DESDE 2023
https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026) P. 77-87

ISSN: 2992-7315

Diseño e Implementación de un Prototipo Experimental de Hardware para Monitoreo Atmosférico Inalámbrico Basado en Arduino® y Protocolo IEEE 802.15.4

Design and Implementation of an Experimental Hardware Prototype for Wireless Atmospheric Monitoring Based on Arduino® and IEEE 802.15.4 Protocol

Juan Gabriel Rodríguez-Ortiz [a], Cornelio Morales-Morales [b], Ángel Adad Franco-Baltazar [c], Isabel Ernestina López-Navarro [d], Louis Phelippe Meziat-Castro [e]

[a,b,c,d] *Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, 76800, San Juan del Río, Querétaro, México.*
[e] *Facultad de Ingeniería, Universidad de Cundinamarca, Dg 18 20-29, Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia*

Resumen

En este artículo se presenta el diseño de hardware, integración electrónica e implementación experimental de un prototipo portátil y autónomo para el monitoreo atmosférico local, independiente de redes celulares e internet. El sistema se fundamenta en una arquitectura modular compuesta por una unidad transmisora (Tx) exterior de bajo consumo y una unidad receptora (Rx) interior. El hardware Tx/Rx integra tecnología Arduino® Nano / Uno (microcontrolador ATmega328P a 16 MHz) y módulos de radiofrecuencia XBee® S1 (IEEE 802.15.4 a 2.4 GHz) en topología punto a punto (P2P). El módulo Tx exterior incluye siete sensores ambientales comerciales y permite la adquisición de diez magnitudes físicas: temperatura ambiente, humedad relativa, calidad del aire (índice COV/NOx), altitud estimada, presión atmosférica, iluminación (ALS), índice UV, velocidad del viento, dirección del viento y precipitación pluvial acumulada. La unidad Rx cuenta con visualización física local mediante una pantalla LCD TFT (controlador ILI9341 con resolución 240x320 pixeles) a color de 2.4 pulgadas. Se presenta la caracterización del consumo eléctrico del hardware (0.36 W en Tx), el análisis de factibilidad teórica de su fuente fotovoltaica autónoma (panel de 5 Vcc / 2 W y batería Li-Ion 18650) considerando eficiencias de conversión, y la evaluación empírica de alcance de RF (65 m en línea de vista con evaluación de tasa de pérdida de paquetes). Los resultados validan la factibilidad técnica del hardware desarrollado como una plataforma experimental asequible para telemetría ambiental en entornos sin conectividad a internet.

Palabras clave: Arduino®, Estación meteorológica experimental, IEEE 802.15.4, XBee® S1, Telemetría de bajo consumo.

Abstract

This paper presents the hardware design, electronic integration, and experimental implementation of a portable, autonomous prototype for local atmospheric monitoring that operates independently of cellular networks and the internet. The system is based on a modular architecture comprising a low-power outdoor transmitter unit (Tx) and an indoor receiver unit (Rx). The Tx/Rx hardware integrates Arduino® Nano/Uno technology (ATmega328P microcontroller at 16 MHz) and XBee® S1 radio frequency modules (IEEE 802.15.4 at 2.4 GHz) in a point-to-point (P2P) topology. The outdoor Tx module incorporates seven commercial environmental sensors capable of acquiring ten physical quantities: ambient temperature, relative humidity, air quality (VOC/NOx index), estimated altitude, atmospheric pressure, ambient light sensing (ALS), UV index, wind speed, wind direction, and accumulated rainfall. The Rx unit features local on-board visualization via a 2.4-inch color TFT LCD screen (ILI9341 controller with a 240x320 pixel resolution). The work details the hardware power consumption characterization (0.36 W at Tx), the theoretical feasibility analysis of its autonomous photovoltaic power supply (5 VDC / 2 W panel and an 18650 Li-ion battery) accounting for conversion efficiencies, and the empirical RF range evaluation (65 m line-of-sight with packet loss rate assessment). The results validate the technical feasibility of the developed hardware as an affordable experimental platform for environmental telemetry in environments lacking internet connectivity.

Keywords: Arduino®, Experimental weather station, IEEE 802.15.4, XBee® S1, Low-power telemetry.

*Autor para la correspondencia: juan.ro@sjuanrio.tecnm.mx
Correo electrónico: juan.ro@sjuanrio.tecnm.mx (Juan Gabriel Rodríguez-Ortiz), cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx (Cornelio Morales-Morales), angel.fb@sjuanrio.tecnm.mx (Ángel Adad Franco-Baltazar), isabel.ln@sjuanrio.tecnm.mx (Isabel Ernestina López-Navarro), Lmeziat@ucundinamarca.edu.co (Louis Phelippe Meziat-Castro).

Historial del manuscrito: recibido el 18/09/2026, última versión-revisada recibida el 09/10/2026, aceptado el 16/11/2026, publicado el 24/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.5281/zenodo.24502597

1. Introducción

El monitoreo de parámetros atmosféricos a escala microclimática es una herramienta fundamental para el diagnóstico ambiental local, la investigación académica y la gestión agrícola (WMO, 2021). Si bien las estaciones meteorológicas automáticas comerciales de grado profesional ofrecen alta exactitud, su elevado costo de adquisición, mantenimiento complejo y dependencia de infraestructura propietaria limitan su despliegue en entornos educativos o comunidades rurales aisladas.

En la literatura reciente, diversas arquitecturas de monitoreo de bajo costo apoyadas en hardware libre y tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) han sido propuestas (Cruz y Choque, 2018; Leelavinodhan et al., 2021; Ricaldi y Andrade, 2022). Asimismo, desarrollos recientes en redes de sensores ambientales han explorado plataformas inalámbricas avanzadas para telemetría agrícola y rural (Al-Okby et al., 2022; Park et al., 2019). Por ejemplo, Babiuch et al. (2022) diseñaron estaciones ambientales basadas en microcontroladores ESP32 conectados mediante Wi-Fi a servidores en la nube para visualización remota; mientras que Mabrouki et al. (2022) implementaron una arquitectura IoT multiparamétrica apoyada en protocolos HTTP/MQTT para monitoreo climático en tiempo real. En el ámbito de redes de área amplia de baja potencia (LPWAN), Kusriyanto y Putra (2023) y Sendra et al. (2023) desarrollaron nodos microclimáticos basados en tecnología LoRa/LoRaWAN con celdas solares para agricultura y monitoreo ambiental rural. De manera similar, Parra et al. (2023) propusieron un prototipo de monitoreo ambiental inalámbrico con arquitectura IoT y comunicación Wi-Fi/MQTT, y García et al. (2022) evaluaron enlaces inalámbricos en bandas ISM de 2.4 GHz para telemetría ambiental en zonas agrícolas de topografía irregular.

