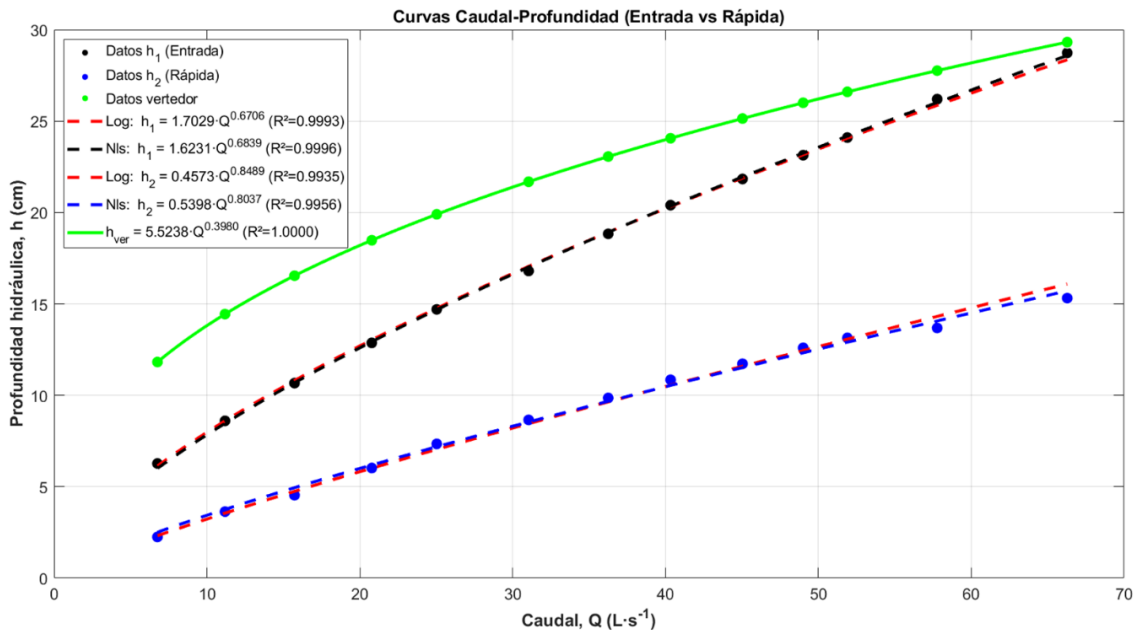


Figura 3.7. Curvas Q-h en la entrada y en la rápida del AGLFS, y del vertedor triangular.

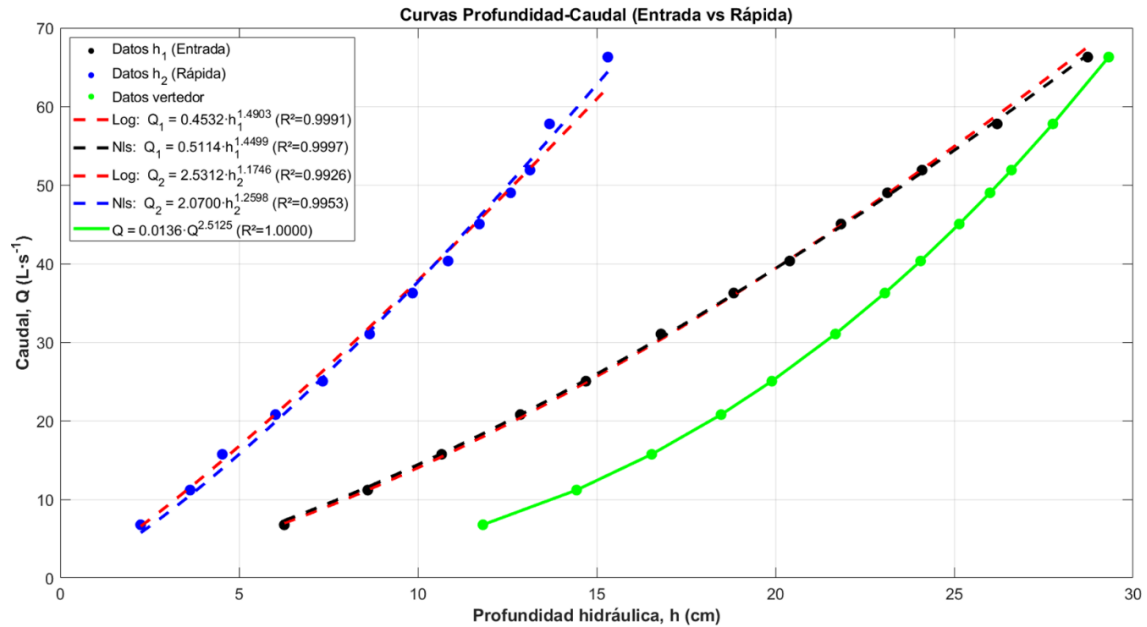


Figura 3.8. Curvas h-Q, entrada y rápida en el AGLFS, y en el vertedor.

De las curvas de la Figura 3.8 y con la regresión no lineal se determinó la relación existente entre la profundidad hidráulica y el caudal (h-Q), en el Cuadro 3.5 se presentan las ecuaciones obtenidas para la entrada (régimen subcrítico) y para la rápida (régimen supercrítico) a partir de los datos experimentales y las ecuaciones teóricas reportadas por Brigido-Morales et al. (2023).

Cuadro 3.5. Ecuaciones h-Q obtenidas para la entrada y rápida del aforador.

Método	Sección	Ecuación	R ²
Datos medidos	Entrada	$Q = 0.5114 \cdot h_1^{1.4499}$	$R^2 = 0.9997$
	Rápida	$Q = 2.0700 \cdot h_2^{1.2598}$	$R^2 = 0.9953$
Reportadas por Brigido-Morales et al. (2023)	Entrada	$Q = 0.4000 \cdot h_1^{1.5378}$	$R^2 = 0.9999$
	Rápida	$Q = 1.8382 \cdot h_2^{1.3155}$	$R^2 = 0.9986$

Al comparar las ecuaciones se observa que la diferencia entre los coeficientes de determinación (R^2) es mínima. Las ecuaciones teóricas de Brigido-Morales et al. (2023) derivadas de simulaciones hidráulicas tienen un ajuste ligeramente superior; sin embargo, las ecuaciones experimentales tienen también muy buena aproximación, cuya discrepancia se presenta a partir del tercer decimal del R^2 .

Para el sitio de interés, correspondiente al tramo del canal el régimen supercrítico, resultó la ecuación 3.11 en la que Q es el caudal ($L \cdot s^{-1}$) y, h es la profundidad del flujo (cm); ecuación que se empleó en la programación del sistema, ya que los sensores se instalaron en el mismo sitio establecido para su ajuste.

$$Q=2.07 \cdot h^{1.2598} \quad (3.11)$$

En la Figura 3.7 y Figura 3.8 se observa que las curvas Q-h para la entrada y para la rápida se separan al aumentar el caudal. Esto se atribuye a la transición del régimen del flujo, de subcrítico a supercrítico. En el régimen supercrítico al incrementar la pendiente de la rápida las profundidades del flujo son menores, debido a la conservación de la energía total, en la rápida el agua gana energía cinética a medida que la energía potencial disminuye. Al crecer el caudal la curva del vertedor triangular tiende a acercarse a la del AGLFS, derivado del exponente de la ecuación, dependiente de la geometría de la estructura aforadora.

