

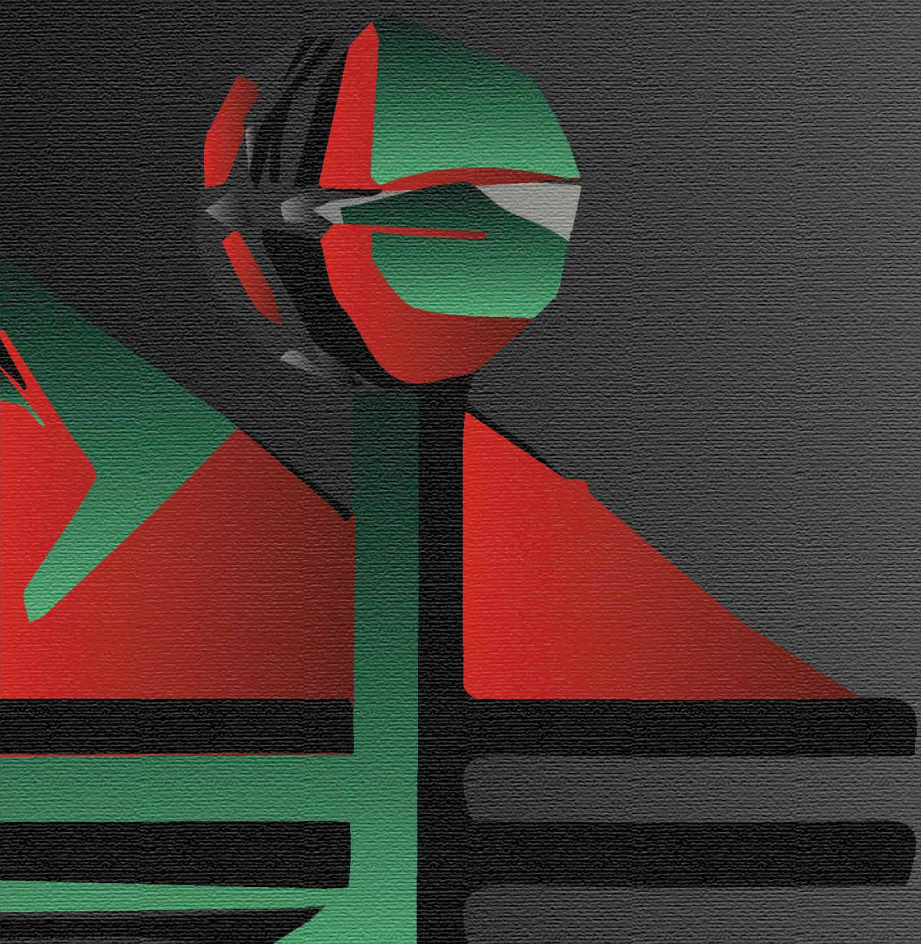
# REQUERIMIENTOS PARA VEHÍCULOS DE SUPERFICIE NO TRIPULADOS ENFOCADOS AL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA

REQUIREMENTS FOR UNMANNED SURFACE VEHICLES  
FOCUSED ON WATER QUALITY MONITORING

Jovheiry Christopher García Guerrero<sup>1\*</sup>

*<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería  
Universidad Autónoma de Querétaro  
Querétaro, México*

*\*jgarcia95@alumnos.uaq.mx*



## RESUMEN

Los Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Agua (WQMS, por sus siglas en inglés Water Quality Monitoring System) son sistemas enfocados al monitoreo de múltiples parámetros del agua con el fin de verificar su calidad y validar si su uso es apto para un fin determinado. Puesto que en México se han presentado situaciones relacionadas con la muerte masiva de peces, la cual pudo haberse prevenido si se hubiera implementado un monitoreo constante del agua, en este trabajo se presentan las principales características, tipos, ventajas y desventajas de los WQMS. El objetivo de esta investigación es definir los principales requerimientos para la implementación de un WQMS basado en un Vehículo de Superficie no Tripulado (USV, por sus siglas en inglés Unmanned Surface Vehicle) mediante una revisión de la literatura. Estos representan una solución adecuada a la problemática actual en México debido a su bajo costo en comparación con sistemas basados en una red de sensores y su gran área de censado en comparación con los sistemas

*El control de calidad del agua es una preocupación actual, misma que a generado el afán de monitorear los mantos acuíferos para la protección del medio ambiente. Se busca implementar un sistema de monitoreo y menor costo, basado en el uso de USV.*

tradicionales. También se presentan los problemas y otros aspectos importantes encontrados en los documentos consultados. Al final se presenta una propuesta de un USV para el monitoreo de la calidad del agua.

**Palabras clave:** IoT; sistema de monitoreo de la calidad del agua; sistemas embebidos; vehículo de superficie no tripulado.

## ABSTRACT

Water Quality Monitoring Systems (WQMS) are systems focused on monitoring multiple water parameters in order to verify its quality and validate if its use is suitable for a specific purpose. Due to the fact that in Mexico there have been situations related to the massive death of fish, which could have been prevented if a constant water monitoring had been implemented, this work presents the main characteristics, types, advantages and disadvantages of the WQMS. The objective of this work is to define the main requirements for implementing a WQMS based on Unmanned Surface Vehicle (USV), through a review of the literature. These represent an adequate solution to the current problem in Mexico, due to its low cost (compared to systems based on a network of sensors) and large census area (compared to traditional systems). Also, the document introduces some problems and other important aspects encountered in the documents from literature review. At the end, a proposal for a USV for water quality monitoring is presented.

