UNIVERSIDAD DEL AZUAY

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

# Desarrollo y Validación de un Dispositivo Sensor de Bajo Costo para la Medición de el Índice Ultravioleta

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Autor:**

**José Francisco Gálvez Balarezo**

**Director:**

**Ing. Esteban Javier Mora, Mgt.**

**CUENCA, ECUADOR**

**2025**

## DEDICATORIA

A mis padres, Priscila y Freddy, quienes no solo me formaron hasta ser la persona que soy hoy, sino que también me brindaron su apoyo durante toda esta etapa, enseñándome la importancia del esfuerzo, la perseverancia y a nunca rendirme en la lucha por mis sueños.

A mis hermanos, Camila y Nicolás, por creer siempre en mí. Su cariño y apoyo han sido un pilar importante durante toda mi vida. A mis mascotas, Leia, Oso y Sam, que en repetidas ocasiones me acompañaron en mis desveladas de estudio.

A mis amigos Gabriel Brito, Juan Manuel Marín, Santiago Jara, Mateo Estévez, Evelyn Ochoa, Berenice Guerrero y William Goercke, quienes me acompañaron durante esta etapa tanto en los buenos como en los malos momentos, brindándome grandes recuerdos que por siempre atesoraré.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad del Azuay por brindarme las herramientas que me han permitido crecer profesionalmente, así como al personal docente de la Escuela de Ingeniería Electrónica, quienes me transmitieron sus conocimientos y enseñanzas a lo largo de mi formación académica. Agradezco también a la organización IERSE por darme la oportunidad y los recursos necesarios para llevar a cabo este estudio.

Mi agradecimiento al ingeniero Esteban Mora por su guía y apoyo durante el desarrollo de este estudio. Al ingeniero Jaime Burbano, miembro del jurado, por sus valiosos comentarios, los cuales contribuyeron a mejorar el contenido de mi investigación. Asimismo, agradezco a los ingenieros Carlos Zeas y Bryan Fajardo por su apoyo y orientación durante el desarrollo práctico de este trabajo.

# Desarrollo y Validación de un Dispositivo Sensor de Bajo Costo para la Medición del Índice Ultravioleta

El uso de sensores para la medición del índice ultravioleta (UVI) ha cobrado gran relevancia durante los últimos años debido al aumento de la radiación ultravioleta (UV). La adquisición de estos dispositivos puede resultar complicada debido a su alto costo, lo que dificulta su implementación a gran escala. En este contexto, el presente estudio se enfoca en el desarrollo y validación de un dispositivo sensor de bajo costo para la medición del UVI, utilizando el fotodiodo *TOCON E2*. Para ello, se llevaron a cabo distintas pruebas que evaluaron los factores que afectan la precisión de las mediciones, tales como la longitud del cable, el voltaje de alimentación, la variabilidad intra-sensor, la inclinación del sensor, la temperatura y el uso de materiales de protección. Tras analizar estos factores, se diseñó una estructura final adecuada para el sensor y se calibraron comparándolos con un sensor UVI certificado, empleando modelos de regresión y aprendizaje automático. Los resultados evidenciaron que el sensor *TOCON E2*, al utilizar una estructura y calibración apropiadas, representa una alternativa viable y económica para el monitoreo del UVI a gran escala.

**Palabras clave:** Índice ultravioleta, TOCON E2, Calibraciones, Sensores de bajo costo, Validación experimental.

# Development and Validation of a Low-Cost Sensor Device for Ultraviolet Index Measurement

The use of sensors for measuring the ultraviolet index (UVI) has gained significant relevance in recent years due to the increase in ultraviolet (UV) radiation. Acquiring these devices can be challenging due to their high cost, which hinders large-scale implementation. In this context, the present study focuses on the development and validation of a low-cost sensor device for UVI measurement, using the *TOCON E2* photodiode. To achieve this, various tests were conducted to evaluate the factors affecting measurement accuracy, such as cable length, supply voltage, intra-sensor variability, sensor inclination, temperature, and the use of protective materials. After analyzing these factors, a suitable final structure for the sensor was designed, and calibrations were performed by comparing it with a certified UVI sensor, using regression and machine learning models. The results showed that the *TOCON E2* sensor, when using an appropriate structure and calibration, represents a viable and cost-effective alternative for large-scale UVI monitoring.

**Keywords:** Ultraviolet index, TOCON E2, Calibrations, Low-cost sensors, Experimental validation.

# Índice de Contenidos

**Dedicatoria** i

**Agradecimientos** ii

**Resumen** iii

**Abstract** iv

**Índice de Contenidos** v

**Índice de Figuras** vi

**Índice de Tablas** vii

**Índice de Anexos** viii

**I Introducción** 1

**II Metodología** 2
- II-A Primera Etapa: Selección del sensor de bajo costo . . . 3
- II-B Segunda Etapa: Desarrollo y validación del sistema de adquisición . . . 4
- II-C Tercera Etapa: Diseño experimental del sensor TOCON E2 . . . 6
  - II-C1 Pruebas de longitud de cables . . . 6
  - II-C2 Pruebas de alimentación . . . 6
  - II-C3 Pruebas intra-sensor . . . 6
  - II-C4 Pruebas de inclinación . . . 6
  - II-C5 Pruebas de temperatura . . . 7
  - II-C6 Experimentos de materiales de protección . . . 7
- II-D Cuarta Etapa: Validación y calibración del dispositivo sensor . . . 8
  - II-D1 Modelo Random Forest (RF) . . . 9
  - II-D2 Modelo Extra Trees (ET) . . . 9
  - II-D3 Red Neuronal (RN) . . . 9
  - II-D4 Modelo Regresión Lineal (RL) . . . 9
  - II-D5 Modelo Regresión Lineal Múltiple (RLM) . . . 9

**III Análisis de Resultados** 10
- III-A Análisis experimental del sensor TOCON E2 . . . 10
- III-B Validación de datos y calibraciones . . . 14

**IV Conclusiones y trabajos futuros** 17

**Referencias** 17

**Anexos** 19

# Índice de Figuras


1 Escala del UVI propuesto por la OMS . . . 2
2 Metodología de pruebas implementadas. . . . 3
3 Diagrama del sistema de monitoreo. . . . 4
4 Software implementado para la adquisición de datos. . . . 5
5 Estructura de sensores para pruebas intra-sensor. . . . 6
6 (a) Inclinación de 1°. (b) Inclinación de 5°. . . . 7
7 Estructuras de sensores implementadas para pruebas de temperatura. . . . 7
8 Anillo con PTFE implementado para el desarrollo de pruebas. . . . 8
9 Simulación de lentes convexo (a) y biconvexo (b). . . . 8
10 Estructuras del sensor UVI para diferentes lentes. . . . 8
11 Pruebas de validación con respecto al sensor certificado. . . . 9
12 Influencia del voltaje de alimentación sobre la medición reportada por el sensor *TOCON E2*. . . . 10
13 Relación entre TOCON1 y la Diferencia. . . . 10
14 Relación lineal entre TOCON1 y TOCON2 aplicando la ecuación para reducir la variabilidad intra-sensor. . . . 11
15 Diferencia entre TOCON1 y TOCON2 aplicando la ecuación para reducir la variabilidad intra-sensor. . . . 11
16 Grados de inclinación con respecto a la Diferencia. . . . 11
17 Resultados de la prueba post-hoc para experimentos de inclinación. . . . 12
18 Relación entre Temperatura y Diferencia. . . . 12
19 Diferencia entre TOCON1 y TOCON2-PTFE. . . . 12
20 Diferencia entre TOCON1-Lente G y TOCON2. . . . 13
21 Diferencia entre TOCON1-Lente P y TOCON2. . . . 13
22 Partes de la estructura final. . . . 13
23 Estructura final para el dispositivo sensor completa. . . . 14
24 Comparación de sensores UVI con promedios por minuto. . . . 14
25 Comparación de sensores UVI con datos crudos por minuto. . . . 14
26 Calibraciones para TOCON1 y TOCON2 con única entrada UVI. . . . 15
27 Calibraciones para TOCON1 y TOCON2 con entradas UVI + TEMP. . . . 15
28 Librería de SW desarrollada para la obtención del UVI. . . . 16

# Índice de Tablas


I Sensores UV y UVI de bajo costo . . . . . 3
II Características de lentes biconvexos . . . . . 8
III Resultados Shapiro-Wilk para pruebas de inclinación . . . . . 12
IV Métricas obtenidas para calibraciones con UVI y UVI + TEMP de ambos sensores . . . . . 15

# Índice de Anexos

I Comparación de mediciones de voltaje realizadas con diferentes instrumentos de medición. . . . . 19

# Desarrollo y Validación de un Dispositivo Sensor de Bajo Costo para la Medición del Índice Ultravioleta

José Francisco Gálvez Balarezo
*Escuela de Ingeniería Electrónica*
*Universidad del Azuay*
Cuenca, Ecuador
jose.galvez@es.uazuay.edu.ec

***Resumen*—El uso de sensores para la medición del índice ultravioleta (UVI) ha cobrado gran relevancia durante los últimos años debido al aumento de la radiación ultravioleta (UV). La adquisición de estos dispositivos puede resultar complicada debido a su alto costo, lo que dificulta su implementación a gran escala. En este contexto, el presente estudio se enfoca en el desarrollo y validación de un dispositivo sensor de bajo costo para la medición del UVI, utilizando el fotodiodo *TOCON E2*. Para ello, se llevaron a cabo distintas pruebas que evaluaron los factores que afectan la precisión de las mediciones, tales como la longitud del cable, el voltaje de alimentación, la variabilidad intra-sensor, la inclinación del sensor, la temperatura y el uso de materiales de protección. Tras analizar estos factores, se diseñó una estructura final adecuada para el sensor y se calibraron comparándolos con un sensor UVI certificado, empleando modelos de regresión y aprendizaje automático. Los resultados evidenciaron que el sensor *TOCON E2*, al utilizar una estructura y calibración apropiadas, representa una alternativa viable y económica para el monitoreo del UVI a gran escala.**

***Palabras clave*—Índice ultravioleta, TOCON E2, Calibraciones, Sensores de bajo costo, Validación experimental.**

## I. Introducción

El incremento de la radiación ultravioleta (UV) sobre la superficie terrestre, debido a la constante degradación de la capa de ozono por los clorofluorocarburos, ha cobrado especial relevancia en los últimos años, generando preocupación en distintas entidades como la OMS (Organización Mundial de la Salud) y la población en general [1], [2]. Si bien una exposición breve (entre 10 y 15 minutos) es esencial para sintetizar vitamina D, una prolongada sobreexposición a la misma puede generar efectos negativos sobre la salud humana [3], [4]. Entre los efectos mencionados se incluyen los defectos genéticos o mutaciones que provocan envejecimiento prematuro de la piel, quemaduras solares, problemas oculares y, de manera más alarmante, el incremento en la incidencia de cáncer de piel [2], [5]–[8]. Ante esta situación, se expone una realidad urgente y actual, que resalta la importancia de mantener a la población informada sobre los riesgos de una exposición prolongada. Por ello, el índice de radiación ultravioleta (UVI, por sus siglas en inglés) se presenta como una herramienta clave para concientizar sobre estos riesgos y promover medidas de protección que prevengan futuros problemas de salud [9].

En Ecuador, la Agencia Espacial Civil Ecuatoriana (EXA) ha informado que los niveles de radiación UV en la costa y en ciudades andinas, como Cuenca, pueden alcanzar hasta 18 y 22 UVI respectivamente, superando el nivel máximo tolerable de 11 UVI que establecen la OMS y la OMM (Organización Meteorológica Mundial) [10]. Esto resalta la necesidad de contar con un dispositivo sensor capaz de medir el UVI con precisión y con un monitoreo continuo. Aunque los espectrómetros son más precisos, su alto costo limita su uso; además, los sensores de radiación convencionales presentan problemas de exactitud al no responder únicamente a las longitudes de onda UV necesarias. Los sensores certificados sensibles a la radiación UV resultan ser una mejor alternativa por su captura en tiempo real, permitiendo obtener una aproximación del UVI. Sin embargo, estos sensores presentan un alto costo de adquisición, con algunos modelos que alcanzan varios miles de dólares, lo que limita su uso en redes de monitoreo densas distribuidas espacialmente sobre el área de interés. Por ello, es necesario implementar una solución que incremente la cantidad de sensores in situ, mejorando la disponibilidad de los datos para un monitoreo y una gestión más confiables.

El espectro de radiación electromagnética emitido por el sol, se clasifica según la longitud de onda en radiación UV, visible e infrarroja, siendo la UV la más energética y subdividiéndose en UVC, UVB y UVA. La radiación UVC, la más peligrosa, es casi totalmente filtrada por la atmósfera. La UVB, que representa el 5% de la radiación UV que llega a la Tierra, causa quemaduras solares y está relacionada con el cáncer de piel, aunque es esencial para la síntesis de vitamina D. Finalmente, la radiación UVA, que constituye el 95% de la radiación UV, contribuye al envejecimiento prematuro de la piel y al desarrollo de cáncer [11], [12]. La cantidad de radiación UV en la superficie terrestre está determinada por ciertos factores como la elevación solar, el tiempo y estaciones, la altitud, la capacidad de reflexión de ciertas superficies, la nubosidad y el grosor de la capa de ozono [1], [2], [9].

La OMS introdujo el UVI como una herramienta para identificar y entender, de manera sencilla, la cantidad de radiación UV que llega a la superficie terrestre y qué tan potencialmente peligrosa puede ser, mediante una escala lineal [9]. Esta unidad puede obtenerse a través de mediciones directas utilizando sensores o mediante el desarrollo de cálculos complejos. En la Fig. 1, se ilustra la escala del UVI propuesta por la OMS.

Dada la importancia del monitoreo del UVI para precautelar la salud humana, múltiples estudios se han enfocado en la

| CATEGORÍA DE EXPOSICIÓN | INTERVALO DE VALORES DEL IUV |
|---|---|
| BAJA | < 2 |
| MODERADA | 3 A 5 |
| ALTA | 6 A 7 |
| MUY ALTA | 8 A 10 |
| EXTREMADAMENTE ALTA | 11+ |

Fig. 1. Escala del UVI propuesto por la OMS [9].

construcción y validación de sensores UV y UVI de bajo costo.