3.4.2 Del desarrollo del sistema de medición y monitoreo

Siguiendo la metodología se ensambló y programó el sistema de medición y monitoreo. Se realizó la conexión de todos los sensores con el microcontrolador ESP32, toda la electrónica se encapsuló en un gabinete metálico, se extrajo solamente los cables para los sensores HC-SR04, DHT22 y el panel solar, los sensores ultrasónicos se colocaron en una capsula de impresión 3D para su protección. En la Figura 3.9 se presenta una fotografía de la electrónica del sistema dentro del gabinete metálico, en la que se observa la placa de desarrollo ESP32, los RTC y el de microSD, la pantalla OLED, así como el controlador de carga y la batería.

La batería se recarga con el panel solar, y esta provee la energía necesaria para la unidad de medición. Para estimar el tiempo de autonomía del sistema, se midió con un multímetro de gancho el consumo nominal de la unidad de medición, siendo de 130mA, por lo tanto, al dividir la capacidad de la batería (9Ah) entre el consumo se tiene una autonomía de 69 horas de uso continuo sin recarga.

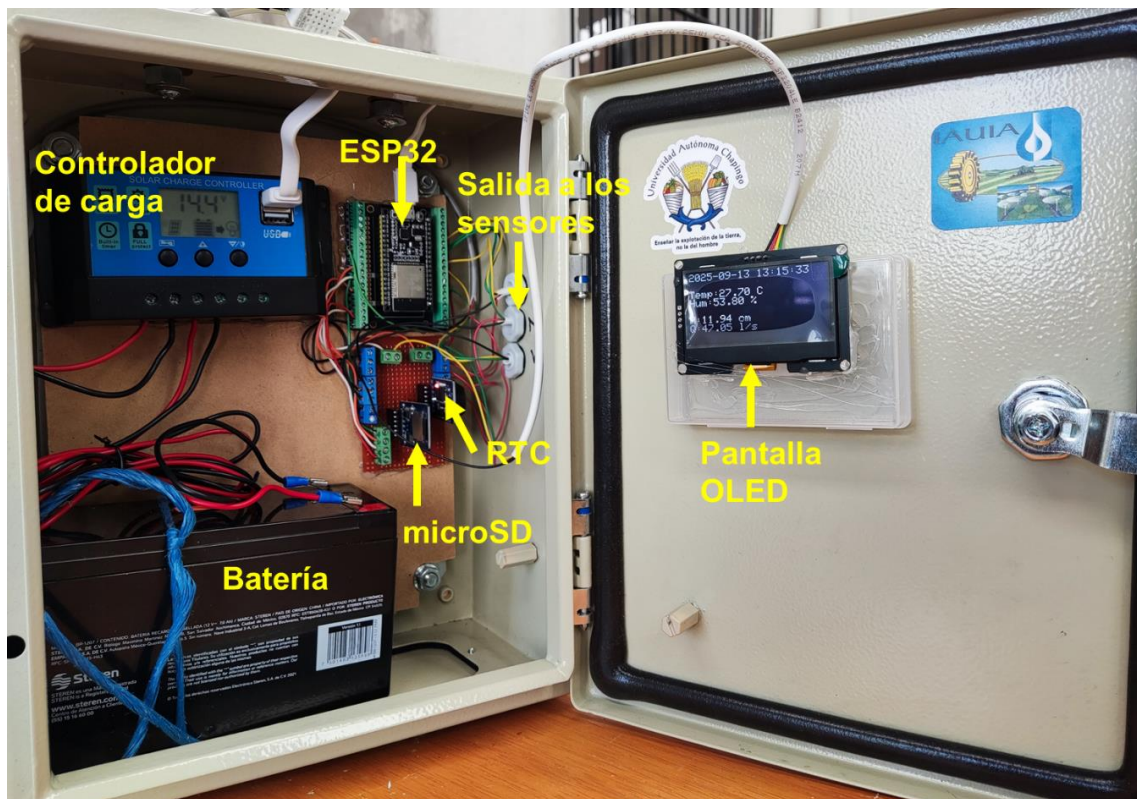


Figura 3.9. Hardware del sistema de medición y monitoreo

Los sensores ultrasónicos encapsulados se montaron sobre una base y se colocaron en la parte superior del AGLFS, la instalación del sistema desarrollado se muestra en la Figura 3.10.



Figura 3.10. Sistema de medición desarrollado e instalado en el aforador de garganta larga.

El sistema IoT transmitió los datos promedio a la plataforma ThingSpeak, y se logró visualizar en tiempo real el comportamiento de las variables de interés (temperatura, humedad relativa, profundidad hidráulica y caudal). El monitoreo en tiempo real se llevó a cabo por medio de la interfaz web y también a través de una aplicación móvil (Figura 3.11), todos los datos recibidos en la plataforma IoT se almacenan en la nube y se pueden descargar en formato CSV para su análisis y postprocesamiento.

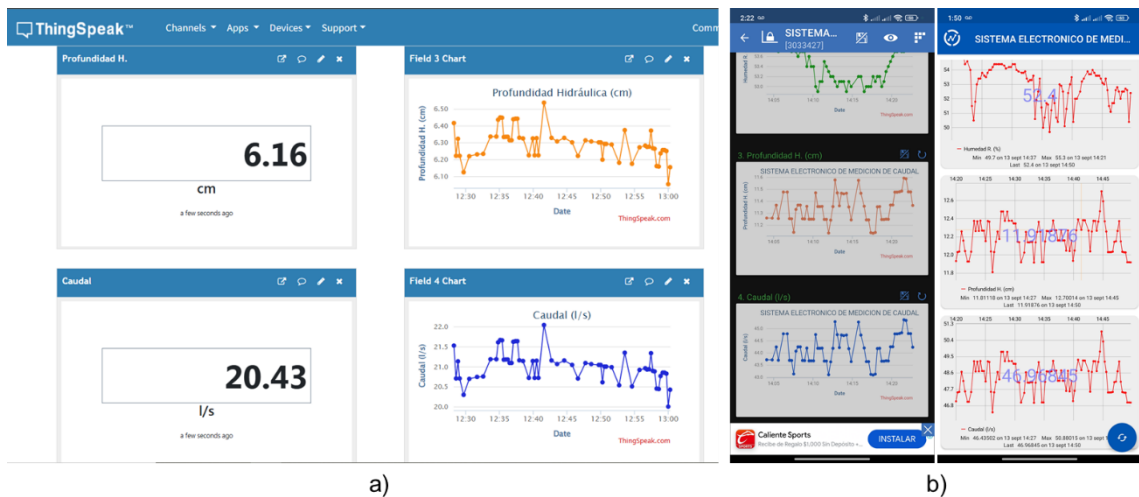


Figura 3.11. Monitoreo de las variables medidas por el sistema a través de la plataforma web de IoT, numéricamente y gráficamente

Se activo el módulo bluetooth de la placa de desarrollo y se añadió una función en la programación para transmitir los valores de medición por medio de Bluetooth, para lo cual el usuario se vincula con una aplicación móvil, se utilizó la app Serial-Bluetooth®, que al vincularse con la placa por medio de un comando comienza la transferencia y descarga de información, se crea un archivo TXT con toda la información registrada hasta ese momento, en la Figura 3.12 se muestra la descarga de la información por medio de bluetooth.

