

**Diseño e implementación de sistema IoT para el monitoreo en los humedales de la
Universidad Icesi y el Ecoparque Lago de las Garzas en la comuna 22 de Cali**

Miguel Ángel Cardona López

Universidad Icesi
Maestría en Sostenibilidad
Programas Interdisciplinarios
Diciembre, 2024
Cali, Colombia

**Diseño e implementación de un sistema IoT para el monitoreo en los humedales de la
Universidad Icesi y el Ecoparque Lago de las Garzas en la comuna 22 de Cali**

Miguel Ángel Cardona López

Trabajo de Grado para optar al título de Máster en Sostenibilidad

Directores del Proyecto

Gustavo Adolfo Londoño Ph.D. & Carlos Andres Diaz MsC.

Universidad Icesi
Maestría en Sostenibilidad
Programas Interdisciplinarios
Diciembre, 2024
Cali, Colombia

Resumen (Español)

El presente trabajo describe el desarrollo e implementación de un sistema IoT diseñado para monitorear en tiempo real variables fisicoquímicas esenciales en humedales urbanos. A partir del uso del microcontrolador ESP32 y sensores específicos, se logró medir parámetros como el pH, la temperatura del agua, la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales, la temperatura ambiental y la humedad relativa. El estudio se llevó a cabo en los humedales de la Universidad Icesi y el Ecoparque Lago de las Garzas, ubicados en la comuna 22 de Cali. Los datos generados por el sistema fueron validados mediante comparación con técnicas tradicionales y análisis de bioindicadores. Los resultados demostraron la funcionalidad del sistema y su precisión, aunque también se identificaron aspectos a mejorar, como la conectividad en áreas con baja señal y la optimización del suministro energético. Este proyecto constituye una solución replicable y escalable que contribuye a la gestión sostenible de los ecosistemas urbanos y al fortalecimiento de las estrategias de conservación ambiental.

Palabras clave: IoT, humedales urbanos, monitoreo ambiental, calidad del agua, sostenibilidad.

Abstract (English)

This research presents the development and deployment of an IoT-based system for real-time monitoring of critical physicochemical variables in urban wetlands. Using the ESP32 microcontroller and dedicated sensors, the system successfully measured parameters such as pH, water temperature, electrical conductivity, total dissolved solids, ambient temperature, and relative humidity. The study was conducted in two wetlands: Universidad Icesi and Ecoparque Lago de las Garzas, located in Cali's Comuna 22. Data collected by the system were validated through comparisons with conventional methods and bioindicator analysis. The findings confirmed the system's functionality and accuracy, while highlighting areas for improvement, such as connectivity in low-signal regions and enhancements in energy autonomy. This initiative represents a scalable and replicable solution that supports sustainable urban ecosystem management and advances environmental conservation strategies.

Keywords: IoT, urban wetlands, environmental monitoring, water quality, sustainability.

Resumen Gráfico

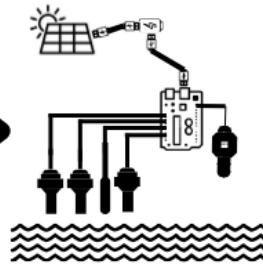
Uso potencial de tecnologías IoT en el monitoreo de humedales urbanos



2022 - 2023

Identificación de humedales

Selección de variables
pH, Temp, EC, TDS,
Temp A. y Humedad



2024

Construcción de módulos

Implementación de
módulos para monitoreo



2024

Presentación de resultados



Búsqueda de información

RESUMEN DE
CONTENIDO
INFORMACIÓN DE
LOS
MÓDULOS DE
DESEÑO
EN LA
IMPLEMENTACIÓN
EN EL MONITOREO DE
HUMEDALES DE CALI

CHARACTERIZACIÓN DE LA SANOBIOTICA ACTIVA EN EL CAMPO DE LA
ENTIDAD DE CALI

INVESTIGADOR PRINCIPAL

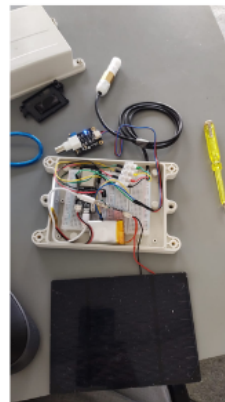
TRABAJO DE GRADUACIÓN OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO EN SISTEMAS DE

Tutor: Leonardo Rivera Osorio, Ph.D.

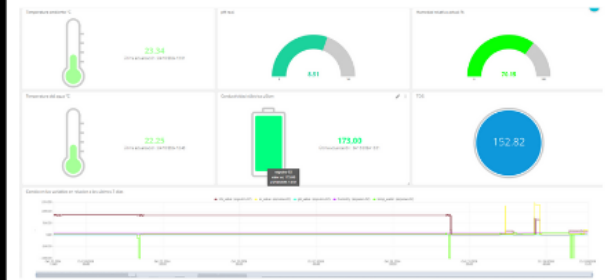
UNIVERSIDAD DE CALI
2023-2024

primaria
y
secundaria

Desarrollo e implementación



Resultados y Conclusiones



Introducción

Los humedales se presentan como ecosistemas de gran importancia para la protección de la biodiversidad, esto se debe a que son capaces de brindar una amplia gama de servicios ecosistémicos, que no solo ayudan a la vida natural, sino que a su vez permiten que la vida en la ciudad sea un poco más sostenible (Qiu et al., 2024). Colombia es un país considerado anfibia, debido a que el 26% de su territorio continental está ocupado por humedales, siendo estos más de 48 mil, de los cuales al menos el 24,2% de ellos presentan transformaciones en los terrenos (Instituto Humboldt, 2021). Estos ecosistemas son muy sensible a las alteraciones de su entorno, siendo la actividad humana la responsable de las principales presiones bióticas y abióticas, presentándose de manera indirecta en los humedales por medio del cambio climático, afectando los ciclos hidrológicos y a su vez a las especies que los habitan, también se han realizado intervenciones directas a los ecosistemas, a nivel global se ha reportado que más del 64% ha sido degradado (Ramachandra et al., 2024; Davidson, 2014; Ramsar, 2018).

En Colombia se ha identificado que las principales causas de la degradación de estos ecosistemas están relacionadas con la ganadería, agricultura, deforestación, urbanización, minería e infraestructura, las cuales son fuente directa de contaminación y en muchos de estos ecosistemas no se cuenta con información base y mucho menos un sistema de monitoreo periódico (Instituto Humboldt, 2021; Cárdenas et al., 2023a; Fernández et al., 2023). Aunque se conoce la problemática y se pueda evidenciar la degradación del ecosistema en muchos casos es imposible realizar una intervención efectiva debido a que los datos sobre la calidad del agua y la salud de estos mismos es información limitada y en muchos casos sus registros se encuentran desactualizados, lo que dificulta la presentación de pruebas tangibles que puedan dar como resultado la aplicación de políticas efectivas de conservación (Ballesteros et al., 2023; Flores et al., 2018; Cárdenas et al., 2023b).

En 2023 el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA), en conjunto a la Universidad Icesi aunaron esfuerzos para la recolección de datos e información referente al impacto de la urbanización en los humedales locales. Aunque este tipo de investigaciones son útiles para la protección y monitoreo de los ecosistemas es necesario tener en cuenta que tecnologías emergentes como el internet de las cosas (IoT) han permitido monitorear parámetros ambientales en tiempo real, facilitando la toma de decisiones informadas y la instauración de medidas de prevención y acción ante problemáticas cotidianas de la vida en la

ciudad (Nishan et al., 2024; Puneeth et al., 2024). En países como China, India y Estados Unidos, los sistemas IoT ha transformado la gestión del agua, permitiendo un registro continuo de datos ecológicos, adicionalmente en la industria este tipo de sensores y sistemas de monitoreo son esenciales para sus procesos, facilitando el manejo de diferentes equipos (Arabelli et al., 2024; Singh et al., 2024).