**Keywords:** IoT; water quality monitoring system; embedded systems; unmanned surface vehicle.





## INTRODUCCIÓN

La idea de implementar un Sistema de Monitoreo de la Calidad del Agua (**WQMS**, por sus siglas en inglés Water Quality Monitoring System) nace como una solución a la problemática que implicaba medir la calidad del agua: trasladarse al lugar, obtener muestras de agua, transportarlas y realizar pruebas de laboratorio. Debido a diversos factores, existía la posibilidad de que las muestras fueran alteradas, ocasionando un error en la medición de los parámetros. Parte del problema se resolvió cuando se fabricaron dispositivos para medir los parámetros en el lugar de interés, tal como los sistemas en [1]-[3].

## METODOLOGÍA

Para la revisión del estado del arte se utilizaron las siguientes cadenas de búsqueda avanzada en la base de datos Scopus:

1. **TITLE-ABS-KEY** (water **AND** quality). Resultados: **143 264** documentos.
2. **TITLE-ABS-KEY** (water **AND** quality) **AND** (**LIMIT-TO** (**EXACTKEYWORD**, "Water Quality Monitoring System") **OR** **LIMIT-TO** (**EXACTKEYWORD**, "WQMS") **OR** **LIMIT-TO** (**EXACTKEYWORD**, "Monitoring System")). Resultados: **1046** documentos.
3. **TITLE-ABS-KEY** (water **AND** quality) **AND** (**LIMIT-TO** (**EXACTKEYWORD**, "Water Quality Monitoring System") **OR** **LIMIT-TO** (**EXACTKEYWORD**, "WQMS") **OR** **LIMIT-TO** (**EXACTKEYWORD**, "Monitoring System")). Resultados: **39** documentos (**19** fueron aceptados para su análisis; referencias [13]-[34]).

Dado el reducido número de resultados, el único criterio para la aceptación de los artículos fue la presentación o utilización de un **USV** para el monitoreo de la calidad del agua. En el caso de la revisión en *ResearchGate*, debido a las limitaciones en la herramienta de búsqueda, se utilizaron los términos **WQMS** y **USV**; se obtuvieron **3460** recursos hasta el **2022**. Posteriormente, sólo se consideraron aquellos cuyo documento era accesible y visible (cumplía con la característica de "*Full-text Available*") y el número se redujo a **1163**. De estos últimos, sólo se aceptaron los relacionados con los temas de interés: **7** artículos (más **4** repetidos, encontrados en Scopus); referencias [35]-[41].

A partir de los artículos aceptados, se realizaron los siguientes pasos:

1. Para cada uno de los documentos se identificaron los componentes electrónicos (microcontroladores, dispositivos de comunicación, dispositivos para navegación, sensores), funciones, tipo de vehículo del **USV** y uso de dispositivos o medios de control remoto.
2. A partir de la lectura de los documentos, se detectaron los principales problemas.
3. Además, a partir del análisis de la información, se establecieron los requerimientos para el desarrollo adecuado de un **WQMS** basado en **USV**.
4. Con base en la información recolectada en las tablas, los requerimientos, los problemas y otros aspectos encontrados, se llevó a cabo una interpretación con el fin de elaborar la propuesta de un **USV** para el monitoreo de la calidad del agua.

En la siguiente sección se presenta una pequeña discusión sobre los sistemas consultados y se introduce la propuesta de un **USV**.

## PRINCIPALES TIPOS DE SISTEMAS DE MONITOREO Y SUS CARACTERÍSTICAS

Los **WQMS** se encargan de medir distintos parámetros del agua relacionados con cierta actividad o uso. En el caso de la calidad del agua para la vida acuática, ésta se compone de los parámetros que influyen en la supervivencia y el desarrollo de las especies, y aquellos enfocados en la detección de contaminantes. Un caso práctico y frecuente se observa en [4].

A continuación, se describen brevemente tres tipos de **WQMS**:

### SISTEMAS TRADICIONALES:

En un principio, los **WQMS** monitoreaban únicamente el lugar de instalación y consistían en una sola unidad. A partir de estas características, a lo largo del documento se referirá a este tipo de sistemas como tradicionales. Su uso resulta oportuno cuando la aplicación es sencilla; un ejemplo se presenta en [5].

### SISTEMAS BASADOS EN REDES DE NODOS:

Ante la necesidad de abarcar áreas más grandes, se crearon los **WQMS** basados en redes conformadas por **2** o más nodos (grupos de sensores). Los que más destacan por sus características son las redes de sensores inalámbricas (**WSN**, por sus siglas en inglés Wireless Sensor Networks). Un ejemplo de monitoreo de un río se observa en [6]. Los **WSN** pueden ser utilizados para monitorear lagos y presas

al instalar los nodos alrededor. Sistemas similares se encuentran desarrollados en [7]–[10]. De acuerdo con [11], estos mecanismos tienen un grado de complejidad y su implementación requiere la consideración de ciertos aspectos para la obtención correcta de los datos. Tal es la importancia que se han desarrollado estudios enfocados en el análisis de estos problemas y la mejora de los sistemas de medición, así como se muestra en [12]. Estos sistemas también se relacionan con temas de Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés Internet of Things).

### SISTEMAS BASADOS EN USV:

Un **WQMS** basado en **USV** se puede entender como un solo nodo de sensores incorporado en una pequeña embarcación controlada remotamente. Y resulta conveniente cuando se busca monitorear sin altos costos un área grande.