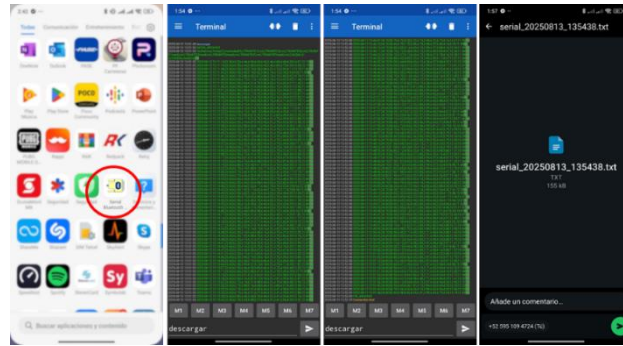


Figura 3.12. Transferencia y descarga de información por medio de bluetooth

Cuando el sistema IoT pierde la conexión a internet la plataforma no recibe ni muestra ningún dato, pero, gracias a que el hardware incluye un módulo microSD, estos datos se registran y almacenan en la SD localmente, se puede acceder y recuperar la información que no se mostró ni se subió en la plataforma IoT mediante descarga de archivos de la SD de manera manual o mediante la app de descarga de datos por bluetooth.

3.4.3 Del funcionamiento y desempeño del sistema de medición

Se descargaron de la microSD los archivos de datos de mediciones en formato CSV, generados por el sistema de medición de los sensores, en la Figura 3.13 se muestra el comportamiento de la profundidad hidráulica y del caudal obtenido a raíz de las mediciones de los sensores, ambas gráficas corresponden a una prueba con un caudal establecido, en total se hicieron nueve pruebas con caudales diferentes de 11 a 65 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ aproximadamente. Se obtuvo la frecuencia de los valores medidos y calculados, que se presentan en un histograma de frecuencias, mostrados en la Figura 3.14.

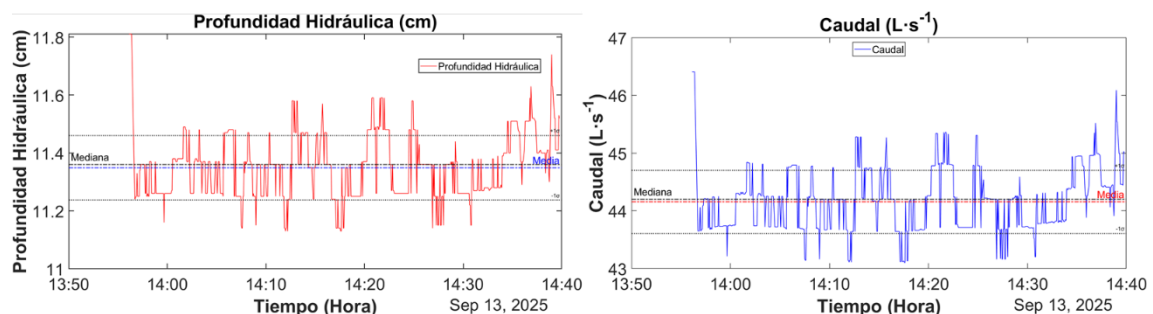


Figura 3.13. Comportamiento de la profundidad y caudal medidos por el sistema de medición con los sensores.

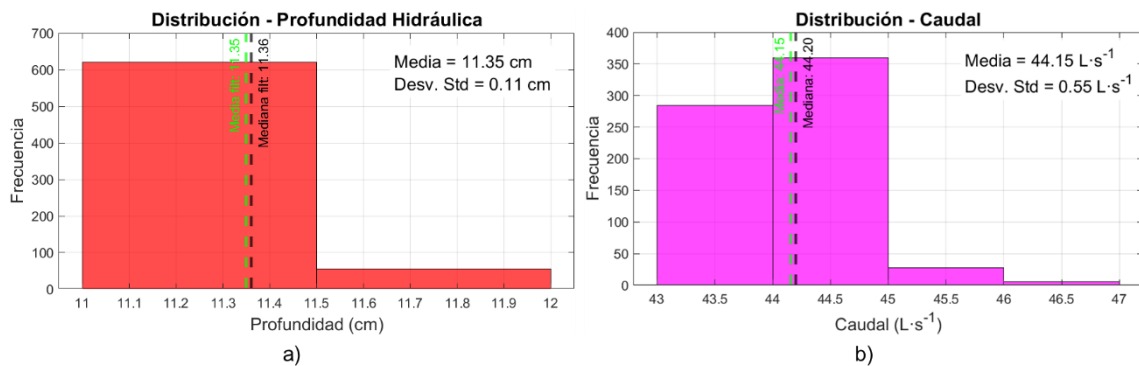


Figura 3.14. Distribución de frecuencias de los valores obtenidos con el sistema de sensores a) profundidad hidráulica y b) caudal

En las gráficas de la Figura 3.13 y Figura 3.14 se presenta el valor de la media, mediana y la desviación estándar, para identificar la dispersión de los datos y ver su variabilidad respecto a la media, se determinó que la desviación estándar fue baja, en la profundidad es de 1.1 mm y para el caudal de $0.55 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ en el caso particular de esta prueba, además que la mayor frecuencia de datos de mediciones se concentra cerca del valor medio.

Se calcularon los promedios de los valores medidos para cada prueba, considerando los datos de los sensores ultrasónicos, los limnómetros y el vertedor triangular. En el Cuadro 3.6 se presentan los resultados de las mediciones; el error absoluto (AE) y error porcentual absoluto (APE) entre los datos de los sensores y los limnómetros para la profundidad del flujo y en el Cuadro 3.7 el caudal calculado con las mediciones de los sensores y los limnómetros en la rápida y entrada, empleando la Ecuación 3.11 y los estimados con el vertedor con la Ecuación 3.4, también los errores entre los caudales obtenidos en la entrada con el de los sensores. Se determinaron los errores medios: Error Medio Absoluto (MAE) y Error Porcentual Medio Absoluto (MAPE), así como la Raíz cuadrada del Error Cuadrático Medio (RMSE), de todas las pruebas, mostrados en el Cuadro 3.8.

Cuadro 3.6. Errores de la profundidad hidráulica en la rápida, entre los sensores y los limnómetros.

Prueba	Profundidad (cm)		AE (cm)	APE (%)
	HC-SR04	Limnómetro		
1	15.327	16.24	0.917	5.646
2	13.267	14.24	0.973	6.830
3	12.773	13.21	0.439	3.321
4	12.175	12.43	0.257	2.068
5	11.349	11.53	0.179	1.555
6	10.523	10.55	0.025	0.241
7	9.503	9.84	0.337	3.430
8	8.345	8.86	0.515	5.809
9	6.288	7.01	0.720	10.280

Cuadro 3.7. Errores entre los caudales estimados con los sensores y los limnómetros en la rápida y entrada del AGLFS y el del con el vertedor patrón.