Contexto del problema

Los humedales urbanos como los de la comuna 22 de Santiago de Cali, han demostrado de manera histórica su importancia en la protección contra inundaciones por su capacidad de regular el ciclo del agua y mantener un equilibrio entre las épocas húmedas y secas, aportando a la preservación de la biodiversidad (Muñoz et al., 2024; Wang et al., 2023; Nermen et al., 2024). En esta comuna se encuentran ubicados aproximadamente el 82% de los humedales de la ciudad, siendo esta una red compleja de cuencas subterráneas (Montilla et al., 2022 y DAGMA, 2018). Sin embargo, en las últimas tres décadas la rápida urbanización ha llevado a la degradación de estos ecosistemas, afectando su capacidad para cumplir con estas funciones vitales (Icesi, 2023b).

Teniendo en cuenta los beneficios que traen estos ecosistemas, la investigación referente a estos es limitada y desactualizada, más hablando sobre la calidad del agua y la salud ecológica en Santiago de Cali. Existen pocos estudios que aborden de manera integral los efectos de la urbanización y la contaminación en estos cuerpos de agua, lo que genera una brecha significativa en el conocimiento necesario para desarrollar políticas de conservación efectivas (Icesi, 2023 b). En la actualidad se están desarrollando actividades de investigación referente a los humedales de la comuna 22 en donde se busca monitorear la salud del ecosistema de manera periódica, lo cual permite tener valores de referencia, pero aún falta camino para detectar de manera temprana cambios ambientales adversos y poder buscar soluciones en tiempo real.(Quevedo et al., 2022).

Con el avance de la tecnología, el uso de redes de sensores autónomos y plataformas de monitoreo en tiempo real se ha consolidado como una opción para enfrentar los desafíos que se generan en la gestión ambiental (Harron et al., 2024). En este contexto, surge la pregunta clave: ¿Cómo se puede diseñar un sistema de monitoreo autónomo, utilizando dispositivos IoT, que permita evaluar y gestionar de manera efectiva los humedales de la comuna 22 de Santiago de Cali?. El uso de las tecnologías IoT permiten la recolección de datos precisos y en tiempo real, lo

que facilita la toma de decisiones informadas y la implementación de medidas de conservación más eficaces (Omkar et al., 2024; Harron et al., 2024; Schmidt et al., 2024).

Objetivo del proyecto

Diseñar un sistema de monitoreo autónomo utilizando tecnologías IoT, que facilite la toma de decisiones en tiempo real con relación a las propiedades físico-químicas de los humedales de la comuna 22 de Cali.

Objetivos Específicos

1. Desarrollar un dispositivo IoT que permita el monitoreo remoto de variables fisicoquímicas relacionadas con la calidad del agua y el clima en los humedales estudiados.
2. Integrar un sistema de almacenamiento y visualización de los datos capturados por el dispositivo IoT.
3. Analizar las condiciones actuales en el humedal de la Universidad Icesi y del Ecoparque Lago de las garzas utilizando el sistema IoT.
4. Evaluar la efectividad del sistema de IoT implementado, contrastando las variables monitoreadas con pruebas de campo tradicionales en los humedales estudiados.

Metodología

Área de estudio

El área de estudio en un principio se determinó mediante dos criterios de inclusión, en primer lugar se buscó humedales en los cuales se presentaron investigaciones o monitoreos en los últimos cinco años y en segundo lugar, se seleccionaron humedales de fácil acceso o en tierras públicas, debido a esto se realizó un levantamiento de información secundaria con el cual fuera posible determinar los humedales idóneos para realizar las pruebas piloto, esto teniendo en cuenta que la comuna 22 alberga el 82% de los humedales de Cali (Figura 1). Al realizar la búsqueda de información se identificaron tres proyectos realizados en conjunto a la Universidad Icesi, el primero en convenio con el DAGMA, en el cual se realizó la continuación de un monitoreo y levantamiento de información en ocho humedales de la ciudad y los otros dos estudios son referentes a trabajos de grado realizados por estudiantes de pregrado de la institución, el primero es una caracterización de la macrofauna acuática de esta misma, mientras que en el segundo se

analizó la presencia de microplásticos en dos humedales de la comuna 22 (Icesi, 2023b; Cardona, 2023; Araujo, 2023).

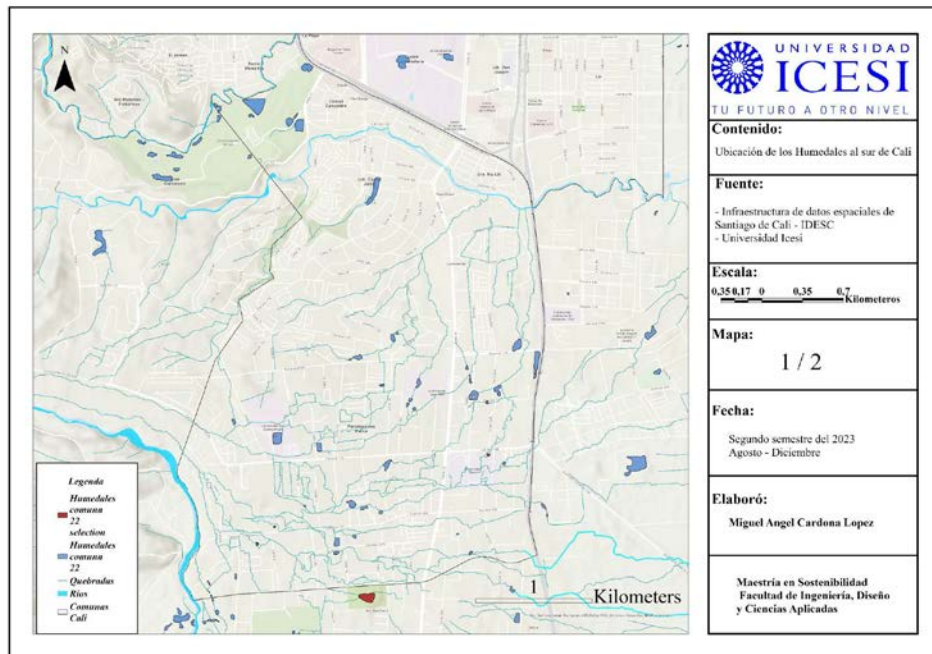


Figura 1. Ubicación e interconectividad de los humedales de la comuna 22 de Santiago de Cali por medio de las corrientes subterráneas y superficiales conocidas.

La información encontrada para los humedales de la comuna 22 nos permitió identificar nueve humedales que cumplen con los dos criterios, debido a esto se decidió excluir a los humedales que no contaran con datos de referencia para macroinvertebrados y de variables fisicoquímicas, dando como resultado un total de siete áreas posibles, por lo que se decidió trabajar únicamente con humedales que cuenten con algún grado de seguridad y cobertura de red móvil o wifi, con el fin de prevenir daños en el sistema. Esto dio como resultado la selección de el humedal de la Universidad Icesi y el Ecoparque Lago de las Garzas (Figura 2), en los cuales se implementó el proyecto piloto de la red de sensores IoT, con el fin de sentar las bases para una futura red en más humedales de la ciudad.