A pesar de los avances reportados, el análisis crítico del estado del arte evidencia una limitación estructural recurrente: la gran mayoría de estos prototipos dependen de conectividad activa a internet, enrutadores Wi-Fi, módems celulares (GPRS/LTE/5G), gateways LoRaWAN con salida WAN o plataformas públicas en la nube. En regiones rurales sin cobertura de telecomunicaciones o durante contingencias hidrometeorológicas severas —momentos críticos en los que el colapso de las torres celulares es frecuente—, dicha dependencia tecnológica constituye un punto único de falla que interrumpe por completo la disponibilidad de los datos ambientales. Adicionalmente, muchos prototipos académicos priorizan la conectividad en la nube sacrificando el consumo energético (> 0.8 W en transceptores Wi-Fi/celulares) o limitándose a medir entre 2 y 5 variables básicas sin despliegue físico local inmediato.

Para atender esta problemática, el objetivo principal de este trabajo es presentar el diseño, acoplamiento electrónico, caracterización experimental y transferencia tecnológica de un prototipo de estación de monitoreo atmosférico inalámbrica completamente autónoma y libre de dependencias de red externa. A diferencia de los desarrollos centrados en IoT convencional, esta propuesta utiliza el protocolo estándar IEEE 802.15.4 sobre transceptores XBee® S1 en topología punto a punto (P2P). El aporte diferencial e innovación de ingeniería radica en la arquitectura de integración heterogénea determinista sobre un microcontrolador de 8 bits sin sistema operativo de tiempo real (RTOS): se consolidan siete transductores físicos de distinta naturaleza eléctrica (bus digital I2C compartido por cuatro sensores, entrada analógica ADC y dos líneas de interrupción por hardware con filtrado RC y antirrebote determinista de 50 ms) para adquirir simultáneamente diez magnitudes atmosféricas con un consumo continuo de apenas 0.36 W, acondicionamiento óptico UV mediante ventana de cuarzo JGS1, autonomía fotovoltaica aislada y visualización física local en tiempo real.

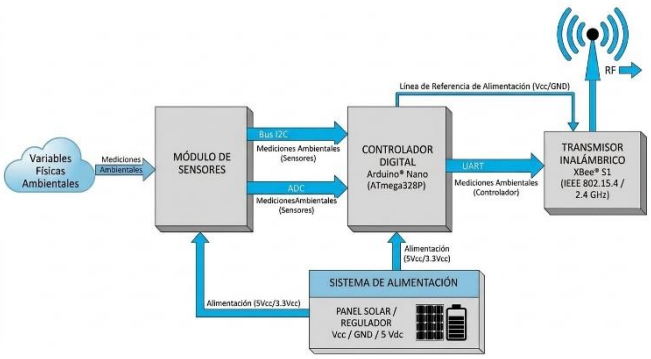
2. Materiales y Método

El prototipo adopta una arquitectura modular dividida en dos bloques físicos de hardware: el módulo o unidad transmisora (Tx) exterior y el módulo o unidad receptora (Rx) interior.

2.1 Arquitectura del hardware módulo transmisor (Tx) exterior

La unidad transmisora (Tx) exterior realiza la adquisición, acondicionamiento de señal y digitalización de diez magnitudes físicas a partir de siete transductores comerciales integrados. Su núcleo de procesamiento es la placa de desarrollo Arduino® Nano (basada en el microcontrolador ATmega328P a 16 MHz). La Figura 1 muestra la arquitectura a bloques del módulo transmisor (Tx) exterior.

Figura 1: Arquitectura del módulo transmisor (Tx) exterior (elaboración propia).



La matriz de transductores implementada y sus características de interfaz se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Matriz de sensores en el módulo transmisor (Tx) exterior.

Ítem	Variable Atmosférica / Unidad	Sensor / Dispositivo / Rango
1	Temperatura ambiente (°C)	AHT20 (-40 °C a +85 °C)
2	Humedad Relativa (%)	AHT20 (0% a 100%)
3	Calidad del aire COV/NOx	SGP41 (1 a 500 índice COV/NOx)
4	Presión atmosférica (hPa)	BMP180 (300 hPa a 1100 hPa)
5	Altitud estimada (m.s.n.m.)	BMP180 (+9000 m a -500 m s.n.m.)
6	Iluminación ambiental (lux)	LTR390 (0.01 lux a 157,000 lux)
7	Índice de radiación UV	LTR390 (Índice UV 0 a ~20)
8	Velocidad del viento (km/h)	Anemómetro de cazoletas (0 km/h a 108 km/h)
9	Dirección del viento (Grados / Sector)	Veleta de resistencia (0° a 360° (8 sectores))
10	Precipitación pluvial acumulada (mm)	Pluviómetro de cazoleta basculante (0.2794 mm/pulso)

La matriz de siete transductores utilizados en el prototipo se interconecta con la placa Arduino® Nano procurando optimizar el uso de líneas de entrada y salida y evitar colisiones de tiempo en la captura de eventos asíncronos (ráfagas de viento y basculaciones del pluviómetro). El acoplamiento eléctrico y asignación de puertos en la placa Arduino® Nano se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2: Interfaz de hardware integrada en el módulo Tx.

Puerto Arduino® Nano	Sensor / Periférico / ID	Tipo de interfaz / Acondicionamiento
A4 (SDA), A5 (SCL)	AHT20 (0x38), BMP180 (0x77), SGP41 (0x59), LTR390 (0x53).	Bus I2C, Resistencias Pull-up externas (4.7 kΩ)
A6	Veleta resistiva	Entrada analógica (Divisor de tensión / ADC)
D2	Anemómetro de cazoletas	Interrupción digital (INT0), Filtro RC y debouncing digital (50 ms)
D3	Pluviómetro de balancín	Interrupción digital (INT1), debouncing digital (50 ms)
TX (Pin 1)	XBee® S1 Transmisor	UART Serie (9600 bps), XBee® Explorer Regulated (5 Vcc a 3.3 Vcc)

2.2 Acoplamiento de niveles lógicos y radiofrecuencia (IEEE 802.15.4)

El microcontrolador Arduino® Nano opera a niveles lógicos TTL de 5 Vcc, mientras que el módulo transceptor XBee® S1 (Silicon Labs EM250) requiere niveles lógicos CMOS de 3.3 Vcc, soporta una tensión máxima absoluta de 3.6 Vcc y entrega una potencia nominal de salida RF de +0 dBm (1 mW) en la banda ISM de 2.4 GHz (DIGI International, 2021). Para evitar el daño de las líneas de entrada del transceptor y asegurar la integridad de las ráfagas seriales a 9600 bps, se integró una placa adaptadora XBee® Explorer Regulated. Esta tarjeta incluye un regulador lineal LDO de 3.3 Vcc y un regulador de nivel con divisor resistivo/transistor en la línea DIN (RX del XBee), garantizando la compatibilidad entre ambas plataformas electrónicas y operando en modo transparente (AT) sin sobrecarga de encabezados de red TCP/IP.