P	Caudal (L·s ⁻¹)				Sen-Limn		Sen-Vert		Sen-Entr	
	Q _{Sen}	Q _{Limn}	Q _{Entr}	Q _{Ver}	AE (L·s ⁻¹)	APE (%)	AE (L·s ⁻¹)	APE (%)	AE (L·s ⁻¹)	APE (%)
1	64.477	69.375	67.377	67.078	4.897	7.059	2.601	3.878	2.900	4.304
2	53.760	58.771	58.231	57.174	5.011	8.526	3.414	5.971	4.471	7.678
3	51.249	53.477	51.898	51.117	2.228	4.166	0.132	0.258	0.650	1.252
4	48.246	49.531	48.534	48.234	1.284	2.593	0.013	0.026	0.288	0.592
5	44.155	45.037	44.606	44.372	0.882	1.958	0.217	0.489	0.451	1.010
6	40.146	40.268	40.015	39.945	0.122	0.302	0.202	0.505	0.132	0.329
7	35.308	36.893	36.340	35.732	1.586	4.298	0.424	1.188	1.033	2.842
8	29.980	32.326	31.652	30.415	2.346	7.258	0.436	1.432	1.672	5.283
9	20.985	24.057	23.503	22.273	3.072	12.770	1.287	5.781	2.518	10.714

Q_{Sen}=Caudal de sensores; Q_{Limn}=Caudal de limnómetros; Q_{Entr}=Caudal en la entrada; Q_{Ver}=Caudal del vertedor.

Cuadro 3.8. Errores estadísticos medios obtenidos para todas las pruebas

Variable	MAE	RMSE	MAPE (%)
Profundidad del flujo (cm)	0.48	0.58	4.35
Caudal (L·s ⁻¹) Sensores-Limnómetros	2.38	2.87	5.44
Caudal (L·s ⁻¹) Sensores-Vertedor	0.97	1.51	2.17
Caudal (L·s ⁻¹) Sensores-Entrada	1.57	2.09	3.78

En la Figura 3.15 se muestra la comparación de las mediciones de la profundidad hidráulica en la rápida, también se muestran las gráficas de los caudales determinados por los diferentes métodos para cada prueba.

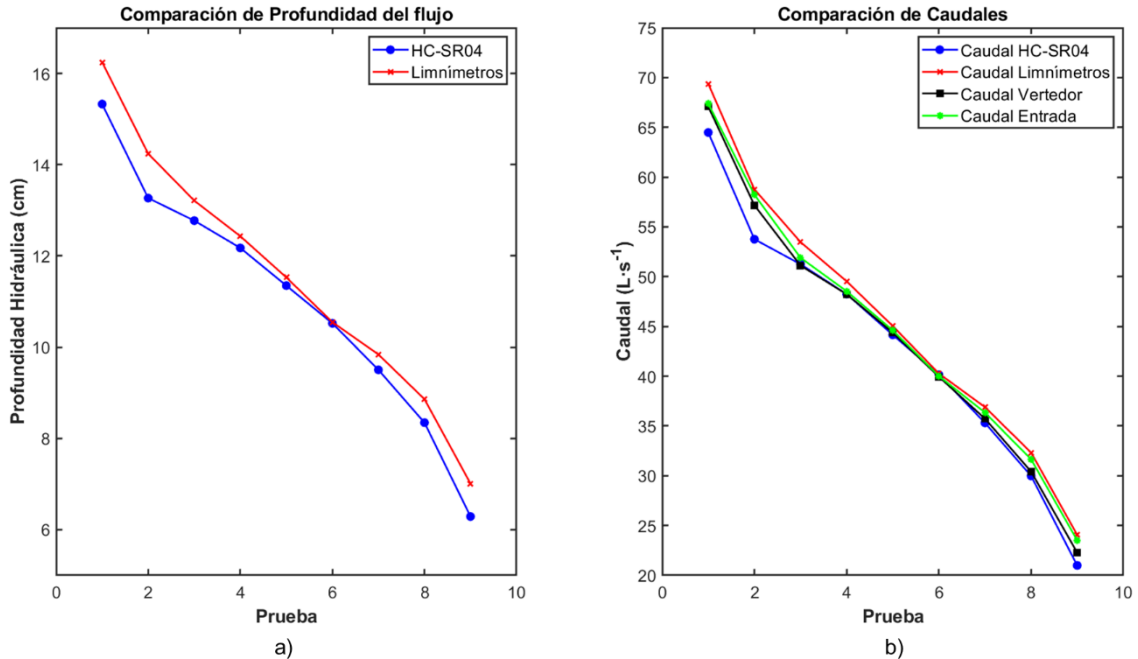


Figura 3.15. Comparación de mediciones a) de la profundidad hidráulica en el tramo supercrítico del AGLFS (rápida) medida con los sensores HC-SR04 y los limnímetros de punta; b) de los caudales estimados por los diferentes métodos.

La Figura 3.13 muestra que el caudal sigue el mismo comportamiento que la profundidad. Esto se debe a que la ecuación $h-Q$ depende solo de la profundidad. Aunque las variaciones en la profundidad son relativamente pequeñas, estas aumentan en el caudal como consecuencia de que la ecuación es potencial por lo que las variaciones en la profundidad se potencialicen en el caudal.

Las variaciones en las mediciones de los sensores mostrados en la Figura 3.13 pueden ser resultado de dos causas principales: 1) del sistema electrónico del propio sensor, el cual al ser un sensor de bajo costo tiene precisión del orden de $\pm 3\text{mm}$, (Cuadro 3.1), además que al enviar la señal ultrasónica la onda se va ampliando en un ángulo de 15° de acuerdo con Corapi et al. (2021) pudiendo rebotar con alguna otra superficie, como son los limnímetros de punta o las paredes del aforador, además; 2) otra causa es al régimen del flujo, debido a que

en la rápida existe un flujo turbulento y la turbulencia provoca una transición de régimen subcrítico a régimen supercrítico, acelerando el flujo por la propia geometría del aforador, después de la sección de entrada existe una transición gradual (horizontal y vertical) de distancia corta hacia la sección de control induciendo un flujo crítico, y el flujo anterior se transforma en caótico, en donde las líneas de corriente dejan de ser paralelas a los contornos y ahora siguen trayectorias curvas y aleatorias (López-Gómez & Gassó-Sánchez, 2025), por lo tanto la turbulencia es significativa. De acuerdo con Pereira et al. (2024) la turbulencia generalmente es menor en flujos más profundos y lentos, como en el caso de la sección de entrada, lo que facilita las mediciones; sin embargo, la turbulencia, como se presenta en la rápida, puede causar lecturas con mayor dispersión, además autores como Abdo et al. (2018); Akers & Bokhove (2008); Ambati & Bokhove (2007); Chaudhry (2008); Chow (1988) y Welahettige et al. (2017) hacen mención que en un flujo de aguas superficiales a través de una contracción puede desarrollar saltos hidráulicos oblicuos, y concuerda con Brigido-Morales et al. (2023) quien señala que encontró inconsistencias entre perfiles simulados, que pueden ser producto de la presencia del salto oblicuo. En el proceso experimental se observó que las líneas de corriente chocan en el eje horizontal del AGLFS, coincidiendo con lo mencionado anteriormente.