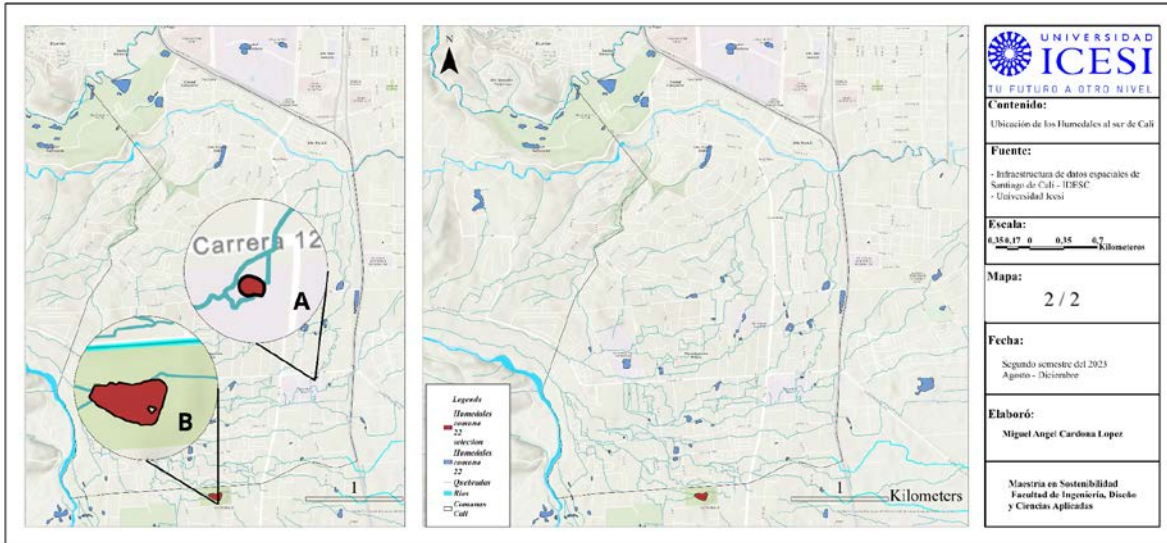


Figura 2. Ubicación de los humedales en la comuna 22 y zonas aledañas. A. representa el humedal de la Universidad Icesi y B. representa al humedal del ecoparque lago de las garzas.

El humedal perteneciente a la Universidad Icesi (Figura 2 A), fue seleccionado por ser un ecosistema clave para la conservación de la biodiversidad local, además de ser un recurso educativo y de investigación. Este ecosistema es un área estacional que durante las épocas de lluvia llega a medir aproximadamente 461 metros cuadrados, mientras que en época seca llega a desaparecer por completo dejando únicamente un área lodosa. En este ecosistema podemos encontrar diferentes especies de flora y fauna, siendo un área de investigación utilizada por estudiantes de la institución (Gevara, 2020; Cardona 2023). Este ecosistema funciona como sala cuna durante la época húmeda, permitiendo que diferentes especies de peces, macroinvertebrados y anfibios se desarrollen en condiciones adecuadas, además de brindar diversos servicios ecosistémicos a la comunidad educativa.

El humedal del Ecoparque Lago de las garzas (Figura 2 B), es un sistema artificial en el que se han desarrollado diferentes esfuerzos de conservación desde 1995 hasta el día de hoy, es un ecosistema que ha demostrado cómo las diferentes intervenciones humanas pueden ayudar a recuperar la biodiversidad. En la actualidad el ecoparque está siendo manejado por el DAGMA y el humedal presenta un área aproximada de 8232 metros cuadrados, siendo este un ecosistema resiliente que ha crecido y mejorado notablemente la salud de sus alrededores en el que se pueden apreciar servicios ecosistémicos sociales, culturales, educativos y ambientales.

Identificación de necesidades

Para la concepción de este proyecto, se identificó la necesidad de un sistema autónomo de monitoreo para evaluar y gestionar de manera efectiva los humedales de la comuna 22 de Cali. La búsqueda de información secundaria referente a estudios realizados en el área de estudio se identificó que la degradación de estos ecosistemas se ve relacionada con la actividad humana y la ausencia de monitoreos periódicos, ha comprometido su capacidad para prestar servicios ecosistémicos (Araujo, 2023; Cardenas et al., 2023 a y b; Cardona, 2023). Con base en esta recolección de información, se definió el objetivo de desarrollar un sistema IoT, capaz de registrar periódicamente variables fisicoquímicas, con las cuales se pueda inferir la condición del ecosistema (Jia, 2020).

Debido a que algunos estudios constantemente resaltan la importancia de variables como el pH, la temperatura del agua, la conductividad eléctrica (EC), los sólidos disueltos totales (TDS), la temperatura ambiental y la humedad relativa para entender las variaciones en los ecosistemas (Bangboye et al., 2016; Jia, 2020; Khloe et al., 2011; Bodkin et al., 2007; Jamshidzadeh et al., 2024; Kumar et al., 2013; Moroşanu et al., 2022; Cardona, 2023; Araujo, 2023). La recopilación de esta información secundaria permitió seleccionar estas variables para la medición periódica por medio del sistema IoT, proporcionando datos confiables para la toma de decisiones informadas y fomentar estrategias de conservación efectivas en la comuna 22 de Cali.

Es necesario entender que existen muchas otras variables que se pueden medir y serían de ayuda para comprender la salud del ecosistema, permitiendo focalizar estrategias y esfuerzos de recuperación dependiendo de las necesidades de cada humedal, es necesario resaltar que no todos los humedales son iguales y aunque puedan llegar a interconectarse de diferentes manera se debe de priorizar el uso de ciertos sensores dependiendo del contexto ecológico de cada uno (Jia, 2020; Bidwell, 2013).

Diseño conceptual y técnico

En esta etapa se buscó la manera de implementar múltiples sensores en un mismo sistema, en este proceso se priorizo la selección de componentes accesibles que garantizaran un desempeño óptimo de las condiciones de los humedales. Tras una búsqueda bibliográfica se identificaron una amplia gama de microcontroladores que podrían funcionar para este trabajo, como pueden ser las

tarjetas Arduino, las ESP32 o Raspberry (Goyal, 2024; Chaidoulis et al., 2022; Najib et al., 2024). Debido a que la idea del proyecto es generar un modelo piloto de bajo consumo, se optó por utilizar microcontroladores ESP32 debido a que es un microcontrolador simple de bajo consumo energético y es capaz de leer los datos registrados por los sensores (Márquez et al., 2023; Maulana et al., 2024).

El diseño técnico incluye la integración de sensores de pH, temperatura, EC, TDS y humedad en un módulo compacto, el cual se alimenta por un sistema de energía fotovoltaica compuesta por paneles y baterías, este modelo busca garantizar la autonomía energética, permitiendo un despliegue del sistema de manera remota con mayor facilidad (Wu et al., 2017; Xu et al., 2024). Adicionalmente se buscó la forma de integrar una plataforma de transmisión de datos en la que se pueda registrar y almacenar la información durante toda la operación de despliegue de los módulos (Olariu et al., 2023; Anal & Kaur, 2024).

Las plataformas seleccionadas para cumplir con estos requerimientos fueron Unidos y ThingSpeak debido a que son dos áreas de trabajo confiables con una fácil visualización permitiendo la identificación de patrones, para el entendimiento de los cambios ambientales, en el caso de la primera es posible generar alertas tempranas para ciertos parámetros y por su parte en la segunda es posible realizar análisis básicos (Ivars et al., 2023; Hutabarat et al., 2023).

