

**Sistema para irradiar cultivos con ondas de las tecnologías LoRa y wifi, que también  
permita su monitoreo en tiempo real**

Johan David Aguirre Marroquin

Nikol Sharith Medina Sandoval

Universitaria Agustiniana  
Facultad de Ingeniería  
Programa Ingeniería en Telecomunicaciones  
Bogotá, D.C.  
2023

**Sistema para irradiar cultivos con ondas de las tecnologías LoRa y wifi, que también  
permita su monitoreo en tiempo real**

Johan David Aguirre Marroquin

Nikol Sharith Medina Sandoval

Director

Ingeniero Guillermo Fernando Valencia Plata

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero en Telecomunicaciones

Universitaria Agustiniiana

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería en Telecomunicaciones

Bogotá, D.C.

2023

*Quiero dedicar este trabajo de grado a una persona muy especial en mi vida, mi amada madre Nelly. Tu amor incondicional, apoyo constante y sacrificio han sido la fuerza impulsora detrás de cada uno de mis logros. Gracias por estar a mi lado en cada paso del camino y por creer en mí cuando dudaba de mis propias capacidades. Esta dedicación es un tributo a tu valentía, perseverancia y amor desinteresado.*

*También quiero extender mi dedicatoria a toda mi familia y personas que han dejado huellas en mi vida y han sido parte de mi éxito y han sido una fuente de inspiración y respaldo. Sus consejos sabios y ánimo constante han sido fundamentales en mi trayectoria académica. Cada uno de ustedes ha contribuido de manera significativa en este logro, y les agradezco de todo corazón por su amor y presencia en mi vida.*

*Johan.*

*Dedico este trabajo de grado con profundo agradecimiento y amor a mis padres, Nazly y Pablo. Su apoyo incondicional y palabras de aliento han sido mi fuerza en los momentos más difíciles.*

*Agradezco de corazón el amor y la educación que me han brindado.*

*A mi familia, mi hermana y mi pareja, les debo una gratitud eterna por creer en mí y motivarme a alcanzar mis metas. Agradezco también a mis amigos y compañeros de clase por ser parte de este viaje y brindarme un apoyo mutuo en cada paso durante estos cinco años de carrera.*

*Esta dedicación es para todos aquellos que han formado parte de mi vida y mi trayectoria académica. Han dejado una huella imborrable en mi camino. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible.*

*Nikol.*

## **Agradecimientos**

Queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a nuestros padres, quienes nos han apoyado incansablemente en este camino, les agradecemos por su amor y aliento incondicional. A la Universidad Agustiniana por brindarnos una educación de calidad y las herramientas necesarias para completar este trabajo de grado. A nuestros compañeros de carrera, profesores y directivos, les agradecemos por su colaboración y por compartir sus valiosos conocimientos. Y, por supuesto, un agradecimiento especial al ingeniero Guillermo Valencia, nuestro tutor, por su guía experta y apoyo constante. Sin todos ustedes, este logro no habría sido posible.

## **Resumen**

Este documento presenta el proceso llevado a cabo para caracterizar un sistema que permite la irradiación de cultivos utilizando las tecnologías LoRa y wifi, al mismo tiempo que permite el monitoreo en tiempo real de diversas variables. El subsistema de irradiación se desarrolló mediante el uso de diferentes módulos capaces de emitir ondas electromagnéticas en los rangos de espectro requeridos, específicamente 433 MHz y 2.4 GHz, por lo que se proporciona información detallada sobre cómo se conforman los paquetes y cómo se realiza la transmisión inalámbrica en cada una de las tecnologías. Por otro lado, el subsistema de monitoreo se basó en el uso de sensores y microcontroladores que permiten obtener las variables necesarias dentro del cultivo. Para llevar a cabo el montaje y diseño de ambos subsistemas, se utilizaron diversos métodos de indagación científica, lo cual permitió obtener información precisa para sustentar y desarrollar cada parte del proyecto. Al finalizar el desarrollo del sistema, cumpliendo con todos los objetivos establecidos, se muestra en detalle el proceso de montaje físico del subsistema de irradiación, así como el diseño del subsistema de adquisición de datos. Además, se hizo uso de diversas plataformas en la nube para el monitoreo y almacenamiento de las variables estudiadas. Asimismo, se profundizó en los protocolos de comunicación empleados para la transmisión de información entre los dispositivos y las plataformas. Finalmente, se describe como se implementó el sistema y las plataformas, detallando cómo se generan alertas de acuerdo con las expectativas y restricciones ambientales de los cultivos.

*Palabras clave:* Irradiación, monitoreo, protocolos, sensores, LoRa, wifi.

## **Abstract**

This paper presents the process carried out to characterize a system that allows crop irradiation using LoRa and wifi technologies, while allowing real-time monitoring of several variables. The irradiation subsystem was developed through the use of different modules capable of emitting electromagnetic waves in the required spectrum ranges, specifically 433 MHz and 2.4 GHz, thus providing detailed information on how the packages are formed and how wireless transmission is performed in each of the technologies. On the other hand, the monitoring subsystem was based on the use of sensors and microcontrollers that allow obtaining the necessary variables within the crop. To carry out the assembly and design of both subsystems, several scientific research methods were used, which allowed obtaining accurate information to support and develop each part of the project. At the end of the development of the system, fulfilling all the established objectives, the process of physical assembly of the irradiation subsystem is shown in detail, as well as the design of the data acquisition subsystem. In addition, use was made of various cloud platforms for monitoring and storage of the variables studied. Likewise, the communication protocols used for the transmission of information between the devices and the platforms were studied in depth. Finally, we describe how the system and platforms were implemented, detailing how alerts are generated according to the expectations and environmental restrictions of the crops.

*Key words:* Irradiation, monitoring, protocols, sensors, LoRa, wifi.

## Tabla de contenido

Introducción .....	12
Problemática .....	12
Pregunta de investigación .....	13
Idea de proyecto.....	13
Objetivos .....	15
Objetivo general .....	15
Objetivos específicos .....	15
Marco referencial .....	16
Estado del arte .....	16
Marco teórico.....	19
Radiación no ionizante.....	20
Tecnología LoRa.....	21
Tecnología wifi .....	23
Internet de las cosas .....	24
Sensores .....	26
Monitoreo.....	27
Protocolos de comunicación en IoT.....	27
Marco legal.....	28
Ley 1978 de 2019 .....	28
Ley 1341 de 2009 .....	28
Resolución 647 de 2021.....	29
Decreto 195 de 2008 .....	29
Ley 99 de 1993 .....	29
Ley 102 de 2013 .....	29
Resolución 711 de 2016.....	30
Metodología .....	31
Administración del proyecto .....	32
Cronograma .....	32
Presupuesto.....	33
Sistema de irradiación Lora y wifi .....	35

Subsistema de irradiación LoRa .....	35
Microprocesadores propuestos para el control del sistema LoRa.....	35
Módulos transceptores de irradiación LoRa estudiados. ....	38
Montaje del subsistema de irradiación LoRa.....	40
Subsistema de irradiación wifi de 2.4 GHz .....	48
Dispositivos de irradiación wifi de 2.4 GHz analizados.....	48
Montaje del subsistema de irradiación wifi de 2.4 GHz .....	50
Montaje físico del sistema de irradiación LoRa y wifi .....	63
Sistema de adquisición de datos, transmisión y monitoreo de variables .....	65
Subsistema de adquisición de datos .....	65
Microprocesador de control para el censado de las variables .....	65
Sensores seleccionados para censar el cultivo .....	66
Forma de transmisión de la información entre dispositivos .....	80
Subsistema de alimentación de todo el sistema.....	81
Circuito final de los sistemas de irradiación, censado y monitoreo .....	82
PCB (Circuito impreso) .....	83
Base de datos DynamoDB – AWS IoT Core .....	83
Broker pub/sub Mikrodash para monitoreo .....	86
Implementación del sistema de adquisición para la generación de alertas .....	88
Configuración de las alertas .....	89
Obtención de alertas .....	90
Conclusiones .....	92
Recomendaciones.....	93
Referencias .....	94



## Lista de tablas

Tabla 1.	Causas y efectos de la irradiación no ionizante .....	21
Tabla 2.	Bandas de frecuencia sin licencia en las que opera la tecnología LoRa .....	23
Tabla 3.	Cronograma de actividades.....	32
Tabla 4.	Costos subsistema de irradiación LoRa. ....	33
Tabla 5.	Costos subsistema de irradiación wifi de 2.4 GHz .....	33
Tabla 6.	Costos subsistema de sensores.....	33
Tabla 7.	Recurso humano.....	34
Tabla 8.	Software .....	34
Tabla 9.	Otros costos del proyecto.....	34
Tabla 10.	Costo total del proyecto.....	34
Tabla 11.	Caracterización de los microprocesadores .....	37
Tabla 12.	Principales características de los modulo LoRa .....	40
Tabla 13.	Distribución de pines entre el transmisor LoRa y el microcontrolador .....	42
Tabla 14.	Distribución de pines entre el receptor LoRa y el microcontrolador .....	42
Tabla 15.	Tamaño aproximado del paquete de datos a transmitir .....	46
Tabla 16.	Tamaño total de la trama transmitida por los módulos LoRa .....	46
Tabla 17.	Características de los módulos wifi de 2.4 GHz .....	50
Tabla 18.	Estándares de comunicaciones de redes inalámbricas .....	53
Tabla 19.	Características de comportamiento en la recepción y transmisión del módulo .....	53
Tabla 20.	Características peticiones GET y POST.....	58
Tabla 21.	Resolución en bits según la temperatura obtenida por el sensor DS18B20 .....	67
Tabla 22.	Medidas prácticas que determinaron el comportamiento del sensor.....	70
Tabla 23.	Medidas prácticas que determinaron el comportamiento del sensor.....	73
Tabla 24.	Medidas prácticas que determinaron el comportamiento del sensor.....	76
Tabla 25.	Tabla de niveles de irradiación de los módulos de irradiación utilizados .....	78
Tabla 26.	Valores de irradiación en función a la distancia de Tx y Rx LoRa.....	78
Tabla 27.	Valores de irradiación en función a la distancia de Tx y Rx wifi. ....	79
Tabla 28.	Rangos aproximados para el desarrollo correcto de distintos cultivos .....	88

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b>	Espectro electromagnético, irradiación ionizante y no ionizante.....	20
<b>Figura 2.</b>	Distribución de las canales de wifi de 2.4 GHz. ....	24
<b>Figura 3.</b>	Escala de tiempo de las actividades del cronograma en Project.. ....	33
<b>Figura 4.</b>	Arduino micro .....	36
<b>Figura 5.</b>	NodeMCU V3 Esp8266 - LoLin. ....	36
<b>Figura 6.</b>	Arduino Nano .....	37
<b>Figura 7.</b>	Transceptor XL1278 – SMT. ....	38
<b>Figura 8.</b>	Transceptor RFM96W .....	39
<b>Figura 9.</b>	Transceptor LoRa E220-900T30D.....	39
<b>Figura 10.</b>	Distribución eléctrica y diagrama de irradiación de la antena en MATLAB. ....	41
<b>Figura 11.</b>	Cobertura en condiciones ideales del transmisor LoRa. ....	42
<b>Figura 12.</b>	Circuito propuesto para el sistema de irradiación LoRa del cultivo.....	43
<b>Figura 13.</b>	Estructura de un paquete transmitido en un enlace LoRa .....	44
<b>Figura 14.</b>	Forma de generación de la señal a enviar por el transmisor LoRa .....	45
<b>Figura 15.</b>	Diagrama de flujo de los códigos de los módulos TX y RX LoRa .....	47
<b>Figura 16.</b>	Modulo ESP8266 (ESP-01) wifi de 2.4 GHz.....	48
<b>Figura 17.</b>	Transceptor RF nRF24L01.....	49
<b>Figura 18.</b>	Modulo ESP32. ....	49
<b>Figura 19.</b>	Distribución de pines del NodeMCUV3 ESP8266–Lolin.....	51
<b>Figura 20.</b>	Cobertura ideal del ESP8266. ....	52
<b>Figura 21.</b>	Circuito planteado para el correcto funcionamiento del NodeMC/transmisor wifi .	52
<b>Figura 22.</b>	Diagnóstico del dispositivo ESP8266 .....	54
<b>Figura 23.</b>	Composición trama inalámbrica 802.11 .....	57
<b>Figura 24.</b>	Comportamiento de peticiones entre los módulos ESP8266 .....	58
<b>Figura 25.</b>	Comportamiento en la red de los módulos ESP8266 .....	60
<b>Figura 26.</b>	Diagrama de flujo de la programación de los módulos ESP8266 .....	61
<b>Figura 27.</b>	Confirmación de la creación de la red y el servido de manera correcta.....	61
<b>Figura 28.</b>	Canal de la red wifi creada con el ESP8266 .....	62
<b>Figura 29.</b>	Información de la red creada – Software wifi Analyzer .....	62
<b>Figura 30.</b>	Circuito real del módulo LoRa y placa de desarrollo NodeMCU .....	63