Los errores obtenidos para la profundidad hidráulica como se mencionó anteriormente pueden deberse a las condiciones del flujo que se presenta en el sitio de medición de la rápida, además que la profundidad medida con los limnómetros se hizo cada cierto tiempo y no de forma continua. Los errores presentados en el Cuadro 3.7 siguen la misma tendencia que se tuvo en la curva $h-Q$, aunque en los extremos de los caudales los errores son mayores, lo que igual podría ser consecuencia de los valores del caudal. Brigido-Morales et al. (2023) menciona que la estructura fue diseñada para caudales entre $10 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ a $50 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, por lo que al acercarse a estos valores el error aumenta. Finalmente en las medias de los errores obtenidos que se mostraron en el Cuadro 3.8 se observa que a excepción de los valores de caudal estimados con el sistema desarrollado comparado con el de los limnómetros ningún otro error estadístico

supera el 5% de error, lo que satisface lo establecido por la Norma Mexicana NMX-AA-179-SCFI-2018 que dice que para un Aforador de Garganta Larga (AGL) la incertidumbre relativa expandida en la medición del caudal o gasto instantáneo E_{qn} es de $\pm 5\%$ con un factor de cobertura igual a 2 y un nivel de confianza de 95 % (D.O.F., 2018).

3.5 Conclusiones

Se calcularon las ecuaciones experimentales para el modelo del aforador de garganta larga para flujo con sedimentos (AGLFS) que relacionan la profundidad hidráulica con el caudal. Estas ecuaciones permiten determinar el caudal midiendo únicamente la profundidad hidráulica, ya sea en la entrada o en la rápida de la estructura. Ambas ecuaciones presentaron un coeficiente de determinación (R^2) superior a 0.99, lo que indica que estiman con exactitud el caudal real.

Se diseñó, desarrolló e instaló, en el Aforador de Garganta Larga con Flujo de agua con arrastre de Sedimentos (AGLFS) del canal basculante en el laboratorio de hidráulica de la UACH, un sistema electrónico para medir la profundidad hidráulica y con los demás elementos se automatizó el sistema de medición del AGLFS. El sistema funcionó adecuadamente, se obtuvieron los siguientes errores para la profundidad hidráulica: MAE= 0.48 cm, RMSE= 0.58 cm y MAPE= 4.35%; para el caudal el MAPE fue de 5.44% entre los sensores y los limnómetros; de 2.17% comparando con los del vertedor patrón y de 3.78% con los resultados obtenidos en la entrada. El MAE del caudal comparado con el vertedor de referencia fue de $0.97 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ lo que indica que el valor del sistema puede estar $\pm 0.97 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ respecto al valor real. Los errores confirman que el sistema de medición y monitoreo tiene un desempeño adecuado y consistente y una alta correspondencia de medición con los métodos de referencia.

El promedio de los errores de todas las comparaciones se mantiene en rangos bajos ($<5\%$) a excepción de la comparación con los limnómetros, lo cual, se encuentra dentro del rango aceptable para estructuras aforadoras, que, aunque

lo ideal es no superar el 2%, la norma NMX-AA-179-SCFI-2018 y varios investigadores indican que se puede aceptar un error máximo del 5% para este tipo de estructura. Además, que siempre es mejor tener valores reales medidos en físico que estimarlos o calcularlos con procedimientos numéricos. Cabe destacar que las mediciones de referencia realizadas con métodos distintos al sistema ultrasónico se consideran exactas y sin errores.

El sistema IoT no muestra información cuando se pierde la conexión a internet (ya que no recibe ningún dato), pero en el hardware se incluye un módulo de reloj y un módulo microSD que se encargan de registrar y almacenar localmente todos los datos con su marca de tiempo. Para acceder a la información y recuperarla se puede hacer de dos maneras: mediante la descarga manual de archivos de la SD; o bien, de forma inalámbrica conectándose al sistema por medio de Bluetooth a través de una aplicación móvil.

Con estos resultados, se puede recomendar el uso del sistema desarrollado y estudiado para fines prácticos por sus ventajas técnicas y económicas en el procesamiento y almacenamiento de datos o información comparado con la instrumentación manual o métodos tradicionales. El sistema combina precisión, durabilidad y facilidad de uso, además permite medir, almacenar y monitorear las variables deseadas en tiempo real, de forma automática y remota. Puede ser una alternativa viable en sistemas de aforo en ríos y zonas remotas, donde puede ser alimentado mediante paneles solares. La adquisición de datos en tiempo real y a largo plazo permitirá crear hidrogramas de alguna escorrentía y obtener información histórica del flujo de agua, ayudando a una mejor gestión del recurso hídrico.

Una limitación del sistema es que necesita conectarse a una red Wifi para transmitir datos en tiempo real; sin embargo, esta limitante se puede resolver al contratar algún proveedor de servicios de internet vía satelital.

3.6 Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al financiamiento de Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) del gobierno de México a través de la beca de maestría del primer autor y a la Universidad Autónoma Chapingo por facilitar sus instalaciones de laboratorio.

3.7 Literatura citada

- Abdo, K., Riahi-Nezhad, C. K., & Imran, J. (2018). Steady supercritical flow in a straight-wall open-channel contraction. *Journal of Hydraulic Research*, 57(5), 647–661. <https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1504126>
- Akers, B., & Bokhove, O. (2008). Hydraulic flow through a channel contraction: Multiple steady states. *Physics of Fluids*, 20(5). <https://doi.org/10.1063/1.2909659>
- Ambati, V. R., & Bokhove, O. (2007). Space-time discontinuous Galerkin finite element method for shallow water flows. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 204(2 SPEC. ISS.), 452–462. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2006.01.047>
- Bae, I., & Ji, U. (2019). Outlier Detection and Smoothing Process for Water Level Data Measured by Ultrasonic Sensor in Stream Flows. *Water*, 11(5), 951. <https://doi.org/10.3390/w11050951>
- Bohn, D. A. (1988). Environmental Effects on the Speed of Sound. *Journal of the Audio Engineering Society*, 36(4), 223–231.
- Braithwaite, J. O. (2008). Evaluación de técnicas y métodos para aforar canales. [Tesis de Maestría] Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000636363>
- Brigido-Morales, J. G. (2022). *Análisis de una propuesta de aforador de garganta larga modificado para flujo con sedimentos*. [Tesis Doctoral]. Universidad Autónoma Chapingo. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/123456789/1769>
- Brigido-Morales, J. G., Carrillo-García, M., Prado-Hernández, J. V., & Flores-Velázquez, J. (2023). Hydraulic analysis of a long-throated flume for sediment-laden flow using CFD. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 15(2), 3–22. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2022.11.090>
- Brigido-Morales, J. G., Carrillo-García, M., Prado-Hernández, J. V., & Flores-Velázquez, J. (2024). Modelación hidráulica de tres aforadores para mínima

