



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

Actualización de Prototipo de Estación de Monitorización de
Variables Meteorológicas

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Electrónica

AUTOR: Héctor Andrés López Andrade

TUTOR: Ing. Vicente Peñaranda MSc.

Guayaquil – Ecuador
2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Héctor Andrés López Andrade con documento de identificación N° 0923656326 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 17 de septiembre de 2025

Atentamente,



Héctor Andrés López Andrade
0923656326

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN
A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Héctor Andrés López Andrade con documento de identificación N°. 0923656326, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del proyecto técnico: “Actualización de Prototipo de Estación de Monitorización de Variables Meteorológicas”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 17 de septiembre de 2025

Atentamente,



Héctor Andrés López Andrade

0923656326

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Vicente Avelino Peñaranda Idrovo con documento de identificación N° 0916113426, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ACTUALIZACIÓN DE PROTOTIPO DE ESTACIÓN DE MONITORIZACIÓN DE VARIABLES METEOROLÓGICAS, realizado por Hector Andrés López Andrade con documento de identificación N° 0923656326, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción tesis que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 17 de septiembre de 2025

Atentamente,



Ing. Vicente Avelino Peñaranda Idrovo MSc.

CI: 0916113426

AGRADECIMIENTO

Son muchas las personas que han contribuido al proceso y conclusión de este trabajo de titulación.

Quiero agradecer a mis padres por estar presentes en cada momento, que con gran paciencia me comprendieron y nunca me dejaron atrás.

A los docentes que con el tiempo se volvieron amigos, que entre risas y disgustos aportaron arduamente al desarrollo y culminación de mi ingeniería.

A mis compañeros que fueron un apoyo constante durante las horas de clase y que a lo largo de la carrera se volvieron hermanos.

Al Ingeniero Pablo Echeverría,
por brindarme su tiempo, atención, dedicación y confianza.
Por ser ese amigo docente que me guió en todo momento,
que me brindó miles de oportunidades y nunca perdió la confianza en mí.

Muchas gracias a todos.

Héctor Andrés López Andrade

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación principalmente a Dios,
por darme la fuerza necesaria para alcanzar este objetivo.

A mi familia, en especial a mis padres y hermanas
quienes con su paciencia y comprensión,
me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más,
gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía.

Héctor Andrés López Andrade

RESUMEN

Año	Alumno	Tutor de Proyecto de titulación	Proyecto de titulación
2025	Héctor Andrés López Andrade	Ing. Vicente Avelino Peñaranda Idrovo MSc.	Actualización de Prototipo de Estación de Monitorización de Variables Meteorológicas

Este Proyecto de Titulación tiene como objeto de estudio el diseño y la elaboración de un prototipo IoT inalámbrico para la monitorización ambiental y radiación solar, el cual incorpora hardware de bajo coste y energía solar como fuente de alimentación independiente en el sistema. Este trabajo permite la adquisición, procesamiento y visualización en tiempo real de parámetros ambientales de interés, permitiendo así la incorporación de tecnologías IoT y energías renovables dentro de aplicaciones educativas e investigativas.

El prototipo incluye diferentes sensores específicos para medir las variables ambientales de interés: BME280 (temperatura, humedad relativa y presión atmosférica), LTR390-UV (radiación ultravioleta) y MQ135 (calidad del aire y gases contaminantes). La información recopilada a partir de los sensores se obtiene mediante conectividad inalámbrica lo que permite compartir de la misma forma el envío seguro y eficiente a la nube. Esta información permite el monitoreo remoto en tiempo real, la consulta histórica de datos y la visualización instantánea de toda la información desde cualquier dispositivo conectado a internet.

El prototipo está basado en el funcionamiento mediante paneles solares y baterías recargables, lo que permite su uso incluso en lugares remotos y/o difíciles de acceder, es decir, que ofrece autonomía; la ESP32 permite la realización del procesamiento, la coordinación del acceso de datos, la transmisión de forma inalámbrica y su posterior presentación en la pantalla del sistema diseñado; y por último, la unión de todos estos aspectos permite una distribución más eficiente, sostenible y práctica del diseño propuesto. Este proyecto permite un beneficio inmediato para la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, ya que aporta información relevante para el cuidado de la comunidad académica, tanto docentes como alumnos.

ABSTRACT

Year	Students	Degree Project Tutor	Technical Degree Project
2025	Héctor Andrés López Andrade	Ing. Vicente Avelino Peñaranda Idrovo MSc.	Updating the Meteorological Variables Monitoring Station Prototype

This thesis project focuses on the design and development of a wireless IoT prototype for environmental and solar radiation monitoring. It incorporates low-cost hardware and solar energy as an independent power source. This prototype allows for the acquisition, processing, and real-time visualization of environmental parameters of interest, thus enabling the incorporation of IoT technologies and renewable energy into educational and research applications.

The prototype includes various specific sensors to measure the environmental variables of interest: BME280 (temperature, relative humidity, and atmospheric pressure), LTR390-UV (ultraviolet radiation), and MQ135 (air quality and polluting gases). The information obtained from the sensors is obtained through wireless connectivity, allowing its secure and efficient transfer and transmission to the cloud. This enables real-time remote monitoring, historical data queries, and instant viewing of all information from any internet-connected device. The prototype is based on solar panels and rechargeable batteries, allowing its use even in remote and/or hard-to-reach locations, thus offering autonomy. The ESP32 enables processing, data access coordination, wireless transmission, and subsequent presentation on the screen of the designed system. Finally, the combination of all these aspects allows for a more efficient, sustainable, and practical distribution of the proposed design.

This project provides immediate benefit to the academic community at the Guayaquil-based Salesian Polytechnic University, as it is an operational prototype for laboratory practices, experimentation, and the development of research projects in IoT and environmental monitoring. The combination of wireless connectivity, cloud services, and solar energy make the proposed system an example of technological innovation that fosters active learning, sustainability, and experimentation with autonomous systems, which must operate in real time and under changing conditions.

ÍNDICE GENERAL

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1 El problema	2
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Antecedentes.....	3
1.3 Importancia y alcance	4
1.4 Delimitación	5
1.4.1 Delimitación temporal.....	5
1.4.2 Delimitación espacial.....	5
1.4.3 Delimitación académica	5
1.5 Beneficiarios de la propuesta	5
1.6 Innovación e impacto del proyecto.....	6
1.7 Objetivos.....	6
1.7.1 Objetivo general	6
1.7.2 Objetivo específico	6
2 Fundamentos teóricos	7
2.1 Cambio climático y su influencia.	7
2.1.1 Necesidad de herramientas tecnológicas para el monitoreo ambiental	7
2.2 Radiación Ultravioleta (UV).....	8
2.2.1 Índice de radiación UV	9
2.3 Innovación tecnológica.....	10
2.3.1 Raspberry PI	11
2.3.2 ESP32.....	12
2.3.3 Sensores.....	14
2.4 Integración de conectividad inalámbrica en estaciones de monitoreo	20
2.4.1 Wi-Fi	20

2.4.2	LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)	21
2.4.3	GSM/GPRS (SIM800L y similares).....	22
2.4.4	Comparación diferentes tecnologías Inalámbricas	23
2.5	Sistemas de Energía Solar Fotovoltaica para Estaciones de Monitoreo.....	23
2.5.1	Sistemas de Panel Solar	24
2.5.2	Producción de energía distribuida	24
2.5.3	Controlador de carga PWM	25
2.5.4	Controlador de carga MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	25
2.5.5	Comparación entre controladores PWM y MPPT	26
2.6	Fundamentos de Software aplicado a IIoT	28
2.6.1	Servidores Linux	28
2.6.2	PHP	29
2.6.3	Node-RED.....	30
3	Marco metodológico	31
3.1	Tipo de investigación	31
3.2	Etapas del Desarrollo del Prototipo	31
4	Resultados	43
5	Conclusiones	45
6	Recomendaciones	46
7	Bibliografía	47
8	Anexos	51

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1 Indice de riesgo de radiacion solar	9
Figura 2 Estacion meteorologica.....	10
Figura 3 Raspberri PI 3 B+.....	11
Figura 4 Board ESP32	13
Figura 5 Sensor BME280	15
Figura 6 Sensor MQ135	17
Figura 7 Sensor LTR390UV.....	19
Figura 8 Arquitectura general de sistema de monitoreo	33
Figura 9 Instalacion de sensores	34
Figura 10 Conexión de elementos internos.....	34
Figura 11 Conexion ESP32.....	35
Figura 12 Diagrama de conexiones ESP32	36
Figura 13 Interfaz PHP MyAdmin.....	39
Figura 14 Interfaz PHP MyAdmin Administracion	40
Figura 15 Interfaz PHP MyAdmin estructura base de datos	41
Figura 16 Monitor ambiental Dashboard Node RED	43
Figura 17 Captura de datos de ESP32 a Node RED.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparacion general de tecnologias inalambricas	23
Tabla 2 Comparacion de controladores de carga PWM vs MPPT	27
Tabla 3 Cuadro de conexión de pines y sus funciones	36

INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha potenciado la necesidad de tener un control exhaustivo de las condiciones ambientales, que afectan al medio ambiente y a sectores clave como el agro, la salud pública o la gestión de los recursos. En este contexto, las estaciones meteorológicas se han convertido en herramientas indispensables para registrar variables como la temperatura, la humedad relativa, la presión atmosférica, la calidad del aire, la radiación solar o la presencia de gases de contaminación, además de la medición y tratamiento de datos climáticos para la comprensión de las dinámicas climáticas a escala local mediante la acumulación de datos y la habilidad para proveer información verificada que apoye el proceso de toma de decisiones basado en evidencias científicas para la adaptación y mitigación frente a situaciones extremas.

Pero muchas de las soluciones comerciales actuales presentan limitaciones en relación con los altos costes, la escasa capacidad para adaptarse a la realidad local, la dependencia de una infraestructura energética básica y dificultad para utilizarse en lugares aislados. Por tanto, surge la necesidad de implementar un sistema mejorado en términos de accesibilidad, eficacia y autonomía. En este sentido, la actualización de un prototipo de estación meteorológica destinado a su uso con módulos inalámbricos presenta una solución adecuada para recopilar y comunicar datos de forma remota de manera inmediata, utilizando tecnologías de bajo consumo, conectividad IoT y sensores de precisión.

El propósito del presente trabajo consiste en diseñar, realizar y validar un sistema de adquisición de datos de monitoreo ambiental vigente con posibilidad de realizar la adquisición continua de los datos relevantes del medio utilizando tecnología inalámbrica y sensores digitales. En este desarrollo, se propone una herramienta asequible, flexible y escalable, y ofrece información confiable, rápida y útil en entornos agrícolas y en zonas vulnerables al cambio climático. Este prototipo consiste en un proceso por etapas en el cual se modifica la arquitectura electrónica, se crea el sistema, se validan experimentalmente el sistema argumentado con pruebas de campo.

Con esto se propone mejorar sensiblemente la calidad del monitoreo ambiental y promover el uso de soluciones tecnológicas que estén alineadas con los enfoques de la sostenibilidad, la eficiencia energética y del acceso a la información climática local.

1 El problema

1.1 Descripción del problema

Hoy en día, la vigilancia ambiental y la cuantificación de la radiación solar, entendiendo como radiación solar la cantidad de energía que llega de manera uniforme y por unidad de tiempo a una superficie orientada hacia el hemisferio soleado, se han vuelto tareas vitales para calibrar la influencia de las actividades humanas sobre los ecosistemas, ya sean estos locales o globales; estos datos son primordiales para la comprensión de fenómenos malos como es la contaminación atmosférica, el calentamiento climático, la degradación de los recursos naturales y sus efectos en la salud pública y la biodiversidad (García Montero, 2023). Asimismo, la obtención de información precisa y en tiempo real sobre determinados parámetros del medio permite a gobiernos tanto como a Instituciones científicas y comunidades locales tomar decisiones informadas, propiciar la planificación de la política pública y dar pie a estrategias que mitiguen y se adapten a los eventuales fenómenos de tipo climático extremo.

Sin embargo, los modos tradicionales de monitoreo tienen limitaciones importantes. En primer lugar, la gran parte de los sistemas implican altos costes de adquisición, instalación y mantenimiento que limitan su utilización en todas aquellas localizaciones rurales, marginales o países en vías de desarrollo (Cazar & Rhor Mancheno, 2025). Por otra parte, el funcionamiento es frecuentemente dependiente de la existencia de personal técnico especializado, y esto también limita su adopción universal. A su vez, y debido a la dependencia energética, como en el caso de requerir una conexión constante a una infraestructura de electricidad, resulta inadecuado para su uso en áreas o comunidades con acceso escaso a la infraestructura energética.

Por tanto, hay que analizar formas o métodos para desarrollar alternativas tecnológicas que sean más accesibles, más autónomas, más rápidas en su operación y más respetuosas con el medio ambiente. Esas nuevas soluciones deben ser capaces de trabajar en condiciones de redes de monitoreo más extensas, aprovechar energías renovables y asegurar el desarrollo sostenible a largo plazo (Fernandes Ministério, 2025). El uso de las nuevas tecnologías, como sensores de bajo consumo, sistemas embebidos y plataformas IoT, puede constituir una buena ruta de democratización del acceso a los datos ambientales.

1.2 Antecedentes

Hoy en día, el cambio climático se ha convertido en una amenaza crítica para la estabilidad de los ecosistemas de la tierra, y el suelo se destaca como uno de los recursos naturales más afectados. Aunque ha ocasionado la aparición de la erosión, la degradación, la desertificación, la salinización y la acidificación del suelo, pone en riesgo directo la biodiversidad, la seguridad alimentaria y la funcionalidad ecológica de los ecosistemas. Por lo tanto, es crítico y necesita ser abordado lo más rápido posible sin enfrentar límites estándar.

En última instancia, la situación exige una solución innovadora que pueda minimizar sus peligros. Por lo tanto, se convierte en una elección convincente e ideal para la implementación de tecnologías avanzadas para monitorear y predecir la ramificación del suelo de los impactos del cambio climático. Entregar datos precisos de tiempo que son esenciales para garantizar un manejo sostenible por parte de los agricultores y los gobiernos. No obstante, esta estrategia consiste en un diseño más amplio que se asocia con la integración del conocimiento científico sobre el cambio climático para el ciclo de vida de las tecnologías apropiadas y resistentes.

El problema se vuelve aún más crítico si se considera el papel central del suelo en el desarrollo socioeconómico de muchas comunidades, especialmente en aquellas donde la agricultura es la principal fuente de sustento para la población (López-Saldaña et al., 2024). En algunas áreas donde se encuentran más del 80% de la población involucrada en la agricultura, la degradación del suelo se convierte en una amenaza directa para la producción de alimentos, lo que agrava la hambruna y la pobreza. A nivel mundial, los suelos desempeñan un papel importante en la regulación del clima; actúan como absorbentes naturales de carbono y albergan comunidades microbianas responsables de los ciclos biogeoquímicos clave.