2.3 Análisis de consumo eléctrico y fuente fotovoltaica autónoma

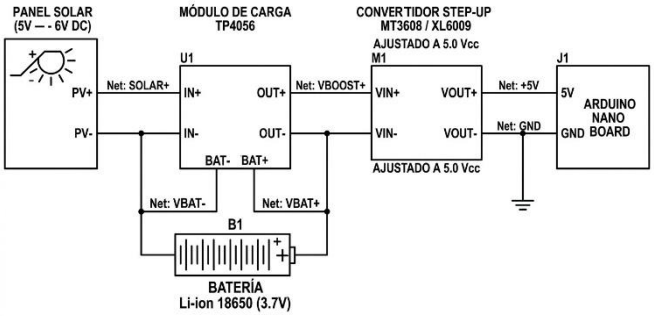
Para verificar el comportamiento dinámico del hardware en campo, se midió el consumo de corriente del módulo Tx empleando una fuente regulada a 5 Vcc. El circuito Tx demanda una corriente media en operación continua de 72 mA (potencia de 0.36 W), alcanzando picos de 88 mA durante las transmisiones de RF de 1 mW (+0 dBm).

Para evaluar la factibilidad teórica de alimentación autónoma en aplicaciones portátiles o aisladas de la red (Off-Grid), se dimensionó una fuente fotovoltaica compacta. El arreglo consiste en un panel solar monocristalino de 5 Vcc / 2 W (corriente máxima promedio de 400 mA), un módulo cargador TP4056 con circuito de protección DW01A y una batería recargable Li-Ion 18650 de 3.7 Vcc / 3000 mAh (energía nominal de 11.1 Wh). Con este arreglo, la energía diaria consumida por el módulo Tx es de $0.36\ W \cdot 24\ h = 8.64$ Wh/día. En un escenario ideal considerando una radiación solar promedio equivalente de 4.5 horas solar pico (HSP) en la región de prueba, el panel solar genera $2\ W \cdot 4.5\ h = 9.0$ Wh/día.

No obstante, al realizar un análisis de factibilidad más riguroso que incorpora la eficiencia del regulador Boost MT3608/XL6009 ($\eta \approx 85\ \%$) y la eficiencia de carga/descarga de la batería Li-Ion ($\eta \approx 88\ \%$), la energía útil disponible se estima en aproximadamente 6.73 Wh/día. Esto indica que, bajo condiciones climáticas desfavorables o días nublados consecutivos, el balance energético requerirá el respaldo de la capacidad acumulada en la batería (11.1 Wh), la cual proporciona un margen de autonomía continua sin radiación solar de aproximadamente 23 a 30 horas. Por lo tanto, este cálculo demuestra la factibilidad teórica de alimentación autónoma del prototipo, reconociendo que para garantizar una operación ininterrumpida 24/7 en periodos invernales se requeriría escalar el panel solar a 3.5 W o implementar modos de bajo consumo (sleep modes) en el firmware. La Figura 2

muestra el diagrama esquemático para el sistema de alimentación eléctrica fotovoltaica.

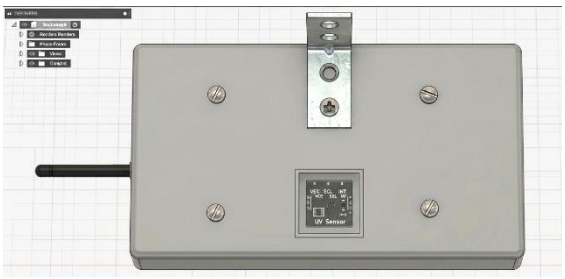
Figura 2: Sistema de alimentación eléctrica fotovoltaica.



2.4 Encapsulado del hardware módulo transmisor (Tx) exterior

El circuito electrónico Tx se alojó en un gabinete de plástico ABS con grado de protección IP65 (130x70x40 mm). Para prevenir pozos térmicos e hidratación de los sensores AHT20, BMP180 y SGP41 por radiación directa, el gabinete dispone de ranuras de ventilación inferior. Para el sensor óptico LTR390 (iluminación e índice UV), se adaptó una ventana superior cubierta con una lámina de vidrio de cuarzo de sílice fundido JGS1 (15x15 mm), para permitir el paso óptimo de la radiación ultravioleta directo hacia el sensor LTR390; el cual garantiza una transmitancia superior al 90% en la banda ultravioleta (200 nm a 400 nm). Esta característica óptica hace de este material ideal en aplicaciones de medición de luz ultravioleta (Shape Optics Technologies, s.f.). La Figura 3 presenta el modelo del gabinete del módulo transmisor (Tx) exterior.

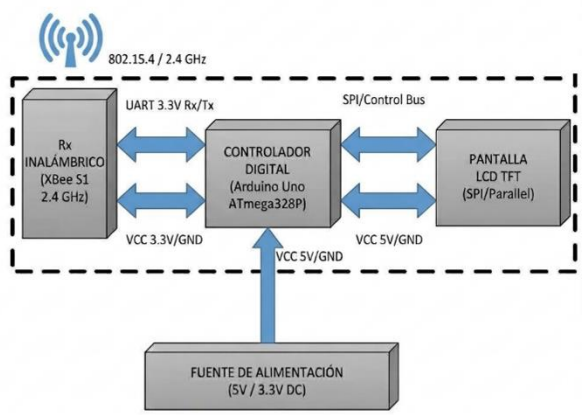
Figura 3: Módulo transmisor (Tx) exterior (elaborado en Autodesk Fusion®).