En la Universidad de California, se llevó a cabo un estudio para monitorear el UVI mediante el sensor *ML8511*, que mostró alta sensibilidad y selectividad a las longitudes de onda UVA y UVB, gracias a su estructura SOI (*Silicon-on-Insulator*) [13]. En otro estudio, se evidenció que la temperatura también influye en el rendimiento de los sensores UV, por lo tanto, su estabilidad ante las variaciones de temperatura es un factor importante a considerar [14].

En la Universidad Sur Colombiana, se desarrolló un sistema de monitoreo con sensores de bajo costo *TOCON ABC6 SiC* y *TOCON E2* para el UV y UVI, respectivamente. La validación del sistema se realizó mediante la comparación con respecto a un piranómetro, dando resultados muy cercanos entre ambos dispositivos y evidenciando la precisión de los sensores de bajo costo frente a sensores de mayor calidad. Sin embargo, el uso de un piranómetro representa una limitación en el estudio, ya que al no ser un sensor propio para la medición del UVI, requiere múltiples cálculos y aproximaciones para su obtención. Además, la estimación del UVI a partir de un piranómtero suele depender del uso de otros sensores [15]. En [16] se diseñaron diferentes dispositivos de bajo costo con sensores *ML8511*, *UVM30A* y *VEML6075*, realizando pruebas tanto entre diferentes modelos como entre sensores de un mismo modelo. Los resultados destacaron que sensores de igual modelo pueden requerir distintas calibraciones debido a la variabilidad intra-sensor. Además, se evidenció que la nivelación y respuesta angular depende del ángulo azimutal en algunos modelos, lo cual afecta en gran medida la precisión de los datos.

En un estudio adicional, se desarrolló un dispositivo sensor portátil para la medición del UVI utilizando el fotodiodo *TOCON E2*. Se diseñó una ecuación de corrección para abordar los errores de medición derivados de las diferencias entre el rango de medición del sensor y el estándar de cálculo de UVI. Esta corrección se logró comparando los datos del sensor con los de un espectrómetro, permitiendo una calibración precisa del sensor UVI [17]. Otro sensor de bajo costo, desarrollado por [18], usó fotodiodos MOS con filtros de resina epoxi, resultando en una alta sensibilidad y mediciones precisas de UV. De manera similar, la Universidad de Gadjah Mada en Indonesia, elaboró un sensor portátil y de bajo costo para la medición del UVI con el sensor *GUVA-S12SD*. El dispositivo fue validado mediante la comparación de sus mediciones de UV con datos del UVI reportados por la empresa AccuWeather, lo que derivó en una ecuación empírica para la conversión del UV en valores del UVI [19].

Se evidencia en distintos estudios que el desarrollo de dispositivos sensores de bajo costo para la medición del UVI ha cobrado gran relevancia en los últimos años, y se ha demostrado que factores como la temperatura, el tipo de sensor y calibraciones son esenciales para lograr un dispositivo de medición UVI preciso y confiable. Además, dada la naturaleza de fabricación de los sensores de bajo costo para la medición del UVI, estos pueden presentar diferencias en las mediciones que entregan, incluso cuando se encuentran sometidos a las mismas condiciones ambientales, a pesar de ser del mismo modelo y fabricante. En el contexto de este estudio, dichas diferencias se definen como variabilidad intra-sensor. Por ello, es fundamental validar estos dispositivos comparándolos con modelos certificados para garantizar su eficacia.

En respuesta a esta necesidad, el Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE) ha desarrollado un programa de estaciones de bajo costo para el monitoreo ambiental. Este estudio se enmarca en dicho programa y se centra en el desarrollo y validación de un dispositivo sensor de bajo costo para medir el UVI. Además, se realizan distintas pruebas de validación para determinar qué factores influyen en la medición del UVI, como la longitud de los cables, el voltaje de alimentación, la variabilidad intra-sensor, la influencia del ángulo de posicionamiento del sensor, la temperatura y el impacto de materiales para proteger al sensor de su exposición directa a las diferentes condiciones ambientales. En base a los resultados obtenidos de estas pruebas, se aplican distintas calibraciones con el objetivo de identificador cuál de ellas se aproxima más a los valores del UVI de un sensor certificado. Asimismo, se desarrolla una librería de software (SW) para su integración en estaciones meteorológicas de la Universidad del Azuay.

A continuación, el estudio presentado se conforma de la siguiente manera: la Sección II describe la metodología utilizada, detallando los procesos llevados a cabo para el desarrollo e implementación del dispositivo sensor, así como los análisis relevantes para el mismo. Posteriormente, en la Sección III, se presentan los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas, explicando cómo estos definieron el modelo final. Además, se discuten los métodos de calibración empleados, entre ellos: Random Forest, Extra Trees, Red Neuronal, Regresión Lineal Simple y Multivariable. Adicionalmente, se describe la estructura de una librería de SW diseñada específicamente para la obtención del valor UVI en estaciones de monitoreo. Por último, la Sección IV presenta las conclusiones alcanzadas en este trabajo, junto con algunas consideraciones a futuro relacionadas con el estudio.

## II. Metodología

En esta sección se describe el desarrollo del dispositivo sensor implementado. La Fig. 2 muestra un esquema que resume brevemente las pruebas consideradas para su desarrollo. Los experimentos se dividieron en cuatro etapas: la primera consistió en una revisión bibliográfica para identificar los

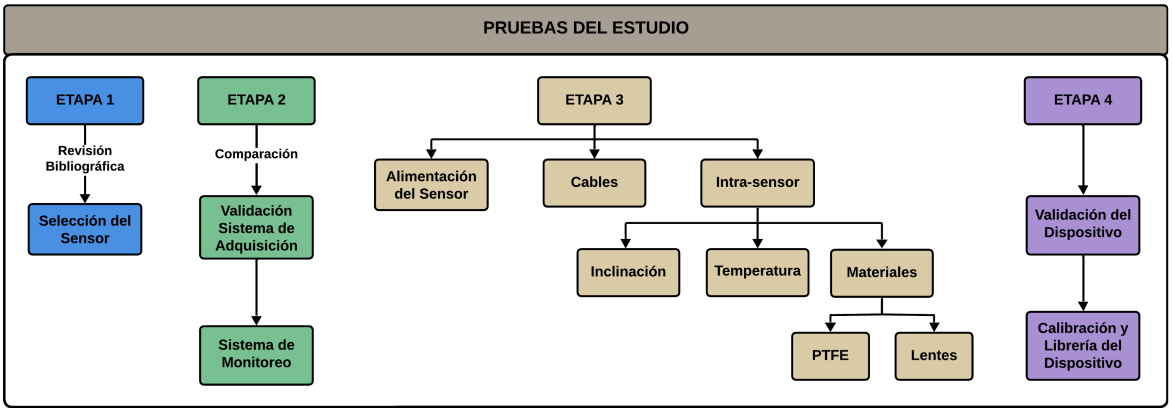


Fig. 2. Metodología de pruebas implementadas.

sensores de UVI disponibles en el mercado y seleccionar aquel que mejor se alineara con los requerimientos del estudio. En la segunda, se realizaron pruebas para validar la confiabilidad del sistema de adquisición de datos y evitar mediciones erróneas. En la tercera etapa, se llevaron a cabo diversas pruebas para evaluar el funcionamiento del sensor ante distintos factores, como la influencia de la alimentación, variabilidad intra-sensor, inclinación, temperatura e impacto de diferentes materiales, como el PTFE (politetrafluoroetileno) y los lentes de sílice fundido, para proteger al sensor. Finalmente, en la cuarta etapa, se llevó a cabo un proceso de validación del dispositivo sensor diseñado, basado en las consideraciones obtenidas a raíz de los experimentos realizados. Además, se realizaron múltiples calibraciones con el objetivo de identificar cuál de ellas proporciona una mejor precisión de los datos respecto al sensor certificado. Posteriormente, se desarrolló una librería de SW que permite una obtención fácil de los valores de UVI en estaciones de monitoreo de bajo costo de la Universidad del Azuay.

### *A. Primera Etapa: Selección del sensor de bajo costo*

Inicialmente, se llevó a cabo una revisión bibliográfica para conocer el mercado actual de los sensores de radiación UV y UVI. Es importante señalar que se analizaron tanto sensores UVI como UV. A pesar de que los sensores UVI son más adecuados para la medición del índice ultravioleta, ya que están diseñados específicamente para este propósito, los sensores UV, que abarcan un rango más amplio del espectro, también permiten calcular el UVI mediante ecuaciones específicas.

En la Tabla I se presenta un resumen de las siete opciones de sensores identificadas, junto con sus características más relevantes para el estudio. Varios de estos sensores fueron considerados debido a su uso en artículos de investigación o a su popularidad en el mercado. Como criterio de selección, se descartaron aquellos sensores que no contaban con algún tipo de material para la difusión de la radiación solar ni con corrección cosenoidal, la cual compensa la variación de la intensidad radiativa en función del ángulo de incidencia de la radiación sobre una superficie. Además, la ausencia de estos elementos puede afectar la precisión de las mediciones, provocando una sobreestimación o subestimación de los valores obtenidos.

Si bien es posible calcular el UVI a partir de las mediciones de un sensor UV, los cálculos asociados pueden ser complejos, ya que requieren de otras variables meteorológicas capturadas por diferentes sensores, lo que afecta la independencia del dispositivo sensor a construirse. Por esta razón, se priorizaron sensores diseñados específicamente para la medición del UVI.

TABLA I
SENSORES UV Y UVI DE BAJO COSTO

| Sensor | Medición | Rango de Irradiancia | Difusor | Alimentación | Precio |
|---|---|---|---|---|---|
| TOCON ABC6 | UV | 180n - 1.8 mW/cm² | PTFE | 2.5 - 5 V | $163 |
| GUVB-T21GH | UVB, UVI | 0 - 5.38 mW/cm² | Cristal | 1.8 - 5.5 V | $20 |
| TOCON E2 | UVI | 0 - 30 UVI | PTFE | 2.5 - 5 V | $196 |
| VEML6075 | UVA, UVB | 0.93 - 2.1 µW/cm² | Ninguno | 1.7 - 3.6 V | $7.5 |
| GUVA-S12D | UVA, UVI | 0 - 2000 µW/cm² | Ninguno | 5 V | $6.5 |
| ML8511 | UV | Inexistente | Ninguno | 5 V | $7.95 |
| UVM30A | UV | 0 - 1000 µW/cm² | Ninguno | 3 - 5 V | $17.40 |

Asimismo, algunos de los sensores de menor precio, según su literatura, reportaban resultados poco fiables, ya que al ser de bajo costo, proporcionan mediciones muy cambiantes, como es el caso del sensor *VEML6075*.

Tras la aplicación de estos criterios, la selección final se redujo a dos opciones: el sensor *GUVB-T21GH* y el *TOCON E2*. A pesar de la diferencia de precios entre ambos, se optó por el sensor *TOCON E2*, debido a que su material de difusión (PTFE) permite una mejor corrección cosenoidal en comparación con el otro sensor, cuyo material (cristal) es menos adecuado, ya que es menos eficiente para difundir la radiación UV de manera uniforme y puede degradarse debido a una exposición prolongada a la radiación, lo que afectaría su durabilidad a largo plazo. Además, los valores de salida que proporciona el *TOCON E2*, permiten la obtención del UVI de manera más sencilla, a través de la división por un factor de conversión específico a cada sensor proporcionado por el fabricante. Esto indica que dichos sensores llevan a cabo un proceso de validación previo a su distribución en el mercado.

### *B. Segunda Etapa: Desarrollo y validación del sistema de adquisición*

Una vez seleccionado el sensor a utilizar, es fundamental realizar pruebas de adquisición de datos que permitan verificar que los valores registrados por el sensor mantengan coherencia con las condiciones ambientales del entorno de medición y que no se vean afectados por factores externos. Además, dado que estos sensores proporcionan una señal de salida analógica, es necesario contar con un conversor ADC de alta precisión.

Para el control del sistema de adquisición, se utilizó el microcontrolador *NodeMCU-ESP32* debido a su fácil integración, amplio uso, variedad de periféricos integrados, numerosas librerías disponibles y bajo costo. Cabe mencionar que esta unidad de control se utilizó únicamente para construir un sistema de adquisición destinado a la validación del sensor, antes de desarrollar el dispositivo sensor.

Inicialmente, se consideró utilizar el ADC con 12 bits de resolución que viene integrado en el microcontrolador; sin embargo, los datos adquiridos presentaban una gran variabilidad con valores pequeños de voltaje, lo que puso en duda la fiabilidad de este conversor. Además, múltiples reportes de diseños electrónicos basados en este microcontrolador, han reportado que su ADC es poco preciso y útil en estudios donde la precisión en la adquisición de datos es crucial. Además, la señal analógica del sensor puede verse reducida significativamente por la resistencia de los cables o por el ruido producido por diferentes artefactos ambientales. Por ello, se optó por el módulo *ADS1115*, debido a su resolución de 16 bits que permite una mayor sensibilidad del sistema y facilita una transmisión digital. Además, la integración de un ADC externo junto al sensor *TOCON E2* lo vuelve más portable y fácil de integrar en las estaciones de monitoreo a través de la comunicación digital I2C. Esto es de suma importancia, ya que según su hoja de especificaciones, el sensor *TOCON E2* presenta una conversión lineal aproximada de 170mV por unidad de UVI. Sin embargo, este valor de conversión puede variar para cada sensor, por lo que el fabricante proporciona un coeficiente de conversión individual para cada unidad. Debido a que estas señales analógicas se encuentran en el orden de los milivoltios, son susceptibles al ruido generado por cables largos, lo que dificulta garantizar la integridad de dicha señal.