Sin embargo, con el cambio climático, tales procesos naturales se alteran, lo que debilita la capacidad del suelo para llevar a cabo sus funciones ecológicas. En este sentido, es esencial desarrollar tecnologías para monitorear y analizar el impacto del clima en el suelo para disponer de información más profunda sobre las dinámicas y la capacidad resultante de proponer estrategias de mitigación y adaptación eficaces.

1.3 Importancia y alcance

La actualización de un prototipo de estación de monitorización de variables meteorológicas posee una importancia estratégica dada las crecientes amenazas y desafíos ambientales asociados al cambio climático. Estas estaciones, provistas de sensores de temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, radiación solar, y otros, se utilizan para la obtención continua y precisa de datos climáticos en tiempo real. Como resultado, es posible caracterizar las condiciones micro climáticas locales, que son fundamentales para la extrapolación directa sobre comportamiento de suelos y pruebas en sistemas agrícolas. En términos técnicos, la modernización de estas estaciones incluye la provisión de tecnologías de bajo consumo energético, conectividad tipo IoT, almacenamiento en la nube y procesamiento local.

Tales instalaciones significan una mayor autonomía operativa en zonas remotas, así como una transmisión eficaz de los datos generados hacia plataformas de análisis y visualización. Asimismo, la implementación de protocolos de comunicación inalámbrica y fuentes de energía renovable contribuye a la sostenibilidad del sistema, reduciendo la dependencia de infraestructuras internas.

El alcance de esta actualización se extiende a otras áreas. Desde el punto de vista agronómico, este sistema permite la toma de decisiones basadas en datos y disminución de prácticas como la agricultura de precisión, riego eficiente y predicción de eventos climatológicos que causen estragos de productividad del suelo. Para los entornos educativos y bases de datos, el sistema actualizado servirá de prototipo de enseñanza para la formación de profesionales en ingeniería electrónica, permitiendo el desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas. Igualmente, esta versión del sistema podría ser integrada a las plataformas nacionales e internacionales de monitoreo climatológico y meteorológico para fortalecer las redes de vigilancia temprana y ser proveedor de datos para los modelos predictivos y estudios de variabilidad climática. Soluciones tecnológicas de este tipo, escalables y de bajo costo, son particularmente relevantes en las regiones rurales de difícil acceso, donde es imposible justificar el costo de adquisición e instalaciones de estaciones comerciales.

En conclusión, la novedad del prototipo no solo responde a una exigencia técnica, sino que a la vez supone una aportación para el monitoreo ambiental, para la gestión resiliente del suelo frente al cambio climático y para el fortalecimiento de las capacidades tecnológicas locales en pro del desarrollo sostenible.

1.4 Delimitación

1.4.1 Delimitación temporal

El tiempo estimado para el diseño, simulación y pruebas de funcionamiento del proyecto es de cinco meses, desde mayo hasta septiembre de 2025.

1.4.2 Delimitación espacial

Los trabajos de validaciones técnicas y captura de datos de la estación de control de parámetros ambientales y radiación UV se llevó a cabo en distintos espacios al aire libre y posteriormente en las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil campus Centenario.

1.4.3 Delimitación académica

El proyecto planeado contempla el estudio de las materias de microcontroladores, redes de computadoras, electrónica digital como analógica, sistemas embebidos.

1.5 Beneficiarios de la propuesta

Los beneficiarios directos del presente proyecto lo constituyen los estudiantes de la carrera de ingeniería de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, ya que de este modo se ha generado un prototipo accesible y de fácil manejo, que permita a los alumnos en el futuro poner en práctica lo aprendido y realizar investigaciones. De la misma manera se verán beneficiadas las instituciones académicas que dictan programas técnicos en donde se promueve la investigación y/o la elaboración de prototipos; los mismos que están relacionados con la monitorización ambiental, la medición de radiación UV, el uso de tecnología IoT para la energización que usa paneles solares.

1.6 Innovación e impacto del proyecto

La revisión de prototipos de estaciones meteorológicas no representa sólo una innovación técnica, sino una innovación que transforma la manera de vivir en el entorno y que tiene un impacto directo en la adaptación al cambio climático, sostenibilidad agraria/de la agricultura y la inclusión en el desarrollo tecnológico. Por su carácter abierto, modular y accesible, esta iniciativa se convierte en la herramienta principal para intentar atender los problemas actuales y futuros en el seguimiento del clima y en la gestión de los suelos.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo general

Crear un sistema que permita recopilar datos precisos y en tiempo real sobre las condiciones ambientales y la radiación solar utilizando tecnología inalámbrica.

1.7.2 Objetivo específico

- Diseñar una arquitectura utilizando tecnología inalámbrica para la comunicación de datos que integre sensores para monitorear diferentes variables ambientales.
- Implementar físicamente el prototipo, enlazando los componentes electrónicos, desarrollando el software para la adquisición, procesamiento y transmisión de datos.
- Configurar la comunicación del prototipo y realizar pruebas para validar la precisión de los datos recopilados.

2 Fundamentos teóricos

La vigilancia ambiental a través de las estaciones meteorológicas ha cambiado enormemente en las últimas décadas para dar respuesta a la necesidad probable de tener información precisa sobre las condiciones climáticas del entorno. Estos sistemas constituyen una parte fundamental en la gestión del medio y el uso de los recursos naturales, la planificación agrícola y de cultivos, la prevención de desastres y el análisis de los efectos del cambio climático, tanto a escala regional como global.

2.1 Cambio climático y su influencia.

Para el siglo XXI, el cambio climático constituye una de las principales amenazas para los principales ecosistemas terrestres y afecta de manera directa e importante a los procesos naturales del suelo. Efectos sobre la estructura, composición y funcionalidad del suelo han sido causados por el cambio de variables meteorológicas como la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar, la presión atmosférica, los patrones de precipitación, entre otros (degradación física y química, erosión del suelo, salinización, acidificación, pérdida de materia orgánica, entre otras) que también comprometen la biodiversidad del suelo, la seguridad alimentaria y la capacidad del suelo sumidero de carbono (Cazar & Rhor Mancheno, 2025).

Por ello, el monitoreo en tiempo real de variables meteorológicas ha sido un indicador importante para caracterizar las dinámicas climáticas, así como sus efectos directos sobre los suelos agrícolas y los ecosistemas naturales, generando datos que permiten crear modelos predictivos y aplicar estrategias de mitigación y adaptación más eficientes, especialmente en regiones con alta vulnerabilidad ambiental.

2.1.1 Necesidad de herramientas tecnológicas para el monitoreo ambiental

Con el desarrollo de tecnologías electrónicas y de comunicación inalámbricas, el monitoreo de factores ambientales ha mejorado significativamente, sobre todo en cuanto a su modularidad y a su conexión sustentable con la red eléctrica. Esto le confiere en gran parte un coste más correspondiente a las capacidades que ofrece, pero también le hace aplicable a lugares donde la logística puede suponer un impedimento en cuanto a la implementación de equipos de medición y control de la actividad humana.

Por su parte, la posibilidad de usar sensores distribuidos que son capaces de medir variables como la temperatura, la humedad relativa, la presión atmosférica, el nivel de radiación solar, la calidad del aire, la concentración de gases tóxicos, y que se encuentran interconectados mediante redes inalámbricas, se trata de una herramienta clave para el monitoreo de factores ambientales. Estas plataformas, además, permiten que se extraiga información; no sólo se extrae información, sino que también permite una transmisión y visualización remota sobre plataformas digitales para el análisis de datos en cuanto a la continuidad de las decisiones y la forma en la que se toman éstas (Fernandes Ministério, 2025).

2.2 Radiación Ultravioleta (UV)

La radiación ultravioleta (UV) es un tipo de energía invisible emitida por el sol y fuentes artificiales, que se encuentra en el espectro electromagnético entre la luz visible y los rayos X, con longitudes de onda comprendidas entre 100 y 400 nanómetros. Se clasifica en tres rangos principales: UVA (315–400 nm), UVB (280–315 nm) y UVC (100–280 nm). La atmósfera terrestre, en particular la capa de ozono absorbe la mayor parte de la radiación UVC y gran parte de la UVB. Sin embargo, la disminución del ozono y otros cambios atmosféricos inducidos por actividades humanas han incrementado los niveles de radiación UV que alcanzan la superficie terrestre, lo que tiene repercusiones tanto en la salud humana como en los ecosistemas (Chadyšiene et al., 2005).

El monitoreo de la radiación UV es fundamental debido a sus efectos sobre la salud humana, incluyendo quemaduras, envejecimiento prematuro de la piel, cáncer cutáneo y daños oculares, así como por su impacto en ecosistemas, suelos y cultivos agrícolas. La radiación UV puede alterar procesos biogeoquímicos, modificar la actividad microbiana y cambiar la composición química de la materia orgánica. En plantas, niveles elevados de UVB provocan estrés fisiológico, reducen la tasa fotosintética y afectan el desarrollo de tejidos, lo que disminuye el rendimiento agrícola (López-Saldaña et al., 2024).

Factores que determinan los niveles de radiación UV

- **Altura solar:** la radiación es más intensa cuando el Sol está alto en el cielo, variando según hora y estación.
- **Latitud:** mayor cercanía al ecuador implica mayor exposición UV.
- **Altitud:** a mayor altura, la radiación UV aumenta debido a menor absorción atmosférica.

- Nubosidad: cielos despejados permiten niveles más altos de radiación, aunque nubes parciales no garantizan protección completa.
- Ozono: su concentración influye directamente en la cantidad de radiación que llega a la superficie.
- Reflexión: superficies como agua, nieve y arena pueden aumentar la exposición.
- Cambio climático: afecta ozono y cobertura nubosa, modificando la irradiancia UV en la superficie

2.2.1 Índice de radiación UV

El índice UV es una escala internacional recomendada por la OMS que clasifica la exposición UV en cinco niveles: bajo (0–2), moderado (3–5), alto (6–7), muy alto (8–10) y extremo (11+). Cada nivel incluye recomendaciones preventivas específicas, como uso de protector solar, ropa adecuada y limitación de exposición directa al sol.

La medición y monitoreo continuo del índice UV mediante sistemas IoT permite tomar decisiones informadas para proteger la salud humana, conservar ecosistemas y mejorar la eficiencia agrícola, al integrar datos en tiempo real con análisis predictivo y almacenamiento en la nube. Esto fortalece la gestión ambiental y la planificación sostenible, convirtiendo los sensores UV en herramientas clave para la investigación aplicada en ingeniería ambiental y electrónica.

En la Figura 1 se muestra el índice de Riesgo de Radiación Solar.

Figura 1

Índice de Riesgo de Radiación Solar



Nota: Figura detalla el rango de daño ultravioleta, siendo 1 el más bajo y 11+ el más alto, Diario el mundo (<https://diario.elmundo.sv/nacionales/marn-advierte-sobre-alta-radiacion-solar-en-marzo>)

La clasificación de riesgo se establece de la siguiente manera:

Nivel Bajo (0–2): riesgo mínimo de daño; se recomienda el uso de gafas de sol y protección solar ligera.

Nivel Moderado (3–5): riesgo moderado; se aconseja ropa protectora, sombrero de ala ancha y protector solar SPF 30+ cada 2 horas.

Nivel Alto (6–7): alto riesgo de daño; se recomienda limitar la exposición directa al sol, usar sombra y ropa protectora.

Nivel Muy Alto (8–10): riesgo muy alto; tomar precauciones adicionales para proteger piel y ojos, minimizar exposición entre las 10 a.m. y 4 p.m.

Nivel Extremo (11+): riesgo extremadamente alto; se deben tomar todas las medidas preventivas, ya que la exposición sin protección puede causar quemaduras rápidas.

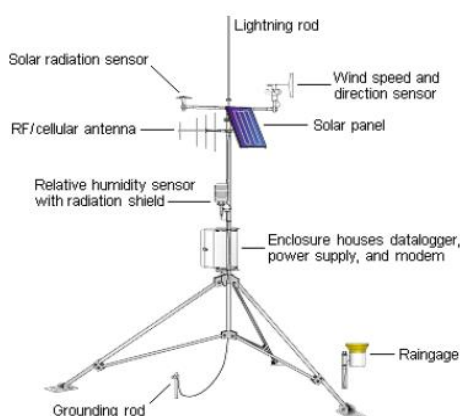
La correcta interpretación y monitoreo del índice UV es esencial para proteger la salud humana, prevenir daños a los ecosistemas y optimizar actividades agrícolas y recreativas bajo condiciones de alta radiación.

2.3 Innovación tecnológica.

Las estaciones meteorológicas comerciales como Davis Vantage Pro2, Campbell Scientific o HOBO brindan buena precisión y robustez, así como, en la mayoría de los casos, buena atención al cliente; sin embargo, su alto precio (que puede llegar a ser de USD 3000 o más por unidad) y la necesidad de una infraestructura específica hacen que la mayoría de los agricultores en entornos agrícolas pequeños o zonas rurales remotas no puedan aplicarlas. En la Figura 2, se presenta un modelo de la marca Campbell Scientific.

Figura 2

Estación especializada para la recepción de datos meteorológicos



Nota: Ejemplo de una estación de estudio meteorológico con sus distintos sensores, Campbell Scientific (<https://www.campbellsci.es/aws-meteorology>)

Por el contrario, se pueden diseñar prototipos funcionales y de fiabilidad suficiente con microcontroladores como Arduino UNO/MEGA, ESP32 o Raspberry Pi utilizando sensores de bajo coste, pero con suficiente precisión como DHT22 (humedad y temperatura), BMP280 (presión), GY-21 (radiación solar), anemómetros, ya sean analógicos o digitales, o pluviómetros.

2.3.1 Raspberry Pi

La Raspberry Pi es un sistema informático en formato pequeño de bajo coste (aproximadamente del tamaño de una tarjeta de crédito), que puede conectarse a un monitor de computadora o televisión, y funcionar con un ratón y un teclado estándar. Es un pequeño ordenador que corre el sistema operativo Linux y permite a personas de todos los niveles de experiencia explorar la informática y aprender lenguajes de programación como Scratch, Python, etc. como se muestra en la Figura 3. Es capaz de realizar la mayoría de las tareas típicas que suelen realizar los ordenadores de sobremesa, por ejemplo: la navegación por Internet; la reproducción de video de alta definición, etc.

Con la capacidad de interacción con el exterior que ofrece la Raspberry Pi, esta puede servir de base tecnológica para la implementación de una amplia variedad de proyectos digitales. Y así, se pueden construir desde reproductores de música y video, detectores de padres o estaciones meteorológicas hasta proyectos tan curiosos como cajas para pájaros con cámaras de visión infrarroja.

Figura 3

Raspberry Pi 3



Nota: Imagen de modulo Raspberry 3,(<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3>)

La Raspberry Pi 3 Modelo B+ es una pequeña computadora de muy bajo costo, de tamaño similar al de una tarjeta de crédito. Cuenta con un puerto HDMI el cual permite la conexión a un monito o un TV. También permite la conexión de mouse y teclado estándar mediante su conexión USB. Esta mini computadora permite utilizar sistemas en base LINUX con la finalidad de brindar acceso al usuario hacia la exploración de lenguajes de programación como Scratch y Python.