## COMPARACIÓN: PRINCIPALES VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Para comprender las principales ventajas y desventajas, se enfocará la comparación en la capacidad de monitorear un área determinada. Debido a esto, se considerará una actividad específica que requiere analizar 3 parámetros distintos, cada uno de los cuales necesita un instrumento. Consideremos como primer caso un pequeño cuerpo de agua o estanque. Debido a su área reducida, un sistema tradicional resulta lo más adecuado. Implementar cualquiera de los otros dos requeriría mayores costos.

Como segundo caso, se considera un río que abarca varios kilómetros de largo. Emplear un sistema tradicional sería inadecuado debido a que se estaría monitoreando un solo punto. Lo ideal sería un **WQMS** basado en **WSN** con varios nodos a lo largo del río. Esto permitiría detectar alguna situación anormal y ubicar el tramo donde se encuentra la fuente del problema. Sin embargo, hay que tener en cuenta que entre más nodos se requieran, mayor será el costo. Un sistema basado en **USV** también sería factible, pero habría que considerar la velocidad del agua como un posible problema.

Supóngase un tercer escenario, donde el cuerpo a monitorear es un lago o presa. Utilizar un sistema tradicional es posible, pero no viable; lo adecuado sería utilizar un sistema basado en **WSN**. Los nodos se instalarían alrededor del cuerpo, pero se tendría el mismo problema que en el segundo caso: el costo es mayor. Para esta instancia se destaca un sistema basado en **USV**. Tener un solo nodo con la capacidad de desplazarse sobre el agua reduciría considerablemente el

costo, pero se requiere un mayor tiempo para realizar el monitoreo.

## REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

De acuerdo con Scopus, existen 143 264 artículos relacionados con el tema de “*Water Quality*”, publicados desde 1954. De 1991 a 2021 se observa una tendencia al aumento de publicaciones por año con un máximo de 9675 en 2021. Al momento de la consulta, en lo que va del 2022 se han publicado 5939. Al delimitar la búsqueda en los **WQMS**, se observa que, desde 1979 hasta la fecha, se han realizado 1046 publicaciones (en 2021 se alcanzó un pico máximo de 96). A la fecha de la revisión, en lo que va del 2022 se han realizado 74 publicaciones.

Para garantizar una revisión adecuada al tema de interés en Scopus, a partir de la primera revisión la búsqueda se limitó a los **USV**. En esta tercera iteración se observa un total de 39 publicaciones después del 2009 a la fecha (con un pico máximo de 11 en 2020), de las cuales se aceptaron 22 para su análisis. Además, se realizó una revisión complementaria en *ResearchGate*, con los términos **USV** y **WQM**; en este caso, se aceptaron 7 documentos (más 4 que se encontraban también con la revisión en Scopus) que presentaban un sistema para el monitoreo del agua implementado en **USV**.

A partir de estas revisiones, se realizó un análisis para la obtención de los requerimientos y los principales problemas detectados para los **WQMS** basados en **USV**. A continuación, en las Tablas 1, 2 y 3, se puede encontrar información acerca de los distintos **USV** presentes en los documentos aceptados.



Tabla 1. Características de los sistemas encontrados.

REF.	DISPOSITIVO PARA EL CONTROL DE PROCESOS	COMUNICACIÓN DE DATOS	SENSORES CALIDAD AGUA	OTROS SENSORES	NAVEGACIÓN
[13]	2 x Arduino Mega 2560	Bluetooth HC-08	pH sensor SEN0161	Vision sensor Pixy CMUCam5	GPS (GY-GPS6MV2)
[14]	-	RF Modem, < 3 KM, 2.4-2.483 GHZ	AlgaeChek ultra (Clorofila-a), sonda de profundidad	Cámara, LiDar	GPS/IMU, Compass
[15]	Raspberry PI 3.0 model B SBC, Huzzah ESP8266 board	2.4 GHZ Wifi	-	NGC Sensors	GNSS DP0106, IMU Adafruit BNO055
[16]	-	RF modem	Chl-a, turbidez, DO (por sus siglas en inglés, Dissolved Oxygen), conductividad, ORP, Temperatura, salinidad, pH	Velocímetro, sistema de adquisición espectral, presión, humedad atmosférica, velocidad y dirección del viento	GPS, 3 compass, Gyro
[17]	STM32F103ZET6 y STM32C8t6	Wifi, GPRS	TDS, pH, turbidez	-	GPS, MPU9250
[18]	Raspberry PI	4G-based DTU	-	Doppler, LiDar	GPS, IMU
[19]	Raspberry PI, MCU STM32, Arduino	Wifi	pH, temperatura, turbidez	-	GPS
[20]	Odroid XU4, 2 x Arduino	Wifi	Temperatura, presión, humedad	-	Razor 9 DOF IMU, Adafruit GPS
[21]	Beaglebone Blue, Jetson nano	Wifi, 900 MHZ RF modem	Adafruit V1 Sensor	-	GPS, 9 DOF IMU
[22]	-	-	Hydrolab MS5 (pH, DO, conductividad, temperatura, turbidez)	2 x Ecosondas	-
[23]	2 x Arduino UNO	Módulo de Radio XBee Series 1, Liberlium SX1272 LoRa	pH, ORP, salinidad, DO,	Ecosonda y sensor de flujo	2x GPS
[24]	AtMega32U4	RN2903 LoRa 915 MHZ	pH, turbidez, DO, temperatura	-	-
[25]	STM32F103ZE	Wifi, Bluetooth, Modulo 4G	pH, TDS, turbidez	Modulo ultrasónico	WF-NEO-6M GPS, 9 axis sensor
[26]	-	Red 4G	Chl-a, DO, conductividad, Ion de potasio, pH, temperatura, turbidez	-	-
[27]	Raspberry PI 3	3G/4G	Temperatura, conductividad, humedad relativa	Sensor de gas TGS800, Hidrófono	-
[28]	-	2.4 MHZ RF	-	Sonares batimétricos y ecosonda	GPS
[29]	PCM 3353	-	-	-	-
[30]	-	Wifi	-	-	GPS, compass
[31]	-	-	Temperatura	Profundidad	GPS