En consecuencia, se llevó a cabo un experimento con distintos instrumentos de medición con el fin de validar el funcionamiento de estos conversores ADC, tanto del microcontrolador como del módulo *ADS1115*. Se utilizó como referencia el multímetro (*Proskit MT-1232*), con el cual se compararon los valores obtenidos con respecto a un osciloscopio, el ADC del microcontrolador y el conversor *ADS1115*. El experimento consistió en medir la misma fuente de voltaje DC simultáneamente con todos los dispositivos, comenzando en 200mV y aumentando progresivamente en intervalos de 200mV hasta alcanzar 3.3V.

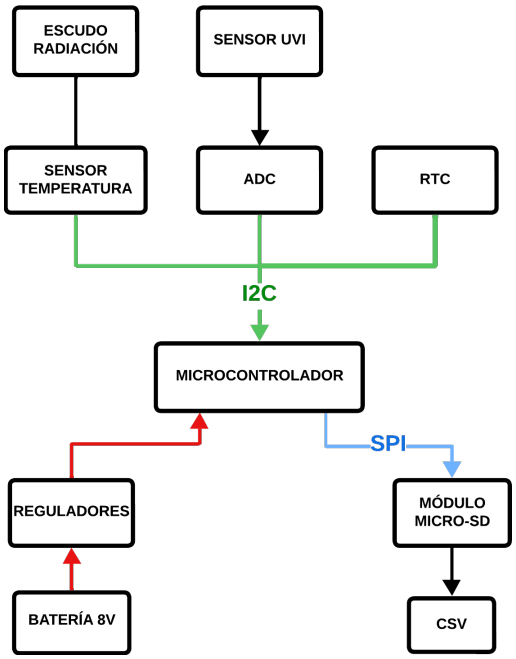


Fig. 3. Diagrama del sistema de monitoreo.

Los resultados obtenidos, presentados en el Anexo I, muestran que el ADC del microcontrolador presenta una alta imprecisión en comparación con el resto de instrumentos, por lo que este fue descartado completamente para el desarrollo del estudio. Para confirmar este hecho, se realizaron mediciones adicionales utilizando otros modelos de ESP32, obteniendo resultados igualmente inexactos. Por otro lado, el módulo *ADS1115* mostró una ligera diferencia en las lecturas con respecto al multímetro y el osciloscopio. Si bien esto podría indicar que el *ADS1115* es menos preciso que estos instrumentos, las discrepancias fueron mínimas y no afectan significativamente el rendimiento del sensor. En consecuencia, se optó por utilizar este conversor ADC junto al sensor con protocolo de comunicación I2C para la adquisición de los valores del *TOCON E2*, no solo por su precisión, sino también como una opción viable para mitigar la sensibilidad al ruido

electrónico a lo largo del cable, considerando una distancia aceptable para I2C de aproximadamente 2 m.

Tras garantizar que tanto el sensor como el método de obtención de datos fueran adecuados para el desarrollo de este estudio, fue necesario contar con un sistema de adquisición de datos capaz de almacenar, adquirir y monitorizar los datos obtenidos. Por lo tanto, se elaboró una pequeña estación conformada por varios sensores y módulos, que no solo permitió registrar los valores del *TOCON E2*, sino también obtener datos adicionales, como temperatura y tiempo, fundamentales para análisis posteriores.

Como se ilustra en la Fig. 3, el sistema está conformado por un microcontrolador *NodeMCU-ESP32*, encargado del control general. Haciendo uso de la comunicación I2C integrada, se incluyó un sensor de temperatura (*BME280*) montado con un escudo de radiación para evitar el sobrecalentamiento a causa de la radiación solar; un módulo RTC (*DS3231*) para registrar el momento en el que se capturan los datos, y el ADC (*ADS1115*) para adquirir las mediciones del sensor UVI. En cuanto a la comunicación SPI, se integró únicamente un módulo de MicroSD para el almacenamiento de datos. Cabe mencionar que el formato utilizado para almacenar los datos provenientes de los sensores y módulo fue CSV (*Comma-Separated Values*). Por último, todo el sistema se alimentaba mediante una batería de 8V, complementada con dos reguladores de voltaje (*LM2596S*) para proporcionar una alimentación estable de 3.3V o 5V, según los requerimientos de cada componente del sistema.

Para la implementación de este sistema, se desarrolló un software encargado de obtener los valores de tiempo, temperatura y UVI, además de la recopilación y almacenamiento de los mismos en una tarjeta de memoria microSD. En la Fig. 4 se muestra un diagrama UML que describe brevemente el funcionamiento de este software.

Inicialmente, es necesario definir ciertos parámetros, como el canal a utilizar, la ganancia y la dirección I2C del ADC. Para el *TOCON E2*, únicamente se debe ingresar el valor de conversión del sensor. Este parámetro es fundamental, ya que un valor de conversión incorrecto no solo afectaría la precisión de los datos, sino también el rango de medición del sensor.

Posteriormente, se solicita el tiempo a través del módulo RTC, ya que el código verifica mediante una condición `if`, si el tiempo actual coincide con el tiempo de muestreo definido. Por ejemplo, si se requiere adquirir datos cada 10 segundos, se compara continuamente si han transcurrido esos 10 segundos para proceder con una nueva adquisición de datos. En caso contrario, el código no ejecuta ningún otro proceso hasta que se cumpla ese intervalo.

Una vez dentro de la condición, se solicita primero los datos de temperatura por medio del sensor *BME280*. Luego, el microcontrolador solicita la adquisición de valores por parte del *ADS1115*, el cual obtiene una señal analógica del canal seleccionado y devuelve una lectura digitalizada al microcontrolador. Este valor digital de voltaje es transformado a unidades de UVI mediante un cálculo basado en el valor de conversión correspondiente al *TOCON E2*.

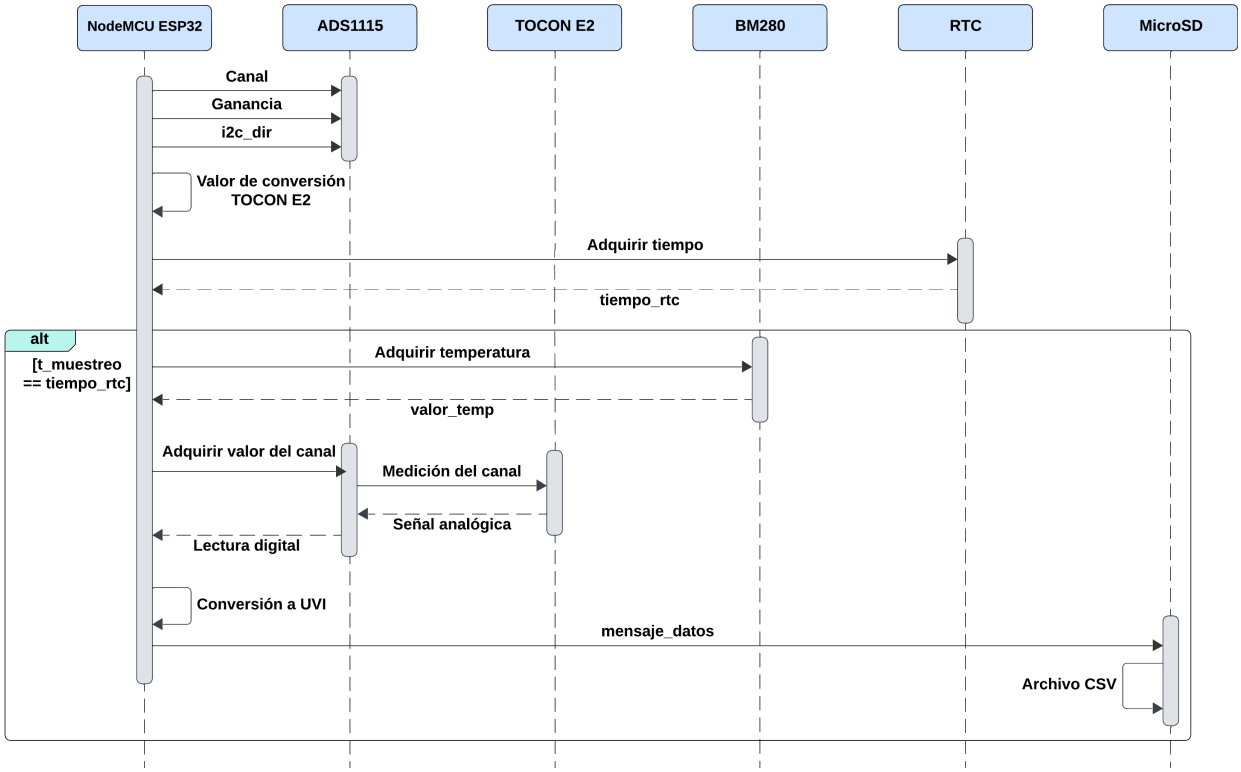


Fig. 4. Software implementado para la adquisición de datos.

Por último, todos estos datos se estructuran en un mensaje con formato CSV, que es enviado al módulo MicroSD, el cual se encarga de almacenarlos en un archivo dentro de una tarjeta de memoria microSD. Cabe mencionar que el tiempo de muestreo depende del usuario. En este estudio, se realizaron mediciones cada 10 segundos en la mayoría de las pruebas, ya que para las pruebas de validación, en las que se compararon con un sensor certificado, se implementaron dos configuraciones: una con muestreo cada segundo y agregación temporal de un minuto, y otra con un muestreo directo cada minuto.

### C. Tercera Etapa: Diseño experimental del sensor TOCON E2

Durante el desarrollo de las diferentes pruebas, se diseñaron e imprimieron diferentes estructuras para el sensor UVI según los requisitos específicos de cada prueba. Por lo tanto, las estructuras variaban dependiendo de las pruebas, ya que al finalizar cada una, se implementaban mejoras en el diseño de las estructuras de los sensores UVI.

Es importante mencionar que todas las pruebas realizadas en este estudio se llevaron a cabo en la parte superior de uno de los edificios de la Universidad del Azuay, ubicada en las coordenadas de longitud y latitud: -2.918732530484774°, -78.99964157403089°. Esto debido a que era necesario contar con una zona elevada y libre de sombras durante la toma de datos. Además, se colocaron los sensores sobre una superficie plana y sin inclinaciones para garantizar una correcta adquisición de datos. Por último, se ubicaron a una distancia de 10cm entre ellos.

#### 1) Pruebas de longitud de cables

Un factor a analizar era si la longitud de los cables podría ocasionar una pérdida en la comunicación I2C, ya que conocer el límite de transmisión es un aspecto importante para ubicar los sensores a cierta distancia de la estación de monitoreo.

Para esta prueba se empleó un *ADS1115* integrado en la placa electrónica construida para cada *TOCON E2*, por lo que la señal enviada a la estación era I2C. Además, un sensor se conectó con un cable de 2 metros de longitud y el otro con un cable de 20 cm. Cabe mencionar que el único factor modificado en esta prueba fue la longitud de los cables, manteniendo constante el resto de parámetros para la obtención del UVI.

#### 2) Pruebas de alimentación

El sensor *TOCON E2*, según su hoja de especificaciones, puede ser alimentado con un rango de voltaje que varía entre 2.5V hasta 5V para su funcionamiento. Por ello, esta prueba tenía como objetivo determinar si los datos adquiridos se veían afectados al ser alimentados con 3.3V o 5V. Además, si la alimentación de 3.3V presentaba problemas, esto habría significado la necesidad de agregar un *level-shifter* o un módulo traductor de I2C para reducir el nivel de voltaje de la señal I2C de 5V a 3.3V. Esto se debe a que los GPIOs del microcontrolador soportan hasta 3.3V, por lo que superar este valor puede causar daños irreversibles en el dispositivo. Durante el experimento, se tomó especial cuidado para garantizar que ambos sensores estuvieran a la misma altura, en un terreno plano y que no existiera ningún tipo de inclinación que pudiera alterar las mediciones.

#### 3) Pruebas intra-sensor

Uno de los factores más cruciales a evaluar en sensores comerciales es la variabilidad que existe entre sensores de un mismo modelo y fabricante. Por lo tanto, para el desarrollo de esta prueba, se utilizaron dos sensores UVI y se compararon bajo las mismas condiciones, considerando variables como altura, longitud de cables, tiempo de muestreo, inclinación y lugar de obtención de datos.

Para estos experimentos, era necesario recopilar datos bajo diferentes intensidades de radiación solar con el objetivo de identificar posibles diferencias en la medición del UVI cuando este aumentaba o disminuía, así como su comportamiento durante periodos prolongados de tiempo con valores altos y bajos.

Es común que exista cierta variación intra-sensor, pero esta debe ser mínima, ya que una variación significativa pondría en duda la calidad del sensor. Por ello, a pesar de las diferencias pequeñas, es posible aplicar ecuaciones simples de corrección para garantizar que los valores no se vean afectados por esta diferencia intra-sensor y así continuar con otras pruebas de validación. En la Fig. 5, se pueden observar las estructuras implementadas para el desarrollo de estas pruebas, evidenciando que ambos sensores se encuentran en condiciones iguales.

Fig. 5. Estructura de sensores para pruebas intra-sensor.

#### 4) Pruebas de inclinación

Los sensores UV o UVI deben permanecer completamente rectos y sin inclinaciones para asegurar una adecuada adquisición de valores, ya que al tratarse de fotodiodos, el ángulo de incidencia de los rayos solares puede excitar el diodo de diferentes maneras y generar variaciones en los valores entregados. Esta es una de las razones por las cuales es necesario contar con un difusor en el sensor.

Por lo tanto, el objetivo de esta prueba fue evidenciar si ángulos pequeños de inclinación, como los que se pueden dar en casos reales debido a irregularidades en el terreno o inclinaciones del plano de instalación, afectan negativamente las mediciones. Por ende, se realizaron experimentos en los

que se varió la inclinación entre 1° y 5°, con incrementos de 1°. Durante cada prueba, un sensor se mantuvo en una superficie completamente plana, mientras que el otro se instaló en una superficie regulable.

El experimento comenzó con una inclinación de 1° y se registraban datos durante un intervalo de entre 15 y 20 minutos. Luego, el sistema se desconectó para ajustar al siguiente ángulo y se conectaba nuevamente, repitiendo este proceso hasta llegar a completar los 5°. Las pruebas se llevaron a cabo entre las 11:00 a.m. y 1 p.m., ya que en este periodo la incidencia solar está en su punto más perpendicular con respecto a la superficie terrestre, con el propósito de minimizar las variaciones debidas a la posición del sol.