<b>Figura 31.</b>	Montaje estructural la protección de todos los circuitos de sensado e irradiación	64
<b>Figura 32.</b>	Arduino Uno.....	66
<b>Figura 33.</b>	Sensor de DS18B20 tipo sonda.....	67
<b>Figura 34.</b>	Diseño circuito planteado para el funcionamiento de los dos sensores DS18B20...	68
<b>Figura 35.</b>	Termómetro digital TP101 .....	69
<b>Figura 36.</b>	Grafica comparativa de las medidas del termómetro, el sensor y su variación % ...	70
<b>Figura 37.</b>	Sensor de humedad de suelo capacitivo .....	71
<b>Figura 38.</b>	Circuito básico de operación de un temporizador 555 y su señal .....	72
<b>Figura 39.</b>	Higrómetro análogo de medición de humedad .....	72
<b>Figura 40.</b>	Grafica de relación de las medidas del higrómetro, el sensor y su variación % .....	73
<b>Figura 41.</b>	Diseño de circuito propuesto para los sensores de humedad .....	74
<b>Figura 42.</b>	Sensor TEMT6000 .....	75
<b>Figura 43.</b>	Grafica de relación de las medidas del sensor, instrumento y su variación %.....	76
<b>Figura 44.</b>	Diseño de circuito propuesto para los sensores de iluminación .....	77
<b>Figura 45.</b>	Niveles de irradiación reales del módulo LoRa XL1278 .....	79
<b>Figura 46.</b>	Niveles de irradiación reales del módulo ESP8266 .....	80
<b>Figura 47.</b>	Ejemplo tren de bits enviado de manera asíncrona con el protocolo UART .....	80
<b>Figura 48.</b>	Ejemplo de operación protocolo SPI, maestro-esclavo.....	81
<b>Figura 49.</b>	Placa utilizada para la alimentación eléctrica de todo el proyecto .....	82
<b>Figura 50.</b>	Diseño del circuito impreso del sistema.....	83
<b>Figura 51.</b>	Esquema de transmisión de datos a la base de datos NoSQL DynamoDB .....	84
<b>Figura 52.</b>	Archivo JSON enviado a la plataforma AWS IoT Core con el protocolo MQTT...	85
<b>Figura 53.</b>	Tabla de almacenamiento de las variables estudiadas.....	86
<b>Figura 54.</b>	Esquema de transmisión de datos a la plataforma de monitoreo MikroDash.....	87
<b>Figura 55.</b>	Ejemplo de visualización de los Dashboards de monitoreo de las variables .....	87
<b>Figura 56.</b>	Menú de configuración de la alertas en la plataforma MikroDash.....	90
<b>Figura 57.</b>	Menú de notificaciones y alertas de la plataforma .....	90
<b>Figura 58.</b>	Alerta obtenida en un dispositivo móvil .....	91
<b>Figura 59.</b>	Alerta obtenida en un dispositivo de escritorio .....	91
<b>Figura 60.</b>	Alerta obtenida en un correo electrónico .....	91
<b>Figura 61.</b>	Alerta obtenida en la aplicación de mensajería instantánea - Telegram .....	91

## Introducción

### Problemática

La agricultura en América Latina tiene un impacto crucial en su economía. Para mejorarla, es imperativo tecnificar la agricultura en Colombia mediante la implementación de técnicas de precisión. La comunicación entre sistemas agrícolas puede lograrse mediante tecnologías como LoRa y wifi. Sin embargo, es necesario analizar la respuesta de las plantas a la radiación no ionizante generada por estas tecnologías para garantizar su efectividad y seguridad.

En la actualidad, la agricultura de precisión es cada vez más utilizada en la sociedad, este tipo de prácticas permiten aplicar la cantidad correcta de insumos, en los momentos idóneos y lugares exactos, además permite controlar distintas variables de los sembradíos para poder tomar medidas preventivas y correctivas frente a cualquier evento que se pueda presentar. El uso de distintos dispositivos de IoT (Internet de las Cosas) permiten satisfacer completamente las exigencias de la agricultura de precisión, ya que esta técnica utiliza tecnología avanzada, como sensores y drones, que permiten recopilar datos precisos sobre diferentes cultivos, posibilitando abordar de maneras diferentes y eficientes campos como la identificación de afectaciones en el desarrollo de algún tipo de planta que se esté monitoreando o estudiando, o incluso procesos predictivos de producción industrial de los cultivos, esto según (Flego & Garcia, 2017, págs. 101 - 103).

Para (Andrade & Peñuela, 2019) los sistemas de telemetría en la agricultura son importantes debido a su funcionalidad, sofisticación y confiabilidad, estos implementan diferentes procesos como, la adquisición de datos, que implica la recolección de información a través de sensores, la transmisión de datos, que consiste en el envío de dicha información a un punto receptor, y el almacenamiento y procesamiento de estos datos, para la toma de decisiones o el monitoreo de distintas variables, los procesos tiene un gran rango de aplicabilidad donde se destacan las áreas como: la inteligencia militar, la medicina y sobre todo la agricultura, en este caso la tecnología permite recolectar de manera digital o análoga diversos parámetros físicos o ambientales de cualquier tipo de plantación para su posterior transmisión por medio de módulos de bajo costo, XBEE y XBEE Pro que utilizan uno de los dieciséis canales predispuestos en la banda de 2.4 GHz, con alcance de transmisión sin errores de hasta 1.6 Km, una vez es enviada la información al receptor realiza la interpretación de los datos para finalmente aplicar el respectivo tratamiento a los cultivos e identificar cambios físicos, ambientales o falencias en los insumos necesarios para el desarrollo correcto de las siembras, con el uso de la agricultura de precisión los cultivos

monitoreados y controlados se hacen propensos a la exposición constante de las ondas generadas por las diferentes tecnologías inalámbricas, las cuales se encargan principalmente de la transmisión de la información medida, siendo así se vuelve prioridad conocer el efecto que causa la irradiación constante a los cultivos (págs. 2 - 6).

Actualmente, el programa de Ingeniería en Telecomunicaciones y su semillero IDESTIC, de la Universitaria Agustiniiana, están desarrollando un proyecto de investigación dirigido a establecer el impacto de la radiación electromagnética no ionizante a los cultivos de *Pisum sativum*, con la noción de apoyar el proyecto investigativo se hace necesario plantear y desarrollar un sistema que permita irradiar las plantas de dicha especie con ondas de las tecnologías LoRa de 433 MHz y wifi de 2.4 GHz, que además permita ser monitoreado mediante sensores y en tiempo real diversas variables como: potencia, intensidad luminosa, temperatura y humedad, todo esto sin desplazarse o tener que estar presente en la ubicación del cultivo, adicionalmente, se deben generar alertas que reporten cambios drásticos en las mediciones para poder tomar medidas preventivas o evidenciar el comportamiento de los cultivos al estar expuestos a la radiación electromagnética de las frecuencias ultra altas (UHF).

### **Pregunta de investigación**

¿Qué características debe tener un sistema que permita irradiar un cultivo de *Pisum Sativum* con ondas electromagnéticas de las tecnologías LoRa y wifi, y con el que además se puedan monitorear en tiempo real diversas variables?

### **Idea de proyecto**

El proyecto se centrará en desarrollar un sistema que permita exponer un cultivo de *Pisum Sativum* a ondas de irradiación no ionizante de las tecnologías LoRa con frecuencias de 433 MHz y wifi de 2.4 GHz, paralelamente el sistema poseerá sensores que darán la posibilidad de monitorear en tiempo real variables como: la temperatura, la intensidad lumínica, la humedad y potencia recibida en el cultivo por parte de cualquiera de las tecnologías que esté operando en un determinado momento, y todo controlado por medio de una plataforma para IoT (Internet de las cosas) y varios servicios de mensajería.

Dicho lo anterior, el sistema contará con la capacidad de emitir radiación hacia una maceta que contendrá una planta de *Pisum Sativum*, mientras que habrá otra maceta de control que no estará expuesta directamente a dicha radiación, esto sin un límite de tiempo determinado y con cualquiera de las tecnologías inalámbricas anteriormente nombradas, por otro lado, estará en continuo

funcionamiento un subsistema de sensores que se encargará de registrar y medir distintas variables físicas relacionadas con el cultivo, los sensores facilitarán la posibilidad de generar alertas que se enviarán a correos electrónicos, mensajes de texto (SMS), servicios de mensajería instantánea desde el mismo hardware y utilizado una plataforma para IoT la cual tendrá en cuenta los rangos idóneos que permitan conservar el bienestar del cultivo.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Desarrollar un sistema para irradiar plantas con ondas de las tecnologías LoRa y wifi, que también permita monitorear en tiempo real variables como potencia, intensidad luminosa, temperatura y humedad de las plantas.

### **Objetivos específicos**

- Realizar un montaje para irradiar las plantas con las tecnologías LoRa y wifi.
- Diseñar un sistema de adquisición de datos que permita monitorear el cultivo y transmitir la información de los sensores.
- Implementar el sistema de adquisición que permita la generación de alertas para el desarrollo del experimento.

## Marco referencial

### Estado del arte

En la actualidad los efectos de la radiación en las plantas es un tema bastante importante y requiere de un análisis profundo, por lo que (Armesto Arenas, 2015, pág. 65) argumenta que la germinación y desarrollo de cualquier tipo de semillas está ligado a factores externos como la humedad, temperatura, iluminación, entre muchos otros, estos factores pueden llegar a alterar el florecimiento y el desarrollo de plantas de cualquier tipo de cultivo, en este caso del maíz. Teniendo en cuenta que casi cualquier factor externo puede manipular el crecimiento de las plantas, entre los que destaca los campos electromagnéticos, ya que actúan sobre la materia y por lo tanto en cada una de las etapas de desarrollo de los organismos biológicos.

Como parte de un estudio de campo necesario (Armesto Arenas, 2015, págs. 67 - 68) en el año 2015 planteó un ensayo el cual consistía en irradiar 100 semillas de maíz cultivadas en un sustrato a base de arenilla y semilleros plásticos ubicados en distintas jaulas metálicas a una distancia de 35 cm de un transmisor de 5w de potencia y de dos antenas de media onda cada una con una frecuencia diferente, la primera de 945 MHz y la segunda de 440 MHz, a dichas distancias y con esas frecuencias se calculó un campo magnético de  $4.45 \times 10^{-3}$  [A/m], a partir de esto los cultivos se irradiaron 24 horas durante ocho días ininterrumpidos, controlando las variables de temperatura, frecuencia, intensidad y campo magnético manteniéndolas dentro de rangos estables e idóneos para el cultivo, el objetivo principal del experimento era observar la variación de tiempo de germinación, la altura de las plantas, su color y cenizas.

Los resultados mostraron dos cambios significativos, el primero que las semillas que fueron irradiadas con ondas de longitudes menores tuvieron una variación mínima en el porcentaje y velocidad de germinación comparado con las que no fueron irradiadas en ningún momento, y el segundo en cuanto a las alturas, las plantas irradiadas con 945 MHz crecieron alrededor de 2.55 centímetros más que las plantas irradiadas con 440 MHz y las que no fueron expuestas al experimento.

En el año 2016 (Monetro, 2016) realizó un experimento donde se analizó el cambio térmico que puede resultar de exponer un cultivo hidropónico de Arabidopsis Thaliana a señales inalámbricas, esta radiación emitida por un router doméstico de la marca D-link que transmite en la banda wifi de 2.4 GHz, se realizaron varios ensayos de irradiación omnidireccional donde variaba la potencia de acuerdo a la distancia del aparato, estas potencias estaban entre -23 dBm y -43 dBm. En el



seguimiento del cultivo se tomaron medidas de temperaturas con el sensor HOBO pro V2 cada hora, para ser comparadas con medidas previas a la exposición del cultivo a la irradiación del dispositivo en cualquiera de las fases del experimento teniendo el balance de la variación de potencia.

Luego de catorce días de irradiación, el experimento arrojó diversos resultados en donde variaba mínimamente las temperaturas de acuerdo a las potencias a la que fueron expuestas las plantas, destaca que el 71% de los cultivos experimentales generaron polimorfismo epigenético o pequeños cambios en algunas de las variables analizadas, esto indica que los campos electromagnéticos emitidos por los routers influyen de alguna manera sobre patrones específicos como la metilación del ADN de las plantas, lo que refiere a una disminución de las enzimas de las plantas independientemente de la potencia o distancia de irradiación, dicha disminución representa una carencia de citosina externa e interna que afecta el desarrollo idóneo y normal de las plantas del cultivo (pág. 12).