- sedimentación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(1), e3317–e3317. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i1.3317>
- Chaudhry, H. M. (2008). *Open channel flow* (2a ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68648-6>
- Chow, V. Te. (1988). *Open-Channel Hydraulics* (reimpresión). McGraw-Hill.
- Clemmens, A. J., Wahl, T. L., Bos, M. G., & Replogle, J. A. (2001). *Water measurement with flumes and weirs: Vol. Publication 58*. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands
- Corapi, P., Acaro Chacon, X. C., Gaibor Nieto, J. A., & Villavicencio Bajaña, W. F. (2021). Sistema de monitoreo de caudal y tirante para el Laboratorio Piloto de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. *Investigación, Tecnología e Innovación*, 13(14), 1–17. <https://doi.org/10.53591/iti.v13i14.1197>
- Cruz, K. M. S. D., Ella, V. B., Suministrado, D. C., Pereira, G. S., & Agulto, E. S. (2022). A Low-Cost Wireless Sensor for Real-Time Monitoring of Water Level in Lowland Rice Field under Alternate Wetting and Drying Irrigation. *Water*, 14(24), 4128. <https://doi.org/10.3390/w14244128>
- D.O.F. (2018). *Norma Mexicana: NMX-AA-179-SCFI-2018 Medición de volúmenes de aguas nacionales usados, explotados o aprovechados*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/714461/2_NMX-AA-179-SCFI-2018.pdf
- Fisher, D. K., & Sui, R. (2013). An inexpensive open-source ultrasonic sensing system for monitoring liquid levels. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(4), 328–334. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2343>
- Guyard, H., Prost-Boucle, S., Sudre, J., Moreau, S., Imig, A., Favreau, G., Quatela, V., & Clement, R. (2025). An open source ultrasonic flowmeter for monitoring the input/output flow rates of wastewater treatment plants. *HardwareX*, 21, e00613. <https://doi.org/10.1016/J.OHX.2024.E00613>
- Hameed, A. Q., Elameer, A. S., & Abbod, A. A. (2008). Oil Tank Prototype based on Wireless Communication-Controller System using IoT. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 6(05), 2294–2301. www.irjet.net
- HOB0. (2025). *Water Level Sensor MX2001-S | Onset's HOB0 Data Loggers*. [Producto]. <https://www.onsetcomp.com/products/sensors/mx2001-s>

- Jo, B., & Baloch, Z. (2017). Internet of Things-Based Arduino Intelligent Monitoring and Cluster Analysis of Seasonal Variation in Physicochemical Parameters of Jungnangcheon, an Urban Stream. *Water*, 9(3), 220. <https://doi.org/10.3390/w9030220>
- Komarizadehasl, S., Mobaraki, B., Ma, H., Lozano-Galant, J. A., & Turmo, J. (2022). Low-Cost Sensors Accuracy Study and Enhancement Strategy. *Applied Sciences* 2022, 12(6), 3186. <https://doi.org/10.3390/app12063186>
- López-Gómez, D., & Gassó-Sánchez, Á. (2025). La turbulencia en canales abiertos. Un enfoque lagrangiano. *Ingeniería del agua*, 29(3), 202–212. <https://doi.org/10.4995/ia.2025.23538>
- Miller, M., Kisiel, A., Cembrowska-Lech, D., Durlik, I., & Miller, T. (2023). IoT in Water Quality Monitoring—Are We Really Here? *Sensors*, 23(2), 960. <https://doi.org/10.3390/s23020960/S1>
- Morgan, E. J. (2014, noviembre 16). *HC-SR04 Ultrasonic Sensor | Alldatasheet*. <https://www.bitmi.ro/domains/bitmi.ro/files/files/bitmi-datasheet-senzor-ultrasonic-hc-sr04-2702.pdf>
- Mvemba, P. K., Band, S. K. G. G., Lay-Ekuakille, A., & Giannoccaro, N. I. (2018). Advanced acoustic sensing system on a mobile robot: Design, construction and measurements. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 21(2), 4–9. <https://doi.org/10.1109/MIM.2018.8327971>
- Palacios, V. E., & Exebio, G. A. (2012). *La operación de los sistemas de riego con apoyo de las técnicas de información*. BBA.
- Panda, K. G., Agrawal, D., Nshimiyimana, A., & Hossain, A. (2016). Effects of environment on accuracy of ultrasonic sensor operates in millimetre range. *Perspectives in Science*, 8, 574–576. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.06.024>
- Pasha, S. (2016). Thingspeak Based Sensing and Monitoring System for IoT with Matlab Analysis. *International Journal of New Technology and Research (IJNTR)*, 2(6), 19–23. www.ijntr.org
- Pereira, T. S. R., de Carvalho, T. P., Mendes, T. A., Reis, G. d C. d., & Formiga, K. T. M. (2024). Hydrodynamic Modeling for Flow and Velocity Estimation from an Arduino Ultrasonic Sensor. *Hydrology*, 11(2), 12. <https://doi.org/10.3390/hydrology11020012>
- Ranieri, C. M., Foletto, A. V. K., Garcia, R. D., Matos, S. N., Medina, M. M. G., Marcolino, L. S., & Ueyama, J. (2024). Water level identification with laser sensors, inertial units, and machine learning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 127, 107235. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107235>

- Rocchi, A., Santecchia, E., Ciciulla, F., Mengucci, P., & Barucca, G. (2019). Characterization and Optimization of Level Measurement by an Ultrasonic Sensor System. *IEEE Sensors Journal*, 19(8), 3077–3084. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2890568>
- Sahoo, A. K., & Udgata, S. K. (2022). A novel fuzzy inspired machine learning framework for relative humidity estimation using time-of-flight of ultrasonic sensor. *Measurement*, 195, 111035. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111035>
- Sammen, S. S., Ghorbani, M. A., Malik, A., Tikhamarine, Y., AmirRahmani, M., Al-Ansari, N., & Chau, K. W. (2020). Enhanced Artificial Neural Network with Harris Hawks Optimization for Predicting Scour Depth Downstream of Ski-Jump Spillway. *Applied Sciences*, 10(15), 5160. <https://doi.org/10.3390/app10155160>
- Serikul, P., Nakpong, N., & Nakjuatong, N. (2018). Smart Farm Monitoring via the Blynk IoT Platform: Case Study: Humidity Monitoring and Data Recording. *International Conference on ICT and Knowledge Engineering, 2018-November*, 70–75. <https://doi.org/10.1109/ICTKE.2018.8612441>
- Torrente, Ó. (2013). *Arduino: Curso práctico de formación* (Libro electrónico). Alfaomega. <https://books.google.es/books?id=G4RzEAAAQBAJ>
- Welahettige, P., Lie, B., & Vaagsaether, K. (2017). Flow regime changes at hydraulic jumps in an open Venturi channel for Newtonian fluid. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 9(4), 169–179. <https://doi.org/10.1177/1757482X17722890>
- Zakaria, M. I., Jabbar, W. A., & Sulaiman, N. (2023). Development of a smart sensing unit for LoRaWAN-based IoT flood monitoring and warning system in catchment areas. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 3, 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.005>

4 MEMORIAS DE TRABAJOS EXPUESTOS EN CONGRESOS INTERNACIONALES

Automatización de toma de datos de un aforador de canales para flujo de agua con sedimentos

Rubén Velasco-Hernández^a, Mauricio Carrillo-García^{a1}, Noé Velázquez-López^{a2}, Jorge Víctor Prado-Hernández^{a3} y Juan Gabriel Brígido Morales^b

^a Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. C.P. 56230, ^aruvhe@hotmail.com, ^{a1}mcarrillog@chapingo.mx, ^{a2}nvelazquezl@chapingo.mx y ^{a3}jpradoh@chapingo.mx.