Los rasgos que destacan incluyen un potente CPU de cuatro núcleos de 64 bits, alcanzando frecuencias de hasta 1.4GHz, compatibilidad para monitores y TV de resoluciones de hasta 1080P mediante un puerto HDMI, 1Gb de capacidad en su RAM ,dual-band LAN de 2,4/5,0 GHz, Gigabit Ethernet, USB 2.0

Especificaciones Técnicas Raspberry PI:

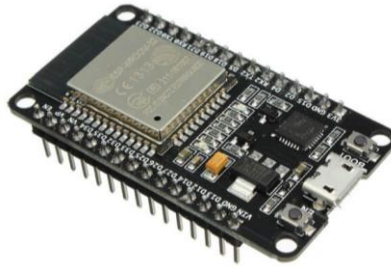
- **Procesador:** Broadcom BCM22873B0, Cortex-A53 de cuatro núcleos (ARM v8) SoC de 64 bits a 1,4 GHz
- **Memoria RAM:** 1GB LPDDR2
- **Conectividad:** LAN inalámbrica IEEE 802.11b / g / n / ac de 2.4 GHz y 5.0 GHz, Bluetooth 5.0, BLE Gigabit Ethernet × USB 2.0
- **GPIO:** estándar de 40 pines
- **Video y sonido:** 1 puerto micro HDMI
- **Puerto DSI** para pantalla
- **Puerto CSI** para cámara
- **Soporte de tarjeta SD:** ranura para tarjeta microSD para cargar el sistema operativo y almacenamiento de datos
- **Potencia de entrada:** 5V DC a través del conector Micro USB (mínimo 3A)

2.3.2 ESP32

El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo y alto rendimiento desarrollado por Espressif Systems, ampliamente utilizado en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), automatización, sistemas embebidos y telecomunicaciones (Babiuch et al., 2019). Su relevancia radica en la integración nativa de conectividad Wi-Fi y Bluetooth, lo que lo convierte en una plataforma versátil para el desarrollo de proyectos que requieren comunicación inalámbrica, control y procesamiento de datos en tiempo real. Se muestra la Figura 4, con la imagen de ESP32.

Figura 4

ESP32 WiFi Bluetooth BLE CH9102F



Nota: Board de desarrollo ESP32 WiFi Bluetooth BLE CH9102F, Electronilab
(<https://electronilab.co/tienda>)

Características del ESP32

- **Conectividad integrada:** dispone de Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth/Bluetooth Low Energy (BLE) en un solo chip.
- **Alto rendimiento:** cuenta con un procesador de doble núcleo Tensilica Xtensa LX6 de hasta 240 MHz, que permite la ejecución simultánea de múltiples tareas.
- **Gran capacidad de memoria:** incluye hasta 520 KB de SRAM interna, con soporte para memorias externas (Flash, PSRAM).
- **Consumo energético eficiente:** incorpora diversos modos de ahorro de energía (deep sleep, light sleep), adecuados para aplicaciones portátiles o alimentadas por batería.
- **Amplia variedad de periféricos:** puertos ADC, DAC, PWM, I2C, SPI, UART, CAN, I²S, entre otros.
- **Compatibilidad con diferentes entornos de desarrollo:** se puede programar en Arduino IDE, PlatformIO, ESP-IDF, MicroPython, NodeMCU (Lua), entre otros.

Especificaciones técnicas principales del ESP32

- **Procesador:** Tensilica Xtensa LX6, doble núcleo, hasta 240 MHz.
- **Memoria:**
 - ✓ RAM interna: 520 KB
 - ✓ Flash externo: hasta 16 MB (dependiendo del módulo)
 - ✓ PSRAM opcional en algunos modelos (hasta 8 MB)
- **Conectividad:**
 - ✓ Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 GHz)

- ✓ Bluetooth v4.2 + BLE
- **GPIO:** hasta 34 pines programables.
- **Interfaces de comunicación:** SPI, I2C, I2S, UART, CAN, PWM.
- **Convertidores:**
 - ✓ ADC de 12 bits (hasta 18 canales)
 - ✓ DAC de 8 bits (2 canales)
- **Relojes y temporizadores:** múltiples timers de hardware de 64 bits.
- **Seguridad:** cifrado AES, SHA, RSA, ECC, generador de números aleatorios (RNG).
- **Consumo de energía:**
 - ✓ Activo: 160–260 mA (dependiendo del uso de Wi-Fi/Bluetooth)
 - ✓ Deep Sleep: 10 μ A (aprox.)

2.3.3 Sensores

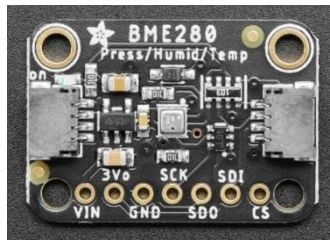
2.3.3.1 Sensor BME280

El BME280 es un sensor ambiental de alta precisión desarrollado por Bosch Sensortec, diseñado para la medición simultánea de temperatura, humedad relativa y presión barométrica, se muestra en la figura 5. Su arquitectura combina en un solo chip tres sensores distintos, lo que lo convierte en una solución compacta y eficiente para aplicaciones en Internet de las Cosas (IoT), estaciones meteorológicas, automatización del hogar, dispositivos móviles y monitoreo ambiental (Shevchenko et al., 2020).

Comparado con sensores individuales, el BME280 ofrece una integración avanzada, bajo consumo energético y comunicación digital a través de interfaces estándar (I²C y SPI), lo que facilita su implementación en sistemas embebidos basados en microcontroladores como el ESP32 o el Arduino (Tagle et al., 2020).

Figura 5

BME280 Sensor de humedad, presión barométrica y temperatura



Nota: Imagen referencial que muestra la estructura de un sensor BME280, I+DElectronica (<https://www.didacticaselectronicas.com/shop>)

Características del BME280

- **Multifuncionalidad:** mide temperatura, humedad y presión en un solo dispositivo, reduciendo espacio y costos.
- **Alta precisión:**
 - ✓ Temperatura: ± 0.5 °C
 - ✓ Humedad: ± 3 %
 - ✓ Presión: ± 1 hPa
- **Interfaz flexible:** soporta comunicación I²C y SPI, lo que permite integrarlo en una amplia gama de sistemas embebidos.
- **Bajo consumo energético:** optimizado para aplicaciones alimentadas por baterías (0.6 mA en modo normal, 0.1 μ A en modo en reposo).
- **Rango amplio de operación:** adecuado para aplicaciones industriales, meteorológicas y portátiles.
- **Dimensiones reducidas:** encapsulado de apenas 2.5 × 2.5 × 0.93 mm.
- **Versatilidad en aplicaciones:** útil para pronóstico meteorológico, altimetría, compensación de sensores GPS y control climático.

Especificaciones técnicas principales del BME280

- Fabricante: Bosch Sensortec
- Dimensiones: 2.5 × 2.5 × 0.93 mm
- Mediciones disponibles:
 - ✓ Temperatura: -40 °C a +85 °C (precisión ± 0.5 °C)
 - ✓ Humedad relativa: 0 – 100 % (precisión ± 3 %)

- ✓ Presión barométrica: 300 – 1100 hPa (precisión ± 1 hPa)
- Resolución:
 - ✓ Temperatura: 0.01 °C
 - ✓ Humedad: 0.008 %
 - ✓ Presión: 0.18 Pa
- Interfaz de comunicación: I²C (hasta 3.4 MHz) y SPI (hasta 10 MHz)
- Voltaje de operación: 1.71 V – 3.6 V
- Consumo de corriente:
 - ✓ 0.6 mA en modo normal
 - ✓ 0.1 μ A en modo standby

- Tiempo de respuesta:
 - ✓ Humedad: 1 ms
 - ✓ Presión y temperatura: <10 ms

2.3.3.2 Sensor MQ-135

El MQ-135 es un sensor de bajo costo diseñado para la detección de la calidad del aire mediante la medición de concentraciones de gases contaminantes como se muestra en la Figura 6. Forma parte de la familia de sensores de gases MQ, fabricados por Hanwei Electronics, ampliamente utilizados en proyectos de Internet de las Cosas (IoT), monitoreo ambiental, sistemas de ventilación inteligente y estaciones meteorológicas (Hadi et al., 2022).

Este sensor es capaz de detectar diversos gases nocivos presentes en el aire, como amoníaco (NH₃), óxidos de nitrógeno (NO_x), alcohol, benceno, humo y dióxido de carbono (CO₂), lo que lo convierte en una herramienta versátil para aplicaciones relacionadas con la salud, el medio ambiente y la automatización de sistemas de control de calidad del aire.

El MQ-135 opera mediante un sensor de óxido metálico (SnO₂) cuya resistencia varía en presencia de gases. Esta variación de resistencia es traducida en una señal analógica que puede ser interpretada por microcontroladores como ESP32, Arduino o Raspberry Pi (Easterline et al., 2024).

Figura 6

Sensor de gas MQ135



Nota: Sensor de gas MQ135 Calidad de aire, Moviltronics (<https://moviltronics.com>)

Características del MQ-135

- **Detección de múltiples gases:** puede identificar compuestos nocivos como amoníaco, benceno, alcohol, CO₂, NO_x y humo.
- **Bajo costo:** es uno de los sensores de calidad de aire más económicos disponibles en el mercado.
- **Interfaz sencilla:** salida analógica y digital, lo que facilita su integración en microcontroladores.
- **Alta sensibilidad a contaminantes:** útil en aplicaciones donde se requiere monitoreo ambiental básico.
- **Amplia disponibilidad:** se encuentra fácilmente en el mercado y cuenta con soporte en múltiples plataformas (Arduino IDE, ESP32, NodeMCU, etc.).
- **Compatibilidad IoT:** permite su conexión con sistemas embebidos para enviar datos a plataformas en la nube.

Especificaciones técnicas del MQ-135

- Fabricante: Hanwei Electronics
- Tipo de sensor: óxido metálico (SnO₂)
- Gases detectables: NH₃, NO_x, alcohol, benceno, CO₂, humo y compuestos orgánicos volátiles (COVs)
- Voltaje de operación: 5 V DC

- Consumo de corriente: 150–200 mA (por el elemento calefactor)
- Resistencia del sensor (en aire limpio): 10 k Ω – 20 k Ω
- Tiempo de calentamiento: recomendado 24–48 horas para estabilización inicial
- Rango de detección:
 - ✓ Amoníaco (NH₃): 10 – 300 ppm
 - ✓ Benceno: 10 – 1000 ppm
 - ✓ CO₂: 350 – 10,000 ppm
 - ✓ Alcohol: 10 – 300 ppm
- Interfaz de salida:
 - ✓ Analógica (0–5 V, proporcional a la concentración de gases)
 - ✓ Digital (a través de un comparador integrado en algunos módulos)
- Temperatura de operación: -10 °C a +45 °C
- Humedad de operación: 20 % – 90 % RH

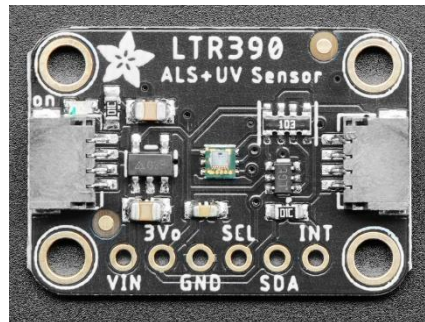
2.3.3.3 Sensor LTR390-UV

El LTR390-UV es un sensor digital avanzado fabricado por LITE-ON Technology, diseñado para medir la intensidad de radiación ultravioleta (UV) y la luz ambiental (ALS, Ambient Light Sensing) con alta precisión y bajo consumo energético, se muestra en la Figura 7. Su aplicación principal se encuentra en sistemas de monitoreo ambiental, domótica, dispositivos IoT y aplicaciones de salud, donde es necesario medir la exposición a la radiación solar o controlar sistemas de iluminación inteligente (García Álvarez & López Lozano, 2024).

Este sensor destaca por su alta sensibilidad espectral en el rango UVA (315–400 nm), lo que le permite calcular el Índice Ultravioleta (UVI), parámetro de referencia internacional para evaluar riesgos de exposición solar. Adicionalmente, su capacidad para medir la luz ambiental lo convierte en un sensor dual, optimizando el diseño en dispositivos que requieren compactación de componentes y eficiencia energética (Xun et al., 2024).

Figura 7

Sensor LTR390-UV



Nota: Imagen de sensor UV LTR390, ESPHOME

(<https://esphome.io/components/sensor/ltr390>)

Características del sensor LTR390-UV

- **Medición dual:** integra detección de radiación UVA y luz ambiental (ALS) en un solo chip.
- **Alta precisión:** sensibilidad espectral ajustada a la radiación UVA, con capacidad de cálculo del UVI.
- **Interfaz digital moderna:** comunicación mediante I²C, simplificando la integración con microcontroladores como ESP32, Arduino o Raspberry Pi.
- **Bajo consumo energético:** diseñado para dispositivos portátiles y aplicaciones IoT alimentadas por batería.
- **Amplio rango dinámico:** permite trabajar en condiciones de baja y alta iluminación solar sin saturación.
- **Dimensiones reducidas:** encapsulado compacto (2 × 2 × 0.75 mm).
- **Aplicaciones en salud y seguridad:** útil para monitorear la exposición solar y prevenir riesgos de radiación UV.

Especificaciones técnicas del LTR390-UV

- Fabricante: LITE-ON Technology
- Dimensiones: 2.0 × 2.0 × 0.75 mm
- Funciones principales:
 - ✓ Detección de radiación ultravioleta (UVA, 315–400 nm)
 - ✓ Detección de luz ambiental (ALS, 500–600 nm aprox.)
- Resolución: hasta 20 bits de conversión digital (ADC).

- Índice UV (UVI): calculado a partir de la medición de radiación UVA.
- Interfaz de comunicación: I²C (dirección configurable).
- Voltaje de operación: 2.0 V – 3.6 V (típico 3.3 V).
- Consumo de corriente:
 - ✓ Modo activo: < 100 μA
 - ✓ Modo standby: < 1 μA
- Rango de operación ambiental:
 - ✓ Temperatura: -40 °C a +85 °C
 - ✓ Humedad: 0 % – 95 % RH

2.4 Integración de conectividad inalámbrica en estaciones de monitoreo

La conectividad inalámbrica constituye un elemento esencial en el diseño de estaciones modernas de adquisición de datos, ya que permite la transmisión remota hacia plataformas de almacenamiento y visualización en la nube. La elección de la tecnología adecuada depende de factores como la cobertura disponible, el consumo energético, el costo de implementación y las condiciones del entorno de despliegue. En la literatura especializada se destacan principalmente tres tecnologías:

2.4.1 Wi-Fi

El Wi-Fi (Wireless Fidelity) es una de las tecnologías más utilizadas en estaciones de monitoreo debido a su amplia disponibilidad y facilidad de integración. Microcontroladores como el ESP32 y el ESP8266 incorporan módulos Wi-Fi de forma nativa, lo que permite la transmisión de datos hacia plataformas en la nube sin necesidad de hardware adicional.