Actualmente todos los procesos industriales están dirigidos a la optimización, la búsqueda de bajos costos en los insumos y la reducción al impacto ambiental, con la implementación de enlaces satelitales se crea una alternativa favorable para el monitoreo y cuidado de paramos o reservas naturales sin generar un cambio significativo en ellos, basado en esto (Ramirez Velazco, 2020) propone un diseño que permite monitorear diferentes cultivos de papa ubicados en regiones con difícil acceso y poca cobertura, dichos sistemas implementan una red WLAN (red inalámbrica local) que estuvo conformada por diferentes sensores y cámaras, todo con acceso a internet satelital utilizando una topología que permita flexibilidad y sobre todo escalabilidad, todo con suministro eléctrico generado mediante un sistema fotovoltaico que da un aporte mayor al medio ambiente (págs. 50 - 55).

El sistema de monitoreo propuesto por el autor se basa en varios dispositivos de video vigilancia con el que se tiene un control visual de la evolución del cultivo además de servir como herramienta de seguridad para supervisar la infraestructura y los dispositivos, se utilizó la tecnología CCTV (Closed Circuit Television), controladores wifi para la transmisión y recepción de la información y cámaras de video tipo bala, junto con los dispositivos de video se extendió una red de sensores de pluviosidad, PH, viento, humedad y temperatura en nueve partes del cultivo para realizar las mediciones y censo de variables necesarias, todo conectado a internet y a el sistema de energía solar que se encarga de la alimentación eléctrica.

Por la necesidad de realizar estudios en la producción alimenticia, medicinal u otras industrias se da el crecimiento de la agricultura urbana dirigida a espacios urbanos al interior o alrededor de las ciudades, (Cadavid Cortes & Vargas Garcia, 2020) propone un sistema de automatización de riego y control de un invernadero urbano ubicado en la localidad de San Cristóbal al sur de Bogotá, con la intención de mitigar el impacto ambiental en la zona y aumentar el nivel de producción de diversos cultivos en la localidad, se analizaron variables como la temperatura, iluminación, humedad, movimiento y presión por medio de sensores que transforman las señales eléctricas a señales analógicas o digitales, se montaron diversos tipos de sistemas de riego como: el de goteo, aspersión, microaspersión y automatizado, todo para garantizar las condiciones idóneas de una cosecha de tomate Cherry, de esta forma se recolecto información de aspectos a mejorar en los sembradíos para posteriormente realizar capacitaciones ambientales y procedimentales a las comunidades que fueron afectadas de primera mano por la producción de los cultivos.

De acuerdo con el escenario de cultivo, se seleccionaron los sensores con las mejores características, para la temperatura el sensor DTH11 es el que mejor debido a su fácil manejo y bajo costo, este tiene una salida digital y rangos de operación y precisión viables para el cultivo, para el control de la humedad se utilizó el sensor FC-28 que permite calcular la humedad del suelo mediante dos electrodos resistivos que transforman señales eléctricas a una señal de salida análoga, en cuanto a microcontroladores y medios de transmisión de información se utilizó una placa Arduino Uno, por su interfaz amigable, fácil lenguaje de programación, su gran disponibilidad de pines análogos y digitales y su bajo costo, para la comunicación y transmisión de datos a la nube, por su bajo costo y fácil conectividad con Thingspeak y Arduino se optó por el módulo wifi Esp8266.

Posteriormente al procesamiento y envío de los datos obtenidos a la nube, se visualizan e interpretan en ThingSpeak para la toma de decisiones sobre los sembradíos, ejemplo de esto puede ser que de acuerdo a cierto porcentaje de humedad se enciendan las electroválvulas para automatizar el sistema de riego, así se puede mejorar la calidad de cualquier cultivo evitando la propagación de plagas y demás afecciones que puedan surgir por la exposición de las plantas a las condiciones climáticas externas (págs. 30 - 36).

Con el análisis de los folíolos de las plantas (Sandino Mora, 2014) identifiqué diferentes tipos de especies vegetales y sus características, aunque este es un método invasivo y destructivo para las siembras, ya que hay que extraer ciertas partes de las plantas lo que resulta en su pérdida casi total,

por la negatividad del procedimiento para los cultivos se han implementado distintas formas de identificación no destructivas con algoritmos que permitan llevar a cabo el monitoreo del crecimiento de las plantas, así como la identificación de plagas, enfermedades y deficiencias nutricionales, estos procedimientos permiten diagnosticar y tomar medidas preventivas frente a daños, enfermedades o fisiopatologías en diferentes fases de monitoreo de cultivos agrícolas. Para ello, se procesan los datos obtenidos y se analizan informes que profundizan en las distintas características obtenidas en el estudio, de la siguiente manera:

- PIC 1394, en este se muestra la manera en la que se analizó el crecimiento de los frutos de los cultivos con resultados positivos ya se obtuvieron datos muy próximos a la edad real de las plantas.
- PIC 1584, este informe muestra como es el diagrama que permite saber si los cultivos tienen plagas o algún tipo de enfermedad o fisiopatología, con este solo se logró identificar un rango de plagas reducidos y sin mayores detalles.
- PIC 1705, aquí se muestra la metodología que se tuvo en cuenta para identificar los nutrientes de las siembras, los resultados fueron negativos ya que la mayor parte mostro un balance idóneo de nutrientes necesarios para su crecimiento lo que provocó la disminución de datos para el desarrollo del estudio.

El proyecto implementó distintos algoritmos que permitieran el análisis de imágenes utilizando el proceso de visión de máquina, dicho proceso hace parte de la inteligencia artificial y se encarga de utilizar procesamiento de imágenes, basado en el uso de controladores integrados para analizar datos con alta velocidad y así tomar decisiones automáticas y de manera sencilla con el objetivo de guiar, inspeccionar y controlar la calidad de un determinado producto u objeto, en este caso se realizó el análisis o proceso de visión de maquina utilizando un dron DJI Phantom F0C40 con el que se adquirieron imágenes de manera automatizada y a distancia de un cultivo de Arándano ubicado en la Universidad Militar Nueva Granada, posteriormente con estas imágenes se siguieron distintos diagramas de flujo que permitían identificar las características del cultivo y del funcionamiento del aparato desplegado en el sembradío, es así que se logró obtener los datos necesarios para caracterizar los frutos y sus condiciones de desarrollo (págs. 15 - 19).

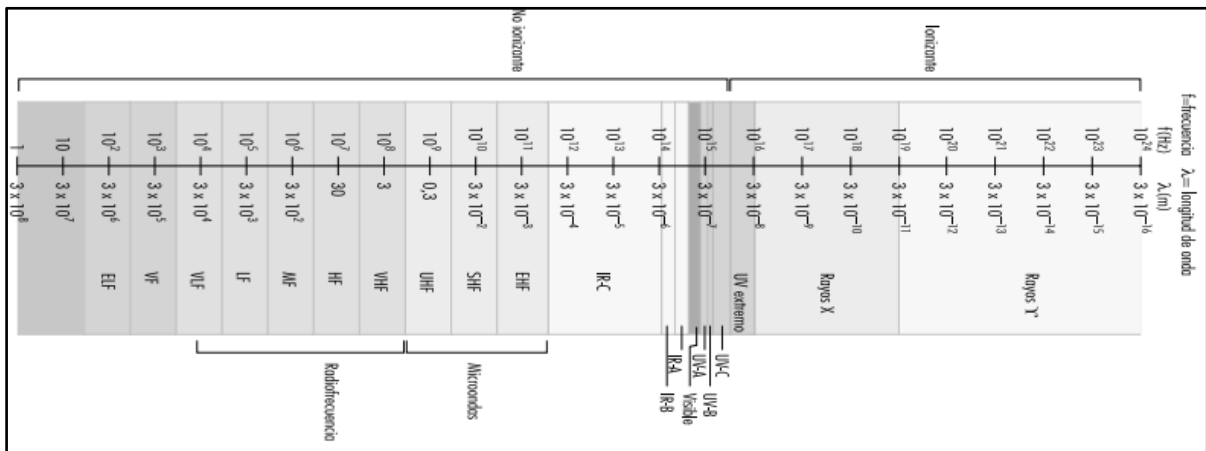
### **Marco teórico**

En el siguiente apartado se profundizará en algunos conceptos necesarios para tener una precepción más clara del proyecto.

## Radiación no ionizante

La luz visible, o luz del sol, es una forma de energía electromagnética ampliamente conocida y que actúa como barrera entre la radiación ionizante, como los rayos gamma o los rayos X, y la radiación no ionizante (RNI), que posee frecuencias mucho menores y, por ende, impacto reducido en la salud de los seres vivos, en rango de radiación se encuentra las ondas de Fm, Am, radio celular, microondas y todas aquellas que impregnan nuestro entorno para prestar diversos servicios. Este tipo de radiación no tiene suficiente energía para ionizar o afectar la materia o de alguna manera interactuar con las entidades biológicas, una de las principales maneras en las que interactúa la radiación no ionizante es el calentamiento de los organismos, pero sin ningún otro tipo de efecto relevante (Mager Stellman, 1998, págs. 24 - 30).

El espectro electromagnético Figura 1 contiene el conjunto de ondas de radiación electromagnética de bajas y altas frecuencias, referenciando así la radiación ionizante o no ionizante.



**Figura 1.** Espectro electromagnético, irradiación ionizante y no ionizante. (Mager Stellman, 1998).

Según (Diaz Soto, 2006) la humanidad siempre ha vivido en espacios llenos de campos electromagnéticos naturales como, la radiación solar, radiación cósmica o la luz visible, aunque en los últimos han aparecido un montón de fuentes de campos electromagnéticos (CEM) dirigidos a distintos objetivos, con rangos de frecuencia desde 3 kHz hasta 300 GHz, en la 0 se muestran los principales efectos de la radiación no ionizante, que son de tipo: térmico, no térmico y atérmicos (pág. 3).

Tabla 1. Causas y efectos de la irradiación no ionizante

Causa	Efecto
<b>Térmico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Se presentan incrementos mayores a 1°C en la temperatura de los cuerpos u objetos.</li> <li>* Cambios en la oscilación de las moléculas bipolares principalmente en las plantas tejidos y órganos.</li> </ul>
<b>No térmico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Cambios en la actividad colinérgica (Cambios neurológicos) de varios animales lo que puede llegar a influenciar en su salud, sin embargo, la OMS dice que son cambios insignificantes.</li> <li>* Se ha presentado acumulación de esta radiación en personas expuestas por más de cinco años a ella.</li> </ul>
<b>Atérmico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Inducción de pequeñas corrientes eléctricas que pueden llegar a estimular las células nerviosas y musculares.</li> </ul>

*Nota.* La tabla fue construida con los aportes de (Diaz Soto, 2006).

Según (Suárez, 2011) la irradiación en los alimentos puede llegar a ser un método efectivo de conservación que prolonga el tiempo en el que este puede ser conservado, la radiación ultravioleta es la más utilizada por la industria alimenticia como bactericida ya que emplea longitudes de onda cercanas a 260 nm que no afectan la calidad de los alimentos, pero si permiten limpiar distintos tipos de organismos que de alguna manera los afectan, la luz ultravioleta de 200 nm en cambio es absorbida en su gran mayoría por el oxígeno de los alimentos lo que da paso a la producción interna de ozono y a una mayor vida útil del alimento (págs. 102 - 103) .

### **Tecnología LoRa**

La tecnología LoRa usa la técnica de modulación denomina espectro extendido SS (Spread Spectrum Technique), este tipo de métodos se utilizan en la transmisión de los datos de las aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT) de las industrias ya que emplean anchos de banda similares a las señales de ruido, en este tipo de tecnologías las frecuencias pueden realizar saltos o cambios de frecuencia en intervalos de tiempo cortos propiciando la transmisiones simultaneas y un

aprovechamiento idóneo del espectro, con esto se puede llegar a transmitir con potencias mínimas que traduce a consumos energéticos muy bajos lo que llega a ser conveniente para sistemas de transmisión muy robustos, los dispositivos LoRa transmiten en frecuencias de 433 MHz o 915 MHz de acuerdo a la región en la que este ubicada y con alcances de hasta 10 kilómetros en las mejores condiciones posibles (Campo abierto).

Los módulos LoRa son capaces de implementar el modo de transmisión dúplex entre el transmisor y receptor, además este tipo de dispositivos propagan sus señales en una banda estrecha en canales bastante amplios lo que permite conseguir cierta inmunidad al ruido, la tecnología utiliza seis factores diferentes para determinar su alcance estos van desde SF7 hasta SF12 (el factor es recíproco a su alcance), generalmente la capacidad de transmisión de datos esta entre 300 bps a 50 kbps teniendo en cuenta el área donde se esté transmitiendo, este tipo de comunicaciones son destacadas debido a que sus receptores puede recibir mensajes de múltiples transmisores que estén configurados en factores de transmisión distintos, representando una ventaja notoria para sistemas de monitoreo que se encuentren en sitios diferentes y deben entregar registros simultáneos (Manrique Latorre, Buitrago Márquez, & Hernandez Guitierrez, 2019, págs. 7 - 8).