2.5 Arquitectura del hardware módulo receptor (Rx) interior

La unidad receptora (Rx) interior se diseñó para brindar visualización inmediata en sitio. Consta de una tarjeta Arduino® Uno, un adaptador XBee® Explorer Regulated acoplado al módulo XBee® S1 receptor, y una pantalla gráfica LCD TFT de 2.4 pulgadas (controlador ILI9341). La unidad decodifica la trama serial entrante y actualiza cíclicamente las diez variables meteorológicas cada 2 segundos. La demanda eléctrica de la unidad Rx es de 350 mA a 5 Vcc (1.75 W), alimentada por un adaptador AC/DC convencional de 5 Vcc / 2 A. La Figura 4 representa la arquitectura del módulo receptor (Rx) interior.

Figura 4: Arquitectura del módulo receptor (Rx) interior (elaboración propia).



2.6 Encapsulado del módulo receptor (Rx) interior

El módulo receptor (Rx) interior fue alojado en un gabinete hermético de plástico ABS con grado de protección IP65 (130x70x40 mm) para proteger la circuitería contra el polvo, humedad y golpes mecánicos. La pantalla a color LCD TFT con controlador ILI9341 y resolución de 240x320 pixeles queda expuesta a la vista del usuario a fin de que la información de las variables climatológicas sea visible desde diversos ángulos. La Figura 5 presenta la vista frontal de la unidad receptora (Rx) interior.

Figura 5: Gabinete del módulo receptor (Rx) interior.



2.7 Transferencia tecnológica, código fuente y esquemas de reproducción

Con el propósito de facilitar la replicabilidad experimental, la validación por pares y la transferencia tecnológica hacia instituciones educativas o comunidades rurales, la documentación técnica completa del prototipo se encuentra disponible en acceso abierto. El paquete de reproducción tecnológica incluye: (a) el código fuente comentado en lenguaje C++ (Arduino IDE) para los firmwares de adquisición y transmisión (Tx) y de recepción y despliegue gráfico (Rx), incluyendo las rutinas de interrupción y calibración de sensores; (b) los diagramas esquemáticos electrónicos y la lista de materiales (BOM) con especificaciones de componentes comerciales. El material se encuentra alojado en el repositorio de hardware abierto del proyecto (https://github.com/HardwareySoftware/ESTACION-METEOROLOGICA-LOCAL) bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

3. Resultados experimentales

Se realizaron evaluaciones instrumentales de contraste en condiciones de laboratorio y campo para comprobar la correcta operación del hardware, radiocomunicación y acondicionamiento de señales.

3.1 Temperatura y Humedad Relativa

El sensor AHT20 registró una temperatura de 26.9 °C frente a una temperatura de 26.0 °C medida con un instrumento de contraste de taller (multímetro Aicevos® AS-118D con termopar tipo K calibrado), presentando una diferencia o error absoluto de 0.9 °C.

Por otra parte, en humedad relativa (HR), el sensor AHT20 indicó 46 % HR frente a 50 % HR registrado por un higrómetro digital de taller HTC-1. Esta lectura representa una diferencia de -4 puntos porcentuales, lo que equivale a un error relativo de -8 % con respecto al valor de referencia del instrumento de taller.

Se reconoce explícitamente que estas comparaciones son de carácter cualitativo y corresponden a una verificación funcional de prototipos de bajo costo en entorno de taller. No obstante, estos márgenes de desviación para temperatura y humedad relativa resultan aceptables para caracterizaciones microclimáticas orientadas a docencia o diagnóstico agrícola no sinóptico (Secretaría de Economía, 2013).

3.2 Calidad del aire

El sensor SGP41 está hecho para medir la concentración de contaminantes en el aire. En esencia, mide compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NOx). Los COV provienen de la quema de combustibles como gasolina o diésel además de la evaporación de disolventes y la actividad industrial; mientras que, los NOx son gases altamente reactivos, siendo el dióxido de nitrógeno el más peligroso (NO_2) y se manifiesta, principalmente, en los gases que expulsan los automotores (Al-Okby et al., 2022).

El firmware para el sensor se realizó considerando que el SGP41 procesa los datos brutos de COV y NOx. El algoritmo de índice de gases y el controlador del sensor están disponibles en el repositorio de GitHub de Sensirion utilizado en la programación del sensor.

Por otra parte, la escala de medida está asignada en el algoritmo para el índice de gases de Sensirion para mediciones de COV y NOx. Este algoritmo procesa las mediciones brutas y las asigna respectivamente a su propia escala de índice, que va de 1 a 500 puntos. La Tabla 3 resume los valores comparativos entre mediciones de COV y NOx que se tomaron como referencia para determinar la calidad del aire (ICA) en las mediciones del prototipo.

Tabla 3: Escala de Índice de Calidad del Aire (ICA) de referencia (Sensirion, 2022).

Característica	Índice COV	Índice NOx
Rango total	1 a 500	1 a 500
Punto de referencia	100 (aire promedio)	1 (entorno limpio)
Valores bajos (1 a 99)	Aire limpio	Sin presencia de combustión
Valores altos (101 a 500)	Presencia de picos de COV	Eventos de NOx detectados

El valor adimensional registrado por el sensor (92) se presenta como una aproximación instrumental indicativa para alertas comunitarias y no como una medición analítica absoluta de concentración.

3.3 Presión atmosférica y Altitud

El sensor BMP180 midió una presión barométrica local (P_{QFE}) de 813 hPa. Ahora bien, para comprobar la coherencia del funcionamiento del sensor respecto a modelos teóricos, se aplicó la ecuación barométrica estándar internacional ISO 2533:1975 (International Organization for Standardization [ISO], 1975):

$$P = P_0 \cdot \left(1 - \frac{(L \cdot h)}{T_0}\right)^{\frac{(g \cdot M)}{(R \cdot L)}} \quad (1)$$

Donde P_0 representa la presión estándar al nivel del mar (1013.25 hPa), L es el gradiente térmico vertical (0.0065 K/m), h equivale al valor de altitud en el lugar de referencia sobre el nivel del mar (1881 m), T0 es el valor de temperatura al nivel del mar (288.15 K), g= representa el valor de aceleración de la gravedad (9.80665 m/s²), M= es el valor de la masa molar del aire seco (0.0289644 kg/mol) y R= el valor de la constante universal (8.31447 J/(mol·K). Entonces, la presión teórica calculada resultó de 811.8 hPa, mostrando una diferencia de 1.2 hPa (error relativo inferior al 0.15 %) respecto al modelo físico.

Por otro lado, la altitud calculada por firmware mediante el modelo altimétrico de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, 1993):

$$h = 44330 \cdot \left(1 - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.190284}\right) \quad (2)$$

Donde h es la altitud resultante en metros, P es la presión atmosférica actual en el sitio de medición en hPa y P_0 es el valor de presión atmosférica de referencia al nivel del mar (1013.25 hPa).