Construcción y Validación

En esta etapa del proyecto se priorizó la construcción y validación del sistema tanto en pruebas de laboratorio, como en campo. Los primeros prototipos contaron con una construcción de hardware específica para cada uno de los sensores por separado, esto basándose en las especificaciones dadas por el fabricante de los sensores. La compra de los componentes principales se realizó por medio de la empresa DFrobot, debido a que contaban en su catálogo bastante accesible y compatibles con el microcontrolador ESP32.

La calibración se realizó de manera particular para cada uno de los sensores, siguiendo las especificaciones del fabricante, como la calibración de tres puntos para el sensor de pH y la calibración de dos puntos para el sensor de EC, empleando soluciones estándar de referencia. Una vez calibrado, el sistema fue sometido a pruebas preliminares en laboratorio utilizando muestras de agua de los humedales seleccionados. Estas pruebas sirvieron para validar la consistencia de las

mediciones y optimizar la programación del ESP32, particularmente en lo relacionado con la recopilación y transmisión de datos a plataformas en la nube.

Durante las pruebas de laboratorio, se configuró un intervalo de registro de datos de un minuto, esto con la finalidad de identificar posibles anomalías en los sensores y permitió realizar los ajustes necesarios en la etapa de integración de múltiples sensores en un mismo software y el hardware. Posteriormente, el sistema fue instalado en los humedales de la Universidad Icesi y el Ecoparque Lago de las Garzas, seleccionados por su relevancia ecológica, seguridad y acceso a redes inalámbricas. Durante la implementación en campo, se priorizó la ubicación estratégica de los módulos para maximizar la cobertura de las mediciones y asegurar la transmisión continua de datos. Además, se realizaron evaluaciones en tiempo real del sistema de energía solar, observando su capacidad para mantener la operación autónoma del módulo durante el día y la noche.

Las pruebas preliminares en campo permitieron evaluar la estabilidad de la conectividad con las plataformas Ubidots y ThingSpeak, identificando que esta última ofrecía un rendimiento más confiable en entornos con conectividad variable. Estas pruebas también revelaron desafíos, como la pérdida intermitente de datos debido a interrupciones en la conectividad a internet, lo que llevó a ajustes en los intervalos de registro y potenciar el sistema de respaldo energético.

Monitoreo y evaluación

En esta fase de campo se realizó un monitoreo continuo en el que las variables ambientales se registraron en un intervalo de registro de diez minutos, esto con la finalidad de optimizar el balance entre consumo energético y frecuencia de muestreo. Los datos obtenidos durante esta etapa se transmitieron en tiempo real a la nube, donde se almacenaron y visualizaron para analizar de manera preliminar y de esta manera identificar tendencias temporales y patrones estacionales en los humedales monitoreados.

El desempeño del sistema fue validado por la comparación de los datos registrados por el sistema IoT y datos recopilados mediante métodos tradicionales, por medio del análisis de muestras de agua en laboratorio y muestreos de bioindicadores por medio del índice BMWP (Tabla 1). A lo largo de esta etapa se realizó un monitoreo constante realizando pruebas de calibración y seguimiento de los sensores permitiendo abordar posibles desafíos operativos relacionados con la autonomía energética, la conectividad y la estabilidad del sistema.

Tabla 1. Índice BMWP/Col propuesto por el Instituto de Investigación en Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (2008)

CLASE	CALIDAD	BMWP/Col	SIGNIFICADO	COLOR
I	BUENA	> 101	Aguas muy limpias a limpias.	Azul
II	ACEPTABLE	61-100	Aguas ligeramente contaminadas.	Verde
III	DUDOSA	36-60	Aguas moderadamente contaminadas.	Amarillo
IV	CRÍTICA	16-35	Aguas muy contaminadas.	Naranja
V	MUY CRÍTICA	<15	Aguas fuertemente contaminadas	Rojo

Los resultados obtenidos mediante estos tres métodos fueron comparados con valores de referencia disponibles en la literatura científica, lo que permitió contextualizar el estado de los ecosistemas monitoreados en relación con los estándares de calidad de agua establecidos. Además, el análisis de macroinvertebrados proporcionó una validación externa de los datos, permitiendo correlacionar la calidad del agua con la presencia de organismos bioindicadores que responden a diferentes niveles de contaminación. Este enfoque integrador, que combinó técnicas cuantitativas y cualitativas, ofreció una visión holística del rendimiento del sistema de monitoreo en condiciones naturales. Así, se identificaron tanto las fortalezas del sistema, como su capacidad para operar de forma autónoma y en tiempo real, como también las limitaciones, como su precisión en ambientes con fluctuaciones rápidas de ciertos parámetros. Este análisis integral permitió evaluar la efectividad del sistema y su aplicabilidad como herramienta en la conservación de humedales.

Resultados y Discusión

Construcción y Validación

El diseño del módulo del sistema IoT considero los requerimientos técnicos y funcionales para garantizar un monitoreo eficaz y accesible en los humedales seleccionados. En este proceso se tomó como base el microcontrolador ESP32-WROOM32 debido a su bajo consumo energético,

conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada, además de su compatibilidad con una amplia gama de sensores. Las propiedades ofrecidas por el microcontrolador nos permitieron construir un hardware mediante el entorno de programación de arduino IDE, en el cual se buscó garantizar la capacidad operativa para registrar y transmitir datos de manera fácil y efectiva en intervalos de cinco minutos.

Una vez definido el microcontrolador ESP32-WROOM32 como núcleo del sistema se realizó la adquisición de los sensores por medio de la empresa DFROBOT. En un principio se construyó un hardware específico para la medida del pH, la temperatura del agua, la conductividad eléctrica, los TDS y el sensor de temperatura y humedad (Figura 3). Cuando se confirmó la funcionalidad de cada uno de los sensores se procedió a construir un código con el cual fuera posible integrar los cinco sensores en un mismo módulo el cual registre las variables de interés. Tras implementar el sistema se buscó validar la funcionalidad de este mismo, por lo que fue necesario calibrar de manera individual cada uno de los sensores, siguiendo los protocolos recomendados por el proveedor. El sensor de pH se calibró por medio de un proceso de tres puntos en el que se requirieron soluciones buffer de referencia con pH 4, 7 y 10, mientras que el sensor de EC se ajustó por un proceso de dos puntos en el se utilizaron soluciones de referencia de 12.88 y 1413 μS para obtener resultados precisos en campo. Los otros tres sensores fueron calibrados a partir de valores de referencia obtenidos de equipos de laboratorio de mayor precisión.

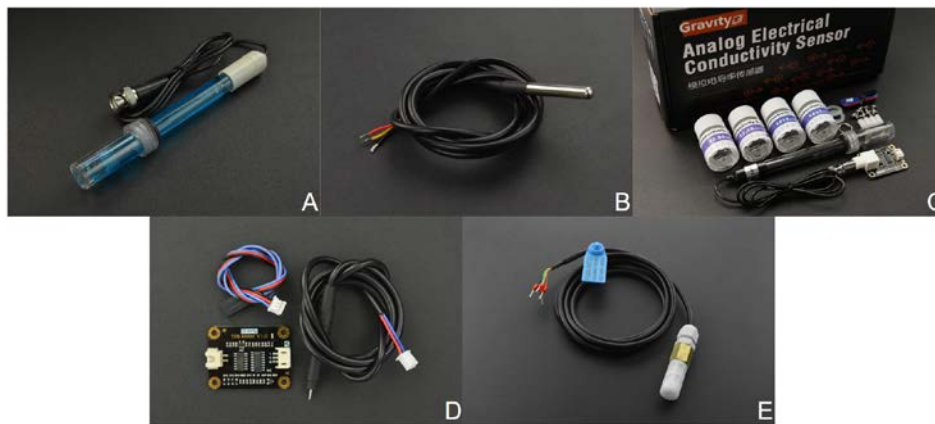


Figura 3. Sensores utilizados para la construcción de los módulos de monitoreo (Imágenes tomadas de la tienda en línea: <https://www.dfrobot.com>). **A.** sensor analógico de pH. **B.** sensor digital de temperatura DS18B20 . **C.** Sensor análogo EC. **D.** Sensor analógico de TDS. **E.** Sensor de temperatura y humedad SHT31.