El progreso tecnológico ha permitido la evolución de los estándares de conexión inalámbrica y de bajo consumo, poco costo y con altos rangos de cobertura, todo para cumplir con las necesidades de los servicios IoT, por esto se ha adaptado su uso a aplicaciones de uso común y servicios básicos que permitan aprovechar la infraestructura de red con las que actualmente cuenta las comunidades, un ejemplo es el control de la sanidad en el agua, datos de consumo eléctrico y las comunicaciones generales de regiones que están muy alejadas de la urbe o estaciones base, la tecnología LoRa tiene un gran alcance y consumo energético muy bajo, haciendo viable su implementación en los diferentes servicios prestados por IoT en ámbitos de desarrollo común e industrial, un aspecto negativo de este tipo de tecnología es su alta latencia y poco ancho de banda (Heredia Rivadeneria & Lucero Andrade, 2021, págs. 31 - 32).

La tecnología LoRa maneja múltiples frecuencias sin licencia lo que permite que se adapte a aplicaciones y servicios de distintos tipos, esto se puede resumir en la Tabla 2 que representa distintas regiones y sus bandas LoRa.

Tabla 2. Bandas de frecuencia sin licencia en las que opera la tecnología LoRa

Continente/país	Nombre de la banda	Banda de frecuencias (MHz)
Europa	EU868	863 – 870
Europa	EU433	433
Estados Unidos	US915	902 – 928
China	CN779	779 – 787
China	CN470	470 – 510
Australia	AU915	915 – 928
Australia	AS923	923
Rusia	RU864	864 – 870
Corea del Sur	KR920	920 – 923
India	IN865	865 - 867

*Nota.* La tabla fue construida con los aportes de (Heredia Rivadeneria & Lucero Andrade, 2021).

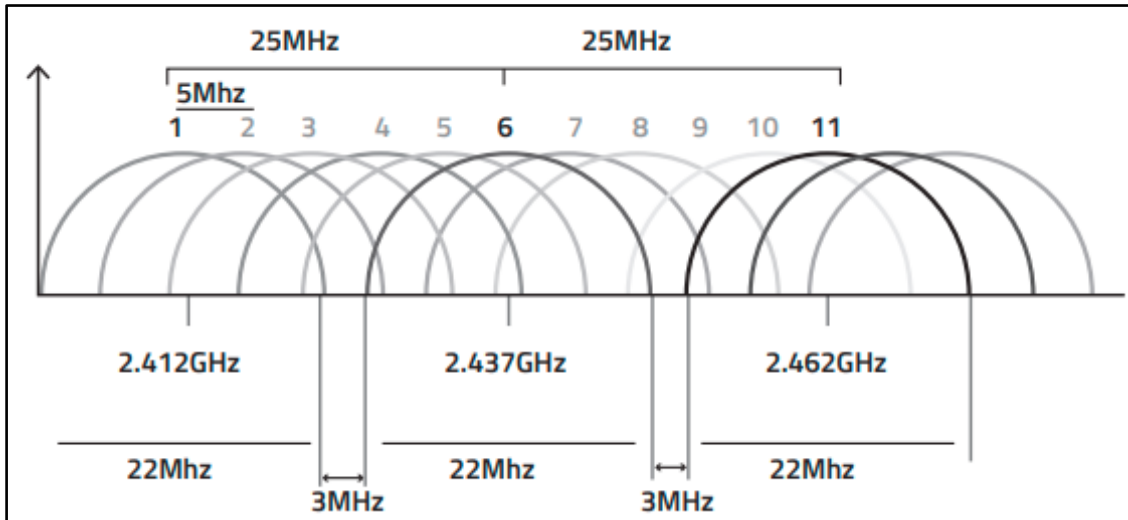
### **Tecnología wifi**

Este es un sistema de comunicación inalámbrica de dispositivos dentro de áreas pequeñas o restringidas de manera física o virtual, para (Instituto Nacional de Ciberseguridad, 2019) el uso más frecuente es el acceso a internet mediante la implementación de dos tipos de dispositivos: clientes y puntos de acceso, las ventajas de estas redes es la ausencia de cables y por lo tanto la no necesidad de mantenimiento de infraestructura intermedia, esto implica gran movilidad para los usuarios dentro de la cobertura de sus redes WLAN (red de área local inalámbrica) eliminando las limitaciones de ubicación, una de las principales falencias de las redes wifi es que al no necesitar cableado o líneas de transmisión físicas se hacen más vulnerables a ataques y muy predispuesta a interferencias externas (págs. 7 - 8).

Las redes inalámbricas pueden dividirse en varios segmentos, el que más destaca es el que caracteriza su cobertura o distancia de alcance, las redes de corto alcance hacen referencia a redes que pueden prestar sus servicios en áreas limitadas, aquí destacan las redes que utilizan la tecnología wifi de 2.4 o 5 GHz, su disponibilidad es muy amplia y se pueden encontrar en cualquier parte del mundo que las necesite debido a su gran aplicabilidad a las industrias, científica, médica o simplemente al uso diario de la comunidad, su espectro se divide en bandas libres, licenciadas o reservadas, la disponibilidad y operación licenciada de estas bandas permite que los usuarios utilicen servicios y dispositivos de manera inalámbrica y con características muy eficientes, como velocidad aproximada de 2 a 110 Mbps en diversos estándares, 802.11 a/b/g/n, lo anterior explicado por (Salazar, Redes inalámbricas, 2017, pág. 7).

El wifi de 2.4 GHz utiliza la banda de frecuencia comprendida entre 2.412 y 2.472 dividido en trece canales de 22 MHz cada uno, como se muestra en la Figura 2, esta distribución permite crear

múltiples vías para el intercambio de información, aunque su principal desventaja es el solapamiento de los mismos, excluyendo a los canales uno, seis y once, las redes que trabajan en las frecuencias de 2.4 GHz se diferencian de la de 5 GHz por su velocidad disminuida, pero mayor alcance.



**Figura 2.** Distribución de las canales de wifi de 2.4 GHz. (Guevara & Serna, 2013)

### **Internet de las cosas**

El Internet de las cosas (IoT) se refiere a un conjunto de dispositivos electrónicos interconectados que pueden recopilar y transmitir datos mediante redes inalámbricas sin necesidad de intervención humana. Según (Oracle, 2023) el Internet de las cosas (IoT) hace referencia a una red de objetos físicos, también conocidos como "cosas", que están equipados con sensores, software y otras tecnologías que les permiten conectarse e intercambiar datos con otros dispositivos y sistemas a través de Internet. Dentro de esta red, se pueden encontrar desde objetos cotidianos en el hogar hasta herramientas de alta tecnología utilizadas en la industria.

El Internet de las cosas (IoT) va mucho más allá de los dispositivos electrónicos tradicionales como computadoras y teléfonos inteligentes. En realidad, cualquier objeto que tenga la capacidad de encenderse y apagarse y pueda conectarse a Internet, puede formar parte de este tipo de redes. Los ejemplos de "cosas" que se pueden encontrar en el IoT son muy variados, desde personas con implantes de monitoreo cardíaco, hasta cámaras que transmiten imágenes de la vida natural en aguas o zonas agrónomas, y automóviles equipados con sensores que alertan a los conductores sobre posibles peligros y riesgos en la carretera.



En principio, cualquier objeto al que se le pueda colocar una dirección de Protocolo de Internet (IP) y que tenga la capacidad de enviar y recibir datos a través de una red, puede formar parte del Internet de las cosas. Esta característica de conectividad puede permitir a los dispositivos comunicarse entre sí y con otros sistemas a través de Internet, lo que abre la posibilidad de crear sistemas más eficientes y autónomos en diversos ámbitos, como el hogar, la industria, la salud y el transporte.

Para (Morales, 2015, pág. 5) la definición ofrecida por Altimeter Group acerca del "Internet de las cosas" resulta sumamente útil para comprender de qué se trata esta tecnología en esencia. Según esta definición, IoT implica la interconexión y la interacción entre el mundo físico y el digital, permitiendo así la integración de objetos físicos a las redes de información a través de infraestructuras de internet ya existentes.

El IoT se presenta como una plataforma que conecta personas, objetos y entornos con el fin de informar y permitir la visibilidad, el compromiso y la innovación. De esta manera, se logra una mayor eficiencia en diversos ámbitos, como el hogar, la industria y la salud, entre otros. Al poder monitorear y recopilar datos de los objetos interconectados, es posible optimizar su funcionamiento y hacer más efectivas las tareas que desempeñan. De igual forma, IoT crea la posibilidad de establecer nuevos productos y servicios innovadores que puedan adaptarse a las necesidades de la sociedad y del mercado.

Según Amazon, el funcionamiento de un sistema de IoT se basa en la recopilación y el intercambio de datos en tiempo real, los cuales son procesados por tres componentes clave: los dispositivos inteligentes, la aplicación de IoT y una interfaz gráfica de usuario. Esta estructura permite la recopilación de datos de manera eficiente, analizar estos mediante tecnologías de machine learning o inteligencia artificial (IA), y tomar diversas decisiones.

El dispositivo de IoT es fundamental en este proceso, ya que permite administrar la información y controlar los dispositivos inteligentes a través de una interfaz de usuario, como una aplicación móvil o un sitio web. De esta forma, se pueden registrar y monitorear los dispositivos en tiempo real, cambiar ajustes y tomar decisiones basadas en el comportamiento de los datos recopilados.

La capacidad de monitorear y recopilar datos en tiempo real permite optimizar el funcionamiento de los objetos interconectados, mejorando su eficiencia y reduciendo costos. Asimismo, la posibilidad de integrar la inteligencia artificial en este proceso permite generar soluciones más precisas y personalizadas. (Amazon Web Services, Inc., 2023, pág. 1).

## **Sensores**

Los sensores son dispositivos que están capacitados para reconocer acciones y estímulos externos y reaccionar en consecuencia. Estos dispositivos pueden convertir cantidades físicas o químicas en cantidades eléctricas.

Según (Weebly, 2023, págs. 1 - 3) un sensor es un componente electrónico capaz de detectar y medir diferentes tipos de variables en su entorno, como temperatura, humedad, presión, movimiento, entre muchas otras. Al detectar estos cambios, los sensores generan una señal eléctrica que se puede procesar y utilizar para obtener información precisa sobre el entorno. Los sensores son dispositivos básicos en el mundo de la tecnología, y su uso se ha extendido a una infinidad de aplicaciones, desde la domótica y la medicina, hasta la industria y la agricultura, de esta forma la tecnología de sensores se está combinando con la inteligencia artificial para crear sistemas de alarmas y predicción bastante precisos.

Agregando lo anterior es importante explicar un poco más en detalle el funcionamiento de los sensores, según (EDS Robotics, 2022) los sensores son capaces de reconocer e interpretar diferentes tipos de variables, lo que permite medir las variaciones en las condiciones de una determinada área. Estas lecturas pueden ser utilizadas para accionar actuadores que controlen otros dispositivos, con servicios como, encender alarmas, apagar ciertas características o encender todo un sistema de maquinaria pesada, entre otras.

En el ámbito industrial, existen diferentes tipos de sensores que se pueden clasificar según diversos criterios. A continuación, se describen algunos de los tipos de sensores más importantes:

Los sensores de distancia permiten medir la separación entre dos puntos. Por su parte, los sensores de frecuencia de luz decodifican la intensidad de los impulsos lumínicos para ayudar a identificar los colores o la luminiscencia en cierto sector. Los sensores de humedad miden la humedad relativa del aire en una habitación, y activan mecanismos que reflejan estas medidas. Los sensores de luz, por su parte, detectan la intensidad de la luz ambiental y responden con impulsos eléctricos. Los sensores de posición miden la posición lineal o angular de un objeto y la convierten en señales eléctricas que pueden ser interpretadas por sistemas de control. Finalmente, los sensores de presión permiten determinar la presión ejercida por un líquido u objeto en un espacio determinado y son utilizados en diversas acciones de la industria, incluyendo la seguridad ocupacional para prevenir accidentes en la realización de tareas, los sensores son elementos que detectan cambios en el entorno y transforman estos cambios en señales eléctricas que pueden ser

procesadas por otros sistemas. Los diferentes tipos de sensores se utilizan en función de las necesidades específicas de cada aplicación industrial.

### **Monitoreo**

El monitoreo es un proceso constante y organizado que evalúa la eficiencia de un proyecto, identificando fortalezas y debilidades, y sugiriendo acciones correctivas para mejorar los resultados esperados del proyecto, este proceso se realiza de forma sistemática, permitiendo ajustes y mejoras a lo largo del tiempo que aseguren que el proyecto alcance sus objetivos de manera segura y sobre todo eficaz.