El cálculo teórico de la altitud arroja un valor de 1828.6 m.s.n.m. frente a la medición experimental de 1829 m.s.n.m., mostrando una concordancia adecuada dentro del redondeo numérico del microcontrolador. Esta comprobación valida la consistencia del algoritmo y acondicionamiento del sensor para aplicaciones microclimáticas orientativas (OACI, 1993).

3.4 Iluminación

La medición de luz ambiental se realizó con el sensor digital LTR390 capaz de cuantificar la luz del medio en un rango de 0.01 a 157,000 lux. El resultado de la medición es directamente proporcional a la cantidad de iluminación que incide sobre el sensor. La fórmula aplicada al firmware para calcular la cantidad de iluminación se toma de la hoja de datos del sensor LTR390 (LITEON®, 2016):

$$lux_{Calc} = \frac{(0.6\ x\ ALS_{DATA})}{(Gain\ x\ INT\ x\ W_{FAC})} \quad (3)$$

Donde ALS_DATA es el valor de medición sensor del sensor, Gain representa la ganancia para un factor de conversión de 16 bits (1), INT es una constante para ganancia 1x (0.25) y W_{FAC} representa el factor de corrección de ventana (1).

El resultado de la medición de iluminación registró un valor de 416 lux en exterior, el cual al contrastarse con la norma ISO 8995-1 (ISO, 2002) (Tabla 4) corresponde a la categoría cualitativa de "Día nublado / sombra en exterior", coincidiendo con la condición de campo observada al momento de la medición.

Tabla 4: Escala cualitativa de iluminación según norma ISO 8995-1 (ISO, 2002)

Valor en lux	Condición ambiental
< 50	Noche
< 300	Penumbra
< 10,000	Día nublado / sombra exterior
< 40,000	Día despejado / luz directa
> 40,000	Día soleado / luz muy intensa

3.5. Índice de radiación UV

El sensor LTR390 cuantifica la irradiancia en la banda ultravioleta. Aunque el Índice UV estándar definido por la OMS (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2002) se pondera según la curva eritemática de la radiación UVB (280–315 nm), el sensor LTR390 presenta su máxima sensibilidad en el espectro UVA (315–400 nm). Bajo condiciones de exposición solar directa sin nubosidad, la relación espectral UVA/UVB se mantiene predecible, lo que permite correlacionar la lectura del sensor con la escala de riesgo mediante un factor de ponderación programado en firmware (Park et al., 2019).

Para verificar la consistencia instrumental del cálculo programado en firmware, se aplicó la fórmula recomendada en la hoja de datos del sensor LTR390 (LITEON®, 2016):

$$UVI_{Calc} = \frac{UV\ Sensor\ count}{(UV\ Sensitivity\ x\ W_{FAC})} \quad (4)$$

Donde UVIcalc = es el Índice UV calculado, UV Sensor count es la lectura directa del sensor, UV Sensitivity es el factor de escala (2300) y W_{FAC} representa el factor de corrección de ventana (1).

La medición de la estación meteorológica al momento de la prueba fue de 2. La equivalencia lineal del índice UV estándar se fundamenta en la irradiancia eritemática efectiva de la luz solar donde 1 unidad equivale a una irradiancia de 25 mW/m². La escala de radiación UV va de 1 a 11+ y están asociados con diferentes recomendaciones de protección solar (OMS, 2002). Por tanto, el valor de la medición corresponde a una escala de riesgo bajo.

3.6. Sensor de velocidad del viento (anemómetro)

La velocidad del viento se determinó mediante el conteo de pulsos por interrupción en el pin D2 (INT0) de la placa Arduino® Nano producidos por el anemómetro de cazoletas. La verificación instrumental se realizó comparando la lectura contra un anemómetro comercial de prueba LUTRON® LM-81AM en un rango de 0 a 38 km/h a lo largo de un conjunto

de 20 mediciones pareadas en túnel de aire controlado. La desviación promedio registrada fue de 0.32 km/h, con una diferencia máxima de 1.3 km/h a velocidades superiores a 30 km/h.

3.7. Sensor de dirección del viento (veleta)

La veleta de resistencia caracteriza ocho sectores angulares a partir del divisor de tensión en el pin A6. La respuesta del hardware se comprobó manualmente orientando la veleta hacia cuatro direcciones cardinales fijas (Norte 0°, Este 90°, Sur 180°, Oeste 270°) y cuatro colaterales, verificando que el firmware decodificara correctamente la orientación con un margen de tolerancia angular de ±11.25°. Durante la prueba de campo, el sistema registró de forma estable una orientación de 225° (Suroeste). Se enfatiza que la veleta debe ser alineada físicamente hacia el sur geográfico durante la instalación para garantizar la coincidencia azimutal.

3.8 Precipitación pluvial (Pluviómetro)

El pluviómetro de cazoleta basculante (0.2794 mm/pulso) se comprobó cuantitativamente mediante el vertido controlado de un volumen conocido de 500 mL de agua pura a través del embudo colector (A_{embudo} = 55 cm²). El volumen vertido equivale teóricamente a una lámina de agua de 90.9 mm. Durante la prueba experimental, el microcontrolador registró un total de 322 impulsos basculantes (322 x 0.2794 mm = 89.96 mm). Esto representa un error absoluto de -0.94 mm (-1.03 % de error relativo) en la acumulación de lluvia, confirmando la efectividad del filtro antirrebote de 50 ms en la rutina de interrupción D3 (INT1). El resultado de la medición para la variable en cuestión se presenta en pantalla LCD TFT como precipitación pluvial acumulada en milímetros.

3.9 Caracterización del alcance de radiofrecuencia (IEEE 802.15.4)

La evaluación de la comunicación inalámbrica a 2.4 GHz (potencia de salida de +0 dBm / 1 mW, antenas integradas de alambre tipo Whip) se realizó ejecutando tres series independientes (repeticiones) de pruebas continuas de transmisión, cada una compuesta por 1,000 paquetes seriales de datos (32 bytes por trama) a intervalos de envío de 2 segundos, lo que equivale a una duración de monitoreo continuo de 33.3 minutos por corrida experimental (100 minutos acumulados por punto de distancia evaluado). Se estableció como criterio de aceptación de enlace confiable una tasa de recepción de paquetes (PRR) superior al 95 % (PER < 5 %), verificando la integridad de cada trama mediante delimitadores de inicio y fin en la recepción serial.