El momento en el que se confirmó la fiabilidad de los datos reportados por el sistema IoT de manera local por medio de la visualización de los registros en Arduino IDE (Figura 4 A.), se

procedió a construir el código para la transmisión y visualización de estos mismos de manera remota, por medio de la plataforma Ubidots (Figura 4 B.), en un principio se registraron datos obtenidos de muestras almacenadas en laboratorio para verificar el correcto funcionamiento del sistema. Las pruebas de laboratorio revelaron que la plataforma presenta ciertas limitaciones en términos de almacenamiento de datos, por lo que se vio la posibilidad de utilizar ThingSpeak como una opción de respaldo en caso de ser necesario, aunque esta contará con una interfaz menos amigable al usuario (Figura 4 C.).

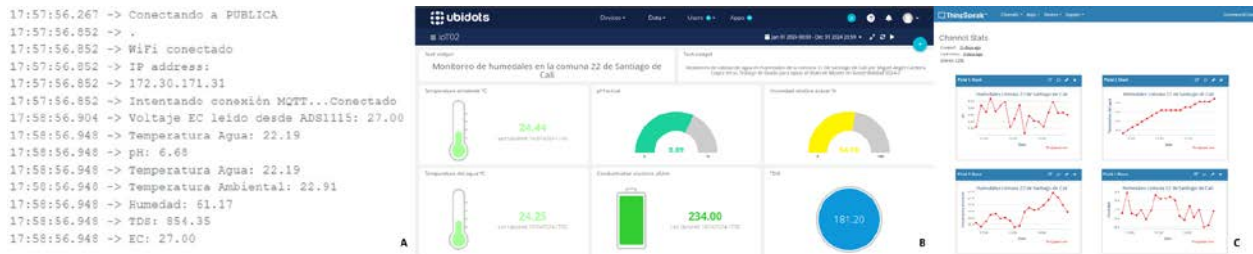


Figura 4. Plataformas utilizadas durante las pruebas piloto realizadas durante los procesos de calibración en laboratorio. **A.** Visualización de datos obtenidos de manera local en Arduino IDE. **B.** Plataforma Ubidots, un sistema de fácil visualización que permite una comprensión de los datos. **C.** Plataforma ThingSpeak, plataforma técnica utilizada para la visualización de datos en el proceso de campo.

Para garantizar la autonomía energética del sistema se realizaron diferentes pruebas en el laboratorio, con las que se determinó que un panel solar de 50 voltios proporciona la energía suficiente para alimentar al sistema durante el día y a su vez permitiría recargar una batería de 15 voltios para almacenar energía para su uso durante la noche, además en caso de mal clima la batería garantiza la autonomía del sistema por al menos tres días continuos (figura 5).

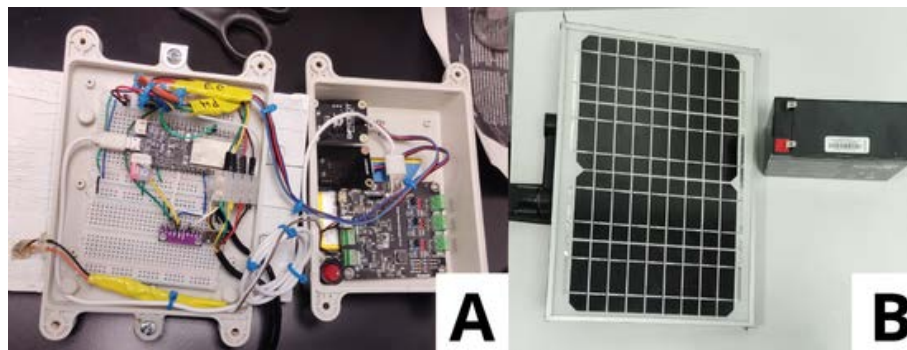


Figura 5. Diseño y conexión de los módulos utilizados para las pruebas piloto en la comuna 22. **A.** módulo de sensores construidos para el monitoreo de humedales. **B.** Sistema fotovoltaico utilizado para alimentar el módulo de monitoreo de manera autónoma.

Implementación

Las pruebas en campo iniciaron cuando se confirmó que el sistema IoT presentaba resultados óptimos en laboratorio, tanto en la medición, registro, transmisión y la autonomía energética del sistema. Las pruebas en los humedales de la Universidad Icesi y en el Ecoparque Lago de las Garzas permitieron identificar algunas problemáticas con la transmisión de los datos a la plataforma ubidots, en el caso de la Universidad Icesi, se identificó que la red Wi-Fi no daba la potencia adecuada, por lo que se intentó agregar un repetidor de señal en los alrededores del humedal, lo cual permitió la conectividad del sistema sin mayor problema. Durante el fin de semana se obtuvieron datos iniciales con los que fue posible identificar algunos patrones, pero al iniciar la jornada académica habitual de la institución se identificó que la calidad de la red variaba en mayor medida en horas de la mañana con el ingreso de la comunidad educativa y en el horario de almuerzo, lo que dio como resultado la pérdida del registro de datos por periodos de dos a siete horas.

Debido a los desafíos identificados en las primeras pruebas de campo se decidió por utilizar la plataforma thingSpeak, la cual era capaz de registrar los datos obtenidos por el sistema IoT aunque la red wifi o móvil sea inestable, lo cual fue una gran ventaja, adicionalmente esta plataforma cuenta con la posibilidad de almacenar un mayor número de datos, con la única desventaja de que su visualización es mucho más sencilla y no permite una mayor personalización. Adicionalmente se optó por agregar una red WiFi propia en el módulo de sensores con la finalidad de poder operar sin mayor problema en áreas de difícil acceso.

Monitoreo y evaluación

La implementación del sistema permitió identificar algunos posibles desafíos al momento de llevar el sistema a campo, debido a que las interacciones inesperadas con animales o con individuos curiosos de la sociedad podrían llegar a generar datos erróneos como lo fue en el caso de diversos datos atípicos que se presentaron durante el registro de datos, lo cual es una cuestión fundamental a tener en cuenta al momento de ubicar el módulo de sensores en el área de estudio. Adicional a la instalación del sistema de monitoreo en los humedales se tomaron registros de las variables físico químicas del ecosistema en días puntuales durante revisiones periódicas, adicionalmente se compara la veracidad del sistema en contraste con el índice de calidad de agua BMWP/Col en el cual se utilizan especies bioindicadoras para determinar la calidad del ecosistema.

Los análisis de caracterización de macrofauna acuática nos permitieron evaluar el índice BMWP de cada ecosistema, dando como resultado que tras tres muestreos rápidos en cada uno, el humedal perteneciente a la Universidad Icesi obtuvo un valor de 40, mientras que el humedal del Ecoparque Lago de las Garzas obtuvo un valor de 44 (Figura 6). En registros realizados en el pasado se encontró que para el humedal de la Universidad Icesi su índice estaba categorizado en crítico con un puntaje de 25, mientras que el índice para el humedal del Ecoparque lago de las Garzas se presentó de igual manera en la categoría de dudoso, pero con un puntaje superior de 45 (Figura 6).