^b Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera a Delta s/n. Ejido Nuevo León, México. Baja California, C.P. 21705, juan.brigido@uabc.edu.mx

Línea temática B

RESUMEN

Debido a la importancia del uso eficiente del agua y con la disponibilidad de sensores y dispositivos electrónicos se han desarrollado sistemas más eficientes para el manejo del agua sobre todo en la medición de caudales. En este trabajo se desarrolló un sistema para medir y monitorear variables en un aforador de garganta larga para flujo con sedimentos del laboratorio de Hidráulica de la Universidad Autónoma Chapingo. El sistema consta de: tres sensores ultrasónicos HC-SR04 que miden y estiman la profundidad del agua, un sensor DHT22 que mide temperatura y humedad relativa, un módulo de reloj y uno de microSD, una placa de desarrollo con un microcontrolador ESP32 que procesa las lecturas de los sensores, almacenando los datos en la microSD y visualizados en una pantalla LCD, información que es enviada a través de Wi-Fi y se visualiza en la plataforma ThingSpeak. Simultáneamente se midió la profundidad con limnómetros de punta y el caudal con un vertedor triangular, comparándolas con las de los sensores. El MAPE promedio fue para el tirante de 3.53%; de 4.31% y 3.36% para el caudal. El sistema es recomendable, pues permite medir de manera aceptable, almacenar y monitorear las variables en tiempo real, de forma automática y a distancia.

Palabras clave | Aforadores, sensores ultrasónicos, flujo con sedimentos, internet de las cosas

INTRODUCCIÓN

La medición de los volúmenes y caudales de aguas es muy importante ya que constituye un elemento indispensable para conseguir una gestión integral del recurso hídrico con eficiencia; atendiendo esta necesidad, trasciende la importancia de utilizar estructuras de aforo apropiadas (Palacios y Exebio, 2011); por ejemplo, los aforadores de garganta larga, estructuras diseñadas geométricamente para cumplir condiciones de flujo no sumergido, que permiten conocer un caudal (Q) a partir de la medida del tirante o profundidad hidráulica (h), y que se ajustan a la Ecuación (1) que es característica de vertedores (Clemmens et al., 2001).

$$Q = kh^n \quad (1)$$

donde Q es el caudal (l s^{-1}), h es la profundidad del flujo (cm) y k es una constante donde interviene geometría y variables de flujo, y n exponente de la ecuación.

Estas mediciones normalmente se realizan de manera manual, lo que puede llevar mucho tiempo y trabajo (Fisher & Sui, 2013). Pero gracias a la llegada de la tecnología y desarrollo de sensores; su aplicación ha logrado el monitoreo en tiempo real del nivel del agua en el campo, lo que ha ayudado a elaborar planes y decisiones sólidas y eficientes para la gestión eficiente del agua (Cruz et al, 2022). Los sensores ultrasónicos se utilizan comúnmente como métodos accesibles para medir distancias (Fisher & Sui, 2013). Los recientes avances en tecnología han mejorado la adquisición de datos y las técnicas de análisis, así como los modos de intercambio de información con las personas interesadas, el monitoreo se puede basar en un enfoque de Internet de las

cosas (IoT) (Jo & Baloch, 2017), la cual es una tecnología que conecta personas con cosas y permite la comunicación en tiempo real y el intercambio de datos (Serikul et al., 2018).

Existen investigaciones sobre la medición de variables hidráulicas, sin embargo, pocas mencionan la automatización de la toma de datos y el monitoreo en tiempo real, por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo desarrollar un sistema para medir y monitorear en tiempo real variables en un aforador de garganta larga para flujo con sedimentos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema tiene tres sensores ultrasónicos (HC-SR04), que miden la distancia del sensor hasta el objeto, la superficie del agua en este caso, un sensor DHT22 que mide la temperatura y humedad relativa del ambiente, además de una placa de desarrollo basada en un microcontrolador ESP32; que procesa las medidas de los sensores, incluyendo la hora y fecha generadas por un módulo de reloj, almacenando los datos en una microSD; también envía los datos a través de internet a una plataforma donde se visualizan a distancia. El sensor HC-SR04 mide la distancia desde el sensor hasta el objeto, en este caso, la superficie del agua, y el sensor DHT22 mide la temperatura del aire y la humedad relativa del ambiente, para hacer una corrección por temperatura y humedad a la velocidad del sonido. La programación de los sensores se realizó en el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, por sus siglas en inglés) de Arduino®.

El sistema de medición, se instaló y se realizaron pruebas en el aforador construido y estudiado por Brígido, et al (2023) en el Laboratorio de Hidráulica de la UACH, la ecuación del aforador está dada por la Ecuación (2)

$$Q=1.8382 \cdot h^{1.3155} \quad (2)$$

Se hicieron circular varios caudales con el sistema en funcionamiento, asimismo se comprobaron resultados realizando mediciones manuales con medidores de profundidad de punta o limnómetros, para comparar con las lecturas de los sensores y también se empleó como patrón de aforo un vertedor triangular, instalado aguas abajo del aforador, y cuya Ecuación (3) de calibración está dada por:

$$Q=0.0136 \cdot h^{2.5125} \quad (3)$$

Para el monitoreo de las mediciones, el microcontrolador envía los datos a través de una red Wi-Fi a la plataforma de IoT, ThingSpeak, donde se crearon cuadro de mandos y vistas rápidas a las que se les puede dar seguimiento a la distancia

Se obtuvo el error absoluto medio (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el error porcentual medio absoluto (MAPE) (Sammen et al., 2020), calculados con las Ecuaciones (4), (5) y (6) respectivamente:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_{ref,i} - Y_{sen,i}| \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{ref,i} - Y_{sen,i})^2} \quad (5)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Y_{ref,i} - Y_{sen,i}|}{Y_{ref,i}} \times 100 \quad (6)$$

donde $Y_{ref,i}$ es el valor medido con los limnómetros o vertedor, el valor referencia y $Y_{sen,i}$ es el valor medido o calculado con los sensores ultrasónicos y N es el número de mediciones.

RESULTADOS Y DISCUSION

Resultados

Se obtuvieron promedios de los valores medidor con los sensores ultrasónicos, igualmente se promediaron los valores de las mediciones hechas con los limnómetros, que se muestran en la Tabla 1, así como los errores calculados (MAE, RMSE y MAPE) entre los datos obtenidos con los sensores y los obtenidos con los limnómetros para la profundidad del flujo y en la Tabla 2 los errores obtenidos para el caudal entre los calculados con las mediciones de los sensores y los limnómetros, empleando la Ecuación (2) y los estimados con el vertedor con la Ecuación (3).

Tabla 1 | Estadísticos calculados de los promedios de las mediciones realizadas para la profundidad, entre los sensores y los limnímetros.

Prueba	Profundidad (cm)		MAE (cm)	RMSE (cm)	MAPE (%)
	HC-SR04	Limnómetro			
1	8.530	8.86	0.33	0.11	3.73
2	7.676	7.99	0.31	0.10	3.91
3	7.186	7.49	0.30	0.09	4.01
4	6.540	6.81	0.27	0.07	3.99
5	5.300	5.51	0.21	0.04	3.78
6	4.490	4.57	0.08	0.01	1.79

Tabla 2 | Estadísticos calculados de los promedios de los caudales calculados, comparando sensores-limnímetros y sensores-vertedor.