En campo abierto con línea de vista (LOS), a una distancia de 65 metros, el sistema recibió un promedio de 986 paquetes por corrida (desviación estándar de ± 3 paquetes). El cálculo de la tasa de error de paquetes (PER) y de la tasa de recepción de paquetes (PRR) se realizó mediante las ecuaciones (5) y (6):

$$PER\ (\%) = \frac{(Paquetes\ enviados) - (Paquetes\ recibidos)}{Paquetes\ enviados} \times 100 \qquad (5)$$

$$PRR\ (\%) = \left(\frac{Paquetes_{Recibidos}}{Paquetes_{Enviados}}\right) x\ 100 \qquad (6)$$

En consecuencia, a 65 m en LOS se registra una tasa PER del 1.4 % (PRR del 98.6 %), lo que confirma una comunicación altamente estable y libre de pérdida significativa de datos. A distancias superiores a 80 m, la tasa PER se incrementó por encima del 15 %, presentando intermitencia en el despliegue.

Por otro lado, en entorno de laboratorio con mampostería (NLOS), a 28 metros de distancia a través de dos muros de concreto, se transmitieron 1,000 paquetes y se recibieron 962 paquetes, obteniendo un PER del 3.8 % (PRR del 96.2 %), estableciendo este valor como el alcance práctico seguro para interiores.

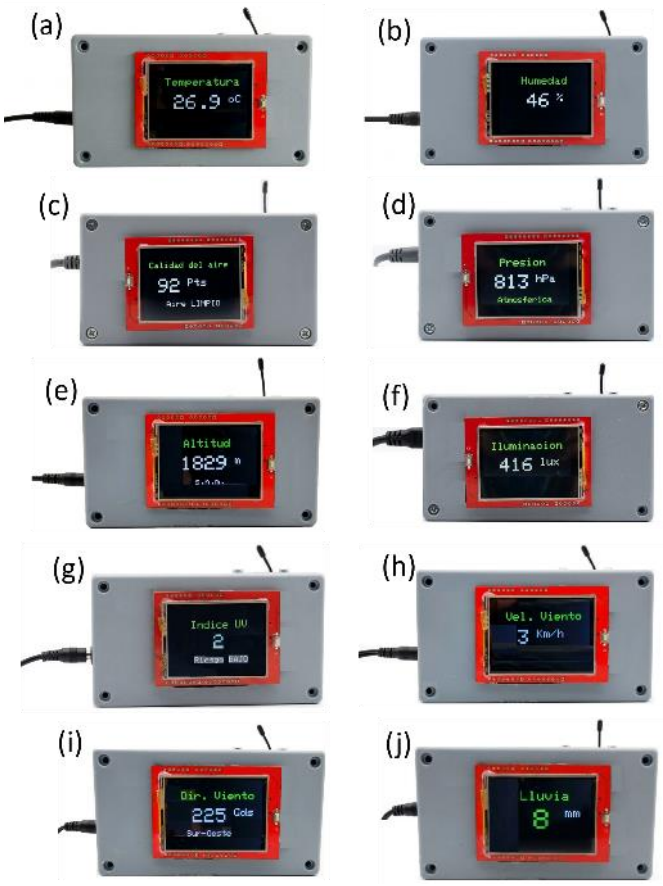
3.10 Integración final del prototipo

El prototipo de hardware experimental de la estación de monitoreo atmosférico inalámbrica con protocolo IEEE 802.15.4 se muestra en la Figura 6; mientras que la Figura 7 presenta un mosaico con el despliegue secuencial de las diez variables en la pantalla LCD TFT del módulo receptor (Rx) interior.

Figura 6: Prototipo experimental de monitoreo atmosférico inalámbrico con Arduino® y protocolo IEEE 802.15.4.



Figura 7: Interfaz de la pantalla LCD TFT de monitoreo ambiental: (a) temperatura, (b) humedad relativa, (c) calidad del aire, (d) presión atmosférica, (e) altitud, (f) iluminación, (g) índice UV, (h) velocidad del viento, (i) dirección del viento y (j) lluvia acumulada.



En la Figura 6 se observa que el módulo transmisor (Tx) exterior que aloja los sensores AHT20, BMP180, SGP41 y LTR390, la placa Arduino® Nano y el transceptor XBee® S1 está debidamente encapsulado y protegido. Asimismo, el anemómetro, la veleta y el pluviómetro se encuentran montados en la parte superior del mástil tubular en contacto directo con el entorno atmosférico, mientras que en la sección inferior se ubica la celda fotovoltaica que alimenta al sistema. Por su parte, la Figura 7 muestra las lecturas reales recolectadas secuencialmente en la unidad receptora (Rx).

3.11 Limitaciones instrumentales del prototipo

Los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y campo confirman la funcionalidad operativa e integración electrónica de los siete transductores y del enlace inalámbrico IEEE 802.15.4. No obstante, en concordancia con la naturaleza experimental del desarrollo, se delimitan tres consideraciones técnicas: (a) las verificaciones de temperatura, humedad relativa e índice UV constituyen contrastes funcionales orientativos frente a instrumentos portátiles de taller y modelos teóricos estándar, por lo que no sustituyen una calibración metrológica formal, (b) la autonomía fotovoltaica calculada (6.73 Wh/día útiles y respaldo de 23 a 30 horas en batería Li-Ion) representa una validación de factibilidad teórica bajo un régimen promedio de 4.5 HSP, sujeta a variaciones estacionales de irradiancia y (c) el alcance práctico probado de 65 m en LOS y 28 m en NLOS responde a la operación de transceptores XBee® S1 de baja potencia (+0 dBm) con antena integrada, suficiente para cobertura microclimática local en parcelas o planteles educativos.

4. Discusión

Los resultados experimentales demuestran la factibilidad técnica del hardware desarrollado para cumplir con los requerimientos de telemetría ambiental local de bajo costo. Para sustentar la pertinencia, originalidad y aportes verificables de la propuesta frente al estado del arte reciente, la Tabla 5 presenta una comparativa multivariable contra cuatro investigaciones representativas de arquitectura completa publicadas entre 2022 y 2023 en el ámbito de estaciones meteorológicas y monitoreo ambiental inalámbrico.

Tabla 5: Comparativa del prototipo de hardware propuesto frente a desarrollos recientes en la literatura (2022-2023).