Una de sus principales ventajas es la alta velocidad de transmisión, con tasas que pueden superar los 100 Mbps en redes modernas, aunque en aplicaciones IoT normalmente se requiere un ancho de banda mucho menor. Esto habilita la transmisión de datos en tiempo real, lo cual es fundamental para sistemas que requieren respuestas inmediatas o monitoreo continuo (Moran Villamar, 2023).

En términos de infraestructura, el Wi-Fi depende de un punto de acceso o router, lo que lo hace adecuado en áreas urbanas, laboratorios, hogares y campus universitarios donde existe

cobertura de internet local. Sin embargo, presenta limitaciones en alcance (típicamente 50–100 metros en espacios abiertos y mucho menos en interiores con obstáculos), lo cual restringe su uso en zonas rurales o extensas áreas agrícolas (Hurtado & Almeida, 2024).

Otra desventaja es su consumo energético relativamente alto, lo que puede reducir la autonomía de estaciones alimentadas por baterías. Por ello, en aplicaciones IoT críticas se suele implementar en combinación con protocolos de ahorro de energía (sleep modes) y optimización del envío de datos.

Aplicaciones típicas: domótica, sistemas de riego inteligentes, laboratorios ambientales, monitoreo urbano, proyectos académicos con acceso a infraestructura Wi-Fi.

2.4.2 LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)

El LoRaWAN es un protocolo de comunicación inalámbrica basado en modulación LoRa (Long Range), diseñado específicamente para aplicaciones IoT de largo alcance y bajo consumo energético. Una de sus características más destacadas es la posibilidad de alcanzar distancias de transmisión de hasta 15 km en entornos rurales y entre 2–5 km en áreas urbanas, con un consumo energético muy reducido en comparación con Wi-Fi o GSM.

Su principal fortaleza es la eficiencia energética, ya que los nodos pueden funcionar durante años con una batería, lo cual es ideal en estaciones autónomas desplegadas en áreas de difícil acceso. Esta característica ha impulsado su uso en agricultura de precisión, monitoreo ambiental en áreas naturales, sistemas de agua y redes de sensores distribuidos (Haxhibeqiri et al., 2018).

No obstante, LoRaWAN presenta una limitada tasa de transferencia de datos (generalmente en el rango de 0.3 kbps a 50 kbps), lo que lo hace adecuado únicamente para variables ambientales de bajo ancho de banda como temperatura, humedad, presión, niveles de gases o radiación solar. No es recomendable para aplicaciones que requieran transmisión de video, audio o grandes volúmenes de datos (Al-Samman et al., 2022).

Otro aspecto relevante es la infraestructura necesaria: LoRaWAN opera en bandas no licenciadas (como 433 MHz, 868 MHz en Europa y 915 MHz en América), lo que permite su despliegue sin costos de espectro. Sin embargo, requiere de gateways LoRaWAN para

conectar los nodos con internet, lo que puede incrementar los costos de instalación inicial (Andrés et al., 2021).

Aplicaciones típicas: monitoreo ambiental en zonas rurales, agricultura de precisión, control forestal, sistemas de energía renovable en sitios remotos.

2.4.3 GSM/GPRS (SIM800L y similares)

La tecnología GSM/GPRS (Global System for Mobile Communications / General Packet Radio Service) aprovecha la infraestructura de redes móviles para la transmisión de datos, lo que le otorga una ventaja clave: la independencia de redes locales como Wi-Fi o LoRaWAN. Esto la convierte en una opción viable para áreas rurales, urbanas y remotas, siempre que exista cobertura de telefonía móvil.

Los módulos como el SIM800L permiten a los microcontroladores enviar datos a través de la red celular, ya sea mediante SMS, HTTP, MQTT o TCP/IP, lo que los hace muy versátiles en proyectos de IoT. Además, algunos módulos incluyen funciones adicionales como llamadas de voz y envío de mensajes, lo que amplía sus posibilidades de integración

Sin embargo, este tipo de comunicación presenta mayores requerimientos energéticos en comparación con LoRaWAN o Wi-Fi, debido al consumo del módulo de radiofrecuencia durante la transmisión. Esto implica que, en estaciones alimentadas con batería, es necesario implementar estrategias de optimización como envío de datos en intervalos programados.

Otra limitación es el costo de operación, ya que requiere el uso de una tarjeta SIM activa con un plan de datos, lo cual puede representar un gasto recurrente. Aun así, su ventaja principal es la amplia cobertura, especialmente en lugares donde no es factible instalar infraestructura de comunicación dedicada.

Aplicaciones típicas: estaciones meteorológicas autónomas, monitoreo de calidad del aire en áreas remotas, transporte inteligente, seguimiento de activos móviles, seguridad industrial.

2.4.4 Comparación diferentes tecnologías Inalámbricas

En la Tabla 1 se resumen las características técnicas y funcionales de distintas tecnologías inalámbricas, permitiendo analizar sus ventajas y desventajas para determinar la opción más adecuada según el tipo de aplicación y las condiciones del entorno

Tabla 1

Comparación General de Tecnologías Inalámbricas

Característica	Wi-Fi	LoRaWAN	GSM/GPRS (SIM800L)
Alcance	50–100 m	Hasta 15 km en campo abierto	Depende de cobertura móvil (km)
Consumo energético	Medio-alto	Muy bajo	Alto
Tasa de datos	Alta (Mbps)	Baja (Kbps)	Media-baja (Kbps – 100 Kbps)
Infraestructura	Router o punto de acceso Wi-Fi	Gateway LoRa	Red celular + SIM
Costo operativo	Bajo	Medio (inversión inicial en gateway)	Alto (SIM + plan de datos)
Aplicaciones	Tiempo real en entornos locales	Monitoreo rural de largo alcance	Zonas sin Wi-Fi ni LoRa disponibles

Nota: Muestra características generales de tecnologías inalámbricas.

2.5 Sistemas de Energía Solar Fotovoltaica para Estaciones de Monitoreo

En la actualidad, muchas estaciones de monitoreo ambiental se instalan en zonas remotas donde no existe acceso a la red eléctrica convencional. Por esta razón, el uso de sistemas solares fotovoltaicos con baterías recargables de litio (Li-Ion o Li-Po) se ha convertido en una solución ampliamente adoptada en prototipos recientes. Estos sistemas, además de ser sostenibles, permiten una operación continua y autónoma, incluso en condiciones meteorológicas adversas, gracias a la integración de controladores de carga y módulos de gestión energética que optimizan el almacenamiento y la distribución de la energía.

2.5.1 Sistemas de Panel Solar

Un sistema fotovoltaico está compuesto por dispositivos capaces de transformar la energía solar en electricidad utilizable. Aunque la conversión primaria se realiza en forma de corriente continua (DC), mediante convertidores e inversores puede transformarse en corriente alterna (AC), que es la forma de energía más utilizada en entornos residenciales e industriales (Ossa & Código, 2017).

Los paneles solares de 120 W representan una opción adecuada para estaciones de monitoreo de bajo y mediano consumo energético, ya que permiten mantener activos sensores, microcontroladores, sistemas de comunicación inalámbrica y módulos de almacenamiento de datos (Bentancourt Rossoli et al., 2020).

Ventajas:

- Fuente de energía **limpia, renovable y sostenible**, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles.
- Operación autónoma, ideal para zonas rurales o de difícil acceso.
- Escalabilidad: se pueden añadir más paneles para cubrir mayores demandas energéticas.
- Bajo mantenimiento en comparación con generadores convencionales.

En términos técnicos, los módulos fotovoltaicos contienen celdas fabricadas con materiales semiconductores (principalmente silicio), que al recibir radiación solar liberan electrones. Este fenómeno genera una diferencia de potencial eléctrico que se aprovecha como fuente de energía.

2.5.2 Producción de energía distribuida

La electricidad generada por las celdas solares surge a partir del desequilibrio de cargas eléctricas, similar al funcionamiento de una batería. Una vez producida, la corriente puede ser utilizada en tiempo real o almacenada en baterías recargables para asegurar el suministro durante la noche o en ausencia de radiación directa.

Contrario a la creencia popular, los paneles no dejan de funcionar en días nublados; sin embargo, su producción disminuye significativamente, reduciendo la eficiencia del sistema

Los principales componentes de un sistema fotovoltaico incluyen:

- Módulos fotovoltaicos: capturan la energía solar y generan corriente continua.
- Estructuras de soporte: permiten la correcta orientación e inclinación de los paneles, maximizando su exposición solar.
- Convertidor o inversor: transforma la energía de corriente continua (DC) en corriente alterna (AC) para su uso en equipos electrónicos. Además, incluye mecanismos de protección frente a cortes o fluctuaciones de energía.

Adicionalmente, muchos sistemas actuales incorporan tecnologías complementarias como sistemas de monitoreo remoto de generación y consumo, así como almacenamiento inteligente de energía, que permiten mejorar la eficiencia y asegurar que la energía generada se utilice de manera óptima.

2.5.3 Controlador de carga PWM

El controlador PWM (Pulse Width Modulation) es uno de los más utilizados en sistemas de bajo costo. Su principio de funcionamiento se basa en la modulación de pulsos, es decir, regula el paso de corriente desde el panel hacia la batería, interrumpiendo la carga una vez que esta alcanza su capacidad máxima (Paipa et al., 2018).

Ventajas:

- ✓ Bajo costo en comparación con controladores más avanzados.
- ✓ Fiabilidad en sistemas pequeños con paneles y baterías del mismo voltaje.
- ✓ Adecuado para proyectos de bajo presupuesto.

2.5.4 Controlador de carga MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Los controladores de carga MPPT son dispositivos electrónicos avanzados que permiten maximizar la energía extraída de los paneles solares, adaptando dinámicamente las condiciones de operación para que siempre trabajen en su punto de máxima potencia. Esto se logra mediante algoritmos de seguimiento que ajustan el voltaje y la corriente que se suministra a las baterías según la radiación solar, la temperatura del panel y las características de la batería.

Principio de funcionamiento

Los paneles solares tienen un punto de máxima potencia (MPP) donde la combinación de voltaje y corriente produce la mayor energía posible. El controlador MPPT ajusta continuamente la relación entre voltaje y corriente del panel para mantenerlo operando en ese punto, incluso cuando cambian las condiciones ambientales.

La energía generada se convierte en corriente adecuada para cargar las baterías, garantizando eficiencia máxima en cada momento del día (Bustos-Márquez et al., 2023).

Ventajas de los controladores MPPT

- Alta eficiencia energética: Pueden incrementar la energía disponible hasta un 30% respecto a controladores PWM, especialmente útil en días nublados o con temperatura alta.
- Flexibilidad de diseño: Permiten usar paneles solares con voltaje mayor al de la batería, facilitando la conexión en serie o paralelo.
- Optimización de recursos: Aprovechan mejor cada panel y reducen la cantidad de paneles necesarios para un mismo sistema.
- Mayor autonomía: La energía almacenada en las baterías se maximiza, aumentando la operatividad de sistemas remotos o estaciones autónomas.

2.5.5 Comparación entre controladores PWM y MPPT

En la Tabla 2 se resumen las características técnicas y funcionales de los controladores de carga PWM y MPPT, permitiendo analizar sus ventajas y desventajas para determinar la opción más adecuada según la eficiencia energética, el tipo de batería y las necesidades específicas del sistema fotovoltaico (Acharya & Aithal, 2020).

Tabla 2

Comparación de Controladores de Carga: PWM vs MPPT

Característica	Controlador PWM (Pulse Width Modulation)	Controlador MPPT (Maximum Power Point Tracking)
Principio de operación	Regula el flujo de corriente hacia la batería mediante pulsos, conectando o desconectando los paneles cuando la batería está cargada.	Ajusta dinámicamente el punto de operación del panel para extraer la máxima potencia posible, adaptando voltaje y corriente según condiciones de radiación solar y temperatura.
Eficiencia energética	Baja a media (70–80%), porque los paneles trabajan al voltaje de la batería y no en su punto máximo de potencia.	Alta (95–99%), aprovecha mejor la energía generada por el panel solar en todo momento, especialmente en días nublados o cuando hay variaciones de temperatura.
Compatibilidad de voltaje	Debe coincidir el voltaje del panel con el de la batería (ej. panel 12V → batería 12V).	Permite usar paneles con voltaje superior al de la batería, optimizando el rendimiento y simplificando la conexión de arrays.
Costo	Bajo, económico y simple de instalar.	Alto, más costoso debido a la electrónica avanzada y algoritmos de seguimiento de máxima potencia.
Complejidad	Simple, sin necesidad de ajustes sofisticados.	Complejo, requiere programación y control electrónico inteligente.
Ventajas	- Bajo costo. - Fiable para sistemas pequeños. - Fácil instalación y mantenimiento.	Mayor eficiencia energética. Maximiza el aprovechamiento de paneles solares. - Ideal para sistemas con variaciones de radiación o paneles de alta potencia.- Permite mayor flexibilidad en el diseño del sistema.
Desventajas	- No aprovecha toda la energía del panel. - Menor eficiencia en días nublados o con temperatura alta. - Requiere que panel y batería tengan el mismo voltaje nominal.	Costo inicial elevado. Más complejo de instalar y mantener. Necesita electrónica de control avanzada.
Aplicaciones recomendadas	Sistemas pequeños de bajo consumo, proyectos educativos, prototipos y baterías de 12V o 24V.	Sistemas profesionales o residenciales de mayor consumo, estaciones de monitoreo remotas con paneles múltiples o arrays.

Nota: Reguladores de carga solar Instalaciones fotovoltaicas.

2.6 Fundamentos de Software aplicado a IIoT

El software constituye un pilar fundamental en la implementación de sistemas basados en el Internet de las Cosas (IoT), dado que proporciona la infraestructura lógica necesaria para la gestión, procesamiento, visualización y almacenamiento de la información recolectada por los dispositivos. A través de herramientas de propósito general, como sistemas operativos, lenguajes de programación y entornos de integración, es posible habilitar la comunicación entre los dispositivos de campo y las aplicaciones de supervisión en la nube o en servidores locales. En este contexto, se analizan tres componentes clave: los servidores Linux, el lenguaje de programación PHP y la herramienta Node-RED, cada uno con un rol específico en la arquitectura del sistema.

2.6.1 Servidores Linux

Los servidores Linux constituyen la base de la infraestructura de software en numerosos entornos industriales debido a su estabilidad, seguridad, flexibilidad y carácter de código abierto. A diferencia de sistemas operativos privados, Linux permite personalizar y optimizar el uso de recursos, lo que resulta esencial en arquitecturas IIoT donde la confiabilidad y la disponibilidad son factores críticos (Toapanta Rocha, 2023).

Entre las ventajas más relevantes se encuentran:

Estabilidad y confiabilidad: Linux es ampliamente reconocido por su robustez en sistemas de misión crítica, garantizando tiempos de operación prolongados sin interrupciones.