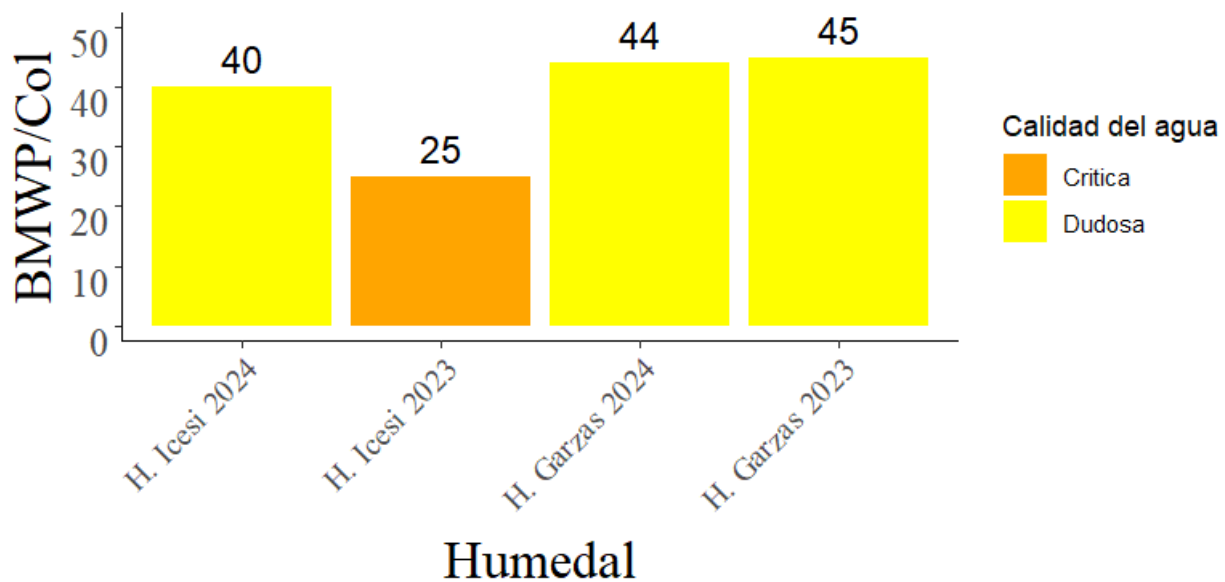


Figura 6. Determinación del índice BMWP/Col para los dos humedales seleccionados en el año 2023 y 2024. Naranja reflejando el humedal en estado crítico en este caso el humedal de la universidad icesi en el año 2023, amarillo para los humedales en estado dudoso.

Estos valores del índice reflejan que la comunidad de macroinvertebrados que habitan en estos ecosistemas pueden tolerar condiciones de contaminación leve a moderada, adicionalmente los datos del Humedal de la Universidad Icesi nos demuestran cómo se pueden generar variaciones en la calidad de hábitat de un ecosistema estacional, puesto que los datos obtenidos en el 2023 fueron tomados al inicio de año, mientras que los de este estudio fueron tomado a mediados de año, dando como resultado un cambio abrupto en la calidad del ecosistema. Los datos recolectados en el humedal de la Universidad Icesi y el humedal del Ecoparque Lago de las Garzas a través de los módulos de monitoreo fueron procesados previamente, eliminando lecturas erróneas causadas por el lector durante la instalación o por fallos técnicos. Luego, se realizó un análisis de cada

variable con estadística básica usando el software Restudio para identificar relaciones y visualizar fluctuaciones.

Los registros del módulo de sensores permitió identificar patrones temporales específicos en las variables físico-químicas y ambientales. Por ejemplo, la temperatura del agua y del ambiente presentaron picos mínimos entre las 4 y las 6 de la mañana y alcanzaron sus valores más altos alrededor de las 10 u 11 de la noche (Figuras A y C), mientras que la humedad relativa alcanzó sus niveles mas bajos entre la 1 y las 2 de la tarde (Figura E). Estas fluctuaciones reflejan la influencia directa del clima y la dinámica diaria del ecosistema. Por otro lado, variables como la conductividad eléctrica (Figura B) y los sólidos totales disueltos (Figura F) mostraron una menor variabilidad a lo largo del día, sugiriendo estabilidad en la composición química del agua bajo condiciones normales. Sin embargo, en el humedal ICESI se observaron variaciones significativas en algunas lecturas, atribuidas a ajustes y calibraciones realizadas durante las primeras fases de implementación del sistema.

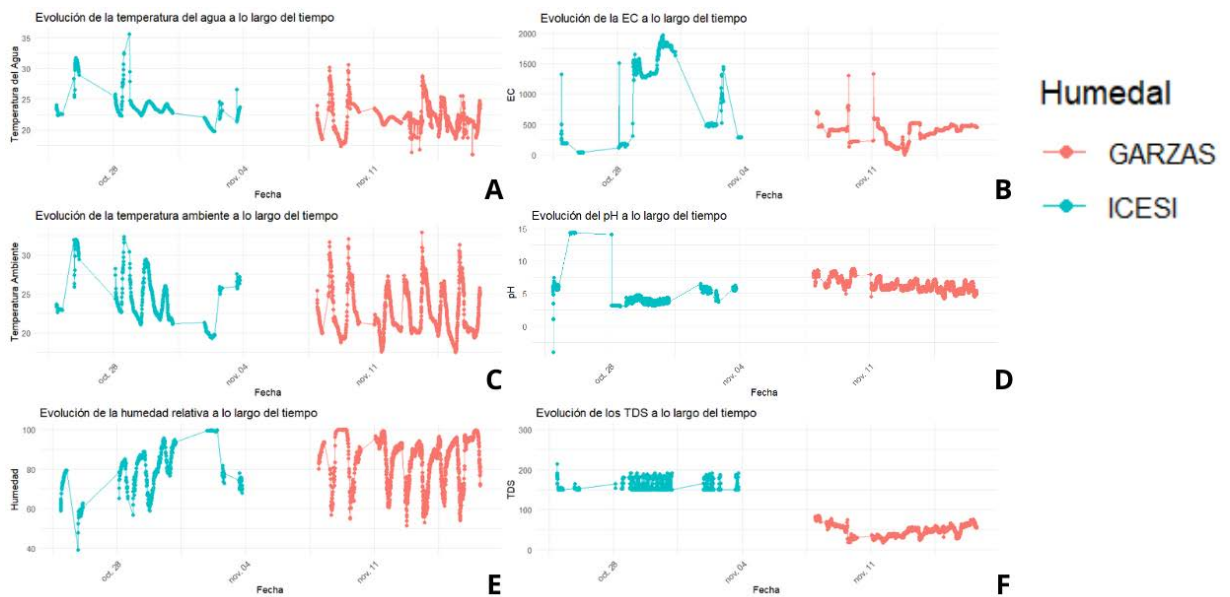


Figura 7. Variables registradas por el modulo de sensores en los dos humedales, de color naranja se identifica al humedal Ecoparque Lago de las Garzas, de color azul se identifica el humedal de la Universidad Icesi. en la figura A, se identifica la variación de la temperatura del agua, en la B, se identifica la de la electroconductividad, en el caso de la C, tenemos la temperatura ambiental, por su parte la D, presenta la variación del pH, la E presenta la humedad relativa y finalmente la F muestras los valores de TDS registrados.