Parámetro / Característica	Babiuch et al. (2022)	Ricaldi y Andrade (2022)	Parra et al. (2023)	Sendra et al. (2023)	Prototipo Propuesto
Protocolo Inalámbrico	Wi-Fi (ESP32)	GPRS / Red Celular	Wi-Fi / MQTT (ESP32)	LoRaWAN (SX1276)	**IEEE 802.15.4 (XBee® S1)**
Dependencia de Internet / Red	Sí (Servidor Cloud)	Sí (Broker MQTT)	Sí (Servidor Cloud)	Sí (Gateway LoRaWAN WAN)	**No (Operación 100% Local)**
Variables Medidas	4 variables	5 variables	5 variables	4 variables	**10 variables simultáneas**
Visualización Física Local	No (Web / Móvil)	No (App Móvil)	No (Dashboard Web)	No (Servidor LNS)	**Sí (LCD TFT 2.4" a color)**
Fuente de Energía	Red eléctrica AC	Panel Solar básico	Red eléctrica AC / Batería	Panel Solar + Li-Ion	**PV Off-Grid (5V / 2W + Li-Ion)**
Consumo de Potencia Tx	> 0.85 W	> 1.50 W (picos GPRS)	> 0.80 W	~ 0.22 W	**0.36 W (Continuo)**

Al evaluar el desempeño de este prototipo frente a otros desarrollos de la literatura (Tabla 5), se resalta la ventaja sustancial de su arquitectura de comunicación e independencia operativa en cinco ejes fundamentales:

A. Ventajas en Arquitectura de Comunicación y Determinismo de Red:

Frente a las plataformas tradicionales basadas en módulos Wi-Fi/ESP32 (Babiuch et al., 2022; Parra et al., 2023) o módems celulares GPRS/LTE (Ricaldi y Andrade, 2022), las cuales requieren una topología dependiente de enrutadores, brokers MQTT remotos o servidores en la nube, así como sistemas LoRaWAN conectados a la red WAN (Sendra et al., 2023), el sistema propuesto adopta una arquitectura desacoplada en topología Punto a Punto (P2P) sobre la capa física IEEE 802.15.4 a 2.4 GHz. Esta elección elimina por completo la latencia de red pública y los puntos únicos de falla asociados a la caída de torres celulares o servidores durante contingencias meteorológicas. El canal inalámbrico local mediante transceptores XBee® S1 en modo transparente (AT) garantiza un enlace serial determinista a 9600 bps con una tasa de error de paquetes (PER) sumamente baja (1.4 % a 65 m en LOS y 3.8 % a 28 m en NLOS), demostrando una inmunidad al ruido superior para entornos microclimáticos delimitados (predios agrícolas, escuelas rurales o reservas forestales) en concordancia con lo reportado por García et al. (2022) para enlaces en bandas ISM.

B. Ventajas en Consumo de Potencia y Eficiencia Eléctrica:

El circuito transmisor (Tx) exterior registra una demanda eléctrica media de apenas 72 mA a 5 Vcc, correspondiente a una potencia de 0.36 W. Este consumo representa una reducción de potencia significativa en comparación con los transceptores Wi-Fi/ESP32 (>0.80 W a 1.20 W) (Parra et al., 2023) y módems GSM/GPRS (>1.50 W con picos de 2 A durante transmisión) (Ricaldi y Andrade, 2022). Si bien existen arquitecturas LoRaWAN de bajo consumo (Sendra et al., 2023, ~0.22 W), estas operan con matrices de sensores muy reducidas (4 variables) y transmisiones esporádicas. La propuesta logra mantener la digitalización ininterrumpida de diez variables con una demanda energética altamente contenida.

C. Ventajas en Autonomía Fotovoltaica y Resiliencia Off-Grid:

El bajo consumo de 0.36 W facilita la integración de un subsistema de alimentación solar Off-Grid sumamente compacto y de bajo costo, constituido por un panel monocristalino de solo 5 Vcc / 2 W, un cargador TP4056/DW01A y una única celda Li-Ion 18650 de 3000 mAh (11.1 Wh nominales). El análisis de factibilidad energética demostró que, aun incorporando las pérdidas por conversión del regulador Boost MT3608 y la eficiencia de la batería, el sistema dispone de 6.73 Wh/días útiles. La batería recargable provee un margen de autonomía continua sin radiación solar directa de 23 a 30 horas, garantizando resiliencia frente a periodos de nubosidad prolongada sin requerir bancos de baterías pesados de plomo-ácido ni paneles fotovoltaicos voluminosos de 10 W- 20 W como los que exigen las estaciones comerciales.

D. Ventajas en la Densidad de Variables Monitorizadas e Integración de Hardware:

Mientras que la mayoría de los prototipos académicos de los últimos cinco años reportan la medición de entre 2 y 5 parámetros ambientales (Babiuch et al., 2022; Ricaldi y Andrade, 2022; Parra et al., 2023; Sendra et al., 2023), el prototipo propuesto consolida la caracterización simultánea de diez magnitudes atmosféricas esenciales mediante siete transductores: temperatura, humedad relativa, calidad del aire (índice COV/NOx), presión barométrica, altitud estimada, iluminación (ALS), índice UV, velocidad del viento, dirección del viento y lluvia acumulada. Esta alta densidad de variables en un solo nodo de 0.36 W —lograda mediante multiplexación I2C, conversión ADC e interrupciones de hardware con filtrado antirrebote— amplía el rango de aplicación del prototipo hacia estudios agroclimáticos integrales, alertas comunitarias por acumulación de lluvia o monitoreo de radiación solar para salud pública.

E. Ventajas en Infraestructura Requerida, Costo Operativo y Transferencia Tecnológica:

A nivel de infraestructura local, la propuesta elimina la necesidad de contar con contratos de telefonía celular, planes de datos M2M, gateways LoRaWAN costosos, equipos de cómputo dedicados en sitio o infraestructura de internet. La inclusión de la unidad receptora interior (Rx) con despliegue físico instantáneo mediante pantalla LCD TFT a color de 2.4 pulgadas permite la visualización cíclica de los datos directamente por el usuario final desde el momento en que se energiza el equipo. Esto reduce a cero el costo recurrente de operación y mantenimiento de la red de telemetría, y al complementarse con la disponibilidad abierta de su firmware, esquemáticos y listado de material, ofrece una solución técnica portable, replicable e independiente de infraestructura de terceros.

En síntesis, si bien este prototipo experimental no sustituye a una estación meteorológica profesional homologada para redes sinópticas oficiales (Secretaría de Economía, 2013), la combinación de sus ventajas verificables lo consolida como un instrumento altamente competitivo, resiliente y asequible para diagnósticos microclimáticos comunitarios, proyectos agrícolas o actividades de docencia en ingeniería.