Para (Lauriac, 2016, pág. 5) Los proyectos de cooperación al desarrollo o de ayuda humanitaria operan en condiciones inciertas y cambiantes. Se trata de múltiples actores con sus propios intereses y estrategias. A menudo tienen como objetivo abordar problemas complejos, el monitoreo es un proceso esencial para gestionar un proyecto de tal manera que contribuya a un cambio efectivo para los beneficiarios. Se utiliza para evaluar el progreso del proyecto, asegurarse de que va por buen camino para lograr los resultados esperados en donde se observa y se comprenden las brechas, las dificultades e incluso las nuevas oportunidades. El monitoreo es un proceso muy importante para aquellos que implementan proyectos, ya que les permite determinar los ajustes necesarios para cumplir con los objetivos establecidos. Al llevar a cabo un seguimiento constante, es posible identificar los puntos positivos como las debilidades del proyecto para recomendar acciones correctivas que permitan optimizar los resultados esperados.

### **Protocolos de comunicación en IoT**

Según (Semle, 2016, págs. 33 - 34) para el Internet de las cosas (IoT), existen muchos protocolos de comunicación bastante importantes para la interconexión entre dispositivos y múltiples sistemas. Existen tres principales protocolos que destacan entre muchos otros, estos son: (MQTT), (CoAP) y (HTTP).

El protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) funciona bajo el principio mensajería ligera que se utiliza comúnmente para la comunicación entre dispositivos IoT y servidores o servicios en la nube, este es muy eficiente en el uso de ancho de banda y además requiere muy poco consumo de energía, el protocolo Constrained Application Protocol (CoAP) es un protocolo diseñado específicamente para dispositivos y aplicaciones IoT con recursos limitados, en los que se encuentran una gran cantidad de sensores y actuadores, que utilizan redes inalámbricas de baja potencia. Por último, Hypertext Transfer Protocol (HTTP) es un protocolo de

comunicación muy utilizado en los sitios web, pero también puede ser implementado y utilizado en dispositivos IoT para acceder a diferentes servicios y aplicaciones que se encuentren en Internet.

### **Marco legal**

Las siguientes leyes, artículos y resoluciones de alguna forma tienen relación con el proyecto realizado.

#### **Ley 1978 de 2019**

Esta ley tiene como objetivo principal disminuir la incertidumbre legal y de alguna forma simplificar y profundizar en el conocimiento de la brecha digital, alineando los agentes y autoridades del sector de las Tecnologías de la información y las Comunicaciones (TIC) (Congreso de la republica, 2019, pág. 1).

Esta ley relaciona todos los aspectos de neutralidad en las redes, la protección y seguridad de los datos y la forma de operación de los sistemas que se encarguen de transmitir algún tipo de información, estableciendo diferentes pautas que aseguran la operación eficiente de los sistemas de transmisión.

#### **Ley 1341 de 2009**

Esta dice que todas las redes y los servicios que se prestan con ellas son un servicio público y están bajo el control total del estado, siendo así esta permite establecer un marco normativo para formular políticas públicas que dirigen el campo de las TIC, en aspectos como, Derechos de los usuarios, calidad, eficiencia y la correcta prestación de los servicios (Congreso de la republica, 2009, págs. 1 - 2).

Esta normativa establece parámetros para preservar la integridad de los datos transmitidos, lo cual garantiza que cualquier información enviada a través de las TIC cumpla con ciertos estándares de calidad y posibles medidas de redundancia durante su transmisión, además del aprovechamiento efectivo del espectro, así lo sustentan los siguientes dos artículos.

#### ***Artículo 4***

Este establece y garantiza el uso adecuado del espectro radioeléctrico dentro de Colombia, conservando y maximizando el bienestar de la sociedad y de alguna forma aprovechando al máximo este recurso limitado (Congreso de la republica, 2009, págs. 3 - 4).

#### ***Artículo 11***

Dice que el acceso al espectro radioeléctrico requiere un permiso previo otorgado por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), así mismo, el

Gobierno nacional establece algunas de las bandas de uso libre dentro del país de acuerdo con las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) (Congreso de la republica, 2009, págs. 6 - 7).

#### **Resolución 647 de 2021**

Por medio de esta se permite aumentar la potencia de irradiación a las frecuencias de servicios telemétricos y de telecontrol inalámbrico a 10mW por cada 50 Hz, entre estas esta la banda de 433 MHz (LoRa) que es de uso libre (Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones de Colombia, 2021, págs. 2 - 3).

Esta resolución permite evidenciar distintos parámetros con lo que se relación la irradiación en la banda de 433 MHz y de alguna forma dar un perspectiva mas clara sobre como se deben operar los dispositivos que se encargarán de intercambiar información en esta porción de espectro.

#### **Decreto 195 de 2008**

En este se establecen las limitaciones de exposición de las personas a los campos electromagnéticos, esta limitación permite una exposición continua entre las bandas de frecuencia de 9 KHz a 300 GHz (Gallego, Torres, & Agudelo, 2014, pág. 23).

Con este decreto se establecieron lineamientos con los cuales se puedo desarrollar de mejor manera el proyecto ya que refleja de alguna manera como es el comportamiento de las ondas electromagnéticas con los cuerpos.

#### **Ley 99 de 1993**

Esta establece políticas ambientales a nivel nacional y sugiere tener en cuenta los elementos de precaución, al irradiar elementos naturales (Ambiente, 1993, pág. 1), los siguientes son los principales aspectos de precaución ambiental:

- Daño irreversible.
- Que ponga en peligro futuro los elementos naturales:
- Que exista evidencia científica de peligro a la exposición.
- Que las autoridades demuestren degradación ambiental.

#### **Ley 102 de 2013**

Esta dictamina los lineamientos básicos para evitar la contaminación electromagnética en el país conservando los aspectos básicos de salud en la población colombiana (Congreso de Colombia, 2013, pág. 1).

### ***Artículo 3***

Esta establece que el Ministerio de Tecnologías de la información y las comunicaciones (MinTIC) junto al ministerio de ambiente y protección social deben corregir y mantener estándares de radiación no ionizante de acuerdo con las investigaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), continuamente a esto se realizaran revisiones periódicas que permitan ajustar y tomar medidas para disminuir el peligro de exposición a los campos electromagnéticos (Congreso de Colombia, 2013, págs. 2 - 3).

### **Resolución 711 de 2016**

Esta establece las frecuencias de uso libre, entre estas se encuentran las bandas de 915 a 925 MHz, 2.4 GHz y 433 MHz que permiten prestar los servicios de LoRa, Sigfox, wifi, ZigBee y Z-Wave (Agencia Nacional del Espectro, 2016, pág. 1).

Las anteriores son algunas de las leyes y resoluciones que más importancia tiene para el desarrollo del proyecto, ya que describen las limitaciones y algunos aspectos básicos que se deben tener en cuenta al momento de querer irradiar con frecuencias LoRa de 433 MHz y wifi de 2.4 GHz, además se muestra las restricciones legales que hay en el país al querer radiar elementos naturales, esto para evitar algún tipo de daño grave o irreversible al cultivo.

## **Metodología**

El método mixto es un tipo de metodología la cual se basa en la unión de varios métodos de investigación, generalmente la cuantitativa y la cualitativa, en esta se unen técnicas numéricas y conceptuales que permiten dar la validez a los resultados obtenidos, la combinación sistemática de las investigaciones cuantitativas y cualitativas da equilibrio al desarrollo de toda la investigación, esto en aspectos como los procedimientos matemáticos realizados hasta la conceptualización general de todos los dispositivos que se utilizarán para la realización del mismo cumpliendo las limitaciones y objetivos propuestos (Moscoso, 2017, págs. 634 - 637 ).

En esta investigación, se aplicó una metodología mixta para garantizar la precisión y calidad en los datos e información recopilada. Para ello, se combinaron tanto la recolección de datos cuantitativos como cualitativos. En la parte cuantitativa, se tuvieron en cuenta las características técnicas de cada uno de los elementos que se utilizarían en el desarrollo del proyecto, como los sensores y dispositivos de irradiación, se analizaron factores como el precio, la precisión, el rango de operación, la resolución y otras características técnicas relevantes para llevar a cabo el proyecto, además, se examinaron diversas fichas técnicas que permitieran comprender y comparar la información de manera clara, también se realizaron mediciones que permitieran confirmar los valores investigados.

En el análisis cualitativo, se evaluó la compatibilidad entre los dispositivos que controlaban cada uno de los sistemas. Se tuvieron en cuenta las características de cada uno de los pines, al igual que los tipos de conexiones requeridas por cada dispositivo y el tipo de circuito que integraría todo. La información recopilada se resumió en varios mapas, diagramas, tablas, entre otros, que permitían identificar las características y el desempeño de cada uno de los elementos utilizados. También, se realizó una investigación acerca de las características primordiales de plataformas capaces de almacenar y monitorear las diferentes variables propuestas, para ello, se recopiló información de diversas fuentes, incluyendo foros oficiales, sitios web y otros medios de información que reflejaran el comportamiento de estas plataformas. Es así, como el análisis se enfocó en establecer una relación entre la información cuantitativa y cualitativa, para poder establecer una metodología coherente y efectiva.

## Administración del proyecto

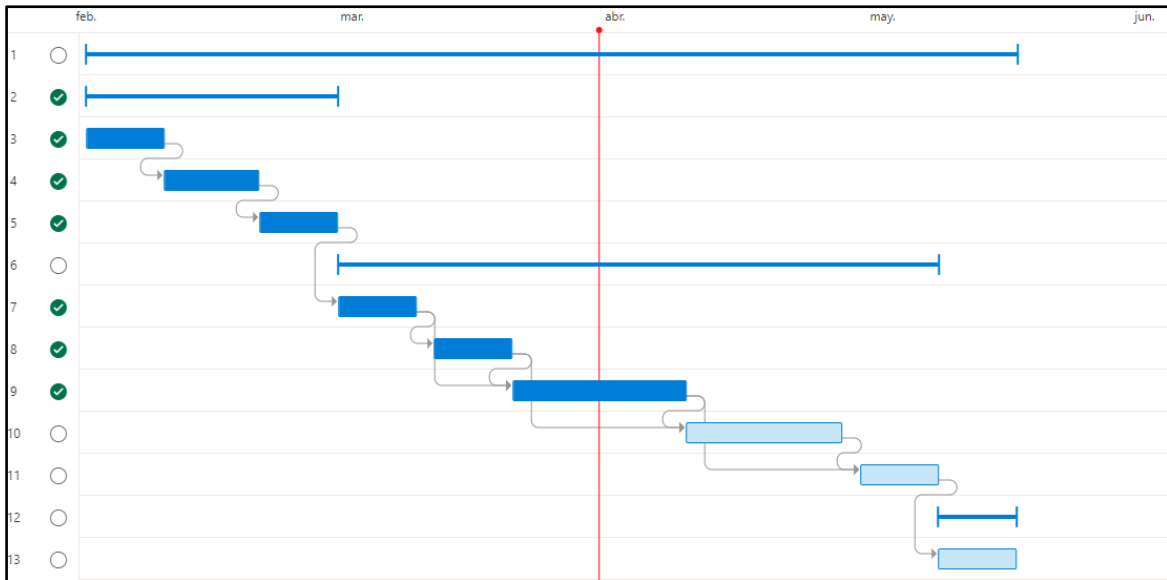
### Cronograma

Tabla 3. Cronograma de actividades

Número de tarea	Tarea	Duración	Dependencia
<b>1</b>	<b>Desarrollo general del proyecto</b>	<b>84 días</b>	
<b>2</b>	<b>Investigaciones preliminares</b>	<b>21 días</b>	
3	Identificar los conceptos más importantes para el desarrollo del proyecto.	7 días	
4	Investigar qué tipo de componentes son necesarios para realizar el montaje de irradiación LoRa y wifi.	7 días	3
5	Reconocer las características de los sensores y elementos que puedan ser implementados para el monitoreo del cultivo.	7 días	4
<b>6</b>	<b>Desarrollo del proyecto</b>	<b>49 días</b>	
7	Describir cada uno de los dispositivos que cumplan con las características para desarrollar el proyecto.	7 días	5
8	Caracterizar y calibrar cada uno de los sensores que fueron seleccionados para el proyecto.	7 días	7
9	Plantear el circuito que permita la comunicación entre unidades de control, sensores y transceptores.	14 días	7, 8
10	Realizar el código de programación que permita a cada uno de los dispositivos irradiar en las frecuencias seleccionadas y obtener de manera correcta las variables necesarias.	14 días	8, 9
11	Implementar una herramienta IoT que permita manipular, monitorear las variables y crear las alarmas.	7 días	9, 10
<b>12</b>	<b>Pruebas experimentales del proyecto</b>	<b>14 días</b>	
13	Realización de pruebas de todas las partes del sistema (irradiación, censado y monitoreo) para verificar el cumplimiento de los objetivos del proyecto.	14 días	11

*Nota.* Autoría propia.





**Figura 3.** Escala de tiempo de las actividades del cronograma en Project. (Autoría propia).

### Presupuesto

Tabla 4. Costos subsistema de irradiación LoRa.