REF.	DISPOSITIVO PARA EL CONTROL DE PROCESOS	COMUNICACIÓN DE DATOS	SENSORES CALIDAD AGUA	OTROS SENSORES	NAVEGACIÓN
[32]	Arduino	Modulo 5G MH5000-31	Temperatura	Humedad, lluvia, presión, altitud y velocidad del viento	
[33]	Raspberry PI 3 y Arduino Mega 2560	Transmisor WLAN	Sonda multiparámetros (temperatura, pH, DO, turbidez, conductividad y materia orgánica disuelta coloreada (CDOM))	Batómetro	GPS, IMU
[34]	-	Celular uplink	Salinidad, AML Oceanographic multisensor (temperatura, DO y pH), SeaBird Scientific multisensor (Clorofila a, Ficocianina, ficoeritrina, CDOM, turbidez, retrodispersión y OD)	-	-
[35]	Raspberry PI	Modulo LoRa SX12772 y modulo multiprotocolo Radio Shield Libelium	Temperatura, pH, salinidad, turbidez y conductividad eléctrica	Profundidad	GPS, IMU
[36]	STM32F103ZET6	LoRa	Temperatura, pH, turbidez y conductividad	-	GPS, IMU MPU 9250
[37]	Arduino Mega 2560	Módulo de telemetría	-	Sonar Garmin Echomap 42	GPS U-Blox, magnetómetro de 3 ejes MEMS
[38]	ATMEGA2560-16U	Comunicación satelital con modulo RockBLOCK y modulo RFM95 breakout	Temperatura, pH, conductividad y DO	-	IMU ICM-20948, GPS
[39]	-	Enrutador WiFi 4G	Sensores de agua (no especificados)	LiDar, Radar	GNSS, IMU
[40]	-	Transceptor AIS, TIGHTVNC version 4.8.8	-	Sonar SIMRAD EK80	GPS
[41]	2 x Adafruit Pro Trinket	2 x Bluetooth	Temperatura, pH, turbidez	Sensor de corriente y voltaje	GPS

Tabla 2. Otras funciones, lugares de monitoreo y tipo de vehículo del USV.

REF.	OTRAS FUNCIONES	LUGAR DE MONITOREO	TIPO DE VEHÍCULO
[13]	Toma de muestras de agua, recolección de objetos y evasión de obstáculos	-	Similar a catamarán
[14]	-	Río	-
[15]	-	Aguas pocas profundas y humedales	Tipo Catamarán



REF.	OTRAS FUNCIONES	LUGAR DE MONITOREO	TIPO DE VEHÍCULO
[16]	Evasión de obstáculos y transmisión de video	Lago Honghu	Waterplane single-hull
[17]	Monitoreo a diferentes profundidades	Lago (zona de acuicultura)	Tipo Catamarán
[18]	Transmisión de video en vivo	Río	-
[19]	-	-	Tipo Catamarán
[20]	-	-	Bote Pioner
[21]	-	Estanque	Tipo Catamarán
[22]	Grabación del recorrido con cámara apuntando al fondo	Lago Constance	Estructura similar a un quadropodo
[23]	-	Lagos, lagunas, ríos y aguas costeras	Tipo Catamarán
[24]	-	Lago Dardanelle	Tipo Catamarán
[25]	Transmisión de video en vivo	-	Tipo Catamarán
[26]	-	Reserva de agua fresca	Doble casco (similar a catamarán)
[27]	-	-	-
[28]	-	-	Tipo Catamarán
[29]	-	-	Tipo jeat
[30]		Río TamSui	-
[31]	Obtención de muestras y transmisión de video en vivo	Bahía Fengxian	Tipo Catamarán
[32]	-	-	Tipo Catamarán
[33]	Transmisión de video para maniobrar el <b>USV</b> (con 2 cámaras conectadas al Raspberry <b>PI 3</b> )	Lago en la sierra de Perú (a 4000 metros sobre el nivel del mar)	Tipo Catamarán
[34]	-	3 lagos (Desoto lake, White's Creek lake y Columbus lake) y aguas costeras en Mississippi, Estados Unidos	Tipo lancha
[35]	-	Cabo Tiñoso y el Mar Menor en Cartagena, España	Tipo single-hull
[36]	-	Lago Tianyin del Instituto de Tecnología de Nanjing	Tipo Catamarán
[37]	Medición de la profundidad	Reserva de agua Inkerman y aguas costeras en la bahía de Holland en Sevastopol	Tipo single-hull
[38]	Cuenta con alimentación con panel solar y por onda/olas con una segunda unidad sumergida. Almacenamiento de datos en tarjeta <b>SD</b>	-	Tipo Catamarán
[39]	Evasión de obstáculos. Cuenta con arreglo de cámaras en anillo de 360° y cámara térmica	Arroyo de Al Bateen en Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos	Tipo Catamarán
[40]	Incorporación de cámara para observar las aves nadando cercanas	Cerca del acantilado de aves en la isla de Runde, Noruega,	Tipo kayak

REF.	OTRAS FUNCIONES	LUGAR DE MONITOREO	TIPO DE VEHÍCULO
[41]	-	Cuerpos de agua en West Lafayette (EE. UU.), Tuti (Perú), y Majes (Arequipa, Perú)	Estructura basada en un repuesto de neumático con el hardware en el centro de la rueda

Tabla 3. Dispositivo de control remoto / obtención de datos.