Para la variación de ángulos de inclinación, se diseñó y construyó un balancín ajustable. Asimismo, para comprobar que las inclinaciones en el balancín eran los ángulos deseados, se utilizó un inclinómetro para la medición de los mismos. En la Fig. 6 se ilustra el desarrollo de las pruebas con el balancín construido junto al sensor ubicado en el plano horizontal, en el cual se observan dos grados de inclinación.

(a) (b)

Fig. 6. (a) Inclinación de 1°. (b) Inclinación de 5°.

### 5) *Pruebas de temperatura*

Estudios realizados previamente sobre la medición de radiación UV, han reportado que la temperatura puede influir sobre el funcionamiento del sensor UVI durante la toma de datos, ya que niveles elevados de temperatura podrían afectar la veracidad de los datos. Esto se debe a que la sensibilidad del fotodiodo puede variar por la temperatura, y un aumento térmico puede provocar errores en la señal generada por la radiación UV. Por ello, con el objetivo de analizar el impacto de esta variable en el sensor *TOCON E2*, se llevaron a cabo pruebas utilizando dos sensores de este modelo. Ambas estructuras se equiparon con un ventilador de 5V, pero solo uno de ellos permaneció en funcionamiento, mientras que el otro ventilador se mantuvo apagado. Esto permitió la ventilación de un sensor, favoreciendo su enfriamiento para posteriormente analizar si existen variaciones en las mediciones.

Para esta prueba, también se requerían condiciones homogéneas, principalmente en las estructuras de los sensores. Por lo tanto, las estructuras se diseñaron con el mismo espacio interno y una salida de aire. El ventilador de 5V fue alimentado por un pequeño panel solar, el cual ajustaba su potencia en función de la intensidad de la radiación solar que existía en ese instante. El experimento realizado se observa en la Fig. 7. Además, se utilizó el sensor de temperatura (*BME280*) para registrar los valores de la temperatura ambiente.

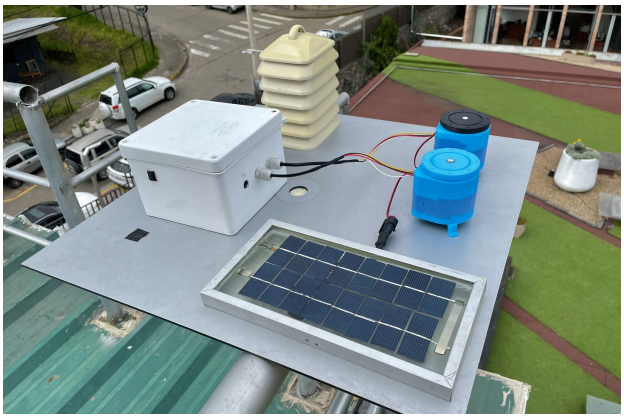

Fig. 7. Estructuras de sensores implementadas para pruebas de temperatura.

### 6) *Experimentos de materiales de protección*

La incorporación de materiales que cubran el sensor de UVI tiene como objetivo principal brindar una protección adicional frente a condiciones ambientales adversas, ya que la filtración de agua en el sensor podría causar daños irreversibles en el mismo. Por ende, se realizó una investigación para determinar qué materiales podían utilizarse como protección, puesto que resulta crítico asegurar que este material no filtrara los rayos ultravioleta. Entre los materiales más adecuados para este estudio, se encontraron el PTFE y el sílice fundido para lentes y domos, debido a sus propiedades. Ambos materiales permiten el paso del espectro dentro de un rango aproximado de 250 nm - 400 nm, cubriendo todo el rango UV (desde el UVA al UVC). El sílice fundido presenta mejores propiedades en términos de resistencia térmica (hasta 1600 °C), durabilidad y una muy baja absorción del UV. Sin embargo, el PTFE también es una opción viable, ya que, aunque no está a la par del sílice fundido, ofrece buenas propiedades y ventajas, como una temperatura máxima de hasta los 260°C, resistencia a impactos, baja absorción del UV (aunque superior al sílice fundido) y sobre todo, es mucho más fácil de adquirir, tanto en términos de disponibilidad como de precio. Por lo tanto, aunque ambos materiales presentan sus ventajas y desventajas, ambos son opciones viables para el desarrollo de este estudio.

#### a) *Lámina de PTFE*

Para incorporar la lámina de PTFE a la estructura del sensor, se imprimió un anillo que permitía fijar el material en la tapa del sensor. La lámina de PTFE se colocó en este anillo, asegurando que quedara completamente estirada, sin arrugas ni dobleces. Este anillo se ubicó a una distancia muy corta del sensor, evitando cualquier contacto directo con él. En la Fig. 8, se observa la integración del PTFE en el anillo y las pruebas realizadas posteriormente, donde se lo comparó con un sensor sin ningún tipo de material adicional.

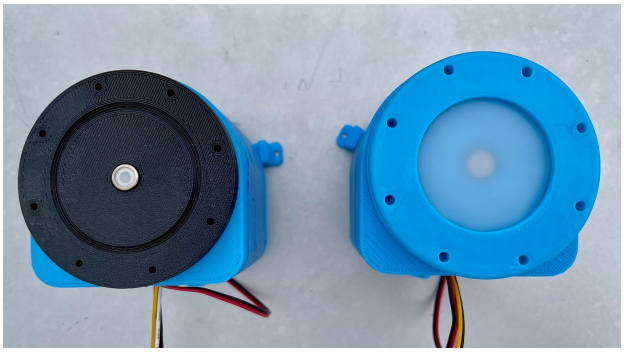

Fig. 8. Anillo con PTFE implementado para el desarrollo de pruebas.

*b) Lentes y domo de sílice fundido*

En una evaluación inicial se propuso la utilización de un domo, dada su aplicación habitual en sensores UVI. No obstante, un análisis sistemático de la disponibilidad en el mercado evidenció las restricciones de su uso, debido a la limitada oferta y a los elevados costos, alcanzando precios superiores a los $500 por unidad. Por esta razón, se optó por utilizar lentes en su lugar. Se evaluaron dos modelos de lentes, el convexo y el biconvexo. Para analizar la diferencia entre ambos, se realizó una simulación en el programa web 3DOptiX [20]. Como se ilustra en la Fig. 9, la simulación consistió en colocar un foco de luz que incidía directamente a los dos lentes. Los resultados mostraron que ambos modelos cumplían con la función de concentrar la luz en un punto; sin embargo, el lente convexo presentaba una distancia focal mucho mayor en comparación con el biconvexo, cuya distancia era de aproximadamente un tercio de la primera. Para este estudio, es fundamental que la distancia focal entre el lente y el sensor de UVI sea pequeña, ya que una distancia focal elevada podría generar problemas en el diseño de la estructura. Por ello, se seleccionó el lente biconvexo como la opción más adecuada.

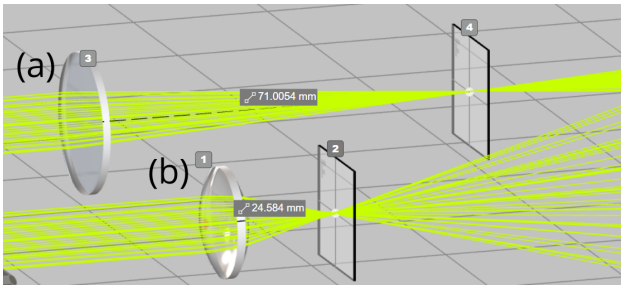


Fig. 9. Simulación de lentes convexo (a) y biconvexo (b).

Posteriormente, fue necesario determinar la geometría que debían tener los lentes según la distancia focal. Los cálculos se desarrollaron mediante la fórmula presentada en (1), donde $f$ representa la distancia focal, $n$ el índice de refracción del material del lente, $R_1$ y $R_2$ los radios de curvatura para cada superficie (considerando que $R_1 > 0$ y $R_2 < 0$, debido a la convención de signos en óptica geométrica), y $d$ el grosor del lente entre ambas superficies. Se obtuvieron tres geometrías para una distancia focal de 20 mm con un diámetro de 20 mm, variando el grosor de los lentes entre las superficies planas de los radios de curvatura (0 mm, 0.5 mm y 1 mm), ya que este parámetro influía en los costos de fabricación.

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)d}{nR_1R_2}\right] \tag{1}$$

Una vez definidos los tres modelos de lentes biconvexos, se contactó con distintos fabricantes. Sin embargo, debido al precio de fabricación y a la baja cantidad de unidades que se requiera para el estudio, se descartó la fabricación personalizada de los lentes. En su lugar, se optó por elegir modelos comerciales con características similares a los calculados. Como resultado, se eligieron dos modelos de lentes biconvexos, los cuales se presentan en la Tabla II.

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DE LENTES BICONVEXOS

| Tamaño | Diámetro | Distancia Focal | Grosor | Precio |
|---|---|---|---|---|
| Pequeño | 16 mm | 16 mm | 6.7 mm | $39.17 |
| Grande | 25.4 mm | 25.4 mm | 10.28 mm | $49.17 |

Con los lentes biconvexos ya definidos, se diseñaron e imprimieron nuevas estructuras para cada modelo de lente biconvexo, como se observa en la Fig. 10. Posteriormente, se realizaron pruebas comparativas, primero con el lente grande y el sensor sin ningún material y luego con el lente pequeño. El objetivo fue evaluar si la presencia del lente afectaba las mediciones, ya sea que amplifique o atenué la señal, y analizar su factibilidad como medida de protección para el sensor UVI.

Fig. 10. Estructuras del sensor UVI para diferentes lentes.

## D. Cuarta Etapa: Validación y calibración del dispositivo sensor

Una vez realizadas las diferentes pruebas para determinar qué variables influyen en la medición del sensor *TOCON E2*, se procedió a realizar una prueba de validación con una

estructura diseñada e impresa considerando todas estas variables. Además, en estas estructuras se priorizó que todos los componentes permanecieran fijos para evitar interferencias en la comunicación debido a movimientos en la placa o los cables. Con la estructura finalizada, se colocaron ambos sensores UVI junto a una estación de referencia equipada con un sensor de UVI (*UV-Cosine_UVI*) certificado, durante dos semanas, con el propósito de recopilar una gran cantidad de datos para su posterior análisis. Los dispositivos sensores se mantuvieron la mayor parte del tiempo en la parte superior del edificio; sin embargo, la operación de los dispositivos sensores se restringió al intervalo aproximado de 9:00 a.m. a 5:30 p.m., ya que, en ausencia de radiación solar, los dispositivos registraban valores nulos, lo que implicaba un consumo energético innecesario. Con los datos ya adquiridos, se realizó una comparación con el sensor de UVI certificado como referencia, con el fin de aplicar calibraciones de corrección y ajustar las mediciones a valores más precisos y fiables. En la Fig. 11, se observan ambos sensores ubicados junto al sensor certificado.

Fig. 11. Pruebas de validación con respecto al sensor certificado.

Para las calibraciones, se consideraron cinco modelos, con el objetivo de comparar cuál de estos presentan calibraciones más adecuadas y precisas respecto al sensor certificado. Los datos se dividieron en un 80% para entrenamiento de los modelos y un 20% para la validación, permitiendo simular el comportamiento del modelo frente a datos reales. Los modelos utilizados se describen a continuación:

*1) Modelo Random Forest (RF)*

Este modelo se basa en un conjunto de árboles de decisión entrenados con subconjuntos aleatorios tanto de los datos como de las características. Su resultado final se obtiene promediando los valores calibrados de todos los árboles (en regresión) o aplicando el voto mayoritario (en clasificación). La representación general para regresión es:

$$\hat{y} = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} h_t(x) \tag{2}$$

donde $T$ es el número total de árboles y $h_t(x)$ representa el valor calibrado del árbol $t$ para la entrada $x$.

*2) Modelo Extra Trees (ET)*

Este modelo es una variante de RF que introduce un mayor grado de aleatoriedad, ya que selecciona aleatoriamente los puntos de corte y las características en cada división del árbol. Esto permite una mayor velocidad del entrenamiento, aunque a veces con menor precisión en comparación a RF. Su expresión general es:

$$\hat{y} = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} h_t^{\text{extra}}(x) \tag{3}$$

donde $h_t^{\text{extra}}(x)$ representa el valor calibrado estimado por el árbol $t$ con divisiones completamente aleatorias.

*3) Red Neuronal (RN)*

Se compone de capas de nodos (neuronas artificiales) que transforman los datos mediante combinaciones lineales y funciones de activación no lineales, aprendiendo patrones complejos para generar valores calibrados. Una representación simplificada de una neurona es:

$$\hat{y} = \sigma\left(\sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b\right) \tag{4}$$

donde:

- $x_i$ son las variables de entrada,
- $w_i$ son los pesos asociados a cada entrada,
- $b$ es el sesgo (bias), y
- $\sigma$ es una función de activación (por ejemplo, ReLU o sigmoide).

*4) Modelo Regresión Lineal (RL)*

Este modelo establece una relación entre una sola variable independiente $X$ y una dependiente $Y$ a través de una recta. Los coeficientes $a$ y $b$ se ajustan para minimizar el error cuadrático medio entre los valores calibrados obtenidos y los reales. Su ecuación es la siguiente:

$$Y = aX + b \tag{5}$$

*5) Modelo Regresión Lineal Múltiple (RLM)*

Este modelo es similar a la RL, con la diferencia de que este permite el uso de múltiples variables independientes para estimar el valor calibrado. De igual manera, este relaciona las variables a través de una recta. Su expresión general es:

$$Y = a_1X_1 + a_2X_2 + \cdots + a_nX_n + b \tag{6}$$

donde $a_i$ son los coeficientes que indican la influencia de cada variable independiente $X_i$, y $b$ es el sesgo.

Inicialmente, se considera el uso de una sola variable de entrada (TOCON1 o TOCON2) y una de salida (sensor certificado). No obstante, en caso de contar con múltiples variables de entrada para la calibración, se aplicará el modelo de RLM en lugar del modelo de RL simple. En total, se realizan cuatro calibraciones.