Referencia	Cantidad	Precios Uni.	Precio total
Módulo Transceptor LoRa SX1278 Ra-02 433 MHz	2	\$ 29.000	\$ 58.000
Antena de resorte simple - 433MHz LoRa	2	\$ 3.500	\$ 7.000
<b>Total</b>			\$ 65.000

Nota. Autoría propia.

Tabla 5. Costos subsistema de irradiación wifi de 2.4 GHz

Referencia	Cantidad	Precios Uni.	Precio total
Módulo wifi NodeMCU V3 ESP8266 Esp12e wifi CH340	2	\$ 30.000	\$ 60.000
Cable micro USB Genérico	2	\$ 4.800	\$ 9.600
<b>Total</b>			\$ 69.600

Nota. Autoría propia.

Tabla 6. Costos subsistema de sensores

Referencia	Cantidad	Precios Uni.	Precio total
Arduino Uno R3	1	\$ 63.000	\$ 63.000
Sensor de humedad de suelo Anticorrosivo – Higrómetro	2	\$ 14.900	\$ 29.800
Sensor de temperatura DS18B20 tipo sonda	2	\$ 9.300	\$ 18.600
Sensor de luz ambiente TEMT6000	2	\$ 10.000	\$ 20.000
<b>Total</b>			\$ 131.400

Nota. Autoría propia.

Tabla 7. Recurso humano

Referencia	Cantidad (Meses)	Precios Uni.	Precio total
Recursos 1	3	\$ 1.300.606	\$ 3.901.818
Recursos 2	3	\$ 1.300.606	\$ 3.901.818
<b>Total</b>			\$ 7.803.636

Nota. Autoría propia.

Tabla 8. Software

Referencia	Cantidad	Precios Uni.	Precio total
IDE Arduino	1	\$ 0	\$ 0
Plataforma de monitoreo	1	\$ 0	\$ 0
Base de datos (Nube)	1	\$ 0	\$ 0
Licencia MATLAB	1	\$ 248.105	\$ 248.105
Licencia Proteus	1	\$ 67.700	\$ 67.700
Licencia XIRIO	1	\$ 0	\$ 0
<b>Total</b>			\$ 315.805

Nota. Autoría propia.

Tabla 9. Otros costos del proyecto

Referencia	Cantidad	Precios Uni.	Precio total
Computador portátil	1	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000
Multímetro uni-t ut33c	1	\$ 74.000	\$ 74.000
40 cables DuPont H – H 20cm	1	\$ 9.200	\$ 9.200
40 cables DuPont M – M 20cm	2	\$ 10.000	\$ 20.000
Fuente de alimentación 3.3 a 5 V	2	\$ 4.800	\$ 9.600
Kit termoencogibles	1	\$ 16.000	\$ 16.000
Adaptador de voltaje 12V 1ª Jack 2.1	1	\$ 19.000	\$ 19.000
Protoboard Adhesiva MB102 830 P.	2	\$ 13.000	\$ 26.000
PCB	1	\$ 85.000	\$ 85.000
<b>Total</b>			\$ 2.258.800

Nota. Autoría propia.

Tabla 10. Costo total del proyecto

Descripción	Total
Subsistema de irradiación LoRa	\$ 65.000
Subsistema de irradiación wifi	\$ 69.600
Subsistema de sensores	\$ 131.400
Recursos humanos	\$ 7.803.636
Software	\$ 315.805
Otros	\$ 2.258.800
<b>Costo total del proyecto</b>	\$ 10.644.241

Nota. Autoría propia.

## **Sistema de irradiación Lora y wifi**

Para desarrollar el sistema de irradiación de las dos tecnologías propuestas, se llevó a cabo el análisis de varios dispositivos que cumplieran con los parámetros iniciales considerados para el desarrollo del proyecto. Se realizó un estudio previo de las particularidades técnicas y de funcionamiento de cada módulo, con el objetivo de identificar su posible aporte y adaptación al proyecto.

### **Subsistema de irradiación LoRa**

En primer lugar, se realizó el análisis e investigación sobre las particularidades de la frecuencia de 433 MHz, en la cual opera la tecnología LoRa. Los dispositivos que trabajan en esta frecuencia son capaces de establecer conexiones a largas distancias y son altamente funcionales y fiables en proyectos de IoT que involucran una cantidad robusta de sensores y que requieren un bajo consumo eléctrico y poco ancho de banda. Si bien la frecuencia de 433 MHz es una banda de operación libre y sin licencia (ISM), es importante considerar las restricciones y regulaciones que se aplican en el país para su operación, estas regulaciones pueden incluir limitaciones en el ancho de banda o las potencias de transmisión permitidas, por este motivo es importante conocer estas normativas para así evitar posibles sanciones o interferencias con otros dispositivos.

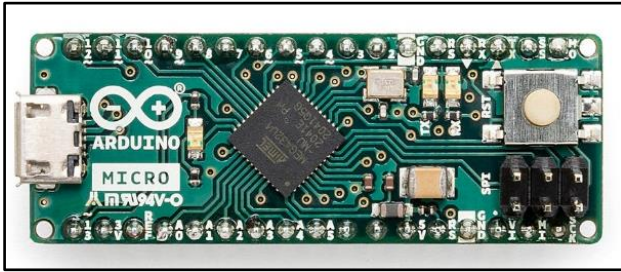
Durante la elección del dispositivo que se utilizó, se consideró cuidadosamente el voltaje y la corriente de funcionamiento, esto para garantizar la eficiencia energética idónea del dispositivo que provee la alimentación de este subsistema. Los transceptores LoRa cuentan con una circuitería compartida y optimizada para la transmisión y recepción de datos, por este motivo fueron objeto de estudio en el proyecto. Este tipo de dispositivos permiten una irradiación constante y controlada del cultivo propuesto, cumpliendo con los límites de tiempo y potencia esperados. Además, estos dispositivos son altamente adaptables a diversos microprocesadores que cuenten con la distribución de pines necesaria para su alimentación y comunicación.

### **Microprocesadores propuestos para el control del sistema LoRa.**

#### ***Arduino micro.***

Esta tarjeta de desarrollo, Figura 4, proporciona una funcionalidad estándar para las placas que emplean el microcontrolador Atmega32U4 de 16 MHz. Ofrece 32 KB de memoria flash y aproximadamente 2.5 KB de memoria estática de acceso aleatorio (SRAM), y requiere una diferencia de potencial de 5V para su correcto funcionamiento. Además, cuenta con una conexión micro USB para dispositivos externos y dispone de 20 pines digitales programables de entrada y

salida (I/O), así como un cabezal de reprogramación ISP de 6 pines, esto según (Torrente, 2013, págs. 114 - 115).

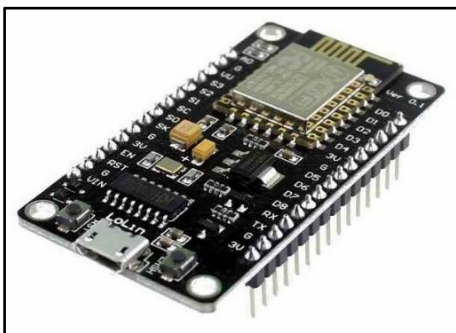


**Figura 4.** Arduino micro (Arduino Store, 2023).

### ***NodeMCU V3 ESP8266.***

Esta placa de desarrollo se basa en el microcontrolador ESP8266, el cual cuenta con un procesador de 32 bits que funciona a una frecuencia máxima de 80 MHz. La placa está especialmente dirigida a proyectos relacionados con IoT debido a que tiene integrado un módulo wifi que permite la conectividad inalámbrica a internet, facilitando la comunicación con una gran cantidad de dispositivos en la red.

La placa cuenta con una memoria RAM de 80 KB para el almacenamiento momentáneo de datos y una memoria flash integrada de 4 MB, lo que permite almacenar una gran cantidad de código y parámetros de configuración para su funcionamiento. El voltaje de operación del dispositivo es de 3.3V y la corriente que puede entregar a través del pin de 3.3V es de aproximadamente 800 mA. En cuanto al pin de 5V, la corriente dependerá de la fuente de alimentación que se emplee. Además, la placa tiene once pines de propósito general (GPIO), uno analógico y dos para establecer comunicación serial con otros dispositivos, este microcontrolador es fácil de programar ya que aprovecha el lenguaje de programación de Arduino y también con la posibilidad de modificar su firmware preinstalado, todo esto mediante su interfaz de conexión USB micro como se ve en la Figura 5, (Marino Dodge, 2018, págs. 51 - 71).

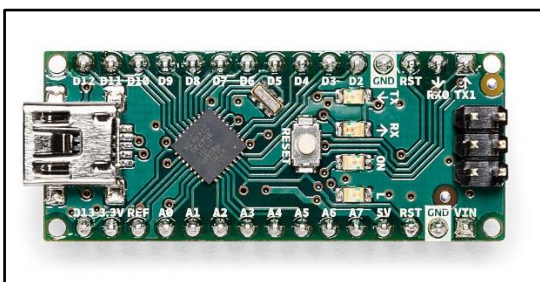


**Figura 5.** NodeMCU V3 Esp8266 - LoLin (Ja-Bots, 2023).

### **Arduino Nano.**

Para (AG electronica S.A, 2019) esta placa de desarrollo es compacta utiliza el microcontrolador Atmega328P y presenta las siguientes características técnicas: permite voltajes de entrada de entre 7 y 12 V, aunque para su funcionamiento basta con 5V; su corriente de entrada típica en estado de funcionamiento normal es de 40 mA, mientras que la de salida es de 20 mA; cuenta con una memoria flash de 32 KB contenida dentro del microprocesador, además de 2 KB de memoria SRAM y 1 KB de memoria EEPROM. El reloj de la placa funciona a una frecuencia de 16 MHz, y dispone de catorce pines digitales programables de entrada y salida, ocho pines analógicos y seis para comunicación serial. Su interfaz para conexiones externas es mediante mini USB.

Gracias a su tamaño compacto Figura 6, este dispositivo puede adaptarse a proyectos con límites de espacio reducidos. Además, su bajo consumo energético y la posibilidad de escalamiento horizontal la hacen una opción atractiva para diferentes aplicaciones IoT (págs. 1 - 6).



**Figura 6.** Arduino Nano (Arduino Store, 2023)

En la Tabla 11 se resumen las características primordiales las cuales se analizaron para escoger el microprocesador que se encargará de controlar el subsistema de irradiación LoRa.

Tabla 11. Caracterización de los microprocesadores

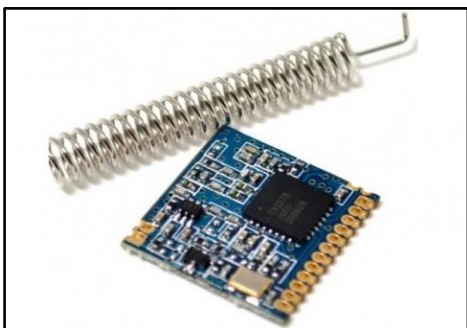
<b>Característica</b>	<b>Arduino Micro</b>	<b>NodeMCU V3</b>	<b>Arduino Nano</b>
Microcontrolador	Atmega32U4	ESP8266	ATmega328P
Voltaje de operación	5V	3.3V	5V
Frecuencia del reloj	16 MHz	80 MHz	16 MHz
Arquitectura	8 bits	32 bits	8 bits
Modos de comunicación	UART, SPI, I2C	wifi, UART, SPI, I2C	UART, SPI, I2C
Pines análogos	12	1	8
Pines digitales	20	11	14
Corrientes máximas (pin 5V)	500 mA	Depende de la fuente	800 mA

Nota. Autoría propia.

## **Módulos transceptores de irradiación LoRa estudiados.**

### ***Modulo Transceptor XL1278-SMT.***

Los dispositivos de este tipo que operan en la frecuencia de 433 MHz permiten una dispersión de ondas a larga distancia, lo que se traduce en una cobertura amplia y constante Figura 7. Además, tienen una gran resistencia a las interferencias y un bajo gasto eléctrico, con un consumo de 10 a 12 mA en modo de reposo. Durante la transmisión de datos consume alrededor de 120 mA, mientras que, en la recepción, el dispositivo tiene una sensibilidad de -148 dBm con una corriente de 12 mA, lo que representa el factor de esparcimiento más alto con un valor de SF12, este representa la cantidad de símbolos utilizados para transmitir los datos, un valor alto de esparcimiento implica una mayor cantidad de símbolos y, por lo tanto, la posibilidad de manejar mayor resolución para algunos sensores. Sin embargo, puede resultar en una velocidad de transmisión más lenta debido a la necesidad de enviar una mayor combinación de bits. La tasa efectiva de bits o velocidad de transferencia de datos varía entre 0.018 y 37.5 kbps, y puede manejar anchos de banda de hasta 500 KHz, aunque normalmente funciona con un ancho de banda de 125 KHz. Es importante tener en cuenta que su voltaje máximo de operación es de 3.3V y su temperatura adecuada de funcionamiento es de 25°C, esto según la ficha técnica expuesta por (Semtech, 2015, págs. 1 - 20).