REF.	DISPOSITIVO DE CONTROL REMOTO / OBTENCIÓN DE DATOS	FUNCIONES
[13]	Aplicación basada en LabVIEW	Visualización de los datos y control remoto
[14]	Estación de control	Establecimiento de la ruta, visualización de datos y almacenamiento
[15]	Estación de control	Control remoto
[16]	Estación de control	Control remoto, establecimiento de la ruta, visualización de datos y estado del USV
[17]	Servicio en la nube	
[18]	Aplicación basada en Android	Control de la unidad en caso requerido
[19]	Aplicación Android; servicio en la nube Octopus	Comunicación con la plataforma y el USV
[20]	GUI de Java en Laptop	recepción de datos y ajuste de parámetros del USV
[21]	-	-
[22]	Sistema de control de misión y software de control	Control del USV, modificación de parámetros; Control sobre los sensores
[23]	Plataforma en la nube	Control remoto, almacenamiento y análisis de datos
[24]	Página web	Visualización de los datos. Estos se actualizan cada 2 minutos
[25]	Aplicación móvil	Adquisición de datos, mapa de orientación y control remoto
[26]	Estación de control	Creación de rutas de monitoreo
[27]	Aplicación móvil	Visualización y análisis de datos
[28]	-	-
[29]	PCM 9588	Monitoreo del estado del USV, visualización de video en vivo, regulación de los parámetros de los controladores, modificación del algoritmo de navegación
[30]	Estación de control	Visualización de datos del USV
[31]	Estación de control	Control del USV
[32]	Plataforma de servicio back-end	Visualización de datos y respaldo en base de datos MySQL
[33]	Estación base	Visualización de los datos mediante una PC conectada a la misma red que el Raspberry PI 3
[34]	Servidor y pagina web	Visualización de datos, generación de gráficas y mapas, y descarga de datos
[35]	Plataforma/aplicación en Laptop	Obtención, almacenamiento y visualización de datos.
[36]	Plataforma/aplicación en Laptop	Obtención y almacenamiento de datos.
[37]	Estación de control	Obtención de datos
[38]	Servidor local en Raspberry PI 3 y aplicación web en línea	Obtención de datos vía correo, almacenamiento de datos en base de datos JSON y envío de datos a página web. Modificación de la posición del USV
[39]	-	-
[40]	Programa open-source OpenCPN y programa desarrollado en LabView 2013	Navegación, obtención y almacenamiento de datos, manejo de mensajes de error y advertencias de navegación, y control de la propulsión y timón
[41]	Aplicación Android SMARTBoat 3	Control del USV, obtención y visualización de datos





## REQUERIMIENTOS, PROBLEMAS Y OTROS ASPECTOS

Al analizar la Tabla 1, se puede observar una amplia variedad de microcontroladores de los *USV*. Esto se debe a las distintas actividades que cada uno requiere ejecutar, el número de sensores, el tipo de comunicación, etc. En resumen, cada enfoque para el monitoreo es distinto, ya sea por los parámetros a medir o por el desarrollo de sistemas de bajo coste. Entre los dispositivos que más se utilizan para navegación están los *GPS* y los *IMU*, los cuales se usan principalmente para tareas de navegación automática. En el caso de los medios de comunicación, los dos que más destacan son los basados en *Wifi* y en *RF* (esto se debe a la distancia de transmisión a la cual pueden comunicarse). Resaltan en el apartado de la comunicación aquellas tecnologías que emplean *LoRa* debido a su gran alcance (en este estudio se destaca y comprueba el envío de datos de manera exitosa a una distancia de hasta 6 km); sin embargo, de acuerdo con [24], debido a que es una tecnología relativamente nueva, existe más compatibilidad con los otros medios de comunicación en aplicaciones de *IoT*.

A partir de la Tabla 2, se advierte que un número considerable de los *USV* comparte características similares. Para el tipo de vehículo, casi todos utilizan el catamarán (el casco doble también podría considerarse como tal). De acuerdo con [15] y [26], este diseño cuenta con una gran estabilidad y soporta grandes cargas. Cabe destacar que gran parte presenta el uso de un medio de control remoto, ya sea como una estación física en tierra o una aplicación móvil o web. En el caso de la Tabla 3, se observa que la mayoría posee un

dispositivo o aplicación externa al *USV* para realizar la obtención de datos y/o el control del sistema.

Con base en la lectura de cada uno de los artículos, a continuación se presentan los aspectos que se pueden considerar como requerimientos y varios de los problemas encontrados en el desarrollo o la implementación del sistema.

### REQUERIMIENTOS:

Es imprescindible contar con una transmisión de datos inalámbrica para comunicarse con el *USV*, recibir datos y realizar control remoto en caso necesario. El medio o tipo de transmisión (*LoRa*, *Wifi*, *Bluetooth*, *RF*, *4G*, etc.) dependerá principalmente de la distancia. La conexión deberá ser segura y la transmisión de datos confiable. Junto con esta última, algo que se podría considerar como un requerimiento es el empleo de un módulo *GPS*. Éste se utiliza para conocer la ubicación del sistema, además de relacionar las coordenadas del monitoreo con las variables de estudio; tal es el caso en [14], [17], [22] y [37].