Encontramos que la mayor variabilidad se encuentra en el humedal de la universidad Icesi, esto se debe a que al ser el primer humedal en el que se plantó el sistema, fue necesario realizar modificaciones y diferentes adaptaciones al módulo, puesto que en este se presentaron los primeros desafíos considerables del proyecto, provocando que fuera necesaria la desactivación del sistema en algunas ocasiones o la recalibración de este mismo. Los datos obtenidos por el módulo de monitoreo autónomo en contraste a los resultados de los monitoreos realizados, nos permiten constatar que el sistema es eficiente, además de demostrar que los cambios en las variables pueden llegar a explicar cambios en el ecosistema, permitiendo la intervención o revisión de este mismo, hasta el momento la aparición de datos atípicos nos permitió identificar cambios en el clima, lo cual puede afectar a la biota y adicionalmente permite identificar patrones naturales que se generan a lo largo del día, los cuales podrían cambiar a lo largo del año.

El sistema de monitoreo autónomo enfrentó desafíos operativos relacionados con la interacción de animales, curiosos humanos y condiciones ambientales extremas, lo que en ocasiones generó datos atípicos o interrupciones en la recolección. Sin embargo, tras ajustes y reconfiguraciones, el sistema demostró ser eficiente y capaz de proporcionar datos confiables que complementan las observaciones tradicionales. La capacidad de identificar patrones como los cambios en el pH, la temperatura o la humedad a lo largo del día y de asociarlos a posibles alteraciones en el ecosistema resalta el valor de estas tecnologías en la gestión de humedales urbanos. Asimismo, la integración de datos históricos y contemporáneos permite establecer tendencias a largo plazo y diseñar estrategias de conservación más precisas, particularmente en ecosistemas dinámicos como los humedales de la comuna 22 en Santiago de Cali.

Conclusiones

El diseño e implementación del sistema IoT para el monitoreo de los humedales de la comuna 22 en Cali demostró ser una herramienta tecnológica efectiva y viable para la recopilación de datos a largo plazo. Por medio de este proyecto fue posible identificar la eficiencia y la aplicabilidad de los sistemas IoT para el monitoreo de los ecosistemas de manera autónoma y remota, la captura de las variables fisicoquímicas, proporcionan información esencial para el análisis de la calidad del agua y la salud ecológica. Los resultados validaron la precisión del sistema al comparar sus datos con registros ocasionales e identificación de bioindicadores,

destacando su potencial como una herramienta para el manejo sostenible de los ecosistemas urbanos.

El uso de tecnologías IoT combinadas con metodologías tradicionales de evaluación ecológica, como el índice BMWP/Col, demostró ser una herramienta eficaz para el monitoreo de los humedales urbanos. Esta integración permitió identificar patrones diarios en las variables físico-químicas y validar las condiciones del ecosistema mediante bioindicadores. Los resultados muestran que los sensores pueden proporcionar datos en tiempo real que complementan los análisis biológicos, facilitando una comprensión más integral de los cambios en la calidad ambiental de los humedales.

El monitoreo en los humedales de la Universidad ICESI y el Ecoparque Lago de las Garzas evidenció cómo factores estacionales, antropogénicos y climáticos influyen en las dinámicas de estos ecosistemas. El incremento en el índice BMWP del humedal ICESI en comparación con años anteriores sugiere una posible cambios en las condiciones del humedal a lo largo del año, mientras que la estabilidad del humedal del Ecoparque Lago de las Garzas refleja una mayor resiliencia frente a perturbaciones.

Los desafíos enfrentados durante la instalación y operación de los sistemas IoT, como la interferencia de animales o errores en los datos por recalibración, nos permitió obtener resultados que respaldan su viabilidad y utilidad. Estas tecnologías permiten identificar patrones naturales y atípicos en las variables monitoreadas, lo cual no solo mejora el entendimiento de las dinámicas ecosistémicas, sino que también facilita la detección temprana de posibles amenazas.

Referencias

- Bangboye, O. A., Osundiya, M. O., Olowu, R. A., & Adeniyi, D. A. (2016). Physico-Chemical Analysis of Wetland water of Iba Community in Lagos State Nigeria. *America Journal of Chemistry*, 6(6), 149-154.
- Bharati, Kolhe., S., P., Zambare, S., P., Zambare., S., B., Andhale, S., B., Andhale. (2011). 3. Assessment of Physico-Chemical Water Parameters Using Correlation Analysis: A Case Study of Gangapur Dam at Nashik District (M.s.) India. *Indian journal of applied research*, doi: 10.15373/2249555X/MAR2014/159
- Bidwell, J. R. (2013). Physical and chemical monitoring of wetland water. *Wetland Techniques: Volume 1: Foundations*, 325-353.

- Bodkin, R., Kern, J., McClellan, P., Butt, A. J., & Martin, C. (2007). Conservation in action: Limiting total dissolved solids to protect aquatic life. *Journal of soil and water conservation*, 62(3), 57A-61A.
- Cárdenas Posada, G., Londoño, G. A., Cardona Lopez, M. A., Ayala Sanchez, D., & Estupiñan, C. A. (2023 a). Informe de las especies encontradas en la investigación de Humedales de Santiago de Cali. DAGMA.
- Cárdenas Posada, G., Londoño, G. A., Cardona Lopez, M. A., Ayala Sanchez, D., & Estupiñan, C. A. (2023b). Informe ejecutivo final de investigación en humedales del convenio 30-2023 del plan de acción del humedal La Bandera y acciones de investigación y educación ambiental en áreas del SIMAP y humedales, ubicados en el Distrito de Santiago de Cali. Universidad Icesi y DAGMA.
- Chaidoulis, I., Karanikolas, N., & Psycharis, S. (2022, November). Modular, low-cost, open-source lab platform for Electronic Engineering & Mechatronics. In *Proceedings of the 26th Pan-Hellenic Conference on Informatics* (pp. 187-191).
- DAGMA. (2018). Actualización de inventario de humedales urbanos de Santiago de Cali y Lineamientos para su conservación en predios privados. Santiago de Cali.
- Dr., Puneeth, GJ., Shashank, T., Vinit, P., S, D, Muzammil., N, R, Karthikeya. (2024). 3. Smart Water Pollution Management: IoT for Automatic Detection and Prevention. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, doi: 10.48175/ijarsct-18484
- Francisca, Quevedo., Jorge, Rojas, Hernández., Ricardo, Barra. (2022). (5) Towards a Chilean Water Governance: A Study on the Los Batros and Paicaví Wetland Reservoirs. *Water*, doi: 10.3390/w14182861
- Guevara, Lina. (2020). Caracterización de la composición y estructura de la flora leñosa de la Universidad Icesi. Repositorio de tesis de pregrado de la Universidad Icesi
- Gloria, Yaneth, Florez-Yepes., Jhon, Fredy, Betancur-Pérez., Mario, Fernando, Monterroso-Tobar., Jhon, Makario, Londoño-Bonilla. (2018). (4) Temporary wetland evolution in the upper Chinchiná river basin and its relationship with ecosystem dynamics. *Dyna*, doi: 10.15446/DYNA.V85N207.69963

Hutabarat, B. F., Peslinof, M., Afrianto, M. F., & Fendriani, Y. (2023). Sistem basis data pemantauan parameter air berbasis Internet of Things (IoT) dengan platform ThingSpeak. *JOURNAL ONLINE OF PHYSICS*, 8(2), 42-50.

Instituto Humboldt. (2021, 2 de febrero). Humedales: un tesoro anfibio que sobrevive en el 26 por ciento de Colombia [Comunicado de prensa]. Prensa Instituto Humboldt.
<https://www.humboldt.org.co/noticias/humedales-un-tesoro-anfibio-que-sobrevive-en-el-26-por-ciento-de-colombia>

Ivars-Palomares, A., Zaragoza-Esquerdo, M., Sendra, S., & Lloret, J. (2023, October). Design of a platform for data storage and data management in IoT networks. In *2023 10th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)* (pp. 1-6). IEEE.