Seguridad: al ser un sistema multiusuario y altamente configurable, permite implementar políticas de control de acceso, segmentación de procesos y actualizaciones continuas que refuerzan la ciberseguridad.

Flexibilidad y escalabilidad: soporta una amplia gama de servicios como servidores web (Apache, Nginx), bases de datos (MySQL, PostgreSQL), y brokers de mensajería (Mosquitto para MQTT), facilitando la integración de dispositivos IoT/IIoT.

Comunidad activa y soporte: la gran cantidad de distribuciones disponibles (Ubuntu Server, Debian, CentOS, entre otros) asegura documentación y soluciones adaptadas a distintos escenarios industriales.

En un sistema IIoT, Linux actúa como plataforma de despliegue de servicios críticos, tales como almacenamiento de datos, servidores de aplicaciones, mecanismos de seguridad y orquestación de flujos de comunicación.

2.6.2 PHP

PHP (Hypertext Preprocessor) es un lenguaje de programación de propósito general, ampliamente utilizado en el desarrollo de aplicaciones web y servicios backend. Su importancia en un sistema IIoT radica en su capacidad para construir interfaces de comunicación entre dispositivos y aplicaciones, a través de servicios web basados en arquitecturas REST (Representational State Transfer)(Laaziri et al., 2019).

Las principales características que justifican el uso de PHP en entornos IoT son:

Desarrollo rápido y flexible: PHP permite crear aplicaciones de servidor de forma ágil, reduciendo tiempos de implementación en comparación con otros lenguajes más complejos.

Compatibilidad con bases de datos: cuenta con librerías nativas para la interacción con sistemas de gestión de bases de datos, lo que facilita el almacenamiento y recuperación de datos provenientes de sensores y actuadores.

Interoperabilidad: permite la integración de aplicaciones externas mediante el consumo y exposición de APIs RESTful, habilitando la conexión con Node-RED, aplicaciones móviles o plataformas en la nube.

Amplia adopción: debido a su trayectoria y comunidad activa, existen frameworks modernos como Laravel o Symfony que potencian la seguridad, escalabilidad y mantenibilidad del código.

En un sistema IIoT, PHP se utiliza para construir servicios backend que procesan la información recibida desde los dispositivos, administran la lógica de negocio y ofrecen interfaces de consulta para otras plataformas.

2.6.3 Node-RED

Node-RED es una herramienta de programación visual desarrollada por IBM y ofertada como software de código abierto. Está diseñada para integrar dispositivos, servicios y aplicaciones de manera fácil e intuitiva, mediante un sistema basado en flujos de nodos que representan operaciones lógicas, conexiones de red o transformaciones de datos (Torres Ventura et al., 2023).

Su aporte a un sistema IoT es particularmente significativo en la capa de integración y visualización, debido a las siguientes características:

Programación visual por flujos: facilita el diseño de arquitecturas complejas de comunicación sin necesidad de conocimientos avanzados en programación.

Compatibilidad con protocolos de IoT: soporta de forma nativa protocolos como MQTT, HTTP, WebSocket y Modbus TCP, lo que permite la conexión directa con sensores, actuadores, PLCs y servidores.

Dashboards en tiempo real: integra módulos de visualización que permiten construir interfaces gráficas dinámicas para el monitoreo de variables críticas, como presión, temperatura o estado de máquinas.

Extensibilidad: cuenta con una amplia librería de nodos creados por la comunidad, que abarcan desde el control de hardware hasta la conexión con servicios en la nube (AWS IoT, Azure IoT Hub, entre otros).

Despliegue en múltiples plataformas: puede instalarse en servidores Linux, dispositivos de bajo costo como Raspberry Pi o incluso en entornos de contenedores como Docker.

En el marco de la presente tesis, Node-RED actúa como una herramienta de orquestación de datos y supervisión, permitiendo integrar la información recibida de los dispositivos industriales con el backend desarrollado en PHP y desplegado en servidores Linux.

3 Marco metodológico

3.1 Tipo de investigación

Investigación Aplicada:

Este trabajo se enmarca en la investigación aplicada, ya que busca utilizar conocimientos científicos y tecnológicos existentes para desarrollar y mejorar un prototipo funcional que permita el monitoreo en tiempo real de variables ambientales como temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, calidad del aire, gases tóxicos y radiación solar. Su propósito es resolver una problemática práctica: la necesidad de sistemas de monitoreo ambiental accesibles, eficientes y escalables, especialmente relevantes en el contexto del cambio climático.

Investigación Experimental:

Se trata también de una investigación de tipo experimental, dado que el proyecto implica la implementación física del prototipo, la configuración de sensores, el desarrollo de software y la realización de pruebas para validar la precisión y confiabilidad de los datos recolectados. El diseño experimental permite observar y medir cómo se comporta el sistema en condiciones reales, permitiendo ajustar su funcionalidad.

Investigación Cuantitativa:

El enfoque es cuantitativo, ya que el sistema recopila, transmite y analiza datos numéricos (mediciones de variables ambientales), que luego serán evaluados y utilizados para determinar la eficacia del prototipo.

3.2 Etapas del Desarrollo del Prototipo

El desarrollo del presente proyecto se estructura en varias etapas secuenciales, con el propósito de garantizar una implementación eficiente y sistemática de la Actualización de Prototipo de Estación de Monitorización de Variables Meteorológicas.

Cada fase comprende actividades específicas orientadas al diseño, configuración, programación, prueba y validación del sistema. A continuación, se describen las etapas principales:

1. Etapa 1: Análisis de requerimientos y diseño de la arquitectura En la fase inicial se efectuó un análisis detallado de requerimientos con el objetivo de definir la arquitectura del sistema de monitoreo ambiental. El sistema debía cumplir con criterios de fiabilidad, escalabilidad, bajo consumo energético y facilidad de integración con plataformas de almacenamiento y visualización de datos.

Para la adquisición de parámetros ambientales se seleccionaron tres sensores principales:

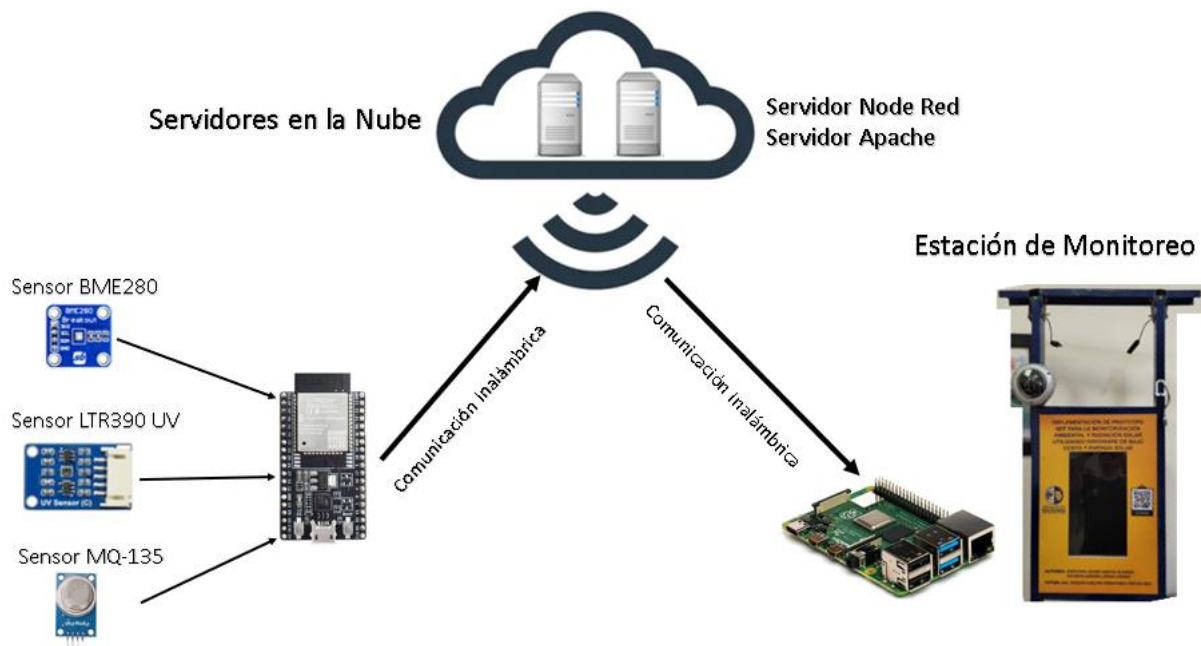
- **Sensor LTR390 UV:** especializado en la medición de radiación ultravioleta, fundamental para evaluar la exposición solar y sus efectos ambientales.
- **Sensor BME280:** empleado para la medición de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica, variables que permiten caracterizar las condiciones climáticas locales.
- **Sensor MQ-135:** utilizado para la detección de gases contaminantes como amoníaco, óxidos de nitrógeno, benceno, dióxido de carbono y alcohol, indicadores relevantes de la calidad del aire.

Estos sensores fueron integrados a un microcontrolador ESP32, que cumple la función de nodo principal de adquisición de datos. La arquitectura contempla la transmisión de la información mediante comunicación inalámbrica, tanto hacia una plataforma en la nube (con servicios Node-RED y Apache) como hacia una estación de monitoreo local basada en una Raspberry Pi.

En la Figura 8 se presenta la arquitectura general del sistema de monitoreo ambiental, donde se evidencia la interacción entre sensores, nodo de procesamiento y plataformas de almacenamiento y visualización.

Figura 8

Arquitectura general del sistema de monitoreo ambiental.



Nota. Representación grafica de la estructura y envío de datos

Etapas 2: Configuración de hardware

En esta fase se realizó la adquisición y configuración física de los módulos electrónicos requeridos. La elección del ESP32 se fundamentó en su capacidad de procesamiento, su conectividad Wi-Fi integrada y su bajo consumo energético.

La etapa de configuración contempló el montaje de los sensores en un prototipo funcional, la interconexión eléctrica mediante buses de comunicación (I2C y analógico), y la incorporación de un sistema de alimentación autónoma basado en paneles solares y baterías recargables, lo que permite la operación continua en ambientes exteriores.

Figura 9

Instalación de Sensores

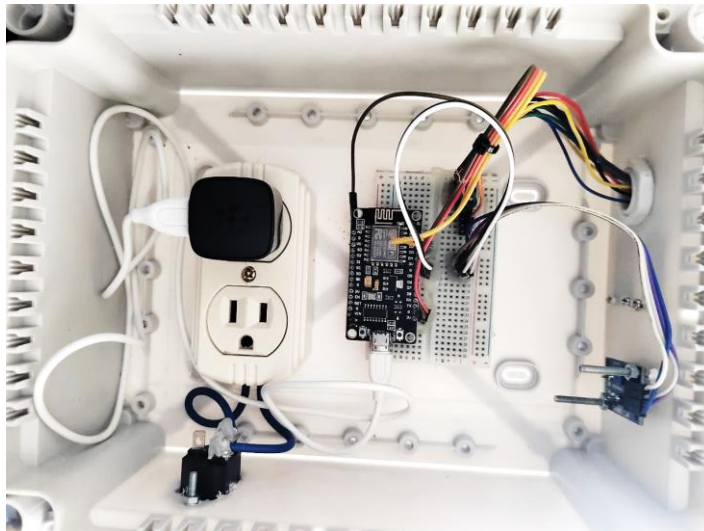


Nota: Muestra imágenes de los sensores utilizados.

Adicionalmente, se diseñó una carcasa protectora con materiales resistentes a la radiación solar y a la humedad, asegurando la durabilidad de los sensores y la estabilidad en las mediciones.

Figura 10

Conexión de Elementos en la caja



Nota: Imagen muestra modulo ESP32 y conexiones internas.

Puertos y pines utilizados en la conexión

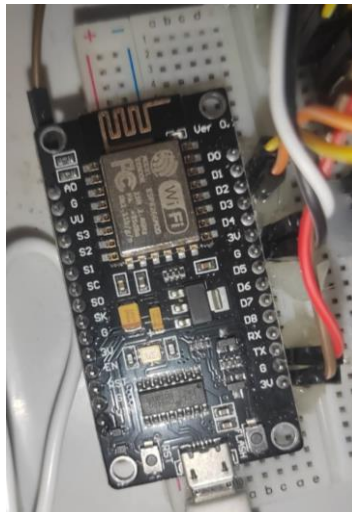
En la implementación del sistema con el microcontrolador ESP32 se emplearon diferentes pines y puertos de comunicación para la integración de sensores y el envío de datos hacia la red. La comunicación principal entre los sensores ambientales se estableció mediante el protocolo I2C, utilizando los pines GPIO 21 (SDA) y GPIO 22 (SCL), a los cuales se conectaron los sensores BME280 y LTR390. El sensor LTR390 opera con dirección I2C 0x53.

Los pines reservados para esta interfaz fueron: GPIO 13 (SCK), GPIO 12 (MISO), GPIO 11 (MOSI) y GPIO 10 (CS). El sistema también considera la creación de un puerto serial por software en los pines GPIO 10 (RX) y GPIO 11 (TX). Por otro lado, el sensor de calidad del aire MQ135 se conectó al pin A0 del ESP32, el cual funciona como entrada analógica para registrar la concentración de gases en partes por millón (PPM).

Finalmente, la comunicación con el servidor de mensajería se realiza mediante el módulo WiFi integrado en el ESP32, utilizando el puerto 1883 del protocolo MQTT sobre TCP/IP para la transmisión de datos en tiempo real.

Figura 11

Conexión de ESP32



Nota: Imagen muestra modulo ESP32.

Tabla 3

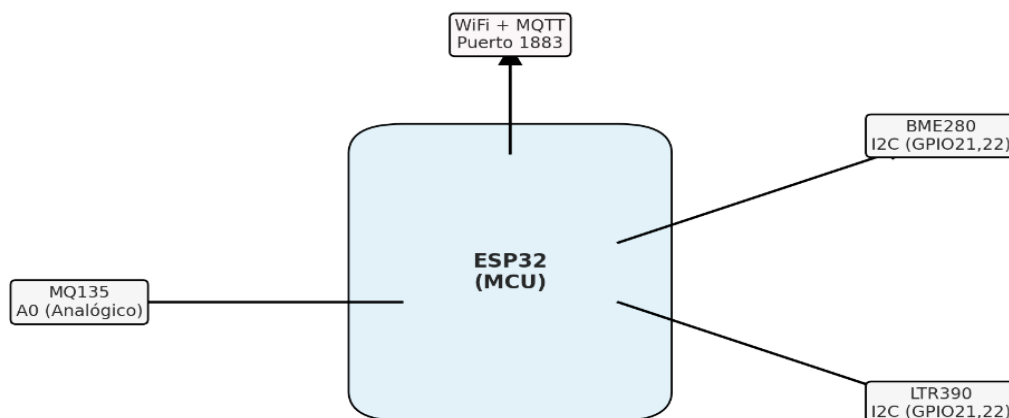
Cuadro de conexión de pines y sus funciones

Elemento	Protocolo / Puerto	Pines ESP32	Función
Sensor BME280	I2C	GPIO 21 (SDA), GPIO 22 (SCL)	Medición de temperatura, humedad, presión y altitud.
Sensor LTR390	I2C, dirección 0x53	GPIO 21 (SDA), GPIO 22 (SCL)	Medición de luz ambiental (Lux) y radiación UV (UVI).
Sensor MQ135	Entrada analógica	A0	Medición de calidad del aire (concentración de gases en PPM).
SPI (no usado en este proyecto)	SPI	GPIO 13 (SCK), GPIO 12 (MISO), GPIO 11 (MOSI), GPIO 10 (CS)	Conexión alternativa para el BME280.
Serial por software (no usado)	UART (SoftwareSerial)	GPIO 10 (RX), GPIO 11 (TX)	Comunicación serial alternativa (no implementada en el programa).
Conexión WiFi	TCP/IP	Módulo WiFi interno	Enlace con el servidor externo.
MQTT Broker	Puerto TCP 1883	Red WiFi	Publicación de datos de sensores en tópicos definidos.