Prueba	Caudal (L·s ⁻¹)			MAE (L·s ⁻¹)	RMSE (L·s ⁻¹)	MAPE (%)	MAE (L·s ⁻¹)	RMSE (L·s ⁻¹)	MAPE (%)
	Q _{Sen}	Q _{Limn}	Vertedor						
1	30.875	32.415	31.413	1.540	2.371	4.750	0.538	0.289	1.713
2	26.929	28.285	27.840	1.355	1.837	4.792	0.911	0.829	3.271
3	24.672	25.970	25.953	1.297	1.683	4.996	1.281	1.641	4.936
4	21.822	22.939	22.795	1.117	1.247	4.867	0.973	0.947	4.268
5	16.619	17.345	17.336	0.725	0.526	4.182	0.716	0.513	4.131
6	13.271	13.576	13.519	0.305	0.093	2.244	0.248	0.061	1.831

En la Figura 1 se muestran de manera gráfica las comparaciones de los promedios de las mediciones realizadas, con el sistema de sensores y los limnímetros, para la profundidad y con el vertedor para el caudal.

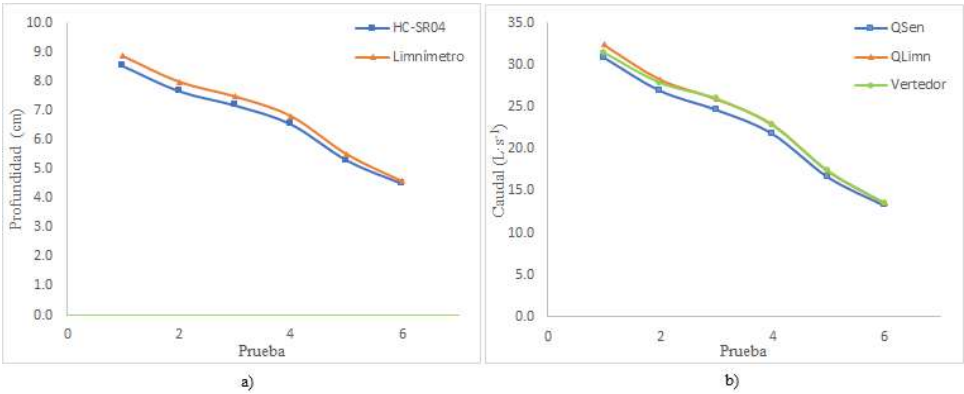


Figura 1 | Comparación de las mediciones a) profundidad del flujo y b) del caudal.

Se obtuvo el promedio general de los errores (MAE, RMSE y MAPE), en la Tabla 3 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 3 | Promedios de los estadísticos calculados.

Variable	MAE	RMSE	MAPE (%)
Profundidad del flujo (cm)	0.25	0.07	3.53
Caudal (L·s ⁻¹) Sensores-Limnímetros	1.06	1.29	4.31
Caudal (L·s ⁻¹) Sensores-Vertedor	0.78	0.71	3.36

Discusión

El error porcentual medio absoluto (MAPE) fue, para el tirante de 1.71% para el mínimo y el máximo de 4.01%; para el caudal de 2.244% en su mínimo y el máximo de 4.996% comparando sensores con los limnómetros; y de 1.713% como mínimo y máximo de 4.936% comparando sensores con vertedor; con promedio de 3.53% en el tirante y de 4.31% y 3.36% en el caudal.

El promedio, se encuentra dentro del rango aceptable para estructuras aforadoras, que, aunque lo ideal es no superar el 2%, varios investigadores, indican que se puede aceptar un error máximo del 5% para el tipo de estructura. Además, que siempre es mejor tener valores reales medidos en físico que estimarlos o calcularlos de manera numérica. También se observó que el error es menor comparando con el vertedor, esto puede ser consecuencia que el perfil del flujo es mas estable en la cresta del vertedor.

CONCLUSIONES

Se logró desarrollar un sistema que cumple con la automatización de las mediciones de las variables hidráulicas en el aforador de garganta larga para flujo con sedimentos o de régimen supercrítico. Con estos resultados, se puede recomendar el uso del sistema estudiado para fines prácticos con mucha ventaja técnica y económica en el procesamiento y almacenamiento de datos comparado con la instrumentación manual. El sistema permite medir, almacenar y monitorear las variables deseadas en tiempo real, de forma automática y a la distancia, permitiendo crear hidrogramas de alguna escorrentía y obtener información histórica del flujo de agua, ayudando a la gestión del recurso hídrico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al financiamiento de la El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) del gobierno de México a través de la beca de maestría del primer autor y a la Universidad Autónoma Chapingo por facilitar sus instalaciones de laboratorio.

REFERENCIAS

- Brigido-Morales, J. G., Carrillo-García, M., Prado-Hernández, J. V., & Flores-Velázquez, J. (2023). Hydraulic analysis of a long-throated flume for sediment-laden flow using CFD. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 15(2) 3-22.
- Clemmens A. J., Wahl T. L., Bos M. G., Replage J. A. (2001). *Water measurement with Flumes and Weirs*. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). Publication 58. Wageningen, The Netherlands. 382p
- Cruz, K.M.S.D.; Ella, V.B.; Suministrado, D.C.; Pereira, G.S.; Agulto, E.S. (2022). A Low-Cost Wireless Sensor for Real-Time Monitoring of Water Level in Lowland Rice Field under Alternate Wetting and Drying Irrigation. *Water*, 14(24), 4128.
- Fisher, D. K., & Sui, R. (2013). An inexpensive open-source ultrasonic sensing system for monitoring liquid levels. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(4), 328-334.
- Jo, B.; Baloch, Z. (2017). Internet of Things-Based Arduino Intelligent Monitoring and Cluster Analysis of Seasonal Variation in Physicochemical Parameters of Jungnangcheon, an Urban Stream. *Water*, 9, 220
- Palacios, V. E., & Exebio, G. A. (2011). *La operación de los sistemas de riego con apoyo de las técnicas de información*. Colegio de Postgraduados. México.
- Serikul, P., Nakpong, N., & Nakjuatong, N. (2018). Smart farm monitoring via the Blynk IoT platform: case study: humidity monitoring and data recording. In 2018 16th International conference on ICT and knowledge engineer-ing (ICT&KE) (pp. 1-6). IEEE. doi: 10.1109/ICTKE.2018.8612441.

VIII Jornadas de Ingeniería del Agua, Zaragoza, 22-23 octubre



CERTIFICADO DE PRESENTACIÓN:

D. Rubén Velasco Hernández

ha presentado en las **VIII Jornadas de Ingeniería del Agua**, celebradas en Zaragoza (España) los días 22 y 23 de octubre de 2025, la siguiente comunicación, realizada por parte de los siguientes autores:

Automatización de toma de datos de un aforador de canales para flujo de agua con sedimentos.

Rubén Velasco Hernández, Mauricio Carrillo García, Noé Velázquez López, Jorge Víctor Prado Hernández y Juan Gabriel Brigido Morales

Y para que conste a los efectos oportunos, se expide el presente certificado en Zaragoza, a 11 de noviembre de 2025.

V.B

D. Beniamino Russo

Presidente del Comité Organizador



Grupo de Ingeniería
Hidráulica y Ambiental
Escuela Politécnica La Almunia
Centro adscrito **Universidad Zaragoza**



Secretario del Comité Científico

D. Pedro López Julián.