**Figura 7.** Transceptor XL1278 – SMT (DNA Tech, 2023).

### ***Módulo Transceptor RFM96W.***

El módulo RFM96W es capaz de irradiar en un rango de frecuencias de 433 a 470 MHz, lo que le permite aprovechar longitudes de onda amplias y lograr una gran cobertura con un bajo consumo de energía. Gracias a su alta sensibilidad de recepción de -144 dBm, este módulo Figura 8 es capaz de transmitir información a distancias de hasta 5 km. El consumo de energía del módulo es bajo, con un consumo típico de 15.5 mA durante la transmisión y 15.2 mA en modo de recepción, su corriente en reposo es bastante baja alrededor de los 15 uA, por lo que el consumo de energía es

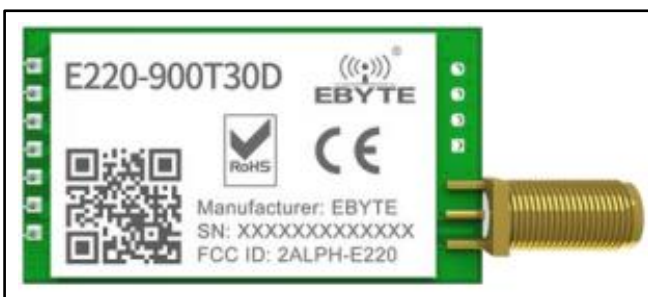
constante y depende de la forma en que se haya programado para transmitir o recibir datos. Este módulo ofrece múltiples opciones de comunicación, como la comunicación punto a punto o multipunto, y puede manejar anchos de banda de 62.5 a 500 KHz. Su voltaje de operación óptimo es de 3.3 V, estas características son descritas por (Hoperf, 2019, págs. 1 - 16).



**Figura 8.** Transceptor RFM96W (Hoperf, 2019).

#### ***Módulo Transceptor LoRa E220-900T30D.***

Según (Ebyte, 2020), este dispositivo es un módulo que posibilita la comunicación inalámbrica mediante la tecnología LoRa, que permite la transmisión de datos a larga distancia con un bajo consumo energético y baja potencia para el envío de paquetes, este dispositivo tiene la capacidad de suspender casi por completo su operación cuando está en reposo, lo que se traduce en un consumo eléctrico de tan solo 5uA. Durante la transmisión, el dispositivo consume aproximadamente 620 mA, mientras que en la recepción el consumo es de alrededor de 17.2 mA. El módulo Figura 9 opera en un rango de frecuencias de 870 a 915 MHz y puede ajustar su potencia de transmisión hasta un límite máximo de 30 dBm. Por su excelente composición electrónica, el módulo puede aprovechar la potencia para establecer comunicaciones de hasta 10 km en escenarios optimizados y opera de forma óptima con una fuente de alimentación de 5V. Además, el dispositivo tiene una velocidad posible de transmisión de datos de 2,4 a 62,5 Kbps (págs. 5 - 8).



**Figura 9.** Transceptor LoRa E220-900T30D (Ebyte, 2020).

En la Tabla 12 se muestran las características más relevantes de los módulos transceptores de irradiación LoRa, que permitió identificar cuál de estos se adapta mejor al microprocesador escogido.

Tabla 12. Principales características de los modulo LoRa

<b>Característica</b>	<b>XL1278-SMT</b>	<b>RFM96W</b>	<b>E220-900T30D</b>
<b>Voltaje de alimentación [V]</b>	3.3	3.3	5
<b>Corriente Tx [mA]</b>	120	15.5	620
<b>Corriente Rx [mA]</b>	12	15.2	17.2
<b>Corriente Reposo [mA]</b>	10	0.0015	0,005
<b>Frecuencia [MHz]</b>	433	433	870 a 915
<b>Máxima velocidad de transmisión de datos [Kbps]</b>	64	37.5	62.5

*Nota.* Autoría propia.

### **Montaje del subsistema de irradiación LoRa.**

En este punto se compararon todos los módulos y microcontroladores estudiados, para escoger los de mejores características y que se adapten a los objetivos del proyecto, para ello se analizaron las principales propiedades de cada dispositivo y se encogieron los siguientes:

Considerando las características expuestas, se dio por hecho que el microprocesador que se utilizaría es el NodeMCU V3 - ESP8266. Esto se debe a varios aspectos del dispositivo que se detallan a continuación:

- El NodeMCU V3 brinda la posibilidad de utilizarlo como irradiador wifi para el segundo subsistema de irradiación del proyecto, esto es viable gracias a los diversos modos de comunicación con los que cuenta el dispositivo;
- Cuenta con amplias memorias que permiten el manejo de grandes cantidades de datos para su posterior transmisión o recepción;
- En comparación a los demás dispositivos, el NodeMCU V3 requiere un bajo voltaje de alimentación para su funcionamiento;
- La arquitectura del NodeMCU V3 le permite contar con una alta velocidad de reloj y por lo tanto gran capacidad de procesamiento de datos.

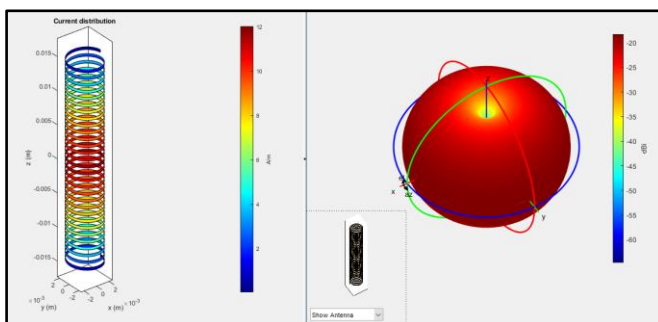
En cuanto a la distribución de pines, es más que para establecer conexiones adecuadas de transferencia y recepción de datos entre el microcontrolador y el módulo LoRa. Es importante aclarar que el microprocesador no será el encargado directo de recibir los datos de los sensores que se utilizaron más adelante en el proyecto para el censado de las variables.



Para los módulos de irradiación LoRa, después de revisar la información disponible, se ha determinado que el transceptor XL1278-SMT es el módulo más adecuado tras cumplir con las características planteadas para llevar a cabo el proyecto. Este módulo puede funcionar con los voltajes y corrientes que son proporcionados por el microprocesador previamente seleccionado. Además, opera en la frecuencia de 433 MHz, que es una de las frecuencias comúnmente utilizadas para la transmisión y posterior monitoreo de variables de proyectos de IoT. El módulo también es capaz de transmitir una alta tasa de bits por segundo lo que permite la transferencia de una gran cantidad de datos sin tener algún tipo de problema. Por último, la distribución de los pines en el transceptor se ajusta perfectamente a la disponibilidad de entradas del NodeMCU – ESP8266 seleccionado.

Siendo así, se les colocó una antena de resorte simple a ambos módulos, la cual es compacta y mide aproximadamente 40 mm de largo. Esta antena proporciona una ganancia de hasta 2.5 dBi y tiene una impedancia de solo  $50 \Omega$  lo que permite una funcionalidad optimizada con transceptores que transmitan en las frecuencias de 400 a 450 MHz. Este tipo de antenas esta polarizada verticalmente lo que refiere a que su campo eléctrico se propaga por el espacio de manera vertical teniendo de referencia al suelo, por último, el patrón de radiación es omnidireccional lo que permite que otros dispositivos se comuniquen desde cualquier dirección.

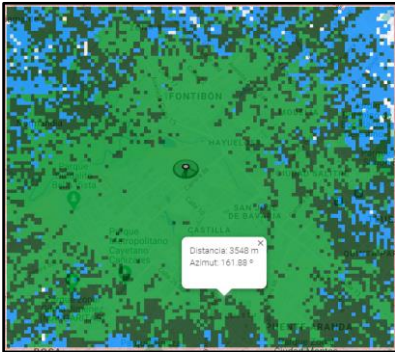
La Figura 10 muestra las características más importantes de la antena utilizada, lo que permite visualizar su comportamiento en cuanto a su distribución eléctrica, las ganancias y la potencia. Con esta información, fue posible concebir una idea del comportamiento de irradiación del dispositivo, todo ello basado en las especificaciones establecidas en el datasheet.



**Figura 10.** Distribución eléctrica y diagrama de irradiación de la antena, simulados en MATLAB (Autoría propia).

Teniendo en cuenta las características de irradiación del dispositivo, las ganancias de la antena, y de acuerdo con la información expuesta en la ficha técnica del dispositivo, se realizó una

simulación del alcance de irradiación ideal, es decir, sin ningún tipo de pérdida calculada. La simulación arrojó una cobertura aproximada de 3548 metros con una potencia en el rango de 0 y -117 dBm.



**Figura 11.** Cobertura en condiciones ideales del transmisor LoRa (Autoría propia).

### ***Conexiones físicas del módulo LoRa y el NodeMCU.***

En la Tabla 13 y Tabla 14 se muestra la forma en la que se conectaron los microprocesadores NodeMCU – ESP8266 y los módulos LoRa, tanto en el transmisor como en el receptor. Se tuvo en cuenta la funcionalidad específica de cada uno de los pines del microprocesador y los del módulo LoRa.

Tabla 13. Distribución de pines entre el transmisor LoRa y el microcontrolador

<b>Pines NodeMCU</b>	<b>Pines LX1278</b>
D0	RST
D5 (CLK)	SCK
D6 (MISO)	MISO
D7 (MOSI)	MOSI
D8 (HCS)	NSS
3.3V	VCC
GND	GND

*Nota.* Autoría propia.

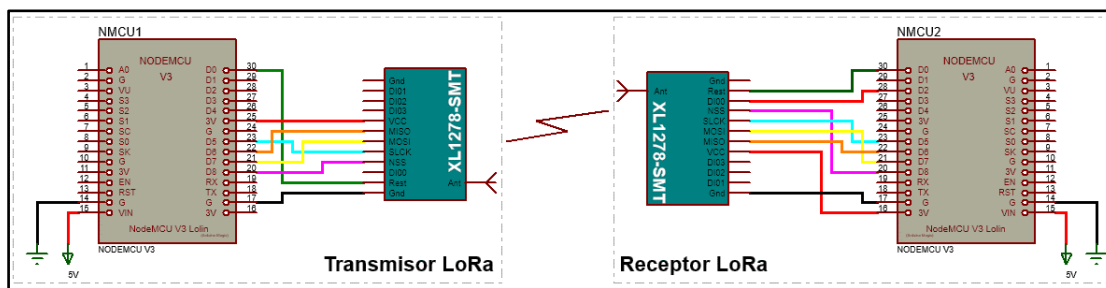
Tabla 14. Distribución de pines entre el receptor LoRa y el microcontrolador

<b>Pines NodeMCU</b>	<b>Pines LX1278</b>
D0	RST
D2	DIO0
D5 (CLK)	SCK
D6 (MISO)	MISO
D7 (MOSI)	MOSI
D8 (HCS)	NSS
3.3V	VCC
GND	GND

*Nota.* Autoría propia.

La funcionalidad de cada una de estas conexiones se describe a continuación, el pin MOSI recibe datos los cuales el microcontrolador envía al módulo mediante la comunicación en serie de la interfaz para periféricos (SPI), por otro lado, el pin MISO tiene la función opuesta, ya que utiliza la interfaz SPI para enviar datos desde el módulo al microcontrolador para su posterior interpretación. El pin SCK se utiliza para sincronizar la transferencia de datos mediante un reloj de la interfaz, mientras que el pin NSS se encarga de seleccionar el esclavo en la comunicación y habilitar el módulo de comunicación. Finalmente, el pin DIO0 indica al microcontrolador si hay o no información disponible para ser enviada o recibida, en resumen, estos pines tienen diferentes funciones en la comunicación entre el microcontrolador y el módulo LoRa que utiliza el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface) para su funcionamiento, lo que le permite transferir hasta 60 Mbps en modo full dúplex, gracias a que cuenta con canales dedicados para cada una de estas funciones y que son controlados de manera síncrona por un reloj.

En la Figura 12 se muestra la conexión real propuesta entre los módulos LoRa y los microprocesadores para la irradiación del cultivo. Esta configuración ha sido organizada de la mejor manera para permitir una mayor disponibilidad de pines para futuras conexiones de otros periféricos a los dispositivos que controlan el sistema de irradiación.



**Figura 12.** Circuito propuesto para el sistema de irradiación LoRa del cultivo (Autoría propia).

### ***Forma de comunicación inalámbrica entre los transceptores LoRa.***

En este punto, se analizó el comportamiento de los módulos seleccionados para la transmisión y recepción de información. Se profundizó en la forma en que cada dispositivo utiliza sus propiedades para generar las señales y propagarlas en el espacio, además de calcular algunas variables importantes para identificar las capacidades del dispositivo.