Nota: Se muestra detalles de la conexión en el módulo ESP32, sensores y funcionalidad

Figura 12

Diagrama Esquemático de Conexiones ESP32



Nota: Representación grafica de las conexiones en el módulo ESP32.

Etapa 3: Desarrollo del software embebido y sistema de comunicación

El desarrollo del software embebido se implementó sobre el microcontrolador ESP32. La programación incluyó:

- Inicialización y calibración de los sensores.
- Rutinas de lectura periódica de variables ambientales.
- Filtros básicos para la reducción de ruido en las mediciones.
- Almacenamiento temporal en memoria interna para evitar pérdida de datos.

A continuación, se realiza el detalle de la programación en el ESP32 para la adquisición de datos y transmisión.

1. Inclusión de librerías y definición de constantes

El programa inicia con la inclusión de las librerías necesarias para la gestión de sensores y la comunicación entre dispositivos. Las librerías `Wire.h` y `SPI.h` permiten el uso de los protocolos I2C y SPI, empleados comúnmente en la conexión de sensores. En este caso, se utiliza el protocolo I2C para el intercambio de datos. Posteriormente, se incorporan las librerías `Adafruit_Sensor.h` y `Adafruit_BME280.h`, fundamentales para la configuración y operación del sensor BME280, el cual proporciona mediciones de temperatura, humedad, presión atmosférica y altitud. De igual manera, la librería `LTR390.h` se destina al manejo del sensor LTR390, encargado de medir la intensidad de luz ambiental y la radiación ultravioleta.

Asimismo, se define la constante `SEALEVELPRESSURE_HPA`, que representa la presión atmosférica estándar a nivel del mar y resulta indispensable para el cálculo de altitud. Finalmente, en esta sección se crean las instancias correspondientes a los sensores y a la dirección I2C necesaria para la comunicación del sensor de luz.

2. Configuración de comunicación WiFi y MQTT

En la siguiente etapa se integran las librerías `ESP8266WiFi.h`, `Adafruit_MQTT.h` y `Adafruit_MQTT_Client.h`, cuya función es establecer la conexión inalámbrica con una red WiFi y habilitar la comunicación con un servidor bajo el protocolo MQTT.

Se definen las credenciales de la red WiFi mediante el SSID y la contraseña, garantizando la autenticación del dispositivo. A continuación, se especifica la dirección IP y el puerto del

servidor MQTT, configurando así el cliente WiFi que sirve como base para el cliente MQTT. Este último es el encargado de publicar los datos adquiridos por los sensores en el servidor correspondiente. Además, se establecen los distintos tópicos MQTT asociados a cada variable monitoreada: temperatura, presión, altitud, humedad, cantidad de luz, radiación ultravioleta y calidad del aire. Dichos tópicos permiten organizar la información y transmitirla de manera estructurada a la plataforma de monitoreo.

3. Función setup

Dentro de la función setup se ejecuta la inicialización del sistema. En primer lugar, se configura la consola serial a 115200 baudios, lo que permite visualizar en tiempo real las lecturas a través del monitor serial. Seguidamente, se establece la conexión con la red WiFi, mostrando en consola el estado de la conexión y la dirección IP asignada por el router. Una vez conectado, se inicia la comunicación I2C necesaria para el intercambio de datos con los sensores. En lo que respecta al sensor LTR390, este se configura en modo de medición de luz ambiental (ALS), ajustando tanto la ganancia como la resolución. Estos parámetros permiten calibrar las lecturas en función del rango de intensidad lumínica esperado. Por su parte, el sensor BME280 es inicializado para comenzar con la adquisición de datos; en caso de presentarse algún error de comunicación, el sistema notifica mediante un mensaje en consola.

4. Función loop

El núcleo del programa se desarrolla en la función loop, la cual ejecuta de forma continua el proceso de adquisición y envío de datos. Este ciclo tiene un retardo de un segundo entre iteraciones para evitar saturación de información. En cada iteración, se llama a la función MQTT_connect con el objetivo de verificar y mantener activa la conexión con el broker MQTT. Posteriormente, se realiza la lectura del sensor MQ135, encargado de medir la calidad del aire en función de la concentración de gases contaminantes expresada en partes por millón (PPM). Estos valores son publicados en el servidor dentro del tópico correspondiente.

De igual forma, se adquieren los datos del sensor BME280, obteniendo la temperatura, presión atmosférica, altitud estimada y humedad relativa. Cada uno de estos valores se imprime en el monitor serial y se transmite a través del protocolo MQTT.

El sensor LTR390 alterna sus mediciones entre la intensidad lumínica ambiental (Lux) y el índice de radiación ultravioleta (UVI), enviando los resultados en los respectivos tópicos.

Finalmente, la función loop mantiene activa la comunicación con el broker mediante un ping, lo que asegura la persistencia de la conexión y la reconexión automática en caso de interrupción.

5. Función MQTT_connect

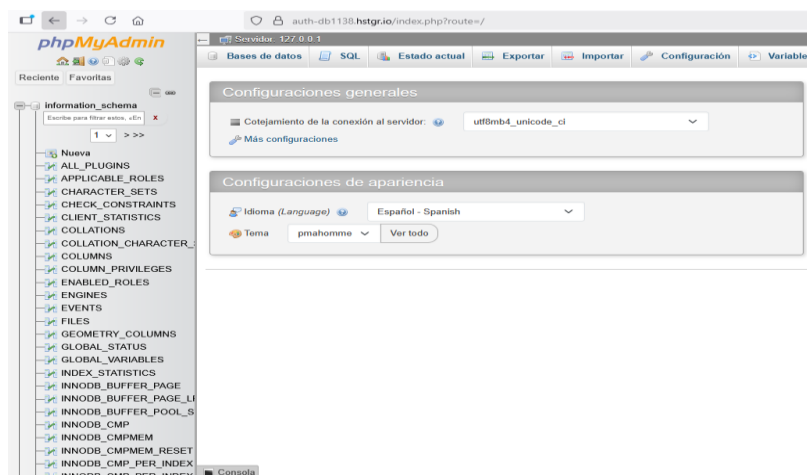
La función MQTT_connect se encarga de establecer y asegurar la conexión con el broker MQTT. En caso de que la conexión ya se encuentre activa, la función finaliza de inmediato.

Si la conexión se ha perdido, el sistema ejecuta hasta tres intentos de reconexión con un intervalo de espera de cinco segundos entre cada uno. En el caso de que las reconexiones no tengan éxito, el programa entra en un estado de espera, confiando en que el watchdog del microcontrolador reinicie la placa de manera automática. De esta manera, se garantiza la estabilidad de la comunicación, evitando pérdidas prolongadas de datos en el sistema de monitoreo.

Para el servicio en la nube se usa el servicio de Hostinger es un proveedor de hosting web, bases de datos, autenticación, etc. en el cual se alquila un servidor de Linux, el servicio de PHP y de NODE Red, para la configuración de los servicios que se usarán la administración y recopilación de datos que serán publicados.

Figura 13

Interfaz de phpAdmin - Configuración Principal



Nota: Imagen muestra interfaz de la consola de administración para la base de datos en PHPMyAdmin.

Configuraciones generales

Conjunto de la conexión al servidor: utf8mb4_unicode_ci, esto define cómo se almacenan y comparan los caracteres (soporta acentos, caracteres especiales y emojis).

Esto garantiza que las bases de datos puedan manejar texto en múltiples idiomas correctamente.

Configuraciones de apariencia

Idioma: configurado en Español (Spanish).

Tema visual: pmahomme (tema clásico por defecto de phpMyAdmin).

Panel derecho (phpMyAdmin)

Versión de phpMyAdmin: 5.2.2.

Acceso a documentación, página oficial, soporte, registro de cambios y licencia.

Interpretación general:

Esta pantalla es la página de configuración de phpMyAdmin, donde el usuario puede:

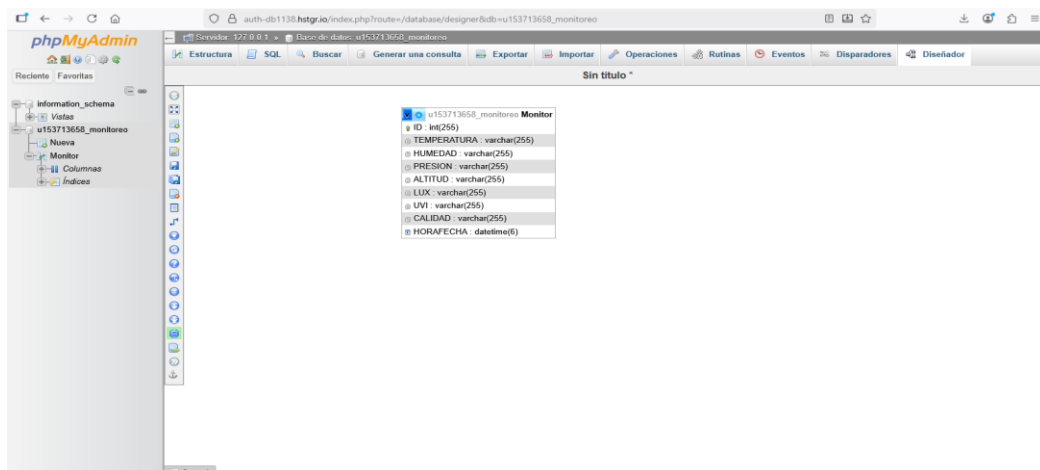
Ajustar la forma en que se visualizan los datos (idioma, tema, codificación).

Confirmar que la conexión al servidor MySQL/MariaDB utiliza utf8mb4, que es el estándar recomendado por su compatibilidad con caracteres extendidos.

Acceder a documentación y soporte de la herramienta.

Figura 14

Interfaz de phpAdmin – Administración de bases de datos MySQL/MariaDB.



Nota: Muestra el diseño de una tabla llamada Monitor, que pertenece a la base de datos u1575363_monitoreo.

La tabla contiene los siguientes campos:

ID – tipo int(255) - Es el identificador principal de los registros.

TEMPERATURA – tipo varchar(255) - Almacena los valores de temperatura como texto.

HUMEDAD – tipo varchar(255) - Almacena los valores de humedad en formato texto.

PRESION – tipo varchar(255) - Contiene los valores de presión atmosférica también en texto.

ALTURA – tipo varchar(255) - Guarda la altura en unidades no especificadas.

UVL – tipo varchar(255) – Almacena datos relacionados con el nivel de radiación ultravioleta.

CALIDAD – tipo varchar(255) - Puede almacenar información sobre calidad del aire o del ambiente.

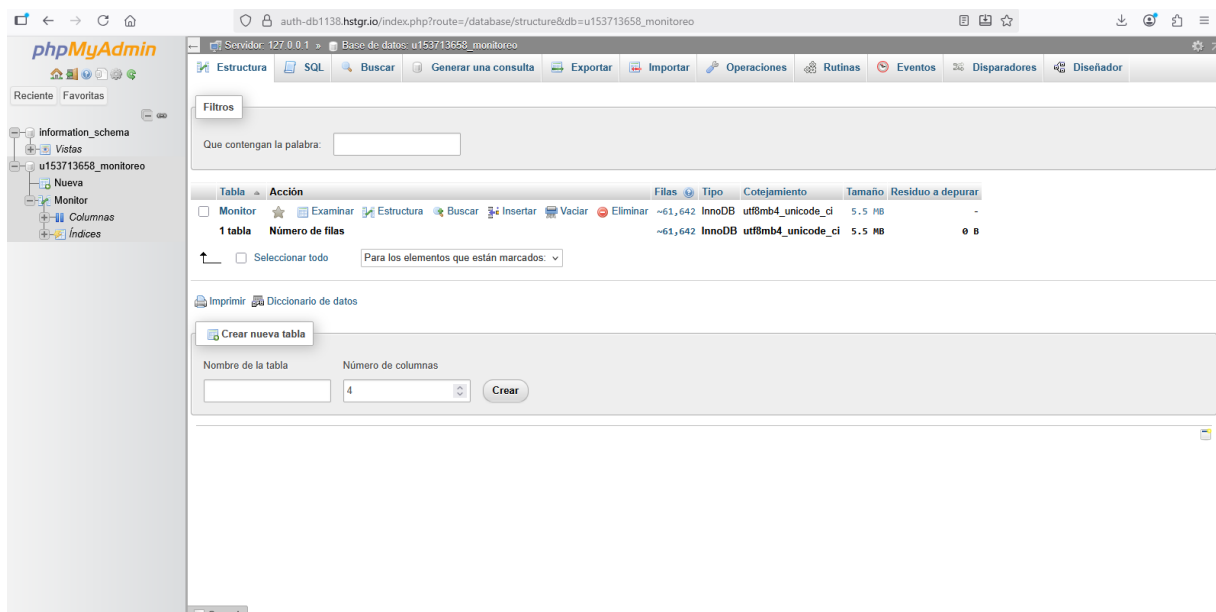
INICIOFECHA – tipo datetime - Registra la fecha y hora en que se guarda el dato.

Interpretación general

Esta tabla diseñada para almacenar mediciones ambientales (temperatura, humedad, presión, altura, radiación UV, calidad del aire), asociadas a una marca de tiempo (INICIOFECHA).

Figura 15

Interfaz de phpAdmin – Estructura de la Base de Datos u1575363_monitoreo



Nota: Muestra la estructura de la base de datos u1575363_monitoreo.

Elementos destacados

Panel lateral izquierdo

Se observa la base de datos seleccionada: u1575363_monitoreo.

Dentro de ella aparece una tabla llamada Monitor.

Panel central – listado de tablas de la base

Se muestra un resumen de la tabla existente.