5. Conclusiones y trabajo futuro

Se diseñó e implementó exitosamente un prototipo de hardware experimental para el monitoreo atmosférico inalámbrico local empleando la plataforma Arduino® y el estándar IEEE 802.15.4. El sistema logró la integración armónica de siete sensores ambientales para la medición simultánea de diez variables atmosféricas, un canal de comunicación RF confiable a 9600 bps con alcance probado de 65 m en línea de vista (PER = 1.4 %) y visualización en tiempo real mediante pantalla LCD TFT.

El bajo consumo energético del hardware transmisor (0.36 W) demostró la factibilidad teórica de su alimentación fotovoltaica aislada (5 Vcc / 2 W), garantizando autonomía mediante almacenamiento en batería Li-Ion de 3000 mAh. Asimismo, la liberación abierta de los códigos fuente, diagramas electrónicos y lista de material en repositorio público asegura la transferencia tecnológica y reproducibilidad del sistema.

Como perspectivas de escalabilidad para elevar la madurez del hardware, se contempla: 1) incorporar un módulo de reloj en tiempo real (RTC DS3231) y memoria MicroSD para datalogging local, 2) migrar el transceptor a módulos XBee® PRO o LoRa (SX1276) para incrementar el alcance de RF a varios kilómetros y 3) diseñar una tarjeta de circuito impreso (PCB) dedicada que optimice el espacio y reduzca aún más el consumo parásito.

Este proyecto sienta una base experimental en el diseño de estaciones meteorológicas autónomas, eficientes y de bajo costo. Se aclara que no constituye una estación meteorológica profesional.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río y a la Universidad de Cundinamarca por el apoyo recibido para la realización del presente proyecto de desarrollo tecnológico mismo que fortalece el vínculo académico entre ambas Instituciones públicas de educación superior.

7. Referencias

Al-Okby, M. F. R., Roddelkopf, T., Fleischer, H., & Thurow, K. (2022). Evaluating a novel gas sensor for ambient monitoring in automated life science laboratories. *Sensors*, 22(21), Article 8161. https://doi.org/10.3390/s22218161

Babiuch, M., Foltynek, P., & Smutny, P. (2022). Using the ESP32 microcontroller for data processing and IoT environmental monitoring. IEEE Access, 10, 45120–45132. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3169842

Cruz, L., & Choque, J. (2018). *Desarrollo de una estación meteorológica automática* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cuyo]. BDigital UNCUYO. https://bdigital.uncu.edu.ar/12862

DIGI International. (2021). *XBee®/XBee-PRO® S1 802.15.4 RF Modules User Guide*. Digi International Inc. https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90000982.pdf

García, L., Parra, L., Jiménez, J. M., Lloret, J., & Lorenz, P. (2022). Practical design of a low-cost wireless sensor network for precision agriculture in 2.4 GHz ISM band. *Sensors*, 22(11), Article 4007. https://doi.org/10.3390/s22114007

International Organization for Standardization. (1975). *Standard atmosphere* (Norma ISO No. 2533:1975). ISO.

International Organization for Standardization. (2002). *Lighting of work places* - Part 1: Indoor (Norma ISO No. 8995-1:2002). ISO.

Kusriyanto, M., & Putra, B. D. (2023). Design and implementation of solar-powered LoRa wireless weather station for remote agricultural areas. Journal of Robotics and Control (JRC), 4(3), 315–323. https://doi.org/10.18196/jrc.v4i3.18142

Leelavinodhan, P., Vecchio, M., Antonelli, F., Maestrini, A., & Brunelli, D. (2021). Design and implementation of an energy-efficient weather station for wind data collection. *Sensors*, 21(11), Article 3831. https://doi.org/10.3390/s21113831

LITEON® Optoelectronics. (2016). LTR390 Optical sensor [Hoja de datos]. https://optoelectronics.liteon.com/upload/download/DS86-2015-0004/LTR-390UV_Final_%20DS_V1%201.pdf

Mabrouki, J., Azrour, M., Fattah, G., Dhiba, D., & El Hajjaji, S. (2022). Intelligent monitoring system for biogas and meteorological parameters based on IoT. Environmental Science and Pollution Research, 29, 2568–2579. https://doi.org/10.1007/s11356-021-15843-w

Organización de Aviación Civil Internacional. (1993). *Manual de la atmósfera estándar de la OACI* (Doc 7488/3, 3.ª ed.). OACI.

Organización Mundial de la Salud. (2002). Índice UV solar mundial: Guía práctica. World Health Organization. https://iris.who.int/handle/10665/42600

Park, D.-H., Oh, S.-T., & Lim, J.-H. (2019). Development of a UV index sensor-based portable measurement device with the EUVB ratio of natural light sensors. Sensors, 19(4), Article 754. https://doi.org/10.3390/s19040754

Parra, L., Rocher, J., Sendra, S., & Lloret, J. (2023). Design and deployment of a smart system for data gathering in estuaries using wireless sensor networks. Sensors, 23(12), Article 5384. https://doi.org/10.3390/s23125384

Ricaldi, J., & Andrade, L. (2022). Design of a weather station with IoT in the wetlands of the District of Ventanilla Callao. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 12(9), 35–42. https://doi.org/10.46338/ijetae0922_04

Secretaría de Economía. (2013). *Estaciones meteorológicas, climatológicas y de la red hidrológica nacional - Requisitos y especificaciones* (Norma Mexicana NMX-AA-166/1-SCFI-2013). Diario Oficial de la Federación.

Sendra, S., García, L., Lloret, J., Bosch, I., & Vega-Rodríguez, R. (2023). LoRaWAN network for fire monitoring in rural environments. Electronics, 12(3), Article 536. https://doi.org/10.3390/electronics12030536

Sensirion AG. (2022). SGP41 Indoor air quality sensor for VOC and NOx measurements [Hoja de datos]. https://sensirion.com/media/documents/5FE8673C/61E96F50/Sensirion_Gas_Sensors_Datasheet_SGP41.pdf

Shape Optics Technologies. (s.f.). JGS1 vs JGS2 vs JGS3 Optical Quartz Glass. Recuperado el 02 de noviembre de 2026, de https://sot.com.sg/optical-quartz-glass/

World Meteorological Organization. (2021). Guide to instruments and methods of observation (WMO-No. 8). WMO. https://library.wmo.int/idurl/4/41650