Para el caso de la RN, los datos serán normalizados con el fin de mejorar la precisión del modelo. Esta red estará compuesta por tres capas: dos capas ocultas de 64 neuronas cada una con función de activación ReLU (*Rectified Linear Unit*) y una capa de salida con una sola neurona y activación lineal. El modelo será entrenado durante 100 épocas (es decir, 100 pasadas completas por el conjunto de entrenamiento) y con un batch size de 16, lo que implica que el modelo se actualizará cada vez que procese 16 muestras.

Asimismo, se calcularán las métricas $R^2$, $MAE$ (error absoluto medio) y $MSE$ (error cuadrático medio) para comparar cuál de los modelos obtenidos presenta la mejor calibración, es decir, aquella que más se aproxima a los valores del sensor certificado.

Una vez identificada la calibración más adecuada para los sensores *TOCON E2*, se continuó con el desarrollo de la librería de SW específica para la obtención de los valores de UVI del dispositivo sensor, con el objetivo de facilitar la portabilidad del dispositivo en distintas estaciones de monitoreo de bajo costo.

## III. Análisis de Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en las distintas pruebas realizadas al dispositivo sensor, con el fin de identificar los factores que influyen en la medición del UVI. Para ello, se realizaron diversos análisis para cada uno de los experimentos, lo que permitió desarrollar una estructura final para el dispositivo sensor. Además, se exponen los diferentes modelos de calibración realizados y su comparación, con el objetivo de identificar cuál de ellos ofrece una mayor precisión en los datos.

### *A. Análisis experimental del sensor TOCON E2*

Las pruebas realizadas con los sensores *TOCON E2*, utilizando uno un cable de 2 m y otro de 20 cm, demostraron que no existieron variaciones en los datos obtenidos al transmitir una señal I2C. Para un total de 1500 muestras, se obtuvo un coeficiente de correlación igual a 1, de manera que los datos están estrechamente relacionados entre sí. Por lo tanto, las mediciones obtenidas no se ven afectadas por longitudes de cable de hasta 2 m, lo que permite ubicar a los sensores a cierta distancia de la estación de monitoreo sin inconvenientes.

Esto también posibilita la colocación de los sensores en zonas elevadas, con el fin de evitar sombras que bloqueen la radiación UV. Sin embargo, es importante considerar que las señales I2C suelen soportar distancias de hasta aproximadamente 3.5 m, por lo que superar este límite podría provocar problemas en la comunicación.

Los resultados obtenidos al alimentar un sensor con 3.3V y otro con 5V, evidenciaron que no existe diferencia significativa entre los datos adquiridos. En la Fig. 12 se observa que la diferencia entre los valores de ambos sensores es prácticamente nula; además, la correlación entre los datos es prácticamente uno, lo que indica que el voltaje de alimentación entre 3.3V y 5V no afecta las mediciones. No obstante, el nivel de voltaje limita el rango máximo de medición del *TOCON E2*, ya que al ser alimentados con 3.3V, el valor máximo de adquisición es de aproximadamente 16 UVI, mientras que con 5V puede llegar hasta 24 UVI. Al llegar a dicho valor máximo, el sensor se satura y mantiene constante el valor máximo hasta que la intensidad de la radiación UV disminuye a un nivel dentro del rango de medición. Estos límites pueden variar, debido a que dependen del valor de conversión individual proporcionado por el fabricante para cada sensor *TOCON E2*.

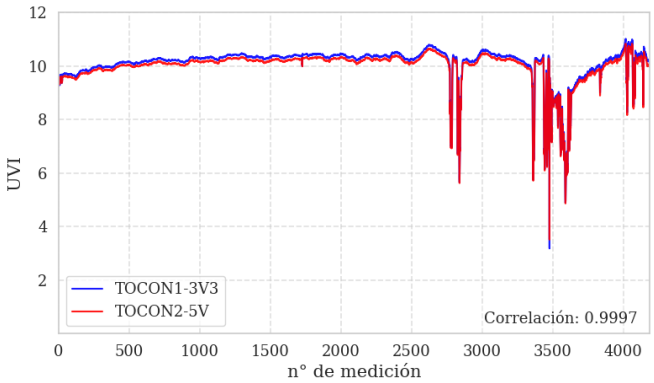


Fig. 12. Influencia del voltaje de alimentación sobre la medición reportada por el sensor *TOCON E2*.

Dado que el estudio tiene como objetivo reportar el nivel de UVI según la clasificación de la OMS, donde valores mayores a 11 entran en la categoría de exposición ”Extremadamente alta”, se consideró alimentar al sensor con 3.3V. Esto permite reducir costos y simplificar el diseño electrónico de la placa del sensor, evitando la necesidad de agregar módulos adicionales para la traducción de la señal I2C de 5V a 3.3V.

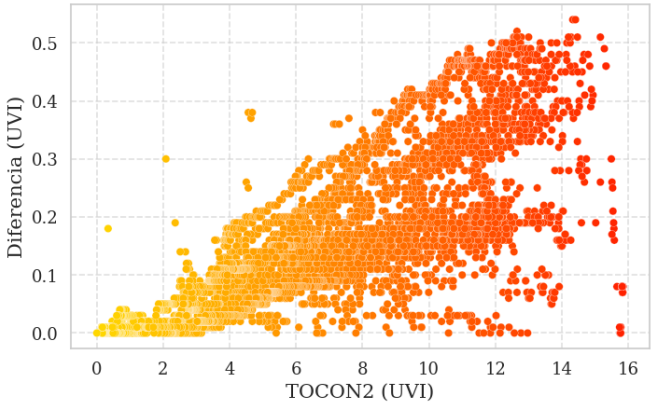


Fig. 13. Relación entre TOCON1 y la Diferencia.

Una vez comprobado que la longitud de cables y el voltaje de alimentación no influyen en la obtención de los valores de UVI, es fundamental evaluar si existe variabilidad intra-sensor. Este análisis permite asegurar que, para posteriores pruebas, las diferencias en las mediciones no se deben a inconsistencias entre los sensores de un mismo fabricante, sino a otros factores externos aplicados al sensor. Cabe mencionar que, para este estudio, se identifican como TOCON1 y TOCON2 al primer

y segundo sensor, respectivamente. En la Fig. 13 se ilustra la diferencia absoluta obtenida entre el TOCON2 en comparación con el TOCON1. Los resultados muestran que la diferencia entre los sensores tiende a aumentar a medida que el nivel de UVI incrementa. Para valores menores a 6 UVI, la diferencia de 0.3 puede considerarse aceptable; sin embargo, para valores de UVI superiores, la diferencia puede alcanzar hasta valores de 0.5 de UVI.

Si bien esta diferencia en los valores no es tan significativa, con el fin de minimizar al máximo esta variación intra-sensor y asegurar que cualquier cambio en los datos se atribuya únicamente a la influencia de otros factores, se aplicó un modelo de RL que permite alinear los valores del sensor TOCON1 con los del sensor TOCON2. La ecuación implementada para esta calibración se presenta en la ecuación (7).

$$TOCON1_{\text{calibrado}} = 0.970 \cdot TOCON1 + 0.025 \quad (7)$$

Aplicando la ecuación de calibración a los valores del sensor TOCON1, se logró reducir la diferencia máxima entre sensores a 0.3 UVI. En la Fig. 14, se ilustra una RL, donde se observa que los valores del TOCON1 y TOCON2 presentan un comportamiento lineal con un coeficiente de determinación $R^2 = 1$, lo que indica una correlación alta y, por lo tanto, una diferencia mínima entre los datos. Además, en la Fig. 15, se presenta un diagrama de caja para ambos sensores, evidenciando que tanto el tamaño de las cajas como la extensión de los bigotes son prácticamente iguales.

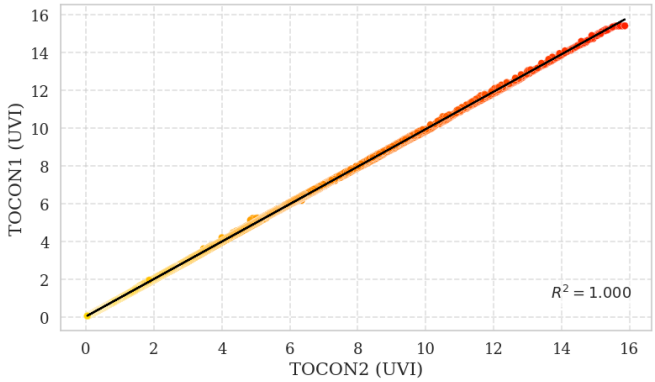


Fig. 14. Relación lineal entre TOCON1 y TOCON2 aplicando la ecuación para reducir la variabilidad intra-sensor.

Por último, para confirmar que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los sensores, se realizó una prueba *t de Student*. Se obtuvo un valor $p = 0.30111$, el cual es mayor a 0.05, lo que resalta que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las mediciones del TOCON1 y TOCON2. Por lo tanto, es posible realizar las distintas pruebas teniendo la certeza de que cualquier cambio en el comportamiento de los sensores se debe a factores externos y no a la variabilidad intra-sensor. Cabe mencionar que, al aplicar esta ecuación para reducir la variabilidad intra-sensor, el límite superior de medición del sensor TOCON1

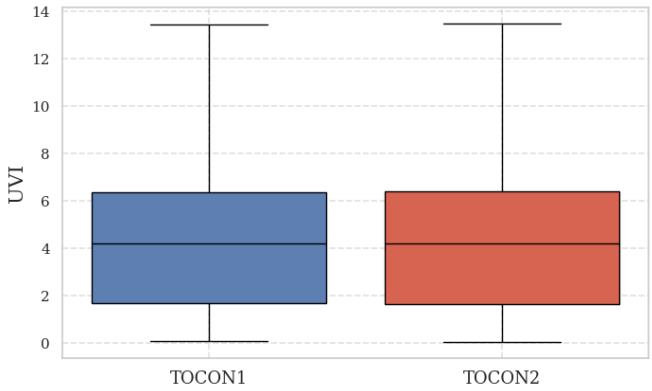


Fig. 15. Diferencia entre TOCON1 y TOCON2 aplicando la ecuación para reducir la variabilidad intra-sensor.

se redujo aproximadamente en 0.4 unidades. No obstante, esta reducción no representa un problema en el estudio, ya que únicamente se reportan los niveles de UVI dentro de la clasificación establecida por la OMS.

Luego de minimizar la variabilidad intra-sensor de los sensores *TOCON E2*, se realizaron las pruebas de inclinación. Los resultados obtenidos se presentan en el diagrama de cajas de la Fig. 16, donde se observa que las diferencias desde 1° hasta 4° muestran un rango de diferencia entre 0.01 y 0.24, con una mediana aproximadamente de 0.06 y 0.08. Mientras que para 5°, el rango de diferencias se mantiene entre 0.14 y 0.23, con una mediana de 0.17, lo que representa una mayor diferencia entre los datos. Para verificar si la inclinación de 5° afecta significativamente durante la medición del UVI, se realizaron pruebas estadísticas para evaluar la diferencia entre los ángulos medidos.

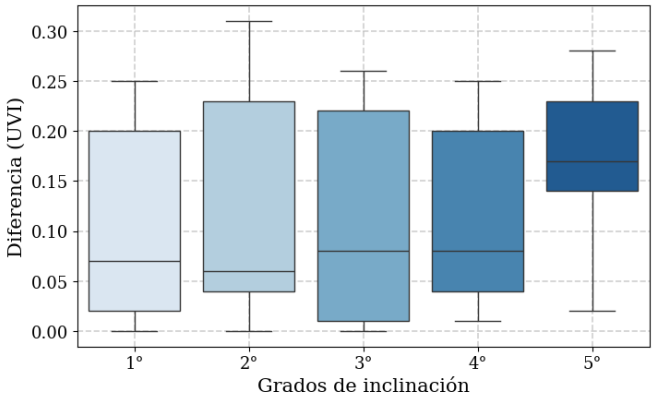


Fig. 16. Grados de inclinación con respecto a la Diferencia.

Primero, se verificó si el conjunto de datos sigue una distribución normal aplicando la prueba de *Shapiro-Wilk*. Según esta prueba, si el valor $p < 0.05$, los datos no siguen una distribución normal. En la Tabla III, se observan los resultados obtenidos para cada grado de inclinación, donde ninguno de los grupos de datos cumple con el factor de normalidad. Como segunda parte, se analizó si los datos cumplen con una

homogeneidad de varianza. Para ello, se aplicó la prueba de *Levene*, obteniendo un valor $p = 6.8221 \times 10^{-17}$, lo cual es considerablemente menor a 0.05, indicando que las varianzas no son homogéneas.

TABLA III
RESULTADOS SHAPIRO-WILK PARA PRUEBAS DE INCLINACIÓN

| Grado | *p-valor* |
|---|---|
| 1° | $1.6156 \times 10^{-14}$ |
| 2° | $2.0963 \times 10^{-15}$ |
| 3° | $8.6817 \times 10^{-16}$ |
| 4° | $4.6323 \times 10^{-12}$ |
| 5° | $2.4950 \times 10^{-07}$ |

Una vez confirmado que los datos no cumplen con una normalidad ni con una homogeneidad de varianza, se realizó la prueba de *Kruskal-Wallis*. El resultado de esta prueba fue un valor $p = 1.7401 \times 10^{-22}$, por lo que existen diferencias significativas entre al menos uno de los ángulos de inclinación. Finalmente, se realizó una prueba de *post-hoc* para identificar qué inclinaciones son significativamente diferentes entre sí. Los resultados de esta prueba se muestran en la Fig. 17, donde los valores $p > 0.05$ indican que no hay diferencia significativa entre esos grupos.