El *USV* necesita una batería que permita una extensa autonomía, suficiente para realizar al menos un recorrido de monitoreo completo. Una solución alterna es la incorporación de fuentes de energía que permitan recargar el *USV* durante el proceso de monitoreo, tal como en [38], donde utilizan paneles solares e incorporan un sistema de propulsión que aprovecha las olas.

Lo siguiente se trata no de un requerimiento sino de una recomendación: un diseño tipo catamarán. Éste tiene una mayor estabilidad y soporta una gran carga, por lo que se podría considerar como una de las mejores opciones. De acuerdo con [26], un bote con diseño de

casco doble (*double hull*) es más seguro que uno de casco único (*single hull*), lo que le permite operar en un clima desfavorable.

El sistema deberá contar con un control de velocidad adecuado al medio donde se realiza el monitoreo y la capacidad para responder a distintos eventos. Algunos de los problemas que se deben considerar son: las velocidades del agua y el viento; en casos similares a los ríos, las distintas alteraciones del medio ocasionadas por animales u otros vehículos. De acuerdo con [22], esto permite mediciones de alta resolución.

En caso de que el sistema no cuente con un algoritmo de navegación automática, la transmisión de datos entre el *usv* y la estación de control tendrá un pequeño retraso o *delay*. En caso contrario, el *usv* requerirá un módulo *GPS* incorporado, un *IMU* y un sensor para detectar y evitar obstáculos, tal como en [13], [16] y [39] (esto último, además, resulta de vital importancia cuando se encuentran animales, personas, botes, etc., en el área de análisis como en [40], donde se utiliza una cámara para observar las aves que nadan cerca del *usv*); en su defecto, un medio de control y visualización de datos del *usv*, ya sea físico, una aplicación móvil o web, o una estación de control.

Algo de vital importancia y que se menciona en [15] es el uso de materiales inertes e impermeables con el fin de reducir la emisión de agentes químicos al medio acuático y proteger la electrónica.

#### PROBLEMAS:

Como ya se mencionó anteriormente, uno de los problemas a los cuales se puede enfrentar un *usv* es la alteración del medio donde

se encuentra. De acuerdo con [26], debido a que el sistema se puede ver afectado por la velocidad del viento o el oleaje, éste consume más potencia para proporcionar el desplazamiento requerido. Lo mismo sucede cuando el *usv* se ve afectado en su posición, ubicación o trayectoria por perturbaciones en el agua. Tales casos aumentarían el consumo energético del sistema para compensar las perturbaciones.

Otro problema es el corte de la comunicación con el medio de control remoto, lo que ocasionaría la pérdida de datos en caso de no tener un almacenamiento de respaldo incorporado en el *usv* (el sistema en [16] sí considera este problema, aunque conserva el respaldo en la estación de control externa, y el [17] en el *usv*) o del control de la unidad, que en ciertas circunstancias podría tener como consecuencia la baja total del *usv* (como referencia, el sistema desarrollado en [20] tuvo un costo menor a los 2000 euros y el sistema en [21] de 3000 dólares).

Asimismo, otro inconveniente que puede presentarse es la obtención de datos inválidos. Ya sea por un error en la comunicación, en los sensores o algún otro aspecto, este problema puede afectar en cierta medida el análisis de los datos. Algunos casos a destacar se pueden consultar en [14], donde pusieron en práctica diversos métodos para el tratamiento de datos con el fin de eliminar la información inválida; y [23], donde implementaron un filtro *EKS* para reducir mediciones inciertas y reconstruir variables de estado no observadas.

#### OTROS ASPECTOS:

Una cuestión que se debe tomar en consideración es el uso de dispositivos que permitan mejorar



el control sobre el **usv** y prevenir algunos de los problemas presentados anteriormente. Otro aspecto sería la implementación de dispositivos de visualización que mejoren el control remoto del sistema al permitir que el usuario tenga conocimiento del medio o la situación del **usv** y actúe de manera adecuada.

Distintos artículos destacaban la importancia de establecer la cantidad de puntos para el muestreo, la distancia entre estos, el tiempo de muestreo por punto y la ruta de monitoreo para determinar y predecir el consumo energético del **usv**. Otra característica de igual relevancia para el consumo energético es la frecuencia con la que se debe realizar el monitoreo del área. Éste lleva un tiempo determinado, por lo que es importante considerar el número de rutinas y verificar si el **usv** cuenta con la capacidad para cumplir correctamente con el trabajo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en la lectura y el análisis de la documentación consultada durante la revisión y a manera de discusión, se presenta la siguiente propuesta para un **WQMS** basado en un **usv**:

1. Utilización de un vehículo tipo catamarán. Éste se puede considerar como una de las mejores opciones (si no la mejor), debido a que ofrece gran estabilidad y capacidad para soportar carga.
2. Uso de un módulo de comunicación LoRa, ya que permite la transmisión de datos a largas distancias (otras opciones viables son **RF** y **4G**).
3. Implementación de un módulo **GPS** y un **IMU** para el control

y desplazamiento automático del **usv**.