Jamshidzadeh, Z., Latif, S. D., Ehteram, M., Sheikh Khozani, Z., Ahmed, A. N., Sherif, M., & El-Shafie, A. (2024). An advanced hybrid deep learning model for predicting total dissolved solids and electrical conductivity (EC) in coastal aquifers. *Environmental Sciences Europe*, 36(1), 20.

Jia, Y. (2020). LoRa-based WSNs construction and low-power data collection strategy for wetland environmental monitoring. *Wireless Personal Communications*, 114(2), 1533-1555.

Kumar, A., Bhawsar, N. G., Khandelwal, S., Sakir, S. S., Ahuja, S., Pathak, M., ... & Khasdeo, K. (2013). PHYSICO-CHEMICAL PARAMETERS APPLY TO ANALYSIS OF DRINKING WATER FROM SOME SELECTED AREA OF BETUL DISTRICT, MADHYA PRADESH. *International Journal of Pharmaceutical, Chemical & Biological Sciences*, 3(4).

Lennart, Schmidt., Felix, Weiske., Manfred, Schütze., Phillip, Grimm., Julius, Polz., Jan, Bumberger. (2024). (4) Tackling practical challenges in anomaly detection for real-time monitoring of urban waste water networks. doi: 10.5194/egusphere-egu24-18749

María, Teresa., Fernandez, Piedade., Florian, Wittmann., Jochen, Schöngart., Wolfgang, J., Junk., Pia, Parolin. (2023). (4) Wetlands Ecosystems. doi: 10.1016/b978-0-12-822562-2.00158-4

Márquez-Vera, M. A., Martínez-Quezada, M., Calderón-Suárez, R., Rodríguez, A., & Ortega-Mendoza, R. M. (2023). Microcontrollers programming for control and automation in undergraduate biotechnology engineering education. *Digital Chemical Engineering*, 9, 100122.

- Maulana, I., Bachtiar, M. M., Fadlun, W., & Sakti, F. P. (2024). Rancang Bangun Alat Informasi Penjemputan Siswa Berbasis Mikrokontroler ESP32. *Jurnal Sistem Komputer dan Informatika (JSON)*, 5(3), 626-633.
- Miguel, Cardona. (2023). Caracterización de la Macrofauna Acuática en el Campus de la Universidad Icesi. Repositorio de tesis de pregrado de la Universidad Icesi
- Moroşanu, G. A., Zaharia, L., & Ioana-Toroimac, G. (2022). An integrated methodology to estimate the contribution of environmental factors controlling the spatial variation of total dissolved solids. Application on Jiu River Basin (Romania).
- Najib, M. A., Sulartopo, S., Sasmoko, D., Danang, D., & Suasana, I. S. (2024). Sistem Pendeteksi Bencana Kebakaran Menggunakan ESP32 Dan Arduino Berbasis WEB: Studi Kasus Di Toko Citra Berkah Karangawen Demak. *Neptunus: Jurnal Ilmu Komputer Dan Teknologi Informasi*, 2(1), 15-24.
- Nathalia, Ballesteros., Luisa, Páez., Nicolás, Luna., Ariana, Reina., Vanessa, Urrea., Catalina, Sánchez., Angie, Ramírez., Juan, David, Ramírez., Marina, Muñoz. (2023). (2) Characterization of microbial communities in seven wetlands with different anthropogenic burden using Next Generation Sequencing in Bogotá, Colombia. *Dental science reports*, doi: 10.1038/s41598-023-42970-w
- Nermen, M., Matter., Nevine, G., Gado. (2024). (2) Constructed wetlands nature-based solutions to enhance urban resilience in Egyptian cities. *HBRC Journal*, doi: 10.1080/16874048.2024.2311521
- Olariu, Eliza, Maria., Vlasin, Cristian., Balaj, Ovidiu., Hediesiu, Horia. (2023). 2. Cloud based Real-Time Data Acquisition for Industrial Applications. doi: 10.1109/siitme59799.2023.10431176
- Omkar, Bhagwan, Khilari., Rushikesh, Nagorao, Anarwad., Rushikesh, Dinesh, Borekar., Bhausahab, Shinde., Prof., Snehal, Khartad. (2024). (2) An IoT based Environment Monitoring System. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, doi: 10.48175/ijarsct-18639
- Qiu, J., Zhang, Y., & Ma, J. (2024). Wetland habitats supporting waterbird diversity: Conservation perspective on biodiversity-ecosystem functioning relationship. *Journal of Environmental Management*, 357, 120663.

- Rajeshwarrao, Arabelli., Eswararao, Boddepalli., Mrunalini, Buradkar., N, V, Sarathbabu, Goriparti., M., Kalyan, Chakravarthi. (2024). 2. IoT-Enabled Environmental Monitoring System Using AI. doi: 10.1109/accai61061.2024.10602131
- Ramachandra, T. V., Asulabha, K. S., Sincy, V., & Jaishanker, R. (2024). Wetlands for human well-being. *Journal of Environmental Biology*, 45(2), i-iv. <https://doi.org/10.22438/jeb/45/2/Editorial>
- Rejoan, Kobir, Nishan., Shapla, Akter., Rayhanul, Islam, Sony., Md, Mozammal, Hoque., Meratun, Junnut, Anee., Md., Amzad, Hossain. (2024). 1. Development of an IoT-based multi-level system for real-time water quality monitoring in industrial wastewater. *Discover water*, doi: 10.1007/s43832-024-00092-y
- Shivani, Anal., Dr., Sukhvinder, Kaur. (2024). 4. Live Data Monitoring in Industry. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, doi: 10.22214/ijraset.2024.63080
- Silvia, Martín, Muñoz., J., Schoelynck., Doerthe, Tetzlaff., Robrecht, Debbaut., Maria, Warter., Jan, Staes. (2024). (5) Assessing biodiversity and regulatory ecosystem services in urban water bodies which serve as aqua-Nature-based Solutions. *Frontiers in Environmental Science*, doi: 10.3389/fenvs.2023.1304347
- Singh, G., Priya, L., Kumar, P., Karthika, J., Saikumar, T., & Nidhya, M. S. (2024). Analysis of Internet of Things-Integrated Technology in a Smart Factory. In *Machine Vision and Industrial Robotics in Manufacturing* (pp. 368-384). CRC Press.
- Syed, Harron., Gaurav, Shukla., Harshita, Kaushik. (2024). (3) Optimized Sensor Network Design for Real-Time Environmental Monitoring. doi: 10.1109/icocwc60930.2024.10470648
- Tatiana, Araujo. (2023) Microplasticos en los humedales de Cali: Panamericano y la ballena (Comuna 22)
- Wu, F., Rudiger, C., & Yuce, M. R. (2017, November). Design and field test of an autonomous IoT WSN platform for environmental monitoring. In *2017 27th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Xu, C., Zhang, X., Fang, J., Yao, Y., Zhang, Y., Lu, X., ... & Xin, M. (2024). Self-Supplying Photovoltaic-Hygroelectric Coupling System Powering Internet of Things Sensors. *ACS omega*, 9(41), 42602-42611.

Yash, Goyal. (2024). 1. Comparative Study of Microcontoller: ARDUINO UNO, RASPBERRY PI 4, ESP 32. International Journal For Science Technology And Engineering, doi: 10.22214/ijraset.2024.63598

Y.G., Wang., Gan, Yang., Biao, Wei., Youli, Zhang., Yuexiang, Lu. (2023). (4) Analysis of Factors Influencing Plant Diversity in Urban Wetlands Based on Structural Equation Model. doi: 10.21203/rs.3.rs-3265743/v1