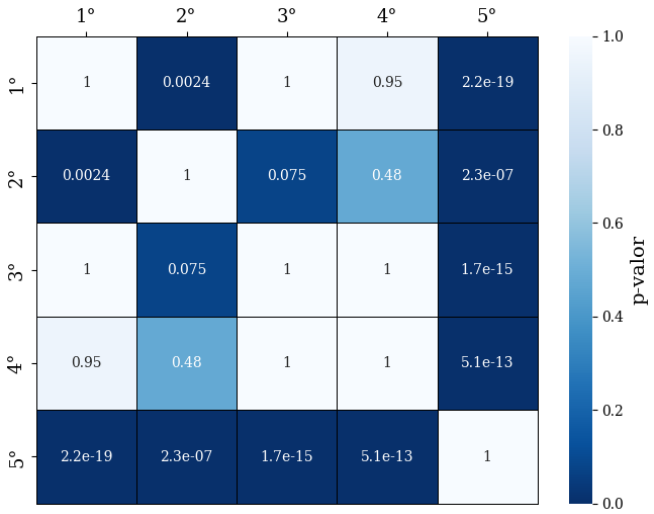


Fig. 17. Resultados de la prueba post-hoc para experimentos de inclinación.

Se observa que una inclinación de 5° representa una diferencia estadísticamente significativa con cualquier otra inclinación. Esto sugiere que una inclinación de 5° en el sensor TOCON2, con respecto al TOCON1 (que se encuentra sin inclinación), influye en las mediciones del sensor. También existe una diferencia entre las inclinaciones de 1° y 2°, pero como no hay diferencia entre las inclinaciones de 3° y 4°, se puede inferir que tampoco existe una diferencia significativa entre 1° y 2°. Adicionalmente, debido a las propiedades de ciertos materiales, como la corrección cosenoidal, pequeñas inclinaciones no representaban un problema en la precisión de datos obtenidos.

Posteriormente, se realizaron pruebas de temperatura para identificar si el aumento de la misma afecta en las mediciones de los sensores *TOCON E2*. Como se observa en la Fig. 18, el incremento de la temperatura no refleja un aumento en la diferencia de UVI entre ambos sensores, ya que incluso para temperaturas elevadas de 28°C, la diferencia es baja en comparación con valores menores, donde las diferencias de UVI son mayores. Adicionalmente, el valor de correlación obtenido es prácticamente cero, lo que sugiere que no existe una relación lineal entre la temperatura y la diferencia del UVI. Sin embargo, aunque se puede afirmar que el incremento de la temperatura no afecta el funcionamiento relativo entre los sensores, no se puede asegurar que las mediciones obtenidas sean completamente correctas, ya que esto solo se podría evidenciar al comparar los resultados con un sensor certificado.

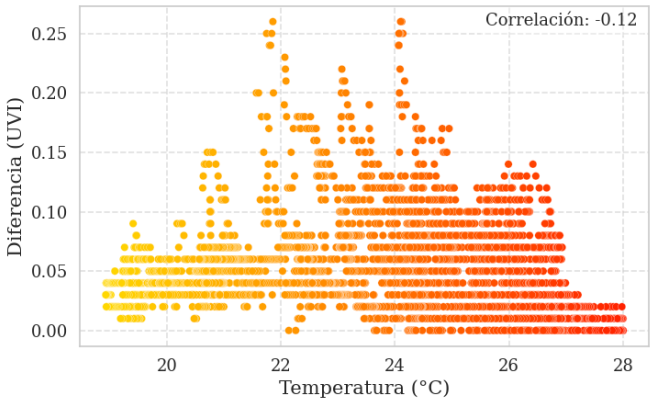


Fig. 18. Relación entre Temperatura y Diferencia.

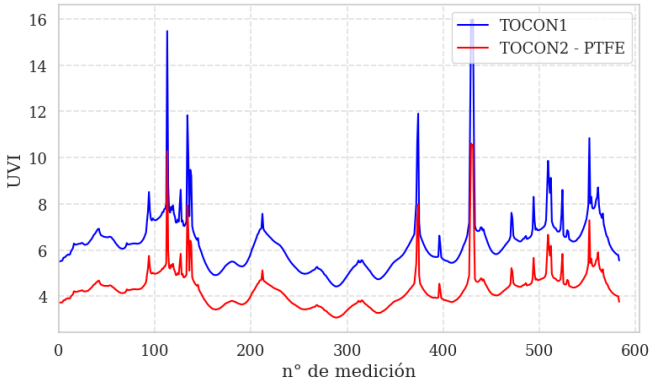


Fig. 19. Diferencia entre TOCON1 y TOCON2-PTFE.

Los resultados obtenidos al utilizar una lámina de PTFE en el sensor TOCON2 se ilustran en la Fig. 19. En ella se observa que este material actúa como un atenuador de la radiación UV. Aunque los datos entre el TOCON1 (sin material) y el TOCON2 (con PTFE) siguen un comportamiento similar, al obtener la ecuación lineal que relaciona ambos sensores, se identificó que los valores registrados por el TOCON2 son

equivalentes al 65% de los registrados por el TOCON1. Por lo tanto, el uso de este material no solo representa una pérdida significativa en la calidad de los datos, sino que también podría dificultar las calibraciones futuras del sistema.

Para el caso de los lentes de sílice fundido, tanto para su versión grande como pequeña, los resultados se muestran en la Fig. 20 y Fig. 21, respectivamente. El sensor TOCON1, al contar con el lente, presenta un comportamiento altamente variado, ya que en ciertas ocasiones los valores de UVI se incrementan hasta alcanzar un punto de saturación, mientras que en otros casos los valores son inferiores en comparación con los del sensor TOCON2 (sin material).

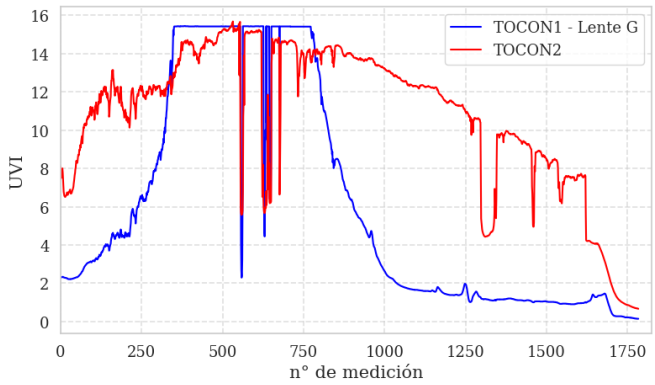


Fig. 20. Diferencia entre TOCON1-Lente G y TOCON2.

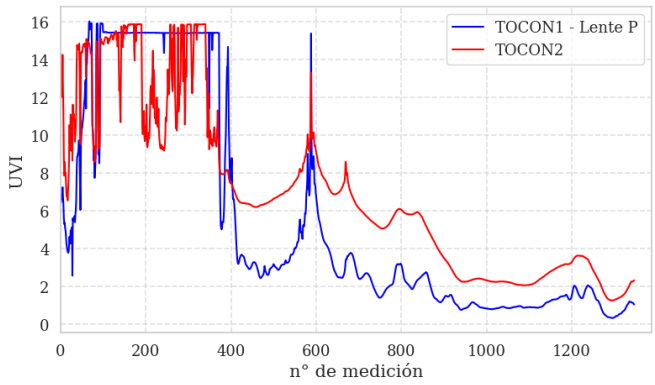


Fig. 21. Diferencia entre TOCON1-Lente P y TOCON2.

Esta variabilidad se debe a que los lentes actúan como amplificadores de la radiación UV, ya que concentran la radiación solar en un mismo punto. Sin embargo, esta amplificación ocurre principalmente cuando el sol se encuentra en su punto más alto en el cielo. En momentos en que el sol no incide perpendicularmente sobre el sensor TOCON1, los valores de UVI disminuyen drásticamente en comparación con los del TOCON2.

Por lo tanto, utilizar lentes de sílice fundido como medida de protección provocaría que las mediciones fueran imprecisas, además de requerir calibraciones extremadamente complejas para corregir estos efectos. Debido a ello, se optó por no emplear ningún tipo de material adicional como protección para los sensores, considerando que los sensores *TOCON E2* están diseñados para operar a la intemperie. No obstante, la filtración de agua hacia la placa electrónica y a los pines del sensor *TOCON E2* podría ocasionar un cortocircuito en el sistema y dañar permanentemente el sensor. Por esta razón, para el diseño final se incorporó un anillo de sellado (o-ring) colocado en el sensor, con el fin de evitar que durante lluvias se produzcan filtraciones de agua hacia la placa electrónica.

Una vez obtenidos los resultados para cada una de las pruebas realizadas, se desarrolló la estructura final del dispositivo sensor. Para ello, se tomaron en cuenta los diferentes factores analizados, como la inclinación, ya que es fundamental que el sensor se mantenga en un plano recto y sin desviaciones. Por esta razón, se diseñó una base que permita evitar inclinaciones; además, se incorporó un nivel de burbuja circular que facilite la instalación del dispositivo sensor. Dado que la temperatura no influye en el funcionamiento del sensor *TOCON E2*, no se incorporó ningún tipo de ventilador en la estructura. Finalmente, no se agregó ningún tipo de protección adicional, salvo un anillo de sellado para garantizar que el interior de la estructura sea hermético y evitar filtraciones de agua. El diseño de la estructura final se muestra en la Fig. 22.

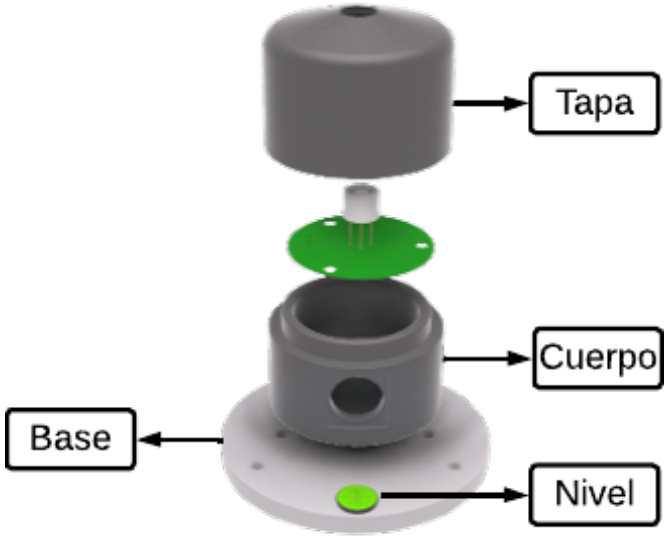


Fig. 22. Partes de la estructura final.

La estructura se compone de tres partes principales. La primera es la base, la cual cuenta con orificios que permiten atornillar el dispositivo sensor, asegurándolo de manera fija. La segunda parte es el cuerpo, donde se alojarán los cables para las conexiones de la placa electrónica, además de incluir una salida específica para el paso de los cables. Por último, la tapa es el elemento donde se colocará el sensor *TOCON E2* y la placa electrónica, ambos de forma atornillada para evitar cualquier inclinación. Además, en el orificio superior de la tapa se instalará el anillo de sellado. Adicionalmente, la parte superior de la tapa se diseñó con una ligera pendiente

para evitar la acumulación de agua. En la Fig. 23 se muestra la estructura completa y lista para su funcionamiento.

Fig. 23. Estructura final para el dispositivo sensor completa.

### B. Validación de datos y calibraciones

Inicialmente, durante el desarrollo de las pruebas de validación, se conocía que el sensor certificado entregaba valores cada minuto. No obstante, dado que este sensor viene calibrado de fábrica, no se tiene conocimiento de los procesos internos que realiza para la obtención del UVI, por lo tanto, no se sabe con certeza si toma una única muestra por minuto o si realiza un promedio de varias muestras y luego reporta un valor cada minuto. Por esta razón, se consideró analizar la variable de agregación temporal, la cual hace referencia a la resolución temporal en la toma de datos, ya que no es equivalente registrar un único dato crudo por minuto que tomar mediciones cada segundo y luego calcular un promedio. En consecuencia, se optó por registrar lecturas de UVI cada segundo con los sensores *TOCON E2*, y posteriormente se calcularon promedios por minuto para su comparación con el sensor certificado.

En la Fig. 24 se presenta una comparación de ambos sensores *TOCON E2* respecto al sensor certificado (UVI_UDA), donde se observa que los valores entre el TOCON1 y TOCON2 son prácticamente iguales. Sin embargo, el sensor certificado presenta, en varias ocasiones, una diferencia aproximadamente de una unidad de UVI. Aunque una diferencia de una unidad representa una variación significativa en las mediciones, esta puede corregirse mediante calibraciones.

Adicionalmente, con el propósito de mejorar la eficiencia en la adquisición de datos de los sensores *TOCON E2*, se realizaron pruebas adicionales para evaluar el impacto de eliminar esta agregación temporal, registrando únicamente datos crudos cada minuto. Posteriormente, se compararon dichos datos con el sensor certificado. Los resultados se presentan en la Fig. 25.

Como se puede analizar, al eliminar esta variable de agregación temporal en la toma de datos de los sensores *TOCON E2*, las diferencias respecto al sensor certificado aumentaron considerablemente. En varias ocasiones, se registraron diferencias superiores a 2 UVI. Por lo tanto, si bien eliminar la agregación temporal mejora la eficiencia del muestreo, incrementa significativamente la discrepancia con el sensor certificado. Para evitar problemas en futuras calibraciones, se optó por utilizar los datos promediados por minuto (con mayor agregación temporal) en todas las calibraciones realizadas.

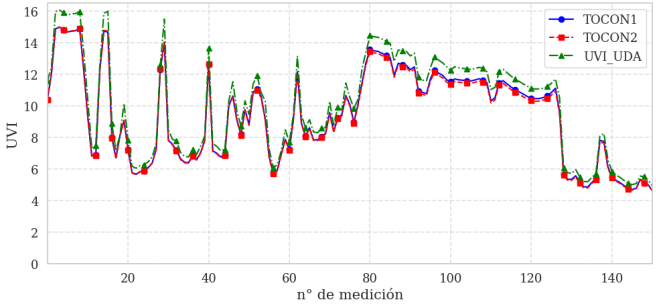


Fig. 24. Comparación de sensores UVI con promedios por minuto.