4. Uso de sensores para la identificación y evasión de obstáculos. Esto resulta indispensable para evitar situaciones que pongan en peligro la integridad del sistema o de algún ser vivo.
5. Aunque no se puede designar un microcontrolador o dispositivo similar como la mejor opción, el controlador a escoger deberá disponer del poder de cómputo suficiente para gestionar todos los procesos y algoritmos que se deban implementar en el **usv**. Algunas de las opciones a destacar, presentadas en la Tabla 1, son la Raspberry **PI** y los microcontroladores **STM32**.
6. Algo que no se mencionó en la documentación fue algún modo de evitar el hundimiento del **usv**. En el supuesto de que ocurra tal contingencia, no solo se perdería el total de la unidad, también supondría un riesgo de contaminación (principalmente por la fuente de alimentación). Debido a esto, se propone implementar un mecanismo que mantenga a flote el vehículo para su rápida recuperación.
7. Otro aspecto sin mencionar en los sistemas introducidos en la revisión es la limpieza de los sensores. Dado que estos están en constante contacto con el agua, son vulnerables a diversas sustancias contaminantes y partículas que pueden quedar adheridas a ellos. El aseo de los sensores resulta aún más indispensable si el lugar a monitorear se considera altamente contaminado o el **usv** permanece un largo periodo en el agua.
8. La visualización de los parámetros relacionados con la

calidad del agua y el rendimiento del **usv**, además del control remoto de la unidad de monitoreo, son características imprescindibles. Como opción más avanzada, también se podrán modificar los parámetros de algunos algoritmos de control automáticos. Una de las opciones que se pueden utilizar para tal fin es una aplicación móvil o de computadora. Para su desarrollo, se debe contemplar una amplia variedad de plataformas; de esta manera, ninguna inversión adicional será necesaria por parte del usuario.

Esta propuesta consolida una base para la elaboración de un **usv** que permita realizar el monitoreo de la calidad del agua. Por último, cabe destacar que, dadas las características de los ríos y de acuerdo con lo presentado, un **usv** no sería completamente recomendable. La causa principal es el consumo energético que éste debería generar para compensar la constante interferencia de la corriente del agua, por lo que el sistema desarrollado deberá enfocarse en cuerpos o reservas de agua quietas como lagos, presas, lagunas, estanques, etc.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un análisis del estado del arte de los **usv** enfocados al monitoreo de la calidad del agua con el fin de establecer los requerimientos en el desarrollo de **WQMS** basados en **usv** y algunos de los problemas que se pueden presentar durante el desarrollo o la implementación del sistema y otros aspectos para su consideración. El principal aspecto a destacar es que la mayoría de sistemas utilizan **usv** basados en

vehículos tipo catamarán, pues estos ofrecen una gran estabilidad y soportan grandes cargas.

Cabe resaltar que los **usv** son sistemas que presentan cierta complejidad, ya que se debe asegurar un control adecuado de la unidad, la obtención y la transmisión de datos y el funcionamiento apropiado de los algoritmos de control implementados en el sistema. A partir de esta información, se elabora una propuesta de un **WQMS** basado en un **usv** que se planea utilizar como base para la futura elaboración de un sistema que permita realizar el monitoreo en lagos y presas.

## REFERENCIAS

- [1] A. Hilary Kelechi et al., "Design and Implementation of a Low-Cost Portable Water Quality Monitoring System," *Computers, Materials & Continua*, vol. 69, no. 2, pp. 2405–2424, 2021.
- [2] D. Mendez, M. Pérez, A. Farfan, and E. Gerlein, "Idc sensor for low-cost water quality monitoring applications\*; [Sensor idc para aplicaciones de bajo costo para el monitoreo de la calidad del agua]," *Ingeniería y Universidad*, vol. 26, 2022.
- [3] M. R. D. Molato, "AquaStat: An Arduino-based Water Quality Monitoring Device for Fish Kill Prevention in Tilapia Aquaculture using Fuzzy Logic," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 13, no. 2, pp. 557 – 562, 2022.
- [4] L. Parra, G. Lloret, J. Lloret, and M. Rodilla, "Physical Sensors for Precision Aquaculture: A Review," *IEEE Sens J*, vol. 18, no. 10, pp. 3915–3923, 2018.
- [5] F. A. Sapparudin et al., "Wireless water quality monitoring system for high density aquaculture application," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 13, no. 2, pp. 507 – 513, 2019.
- [6] K. S. Adu-Manu, F. A. Katsriku, J.-D. Abdulai, and F. Engmann, "Smart River Monitoring Using Wireless Sensor Networks," *Wirel Commun Mob Comput*, vol. 2020, 2020.
- [7] H.-C. Yu et al., "Development of miniaturized water quality monitoring system using wireless communication," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 17, 2019.
- [8] F. Lezzar, D. Benmerzoug, and I. Kitouni, "IoT for monitoring and control of water quality parameters," *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, vol. 14, no. 16, pp. 4 – 19, 2020.
- [9] A. C. D. S. Junior et al., "Internet of water things: A remote raw water monitoring and control system," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 35790 – 35800, 2021.
- [10] L. V. Q. Danh, D. V. M. Dung, T. H. Danh, and N. C. Ngon, "Design and Deployment of an IoT-Based Water Quality Monitoring System for Aquaculture in Mekong Delta," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 9, no. 8, pp. 1170–1175, 2020.
- [11] J. Zhang et al., "Design and Analysis of a Water Quality Monitoring Data Service Platform," *Computers, Materials & Continua*, vol. 66, no. 1, pp. 389–405, 2020.
- [12] N. Thai-Nghe, N. Thanh-Hai, and N. C. Ngon, "Deep learning approach for forecasting water quality in IoT systems," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 8, pp. 686 – 693, 2020.
- [13] H.-C. Chang et al., "Autonomous water quality monitoring and water surface cleaning for unmanned surface vehicle," *Sensors (Switzerland)*, vol. 21, no. 4, pp. 1 – 21, 2021.
- [14] E. Kim et al., "Comparison of spatial interpolation methods for distribution of surface vehicle data for chlorophyll-a monitoring in the stream," *Environ Technol Innov*, vol. 28, 2022.
- [15] A. Odetti et al., "SWAMP, an Autonomous Surface Vehicle expressly designed for extremely shallow water," *Ocean Engineering*, vol. 216, 2020.
- [16] Y. Li et al., "Design and experiments of a water color remote sensing-oriented unmanned surface vehicle," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 8, 2020.
- [17] H. Cao et al., "Intelligentwide-area water quality monitoring and analysis system exploiting unmanned surface vehicles and ensemble learning," *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 3, 2020.
- [18] X. Zhu, K. Yan, S. Kong, and Y. Yue, "4G-based remote manual control for unmanned surface vehicles," in *ACM International Conference Proceeding Series*, 2019.
- [19] M. D. Asif Hasan, H. Chen, Y. Lin, and X. Liu, "WIPI: An Extendable Edge Platform for Building Time-critical Cyber-Physical-Human Systems," in *ACM International Conference Proceeding Series*, 2019.
- [20] O. L. Osen et al., "A low cost usv for aqua farm inspection," in *Techno-Ocean 2016: Return to the Oceans*, 2016.
- [21] M. Zhou and J. Shi, "The De-