4 Resultados

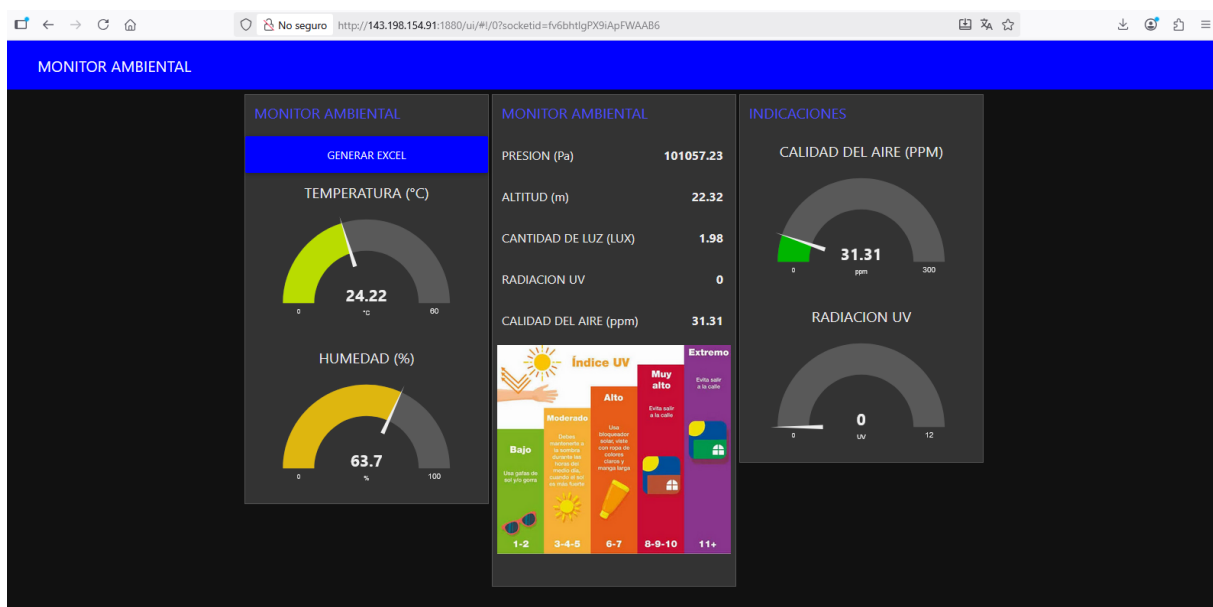
El motivo fue evaluar la correcta recopilación de datos a partir de los sensores, que la información sea enviada hacia la nube, y que sea visualizada en la interfaz gráfica.

De esta forma, se crea una interfaz gráfica de usuario mediante Node-RED Dashboards para que, al mismo tiempo, no sólo sean memorias de la información, sino que también puedan ir visualizando, en cada instante preciso los datos de las variables ambientales medidas: Radiación ultravioleta, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica de gases contaminantes, altitud y luminosidad.

La interfaz gráfica de usuario tiene animaciones dinámicas, en donde se puede graficar cada uno de los datos que muestran la evolución de cada variable. También fue posible incluir el estado y los indicadores de los umbrales críticos cuya condición; en el caso de radiación de ultravioleta el sistema reconoce y si sobrepasa los umbrales de la OMS (Organización Mundial de la Salud) genera una alerta visual, lo que contribuye a la prevención de la exposición solar.

Figura 16

Monitor ambiental Dashboard Node Red



Nota: Muestra los valores recopilados en graficas dinámicas.

De la misma forma, se habilitó el registro histórico de datos, accediendo así la detención de información en períodos prolongados de tiempo, lo cual es de utilidad para ver cómo puede cambiar el estado del medio ambiente, los cambios de la presión atmosférica que pueda

prever situaciones meteorológicas, así como la variación de la concentración de contaminantes en los picos de tráfico.

Durante las pruebas de validación previas a la aplicación del sistema en condiciones ambientales e instrumentales normales para su uso, se compararon los datos obtenidos con instrumentos de referencia refiriendo una buena correspondencia. En el caso del sensor BME280, las mediciones de temperaturas y la humedad relativa se muestra una baja desviación, lo que indica la fiabilidad de la medición. El MQ-135 mostró buena capacidad de detección para la concentración de gases al exponerlo a fuentes controladas, validando así su sensibilidad, aunque requiere calibraciones periódicas y/o reemplazo de sensor para recuperar su precisión absoluta.

Para la radiación ultravioleta, el sensor LTR390 mostró resultados congruentes con los diversos horarios de mayor radiación solar, mostrando picos elevados a la hora de máxima radiación y dotando así de valores mínimos en las horas de atardecer y dentro de oficinas. Las mediciones obtenidas son congruentes con la curva de irradiancia solar típica de la región, aportando así un argumento más por el cual este sistema es útil para la monitorización ambiental y el cuidado de la comunidad académica.

Por último, la interfaz se diseñó para su uso desde dispositivos móviles y desde equipos de escritorio, realizando un diseño de sistema de visualización multiplataforma, intuitivo y de fácil acceso para usuarios especializados y expertos (técnicos e investigadores), y público en general. Todo esto acentúa el carácter accesible del sistema, permitiendo un acceso a la información ambiental, desde cualquier lugar que cuente con un acceso a internet.

Por lo que las conclusiones a las que se llegaron, una vez analizados los resultados generados muestran que se cumple con los objetivos propuestos, proporcionando una solución confiable, escalable y autónoma para la identificación de condiciones ambientales.

5 Conclusiones

Las conclusiones de este proyecto son las siguientes:

- Se diseñó e implementó una arquitectura modular e inalámbrica que enlaza los sensores ambientales con un microcontrolador ESP32 con los servidores en la nube, lo que permitió validar la fiabilidad de la comunicación, así como la escalabilidad del sistema.
- Se realizó el ensamblado físico del prototipo usando una estructura adecuada para los entornos exteriores que protegería los componentes electrónicos y permitiría el funcionamiento continuo del sistema.
- Se realizó la programación del software embebido para el ESP32, que permitió que el sistema adquiriera, filtre y transmita datos a los servidores en la nube y sea consultada por una estación de monitoreo.
- Se realizó la configuración y la prueba de la comunicación inalámbrica del prototipo, validando la precisión de las mediciones hechas. Las pruebas mostraron que los datos obtenidos mantenían una correlación fiable con las condiciones ambientales reales, confirmando la validez del diseño propuesto.
- De la misma manera, la implementación de una interfaz de visualización en tiempo real permitió no solo el acceso remoto a la información desde dispositivos móviles y de escritorio, sino también el análisis histórico de las variables.

6 Recomendaciones

Se tiene las siguientes recomendaciones en este proyecto:

- Se aconseja realizar calibraciones y/o reemplazo periódico de los sensores (LTR390 UV, BME280 y MQ-135) a fin de asegurar la fiabilidad de las lecturas en el tiempo, principalmente en el caso de trabajar en ambientes exteriores donde las condiciones podrían modificar su sensibilidad.
- Se recomienda adoptar mecanismos redundantes para asegurar el suministro energético, utilizando baterías de mayor capacidad o sistemas híbridos de suministro (solar y red eléctrica) garantizando así la operación del prototipo en periodos de baja irradiación solar.
- Con el propósito de extender el alcance del sistema se sugiere estudiar la posibilidad de integrar tecnologías de comunicación a largo alcance (LoRaWAN, NB-IoT), lo que permitiría que la monitorización pudiera emplearse en zonas rurales o de difícil acceso sin depender exclusivamente de Wi-Fi.
- Se aconseja complementar la interfaz de visualización con herramienta de análisis avanzado en series temporales, modelos de predicción climática, mapas georreferenciados con lo cual se aumenta la utilidad del sistema para aplicaciones de investigación y gestión ambiental.
- Se aconseja realizar ensayos comparativos contra estaciones meteorológicas homologadas para validar y/o documentar el nivel de precisión obtenido por el prototipo, asegurándose de este modo una base científica y técnica de mayor relevancia.
- Al final, se sugiere seguir adelante con el proyecto concretando la implementación de módulos adicionales (p. ej., sensores de partículas PM2.5/PM10) y escalando a una red de estaciones IoT conectadas, dotando al mismo tiempo de más prestaciones al registro ambiental a nivel urbano o regional.

7 Bibliografía

- Acharya, P. S., & Aithal, P. S. (2020). A Comparative Study of MPPT and PWM Solar Charge Controllers and their Integrated System. *Journal of Physics: Conference Series*, 1712(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1712/1/012023>
- Al-Samman, A. M., Al-Hadhrami, T., Al Shami, A., Alnajjar, F., M Almuahay, M. A., Jabbar, W. A., Sulaiman, N., & Abdulmalek, S. (2022). A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions. *Electronics 2022, Vol. 11, Page 164*, 11(1), 164. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS11010164>
- Andrés, N., Lojan, F. J., & Navarrete, P. A. (2021). "Análisis comparativo entre tecnologías LoRaWAN y GSM/GPRS a fin de evaluar métricas como el rendimiento, consumo de energía y cobertura para transmisiones de datos en escenarios IoT." <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20586>
- Babiuch, M., Foltynnek, P., & Smutny, P. (2019). Using the ESP32 microcontroller for data processing. *Proceedings of the 2019 20th International Carpathian Control Conference, ICC 2019*. <https://doi.org/10.1109/CARPATIANCC.2019.8765944>
- Bentancourt Rossoli, R. A., Rodich, D. J., Rojas, L. M., Romero, E. E., Romero, M. L., Ruffino, L., & Salgueira, M. S. (2020). *Sistema de paneles fotovoltaicos*. <http://repositorio.unne.edu.ar/xmlui/handle/123456789/49610>
- BME280 Humidity + Barometric Pressure + Temperature Sensor Breakout*. (s/f). Recuperado el 24 de agosto de 2025, de <https://learn.adafruit.com/adafruit-bme280-humidity-barometric-pressure-temperature-sensor-breakout/pinouts>
- Board de desarrollo ESP32 WiFi Bluetooth BLE CH9102F - Electronilab*. (s/f). Recuperado el 24 de agosto de 2025, de <https://electronilab.co/tienda/board-de-desarrollo-con-modulo-esp32-wifiblueetooth-ble/>
- Bustos-Márquez, L. F., Sepúlveda-Mora, S. B., Guevara-Ibarra, D., Medina-Delgado, B., Bustos-Márquez, L. F., Sepúlveda-Mora, S. B., Guevara-Ibarra, D., & Medina-Delgado, B. (2023). Controlador de carga MPPT con método de estimación del estado de carga basado en conteo de amperios hora y voltaje a circuito abierto. *Ingeniería*, 28(2), 18722. <https://doi.org/10.14483/23448393.18722>
- Cazar, D., & Rhor Mancheno, J. S. (2025). Hacia una agricultura resiliente al cambio climático: sistemas de riego inteligente y monitoreo de humedad del suelo para cultivos en la zona andina. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 17(1), 1. <https://doi.org/10.18272/ACI.V17I1.3299>

- César Vilorio Núñez, Jairo Cardona Peña, C. L. G. (2009). *Análisis comparativo de tecnologías inalámbricas para una solución de servicios de telemedicina*. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612009000100011
- Chadyšiene, R., Girgždiene, R., & Girgždys, A. (2005). Ultraviolet radiation and ground-level ozone variation. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 13(1), 31–36. <https://doi.org/10.1080/16486897.2005.9636843>
- COLMENAR SANTOS Antonio , BORGE DIEZ David , COLLADO FERNÁNDEZ Eduardo, C. G. M. A. (2015). *Generacion Distribuida, Autoconsumo y redes Inteligentes* . [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=9fOiCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Producción+de+energía+distribuida&ots=wsv8JwLhAj&sig=aeJrkR1oV8HytVkp55tb3OGmXCQ&redir_esc=y#v=onepage&q=Producción de energía distribuida&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=9fOiCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Producción+de+energía+distribuida&ots=wsv8JwLhAj&sig=aeJrkR1oV8HytVkp55tb3OGmXCQ&redir_esc=y#v=onepage&q=Producción+de+energía+distribuida&f=false)
- Easterline, L. M., Putri, A. A. Z. R., Atmaja, P. S., Dewi, A. L., & Prasetyo, A. (2024). Smart Air Monitoring with IoT-based MQ-2, MQ-7, MQ-8, and MQ-135 Sensors using NodeMCU ESP32. *Procedia Computer Science*, 245(C), 815–824. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2024.10.308>
- Fernandes Ministério, F. (2025). *Tecnologías emergentes para la mitigación del cambio climático: innovaciones en políticas forestales, reforestación y ecología urbana*. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/79483>
- García Álvarez, C. X., & López Lozano, R. A. (2024). *Implementación de prototipo IOT para la monitorización ambiental y radiación solar utilizando hardware de bajo costo y energía solar*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27419>
- García Montero, P. (2023). El cambio climático: posibles impactos en la agricultura en el contexto de América Latina y Venezuela. *Agroalimentaria Journal - Revista Agroalimentaria*, 28(55), 167–189. <https://doi.org/10.22004/AG.ECON.338827>
- Hadi, A. S., Alsaker, M., Eshoom, A., Elmnifi, M., Alhmode, M. A., & Habeeb, L. J. (2022). Development of Low-Cost and Multi-Material Sensing Approach for MQ 135 Sensor. *ECS Transactions*, 107(1), 17309–17321. <https://doi.org/10.1149/10701.17309ECST/XML>
- Haxhibeqiri, J., De Poorter, E., Moerman, I., & Hoebeke, J. (2018). A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. *Sensors 2018, Vol. 18, Page 3995*, 18(11), 3995. <https://doi.org/10.3390/S18113995>
- Hurtado, L. C., & Almeida, C. M. (2024). *Análisis del Desempeño de la Tecnología WiFi 6 y Configuración de una Red Inalámbrica WiFi 6 LTE con el Router MikroTik hAP ax Lite LTE6*. https://www.researchgate.net/profile/Luis-Felipe-41/publication/383877839_Analisis_del_Desempeno_de_la_Tecnologia_WiFi_6_y_Con