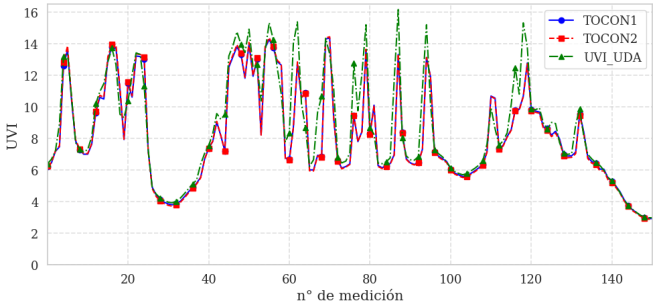


Fig. 25. Comparación de sensores UVI con datos crudos por minuto.

Una vez realizada la comparación entre los sensores *TOCON E2* y el sensor certificado, se continuó con el desarrollo de las diferentes calibraciones utilizando distintos modelos. En total, se realizaron cuatro calibraciones. Para las dos primeras se consideró una sola variable de entrada, una utilizando los valores de UVI del TOCON1 y otra con los del TOCON2. Para las calibraciones restantes, se añadió como variable de entrada la temperatura, ya que, a pesar de que se comprobó que el aumento de temperatura no afecta significativamente la variación entre ambos sensores *TOCON E2*, no se puede asegurar que no tenga influencia en el comportamiento general del sensor. Por ello, se consideró conveniente incluir esta variable en las calibraciones.

A continuación, en las Fig. 26 y Fig. 27, se presentan los resultados obtenidos para las distintas calibraciones aplicadas con cada uno de los modelos, donde el eje $x$ representa los valores reales del sensor certificado y el eje $y$, los valores calibrados por cada modelo.

Para las dos primeras calibraciones de la Fig. 26, los modelos de RN y RL muestran un mayor ajuste a un comportamiento lineal, a pesar de presentar algunos valores atípicos. En cambio, el resto de los modelos mantienen una tendencia lineal general, pero con una mayor dispersión de los datos respecto a la línea de referencia, por lo que fueron descartados.

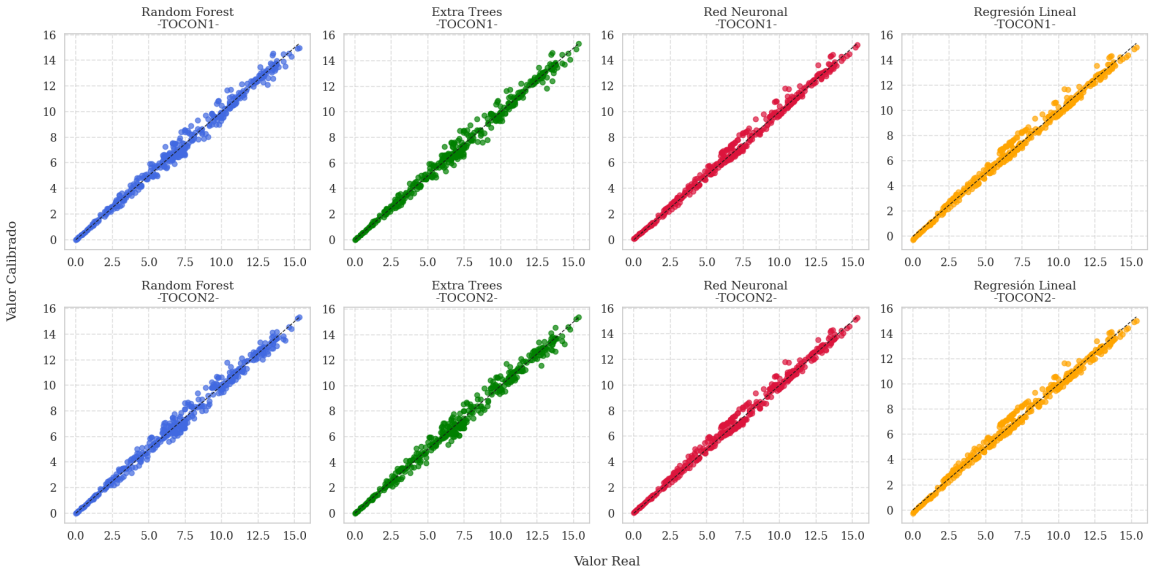


Fig. 26. Calibraciones para TOCON1 y TOCON2 con única entrada UVI.

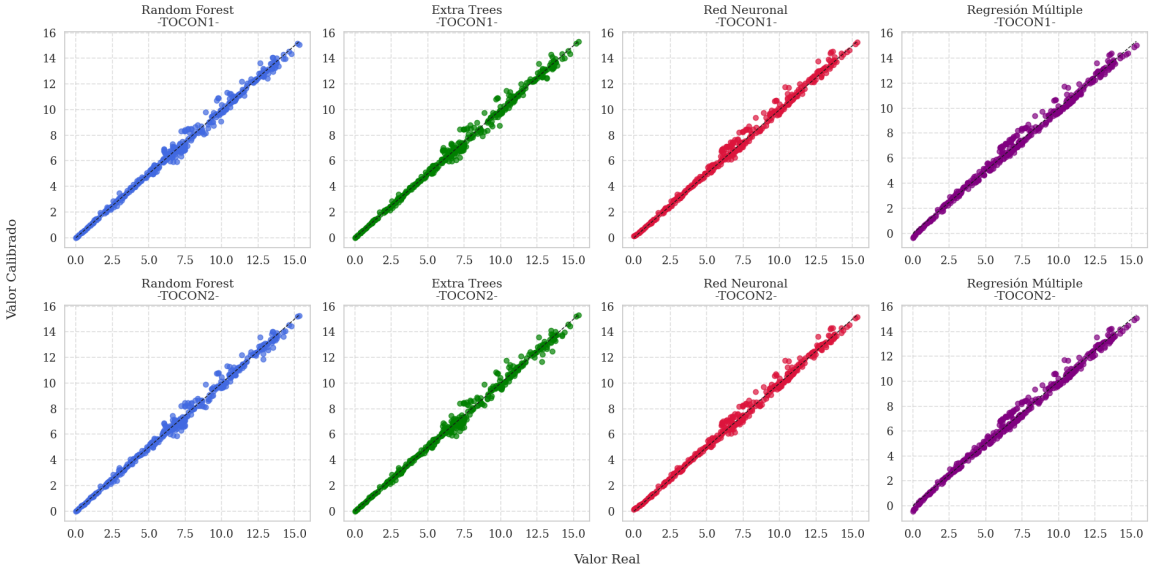


Fig. 27. Calibraciones para TOCON1 y TOCON2 con entradas UVI + TEMP.

TABLA IV
MÉTRICAS OBTENIDAS PARA CALIBRACIONES CON UVI Y UVI + TEMP DE AMBOS SENSORES

| **Sensor** | **Métricas** | **UVI** | | | | | **UVI + TEMP** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Raw | RF | ET | RN | RL | Raw | RF | ET | RN | RLM |
| TOCON1 | $R^2$ | 0.9861 | 0.9901 | 0.9893 | **0.9923** | **0.9920** | 0.9861 | **0.9938** | 0.9931 | 0.9930 | 0.9921 |
| | $MAE$ | 0.3897 | 0.2786 | 0.2846 | **0.2496** | **0.2678** | 0.3897 | **0.1985** | 0.2011 | 0.2188 | 0.2609 |
| | $MSE$ | 0.2110 | 0.1491 | 0.1621 | **0.1161** | **0.1210** | 0.2110 | **0.0942** | 0.1044 | 0.1059 | 0.1188 |
| TOCON2 | $R^2$ | 0.9859 | 0.9895 | 0.9885 | **0.9916** | **0.9915** | 0.9859 | **0.9939** | 0.9931 | 0.9935 | 0.9924 |
| | $MAE$ | 0.3891 | 0.3033 | 0.3100 | **0.2689** | **0.2853** | 0.3891 | **0.1957** | 0.2025 | 0.2183 | 0.2548 |
| | $MSE$ | 0.2143 | 0.1594 | 0.1744 | **0.1277** | **0.1278** | 0.2143 | **0.0918** | 0.1040 | 0.0975 | 0.1148 |

**Nota.** Raw = Valores Originales del TOCON E2; RF = Random Forest; ET = Extra-Trees; RN = Red Neuronal; RL = Regresión Lineal; RLM = Regresión Lineal Múltiple.

Por otra parte, en la Fig. 27, las calibraciones que consideran el valor de UVI del sensor y la temperatura ambiente como variables de entrada (UVI + TEMP) muestran un mejor ajuste lineal en todos los modelos. Sin embargo, debido a la similitud visual de los resultados, no es posible determinar cuál modelo ofrece mayor precisión únicamente con las gráficas. Por ello, se obtuvieron métricas del rendimiento de cada modelo ($R^2$, $MAE$ y $MSE$) que permiten una comparación más precisa entre los modelos evaluados.

Como se ilustra en la Tabla IV, todos los modelos indican valores de $R^2$ cercanos a 1. No obstante, los valores de $MAE$ y $MSE$ muestran diferencias más significativas entre los modelos. En particular, el modelo de RN fue el que obtuvo mejores resultados en las calibraciones con una sola entrada (solo UVI), mientras que el modelo de RF fue el más preciso para las calibraciones con dos entradas (UVI + TEMP). Comparando ambos enfoques, se concluye que la calibración utilizando UVI y temperatura con el modelo de RF resulta ser la más precisa, obteniendo para el sensor TOCON1 valores de $R^2 = 0.9938$, $MAE = 0.1985$ y $MSE = 0.0942$; mientras que para el TOCON2 se alcanzaron valores de $R^2 = 0.9939$, $MAE = 0.1957$ y $MSE = 0.0918$. Sin embargo, incluir la variable de temperatura no genera una mejoría significativa en las calibraciones, debido a la alta correlación que existe entre la temperatura y el UVI. Por lo tanto, para evitar que el dispositivo sensor tenga dependencia de otros sensores externos, los cuales pueden presentar errores propios de medición, se optó por considerar los modelos que tienen como única entrada el UVI.

A pesar de que el modelo de RN fue el que presentó mejores resultados en las calibraciones con una sola entrada, se optó por implementar el modelo de RL en la librería de SW con la que se distribuye el dispositivo sensor. Esto se debe a la complejidad que conlleva implementar un modelo no lineal en estaciones meteorológicas de bajo costo, las cuales suelen contar con capacidades computacionales limitadas. Este modelo presenta los valores de $R^2 = 0.9920$, $MAE = 0.2696$ y $MSE = 0.1012$ para el sensor TOCON1, y $R^2 = 0.9915$, $MAE = 0.2853$ y $MSE = 0.1278$ para el sensor TOCON2. La disminución despreciable en la similitud de los datos se ve ampliamente compensada por las ventajas que conlleva la implementación de un modelo simple de calibración, como el caso de la RL.

Tras haber corregido la variabilidad intra-sensor en los experimentos que evaluaron la influencia de múltiples factores sobre el diseño del dispositivo sensor, se busca evaluar la eficacia de un único modelo de calibración aplicable a todos los sensores *TOCON E2*. Esto simplificaría la escalabilidad de los dispositivos sensores propuestos, ya que eliminaría la necesidad de realizar procesos de calibración individuales con un sensor certificado. Por ello, se deriva un único modelo a partir del promedio entre los coeficientes de los modelos individuales: $a_1 = 1.0727$, $a_2 = 1.0673$, $b_1 = -0.3470$ y $b_2 = -0.3059$. Como resultado, se obtuvo la ecuación de calibración final que se presenta en la Ecuación 8.

$$Y = 1.07 \cdot X - 0.32645 \tag{8}$$

Una vez obtenida la ecuación de calibración final, se desarrolló la librería de SW para facilitar la portabilidad del dispositivo, cuya estructura se presenta en la Fig. 28. Esta librería está compuesta por dos clases. La primera es *UVI_Sensor*, que, como su nombre lo indica, se encarga de la obtención del UVI. Cuenta con tres variables privadas que definen el valor de conversión del sensor *TOCON E2* y los valores fijos de la ecuación de calibración final ($a$ y $b$). Los métodos de esta clase realizan la inicialización del sensor (`begin()`), el establecimiento del valor de conversión (`set_conv_const()`), la obtención de los valores crudos de UVI (`get_raw_UVI()`) y los valores calibrados del mismo al ingresar el promedio de datos crudos de UVI por minuto (`get_cal_UVI()`).

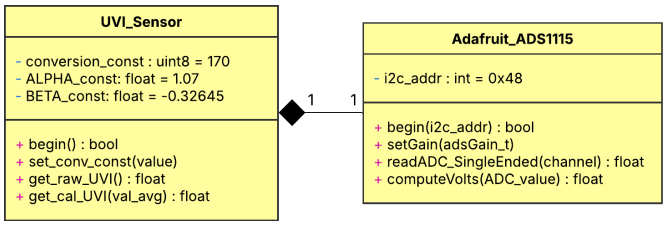


Fig. 28. Librería de SW desarrollada para la obtención del UVI.

La segunda clase, *Adafruit_ADS1115*, cuenta con una sola variable privada que define la dirección I2C del módulo. Sus métodos realizan la inicialización del módulo y la configuración de la dirección I2C (`begin(i2c_addr)`), el ajuste de la ganancia del módulo (`setGain()`), la lectura del valor cuantificado para un canal específico del ADC (`readADC_SingleEnded(channel)`) y la conversión de este valor cuantificado a milivoltios (`computeVolts()`).

**Algoritmo 1** Ejemplo Básico de Uso Librería UVI

```
#include "UVI.h";
procedure APP_MAIN
    UVI_Sensor uvi;
    while (not uvi.begin()) do
        PRINTF("UVI sensor not found")
        Delay(1000)
    while (true) do
        float sum = 0
        for i = 1 to 60 do
            sum += uvi.get_raw_UVI();
            Delay(1000)
        float uvi_avg = sum / 60
        float uvi_cal = uvi.get_cal_UVI(uvi_avg);
        PRINTF("UVI = %.2f ", uvi_cal)
        Delay(5000)
```

Finalmente, con el fin de representar de forma más clara el uso de la librería, en el Algoritmo 1 se presenta un ejemplo de

su implementación para la obtención del UVI en una estación de monitoreo de bajo costo.