- sign and Development of an Affordable Unmanned Surface Vehicle for Estuary Research and STEM Education," in *2020 Global Oceans 2020: Singapore - U.S. Gulf Coast*, 2020.
- [22] C. Degel et al., "HydroCrawler - An innovative autonomous surface vehicle for high precision underwater measurements," in *OCEANS 2019 - Marseille, OCEANS Marseille 2019*, vol. 2019-June, 2019.
- [23] S. Garuglieri et al., "An Integrated System for Real-Time Water Monitoring Based on Low Cost Unmanned Surface Vehicles," in *SAS 2019 - 2019 IEEE Sensors Applications Symposium, Conference Proceedings*, 2019.
- [24] N. Wu and M. Khan, "LoRa-based Internet-of-Things: A Water Quality Monitoring System," in *Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON*, vol. 2019-April, 2019.
- [25] J. Balbuena et al., "Design and Implementation of Unmanned Surface Vehicle for Water Quality Monitoring," in *OCEANS 2017 - Anchorage*, vol. 2017-January, 2017.
- [26] S. Siyang and T. Kerdcharoen, "Development of unmanned surface vehicle for smart water quality inspector," in *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2016*, 2016.
- [27] J. Matos and O. Postolache, "IoT enabled aquatic drone for environmental monitoring," in *Proceedings of the 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, EPE 2016*, 2016.
- [28] M. L. Seto and A. Crawford, "Autonomous shallow water bathymetric measurements for environmental assessment and safe navigation using USVs," in *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, 2015.
- [29] M. Li, Y. He, Y. Ma, and J. Yao, "Design and implementation of a new jet-boat based unmanned surface vehicle," in *IET Conference Publications*, vol. 2012, no. 598 CP, pp. 768 – 771, 2012.
- [30] W.-R. Yang et al., "Multifunctional inshore survey platform with unmanned surface vehicles," *International Journal of Automation and Smart Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 19 – 25, 2011.
- [31] J. Wang, W. Gu, J. Zhu, and J. Zhang, "An Unmanned Surface Vehicle for multi-mission applications," in *Proceedings - 2009 International Conference on Electronic Computer Technology, ICECT 2009*, 2009.
- [32] Z. Gao, "Research on Information Sensing and Transmitting Technology for Island Using 5G System," in *2022 IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information, ICETCI 2022*, 2022.
- [33] J. Balbuena et al., "Design and implementation of an USV for large bodies of fresh waters at the highlands of Peru," in *OCEANS 2017 - Anchorage*, 2017.
- [34] P. Dash et al., "Evaluation of Water Quality Data Collected using a Novel Autonomous Surface Vessel," in *Oceans Conference Record (IEEE)*, vol. 2021-September, 2021.
- [35] D. Sousa, M. Luís, S. Sargento, and A. Pereira, "An aquatic mobile sensing usv swarm with a link quality-based delay tolerant network," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 10, 2018.
- [36] W. Chen et al., "The Mobile Water Quality Monitoring System Based on Low-Power Wide Area Network and Unmanned Surface Vehicle," *Wirel Commun Mob Comput*, vol. 2021, 2021.
- [37] V. Nikishin, M. Durmanov, and I. Skorik, "Autonomous Unmanned Surface Vehicle for Water Surface Monitoring," *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 14, pp. 853–858, 2020.
- [38] M. Elkolali et al., "A low-cost wave-solar powered Unmanned Surface Vehicle." Oct. 2021.
- [39] È. Pairet et al., "Nukhada USV: a Robot for Autonomous Surveying and Support to Underwater Operations." Oct. 2022.
- [40] A. Totland and E. Johnsen, "Kayak Drone – a silent acoustic unmanned surface vehicle for marine research," *Front Mar Sci*, vol. 9, p. 986752, oct. 2022.
- [41] W. Jo et al., "A low-cost and small USV platform for water quality monitoring," *HardwareX*, vol. 6, oct. 2019.