- figuracion_de_una_Red_Inalambrica_WiFi_6_LTE_con_el_Router_MikroTik_hAP_ax_Lite_LTE6_Performance_Analysis_of_WiFi_6_Technology_and_Configuration_of_/links/66df982d2390e50b2c7d98eb/Analisis-del-Desempeno-de-la-Tecnologia-WiFi-6-y-Configuracion-de-una-Red-Inalambrica-WiFi-6-LTE-con-el-Router-MikroTik-hAP-ax-Lite-LTE6-Performance-Analysis-of-WiFi-6-Technology-and-Configuration-of.pdf
- Laaziri, M., Benmoussa, K., Khouilji, S., & Kerkeb, M. L. (2019). A Comparative study of PHP frameworks performance. *Procedia Manufacturing*, 32, 864–871. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2019.02.295>
- López-Saldaña, G. A., Cendejas-Valdez, J. L., Soto-Summano, J. L., & Benítez-Ramírez, M. E. (2024). Study of the ultraviolet radiation index in the Central Western area of Mexico, its association with the risk of skin cancer, and a technological proposal for the dissemination of the problem and its prevention. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 48(186), 25–37. <https://doi.org/10.18257/RACCEFYN.2190>
- LTR390 UV Sensor. (s/f). Recuperado el 25 de agosto de 2025, de <https://learn.adafruit.com/adafruit-ltr390-uv-sensor/arduino>
- Moran Villamar, E. E. (2023). *Análisis comparativo de redes wifi 2.4GHZ y 5GHZ para la transmisión de datos e información*. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/14201>
- Ossa, V., & Código, A. (2017). *Ensamble y caracterización de un panel solar fotovoltaico*. Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira. <https://hdl.handle.net/11059/7616>
- Paipa, E. A. L., Serrano, M. Á. L., & Mora, S. B. S. (2018). Controlador de carga PWM eficiente y de bajo costo para sistemas fotovoltaicos autónomos. *Respuestas*, 23(S1), 6–13. <https://doi.org/10.22463/0122820X.1491>
- Raspberry Pi 4 Model B. (s/f). Recuperado el 24 de agosto de 2025, de <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>
- Raspberry Pi Cookbook - Simon Monk. (s/f). Recuperado el 25 de agosto de 2025, de https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=QaqgEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Raspberry+PI&ots=b9Rmz5RM-1&sig=EFek-tbiNN3pLD0uMmBeYNrsisQ&redir_esc=y#v=onepage&q=Raspberry+PI&f=false
- Reguladores de carga solar Instalaciones fotovoltaicas. (s/f). Recuperado el 25 de agosto de 2025, de <https://circuitoelectrico.com/calculo-de-instalaciones-fotovoltaicas/reguladores/>
- Sensor de gas MQ135 Calidad de aire. (s/f). Recuperado el 25 de agosto de 2025, de <https://moviltronics.com/tienda/sensor-mq135/>
- Shevchenko, G. V., Glubokov, N. A., Yupashevsky, A. V., & Kazmina, A. S. (2020). Air flow

- sensor based on environmental sensor BME280. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM, 2020-June*, 432–435. <https://doi.org/10.1109/EDM49804.2020.9153474>
- Sistema de medida de temperatura y humedad con notificación de alarma por interfaz GPRS.* (s/f). Recuperado el 25 de agosto de 2025, de <https://openaccess.uoc.edu/items/9365307d-8290-432f-a049-4b4b3e879399#page=1>
- Tagle, M., Rojas, F., Reyes, F., Vásquez, Y., Hallgren, F., Lindén, J., Kolev, D., Watne, Å. K., & Oyola, P. (2020). Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(3), 1–18. <https://doi.org/10.1007/S10661-020-8118-4/TABLES/3>
- Toapanta Rocha, J. C. (2023). *Implementación de hardening en sistemas operativos de servidor implementación de hardening en un sistema operativo de servidor Linux de base Red Hat.* <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25203>
- Torres Ventura, J., Ruelas Puente, A. H., Herrera García, J. R., sugerida de citación, F., Ventura, T., Puente, R., & Herrera García, A. H. (2023). Rendimiento para la interoperabilidad entre Raspberry pi, ESP8266 y PLC con Node-RED para el IIoT. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 2023(29), 90–97. <https://doi.org/10.17163/INGS.N29.2023.08>
- Xun, L. S., Merugu, S., & Maheshwari, H. (2024). Smart IoT-Integrated Weather Analytics System. *IET Conference Proceedings*, 2024(30), 13–24. <https://doi.org/10.1049/ICP.2025.0228>

8 Anexos

ANEXO 1

Configuración de ESP32.

```
// Librerías para sensores y comunicación

#include <Wire.h>

#include <SPI.h>

#include <Adafruit_Sensor.h>

#include <Adafruit_BME280.h> // Sensor ambiental BME280

#include <LTR390.h> // Sensor de luz y UV

// Pines para conexión SPI (no usados si se usa I2C)

#define BME_SCK 13

#define BME_MISO 12

#define BME_MOSI 11

#define BME_CS 10

// Comunicación serial por software (no utilizada en este código)

#include <SoftwareSerial.h>

// Definición de presión atmosférica al nivel del mar (para cálculo de altitud)

#define SEALEVELPRESSURE_HPA (1013.25)

// Instancia de SoftwareSerial (pines 10 y 11)

SoftwareSerial mySerial(10, 11); // RX, TX

// Instancia del sensor BME280
```

```

Adafruit_BME280 bme;

unsigned long delayTime;

// Dirección I2C del sensor LTR390

#define I2C_ADDRESS 0x53

LTR390 ltr390(I2C_ADDRESS); // Instancia del sensor LTR390

// Librerías para WiFi y MQTT

#include <ESP8266WiFi.h>

#include "Adafruit_MQTT.h"

#include "Adafruit_MQTT_Client.h"

#include "MQ135.h" // Sensor de calidad del aire

// Credenciales WiFi

#define WLAN_SSID    "4961_0"

#define WLAN_PASS    "crespo2460669"

// Configuración del servidor MQTT

#define AIO_SERVER    "143.198.154.91"

#define AIO_SERVERPORT 1883           // use 8883 for SSL

#define AIO_USERNAME  ""

#define AIO_KEY       ""

// Cliente WiFi

WiFiClient client;

```

```

// Cliente MQTT usando el cliente WiFi
Adafruit_MQTT_Client mqtt(&client, AIO_SERVER, AIO_SERVERPORT, "",
AIO_USERNAME, AIO_KEY);

// Tópicos MQTT para publicar datos
Adafruit_MQTT_Publish TEMPERATURA = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt,
"TEMPERATURA");
Adafruit_MQTT_Publish PRESION = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, "PRESION");
Adafruit_MQTT_Publish ALTITUD = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, "ALTITUD");
Adafruit_MQTT_Publish HUMEDAD = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, "HUMEDAD");
Adafruit_MQTT_Publish LUX = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, "LUX");
Adafruit_MQTT_Publish UVI = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, "UVI");
Adafruit_MQTT_Publish CALIDAD = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, "CALIDAD");

// Prototipo de función
void MQTT_connect();

void setup() {
  Serial.begin(115200); // Inicializa la consola serial

  // Conexión a WiFi
  WiFi.begin(WLAN_SSID, WLAN_PASS);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
}

```

```
Serial.println();

Serial.println("WiFi connected");

Serial.println("IP address: "); Serial.println(WiFi.localIP());

Serial.println("Ya estás conectado");

// Inicializa comunicación I2C

Wire.begin();

// Inicializa sensor LTR390

if (!ltr390.init()) {

    Serial.println("LTR390 not connected!");

}

// Configura el modo ALS (luz ambiental)

ltr390.setMode(LTR390_MODE_ALS);

// Configura ganancia

ltr390.setGain(LTR390_GAIN_3);

Serial.print("Gain : ");

switch (ltr390.getGain()) {

    case LTR390_GAIN_1: Serial.println(1); break;

    case LTR390_GAIN_3: Serial.println(3); break;

    case LTR390_GAIN_6: Serial.println(6); break;

    case LTR390_GAIN_9: Serial.println(9); break;

    case LTR390_GAIN_18: Serial.println(18); break;

}
```

```

// Configura resolución
ltr390.setResolution(LTR390_RESOLUTION_18BIT);
Serial.print("Resolution : ");
switch (ltr390.getResolution()) {
  case LTR390_RESOLUTION_13BIT: Serial.println(13); break;
  case LTR390_RESOLUTION_16BIT: Serial.println(16); break;
  case LTR390_RESOLUTION_17BIT: Serial.println(17); break;
  case LTR390_RESOLUTION_18BIT: Serial.println(18); break;
  case LTR390_RESOLUTION_19BIT: Serial.println(19); break;
  case LTR390_RESOLUTION_20BIT: Serial.println(20); break;
}

while (!Serial); // Espera a que la consola serial esté lista
Serial.println(F("BME280 test"));

unsigned status;

// Inicializa el sensor BME280
status = bme.begin();
if (!status) {
  Serial.println("Could not find a valid BME280 sensor, check wiring, address, sensor ID!");
  Serial.print("SensorID was: 0x"); Serial.println(bme.sensorID(), 16);
  Serial.print("    ID of 0xFF probably means a bad address, a BMP 180 or BMP 085\n");
  Serial.print("    ID of 0x56-0x58 represents a BMP 280,\n");
  Serial.print("    ID of 0x60 represents a BME 280.\n");
  Serial.print("    ID of 0x61 represents a BME 680.\n");
}

```

```

    while (1) delay(10); // Se queda aquí si no encuentra el sensor
}

Serial.println("-- Default Test --");

Serial.println();

}

void loop() {

    delay(1000); // Espera 1 segundo

    MQTT_connect(); // Conecta o reconecta al broker MQTT

    // Lectura del sensor de calidad de aire MQ135
    MQ135 gasSensor = MQ135(A0);
    float air_quality = gasSensor.getPPM();
    Serial.print("Air Quality: ");
    Serial.print(air_quality);
    Serial.println(" PPM");
    Serial.println();

    CALIDAD.publish(air_quality); // Publica en MQTT

    // Lecturas del sensor BME280
    float temperature = bme.readTemperature();
    float pressure = bme.readPressure() / 100.0F;
    float altitude = bme.readAltitude(SEALEVELPRESSURE_HPA);
    float humidity = bme.readHumidity();

```

```
Serial.print("Temperature = ");
Serial.print(bme.readTemperature());
Serial.println(" °C");

Serial.print("Pressure = ");
Serial.print(bme.readPressure() / 100.0F);
Serial.println(" hPa");

Serial.print("Approx. Altitude = ");
Serial.print(bme.readAltitude(SEALEVELPRESSURE_HPA));
Serial.println(" m");

Serial.print("Humidity = ");
Serial.print(bme.readHumidity());
Serial.println(" %");

Serial.println();

// Publica en MQTT los datos del BME280
TEMPERATURA.publish(bme.readTemperature());
PRESION.publish(bme.readPressure());
ALTITUD.publish(bme.readAltitude(SEALEVELPRESSURE_HPA));
HUMEDAD.publish(bme.readHumidity());

// Lectura de datos del sensor LTR390
if (ltr390.newDataAvailable()) {
```

```

if (ltr390.getMode() == LTR390_MODE_ALS) {
  Serial.print("Ambient Light Lux: ");
  Serial.println(ltr390.getLux());
  ltr390.setGain(LTR390_GAIN_18); // Configuración para UV
  ltr390.setResolution(LTR390_RESOLUTION_20BIT); // Recomendado para UV
  ltr390.setMode(LTR390_MODE_UVS); // Cambia a modo UV

  LUX.publish(ltr390.getLux()); // Publica Lux
} else if (ltr390.getMode() == LTR390_MODE_UVS) {
  Serial.print(",LUX,");
  Serial.print(ltr390.getUVI());

  ltr390.setGain(LTR390_GAIN_3); // Configuración para Lux
  ltr390.setResolution(LTR390_RESOLUTION_18BIT);
  ltr390.setMode(LTR390_MODE_ALS); // Cambia a modo ALS
  UVI.publish(ltr390.getUVI()); // Publica UV Index
}
}

// Mantiene viva la conexión MQTT
if(! mqtt.ping()) {
  mqtt.disconnect();
}
}

// Función para conectar al broker MQTT

```

```

void MQTT_connect() {
    int8_t ret;

    // Si ya está conectado, salir
    if (mqtt.connected()) {
        return;
    }

    Serial.print("Connecting to MQTT... ");
    uint8_t retries = 3;

    // Intenta conectarse hasta 3 veces
    while ((ret = mqtt.connect()) != 0) { // retorna 0 si conecta
        Serial.println(mqtt.connectErrorString(ret));
        Serial.println("Retrying MQTT connection in 5 seconds...");
        mqtt.disconnect();
        delay(5000);
        retries--;
        if (retries == 0) {
            // Espera a que el watchdog reinicie
            while (1);
        }
    }

    Serial.println("MQTT Connected!");
}

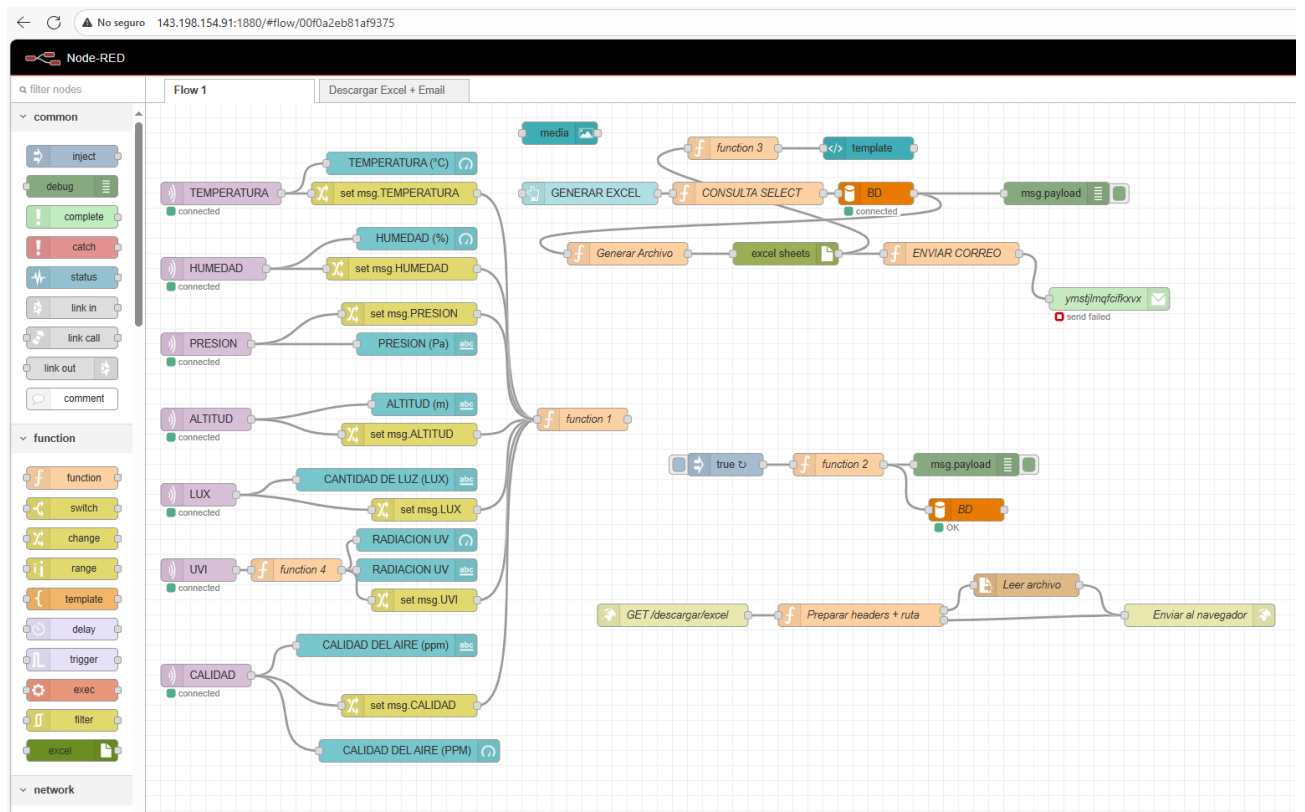
```

ANEXO 2

Configuración de NODE RED

Figura 17

Captura de datos de ESP32 hacia plataforma Node RED.



Nota: Muestra el proceso de captura de datos hacia Node RED.