Cabe mencionar que el establecimiento de variables, como la constante de conversión, la dirección I2C del ADC y la ganancia, se realiza en el método `setup()` del código. Además, al llamar al método `get_raw_UVI()`, este invoca internamente a los demás métodos de la clase *Adafruit_ADS1115* para la obtención de los valores cuantificados y su transformación a milivoltios.

## IV. Conclusiones y trabajos futuros

A lo largo de este estudio, se ha desarrollado un dispositivo sensor de bajo costo para la medición del UVI. Inicialmente, se realizó una investigación para evaluar los sensores de bajo costo disponibles en el mercado, seleccionando el sensor *TOCON E2* por sus características adecuadas al objetivo del estudio.

Posteriormente, se construyó un sistema para la adquisición de datos, con el fin de realizar distintas pruebas que permitieran determinar si factores como la longitud de los cables, la alimentación, la variabilidad intra-sensor, la inclinación, la temperatura y el uso de materiales de protección influyen en la medición del UVI. Como resultado, mediante múltiples análisis y pruebas estadísticas, se identificó que factores como la inclinación y los materiales de protección afectan significativamente la calidad de los datos. Por otro lado, la variabilidad intra-sensor presentó diferencias poco significativas. Sin embargo, se aplicó una ecuación para minimizar dicha variabilidad durante las pruebas, garantizando que cualquier cambio en los datos se debiera exclusivamente a los factores modificados y no a diferencias propias entre sensores. Los materiales de protección generaron una degradación en los datos, afectando la calidad de las mediciones y dificultando calibraciones futuras. Por esta razón, se descartó su uso, considerando además que el sensor *TOCON E2* fue diseñado para operar a la intemperie.

El diseño de la estructura del dispositivo se llevó a cabo considerando todos estos factores. El modelo final asegura que el sensor *TOCON E2* permanezca fijo y sin inclinaciones. Asimismo, se incorporó un anillo de sellado para evitar filtraciones de agua a través del orificio por donde se conecta el sensor con el interior de la estructura. Con este diseño, se realizaron dos grupos de pruebas con diferentes frecuencias de muestreo. En el primer grupo, se tomaron muestras por segundo y se realizaron promedios por minuto, mientras que en el segundo grupo, se tomaron datos crudos directamente cada minuto. Este factor de agregación temporal influyó notablemente al comparar los datos con respecto al sensor certificado, obteniéndose mejores resultados al realizar mediciones por segundo y luego calcular el promedio por minuto.

Tras ello, se realizaron las calibraciones de ambos sensores con respecto al sensor certificado. Se utilizaron cinco modelos distintos: Random Forest, Extra Trees, Red Neuronal, Regresión Lineal y Regresión Múltiple. Además, se evaluó si las calibraciones presentaban mejores resultados utilizando una sola entrada (UVI) o dos entradas (UVI y temperatura). Como resultado, se determinó que el modelo de RL utilizando una única entrada fue el más adecuado para el estudio. Aunque no presentó las mejores métricas, la mejora de los otros modelos frente a este era mínima, y el uso de este modelo ofrecía una gran ventaja en la implementación debido a su simplicidad, especialmente en estaciones de bajo costo con capacidades computacionales limitadas. Por último, se obtuvo una ecuación de calibración final, que fue utilizada para desarrollar una librería de SW que facilita la implementación y obtención del UVI en las estaciones de bajo costo de la Universidad del Azuay.

Con el desarrollo de este estudio, se han identificado algunas oportunidades de mejora para trabajos futuros. En primer lugar, la alimentación de 3.3V limita el alcance de medición de los sensores *TOCON E2*, por lo que una alimentación a 5V sería más adecuada. Si bien los valores mayores a 11 UVI no se reportan, registrar el UVI sin esta limitación permitiría identificar con mayor exactitud los niveles reales de radiación ultravioleta, obteniendo así resultados más precisos. Esto implicaría un rediseño de la placa electrónica, ya que sería necesario incluir un traductor I2C para reducir las señales de 5V a 3.3V y así garantizar una lectura adecuada.

Finalmente, aunque el sensor *TOCON E2* está diseñado para operar a la intemperie, contar con un material adicional de protección permitiría aislarlo no solo de condiciones ambientales extremas, sino también de otros factores externos que puedan ocasionar daños en el sensor a largo plazo.

## Referencias


[1] Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, "La disminución de la capa de ozono," Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, Washington, D.C., Tech. Rep. EPA 430-F-01-033, Sep. 2001, accedido el 28 de abril de 2025. [Online]. Available: https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/ozono.pdf

[2] Secretaría del Ozono, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, "El ozono y tú," https://ozone.unep.org/ozone-and-you, 2025, accedido el 28 de abril de 2025.

[3] S. Hu, F. Ma, F. Collado-Mesa, and R. S. Kirsner, "Uv radiation, latitude, and melanoma in us hispanics and blacks," *Archives of dermatology*, vol. 140, no. 7, pp. 819–824, 2004.

[4] A. Jemal, S. S. Devesa, T. R. Fears, and P. Hartge, "Cancer surveillance series: changing patterns of cutaneous malignant melanoma mortality rates among whites in the united states," *Journal of the National Cancer Institute*, vol. 92, no. 10, pp. 811–818, 2000.

[5] The Skin Cancer Foundation, "Radiación uv," https://www.skincancer.org/es/risk-factors/uv-radiation/, 2025, accedido el 28 de abril de 2025.

[6] American Cancer Society, "¿causa cáncer la radiación uv?" https://www.cancer.org/es/cancer/prevencion-del-riesgo/sol-y-uv/radiacion-uv.html, 2025, accedido el 28 de abril de 2025.

[7] Instituto Nacional del Cáncer, "Factores de riesgo: Luz solar," https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/luz-solar, 2020, accedido el 28 de abril de 2025.

[8] Organización Mundial de la Salud, "Radiación ultravioleta," https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ultraviolet-radiation, 2022, accedido el 28 de abril de 2025.

[9] World Health Organization, World Meteorological Organization, United Nations Environment Programme, and International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, *Global Solar UV Index: A Practical Guide*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2002, accedido el 28 de abril de 2025. [Online]. Available: https://www.who.int/uv/publications/globalindex/en/

[10] EXA, "EXA ADVIERTE DE INCREMENTO EN LA RADIACION UV DE ENERO a MAYO 2009," http://www.exa.ec/bp22/, accessed: 2024-11-20.

[11] R. P. Gallagher, T. K. Lee, C. D. Bajdik, and M. Borugian, "Ultraviolet radiation," *Health Promotion and Chronic Disease Prevention in Canada*, vol. 29, 2010.

[12] M. González-Púmariega, M. V. Tamayo, and Á. Sánchez-Lamar, "La radiación ultravioleta. su efecto dañino y consecuencias para la salud humana," *Theoria*, vol. 18, no. 2, pp. 69–80, 2009.

[13] N. Amini, J. E. Matthews, F. Dabiri, A. Vahdatpour, H. Noshadi, and M. Sarrafzadeh, "A wireless embedded device for personalized ultraviolet monitoring," in *International Conference on Biomedical Electronics and Devices*, vol. 1. SCITEPRESS, 2009, pp. 220–225.

[14] W. Liu, Y. Wu, Z. Yin, X. Tong, X. Zhou, X. Yan, T. Suzuki, Y. Ohishi, and T. Cheng, "A composite photoluminescent probe based on er/yb co-doped tellurite glass powder for dual-parameter measurement of temperature and uv radiation," *Ceramics International*, vol. 50, no. 22, pp. 44 895–44 906, 2024.

[15] P. A. Pérez Narváez, A. Cortes Cabezas, and D. Salcedo, "Design and implementation of an uv radiation monitoring system to the neiva-huila municipality," 2019.

[16] A. Serrano, J. Abril-Gago, and C. J. García-Orellana, "Development of a low-cost device for measuring ultraviolet solar radiation," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 9, p. 737875, 2022.

[17] D.-H. Park, S.-T. Oh, and J.-H. Lim, "Development of a uv index sensor-based portable measurement device with the euvb ratio of natural light," *Sensors*, vol. 19, no. 4, p. 754, 2019.

[18] J. G. Hong, T.-J. Ahn, and K.-Y. Song, "Distributed ultraviolet sensor based on brillouin optical correlation-domain analysis using an azobenzene polymer-coated optical fiber," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 8, pp. 2657–2662, 2021.

[19] N. A. Siddiq, A. B. Wijatna, and Y. Akbar, "Real time, portable and low-cost ultraviolet (uv) sensor: Measuring the solar uv index for sunbathing safety," in *2023 8th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA)*. IEEE, 2023, pp. 171–176.

[20] 3DOptix, "3doptix: Software de simulación óptica en la nube," 2025, accedido: 2024-07-17. [Online]. Available: https://www.3doptix.com/

# ANEXOS

Anexo I: Comparación de mediciones de voltaje realizadas con diferentes instrumentos de medición.

| Voltaje | Multímetro (Referencia) | Osciloscopio | ADC ESP32 | ADS1115 |
|---|---|---|---|---|
| 200mV | 200.5 | 199 | 61.29 | 200 |
| | 200.5 | 201 | 64.15 | 200 |
| | 200.5 | 199 | 60.8 | 200 |
| | 200.5 | 199 | 61.49 | 200 |
| | 200.5 | 199 | 59.11 | 200 |
| 400mV | 400 | 399 | 253.6 | 400 |
| | 400 | 399 | 254.5 | 400 |
| | 400 | 399 | 252.96 | 400 |
| | 400 | 399 | 254.81 | 400 |
| | 400 | 399 | 254.69 | 400 |
| 600mV | 601 | 606 | 450.76 | 600 |
| | 601 | 606 | 451.4 | 600 |
| | 601 | 606 | 451.97 | 600 |
| | 601 | 606 | 451.93 | 600 |
| | 601 | 606 | 451.93 | 600 |
| 800mV | 800 | 810 | 642.92 | 800 |
| | 800 | 810 | 643.68 | 800 |
| | 800 | 810 | 644.45 | 800 |
| | 800 | 810 | 644.85 | 800 |
| | 800 | 810 | 645.09 | 800 |
| 1V | 1000 | 989 | 843.17 | 1000 |
| | 1000 | 989 | 844.1 | 1000 |
| | 1000 | 989 | 842.29 | 1000 |
| | 1000 | 989 | 843.25 | 1000 |
| | 1000 | 989 | 843.29 | 1000 |
| 1.2V | 1200 | 1200 | 1038.35 | 1200 |
| | 1200 | 1200 | 1040 | 1200 |
| | 1200 | 1200 | 1040.81 | 1200 |
| | 1200 | 1200 | 1039.84 | 1200 |
| | 1200 | 1200 | 1041.09 | 1200 |
| 1.4V | 1400 | 1400 | 1236.35 | 1400 |
| | 1400 | 1400 | 1239.94 | 1400 |
| | 1400 | 1400 | 1236.03 | 1400 |
| | 1400 | 1400 | 1239.01 | 1400 |
| | 1400 | 1400 | 1236.15 | 1400 |
| 1.6V | 1600 | 1610 | 1433.59 | 1590 |
| | 1600 | 1610 | 1435.36 | 1590 |
| | 1600 | 1610 | 1435.72 | 1590 |
| | 1600 | 1610 | 1436.29 | 1590 |
| | 1600 | 1610 | 1434.23 | 1590 |
| 1.8V | 1800 | 1810 | 1628.48 | 1790 |
| | 1800 | 1810 | 1629.09 | 1790 |
| | 1800 | 1810 | 1630.66 | 1790 |
| | 1800 | 1810 | 1631.14 | 1790 |
| | 1800 | 1810 | 1628.36 | 1790 |
| 2V | 2000 | 1990 | 1824.35 | 1990 |
| | 2000 | 1990 | 1823.82 | 1990 |
| | 2000 | 1990 | 1821.69 | 1990 |
| | 2000 | 1990 | 1823.14 | 1990 |
| | 2000 | 1990 | 1824.79 | 1990 |
| 2.2V | 2200 | 2200 | 2021.06 | 2190 |
| | 2200 | 2200 | 2020.37 | 2190 |
| | 2200 | 2200 | 2020.29 | 2190 |

| Voltaje | Multímetro (Referencia) | Osciloscopio | ADC ESP32 | ADS1115 |
|---|---|---|---|---|
| | 2200 | 2200 | 2019.33 | 2190 |
| | 2200 | 2200 | 2021.54 | 2190 |
| | 2400 | 2400 | 2220.83 | 2390 |
| | 2400 | 2400 | 2222.56 | 2390 |
| 2.4V | 2400 | 2400 | 2220.47 | 2390 |
| | 2400 | 2400 | 2222.08 | 2390 |
| | 2400 | 2400 | 2220.91 | 2390 |
| | 2600 | 2600 | 2437.81 | 2590 |
| | 2600 | 2600 | 2438.41 | 2590 |
| 2.6V | 2600 | 2600 | 2435.15 | 2590 |
| | 2600 | 2600 | 2437.73 | 2590 |
| | 2600 | 2600 | 2436.6 | 2590 |
| | 2800 | 2800 | 2702.05 | 2790 |
| | 2800 | 2800 | 2702.78 | 2790 |
| 2.8V | 2800 | 2800 | 2702.05 | 2790 |
| | 2800 | 2800 | 2702.53 | 2790 |
| | 2800 | 2800 | 2702.66 | 2790 |
| | 3000 | 3030 | 3031.73 | 2990 |
| | 3000 | 3030 | 3033.42 | 2990 |
| 3V | 3000 | 3030 | 3036.93 | 2990 |
| | 3000 | 3030 | 3035.68 | 2990 |
| | 3000 | 3030 | 3034.99 | 2990 |
| | 3200 | 3230 | 3300 | 3190 |
| | 3200 | 3230 | 3300 | 3190 |
| 3.2V | 3200 | 3230 | 3300 | 3190 |
| | 3200 | 3230 | 3300 | 3190 |
| | 3200 | 3230 | 3300 | 3190 |
| | 3306 | 3330 | 3300 | 3300 |
| | 3306 | 3330 | 3300 | 3300 |
| 3.3V | 3306 | 3330 | 3300 | 3300 |
| | 3306 | 3330 | 3300 | 3300 |
| | 3306 | 3330 | 3300 | 3300 |