Según (Manrique Latorre, Buitrago Márquez, & Hernandez Guitierrez, 2019, págs. 12 - 13) el empaquetado de los datos que transmiten los módulos LoRa (Capa física) consta de cuatro partes fundamentales que se describen a continuación:

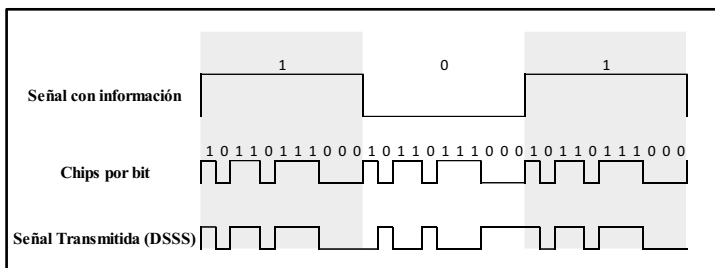
- **Preámbulo (2 bytes):** Esta sección del paquete se encarga de la sincronización del dispositivo de transmisión y recepción. La sincronización se realiza mediante la transmisión de hasta 16 bits, cuyo valor es programable y puede variar según la configuración. Inicialmente, se envían y reciben "chirridos de subida" o upchirp que indican que los dispositivos están disponibles para establecer la comunicación, Seguido a esto se transmite una serie de pulsos de sincronización (palabra de sincronización) que sirven como identificador para establecer la comunicación. Por último, se cierra el paquete con "chirridos de bajada" o downchirp con lo cual se establece la comunicación entre los dispositivos en la red. Una vez establecida la comunicación, se espera a las indicaciones de los siguientes paquetes.
- **PHY Header (4 bytes):** Este apartado tiene información importante para el acceso a los protocolos de LoRaWAN, ancho de banda, SF, entre otros.
- **CRC (2 bytes):** Este incluye un código para la corrección de errores al establecer el enlace entre los dispositivos.
- **Carga útil (Hasta 255 bytes):** En esta última se transporta la cantidad de bits programada (resolución) que represente los datos de la lectura de los sensores con espacio hasta de 250 bytes, de este 1 byte en la dirección MAC del dispositivo de destino y 4 Bytes es espacio de integridad del paquete.

Preámbulo	PHY Header	CRC	Carga util
16 bits	Info. Lora WAN (32 bits)	Correccion de datos (16 bits)	Hasta 255 bits (Varia de acuerdo a la resolucion de lectura)

**Figura 13.** Estructura de un paquete transmitido en un enlace LoRa (Autoría propia).

Según (SEMTECH, 2015) los transceptores XL1278-SMT utilizan una técnica de espectro ensanchado de chirp (CSS) en su capa física, la cual permite una sincronización más eficiente y consume menos energía que la sincronización mediante relojes utilizada en otro tipo de conexiones inalámbricas. Esta técnica se basa en el uso de chirridos que implican el cambio de varias frecuencias de acuerdo con el bit del preámbulo que se está enviando. Además, la modulación de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS), que está basada en la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK), es esencial para mejorar la seguridad en el intercambio de información, esta técnica utiliza varias frecuencias para la transmisión de cada bit, evitando la interceptación y fácil demodulación de la señal que se puede llegar a presentar en FSK.

Luego de este proceso se utiliza la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) para generar la señal final a transmitir que represente el dato o lectura (en este caso la carga útil del paquete), dicha técnica multiplica una determinada cantidad de bits generados de manera más rápida o con mayor frecuencia que la señal de datos, de esto se encarga el reloj del módulo y se hace individualmente para cada bit de información que se desea enviar, al multiplicar esta secuencia de bits o “Chips” con la señal de información se genera una señal mucho robusta, segura y óptima para la transmisión, teniendo en cuenta los bits de inicio y fin de la secuencia que indican una comunicación asíncrona (págs. 30 - 32), esto se puede evidenciar en la Figura 14.



**Figura 14.** Forma de generación de la señal a enviar por el transmisor LoRa (Autoría propia).

Esta señal en banda base se utiliza por el dispositivo transmisor LoRa para enviar información a través del espacio y con la frecuencia asignada de espectro (433 MHz). Una vez transmitida y recibida, el receptor utiliza la técnica de espectro ensanchado directo (DSSS) para demodular y descomprimir la señal y obtener los bits que representan la información original enviada. Para ello, se emplea el mismo tren de "chips" que utilizó el transmisor, pero en sentido inverso.

Posteriormente, los bits obtenidos se transforman al formato hexadecimal para que puedan ser interpretados de manera más sencilla por las máquinas, no obstante, existen funciones de programación que permiten obtener directamente los datos en formato decimal.

Teniendo en cuenta los parámetros necesarios para la transmisión de una trama LoRa, es importante considerar la cantidad de bits de cada uno de los paquetes transmitidos. Teniendo en cuenta que 8 bytes se destinan a la sincronización, direccionamiento y otros parámetros necesarios para establecer una conexión e intercambio de información precisa entre los dos dispositivos. De esta forma se calculó el peso total de la trama, incluyendo los datos a transmitir, lo anterior se hizo considerando los datos tipo float e int que recibían por comunicación serial los microprocesadores que controlaban los módulos LoRa. Es importante tener en cuenta que el tamaño total de la trama puede variar según la configuración específica del dispositivo y la no inclusión de ciertos valores, en la Tabla 15 y la Tabla 16 se representa esta información.

Tabla 15. Tamaño aproximado del paquete de datos a transmitir

<b>Dato por enviar</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamaño del tipo del dato [bits]</b>	<b>Resolución del sensor [bits]</b>	<b>Tamaño total requerido [bytes]</b>
Temperatura 1	Float	32	12	4
Temperatura 2	Float	32	12	4
Humedad 1	Int	16	12	2
Humedad 2	Int	16	12	2
Iluminación 1	Int	16	10	2
Iluminación 2	Int	16	10	2
Potencia	Int	16	16	2
<b>Tamaño total de los datos (bytes)</b>				<b>18</b>

*Nota.* La tabla fue construida con los aportes de (Ruiz, 2007).

Tabla 16. Tamaño total de la trama transmitida por los módulos LoRa

<b>Tamaño total de los datos [bytes]</b>	18
<b>Tamaño características de la trama [bytes]</b>	8
<b>Tamaño total de la trama [bytes]</b>	26

*Nota.* Autoría propia.

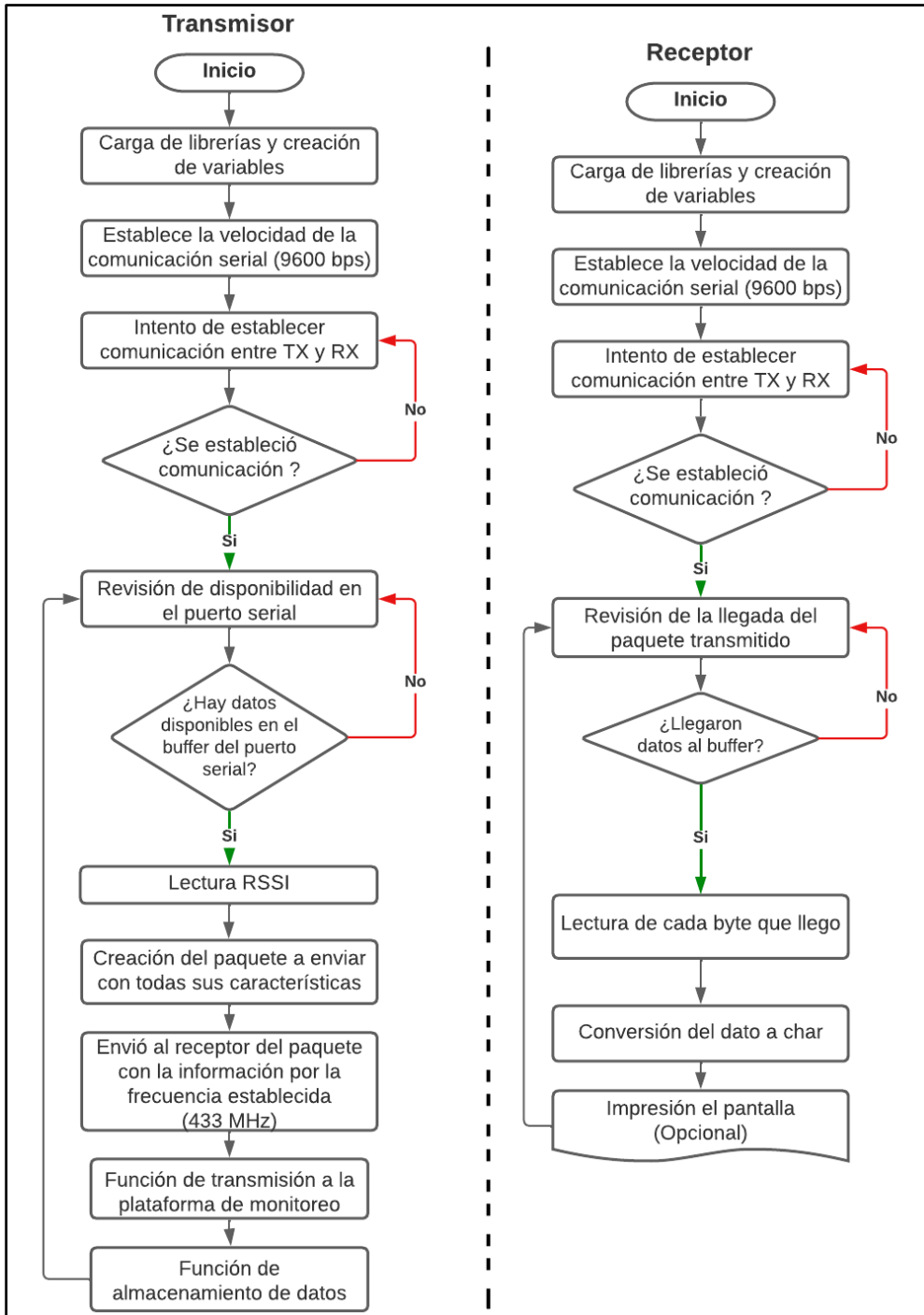
### ***Programación de los módulos LoRa.***

Teniendo en cuenta el circuito y la distribución de pines previamente mencionados, se procedió a instalar en el IDE de Arduino la librería LoRa.h. Esta biblioteca permitió integrar y programar de manera eficiente los dispositivos de irradiación LoRa XL1278 SMT con el NodeMCU-ESP8266, haciendo uso del lenguaje de programación que se utiliza en el entorno de desarrollo, C y C++.

La librería LoRa.h es esencial en este proceso, ya que permite configurar de manera sencilla los pines que se asignaron como reloj para sincronizar la comunicación entre el ESP8266 y el XL1278 y los pines MOSI y MISO necesarios para el intercambio de información según el protocolo SPI utilizado, en este punto también se hizo necesario el uso de la librería SPI.h que permitió establecer los parámetros principales para este tipo de comunicación serial. Es importante mencionar que esta configuración se ha realizado teniendo en cuenta la coincidencia y funcionalidad de los pines del NodeMCU y el módulo LoRa. De esta manera, se asegura una comunicación correcta entre ambos dispositivos.

La información transmitida entre los transceptores LoRa consta de las lecturas de los sensores, que obtuvo cada microprocesador (NodeMCU) a través de una comunicación serial con un Arduino Uno el cual envían vector que contiene cada uno de los valores. Este último dispositivo forma parte del sistema de adquisición de datos, que tiene como tarea controlar y obtener los valores de los sensores, esto se detalla y explica con más profundidad en el siguiente capítulo. En el siguiente

diagrama de flujo, Figura 15, se muestra como es el proceso que sigue el código de programación del microprocesador del transmisor y receptor LoRa para la obtención de los datos de forma serial y su posterior transmisión y recepción de manera inalámbrica, estos códigos se encuentran explicados a profundidad en el *Anexo 1*.



**Figura 15.** Diagrama de flujo de los códigos de los módulos TX y RX LoRa (Autoría propia).

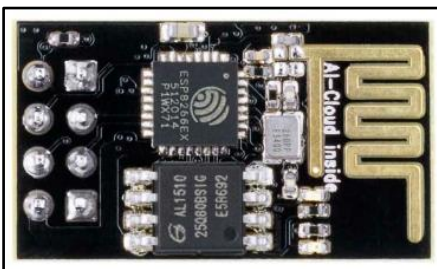
## Subsistema de irradiación wifi de 2.4 GHz

### Dispositivos de irradiación wifi de 2.4 GHz analizados

#### *Modulo wifi Esp8266.*

Según (Granados, 2017) el módulo ESP8266 es una excelente opción para proporcionar conectividad wifi en la banda de 2.4 GHz usando cualquier de los estándares 802.11 b/g/b. Con este módulo, se pueden conectar microprocesadores a redes inalámbricas sin la necesidad de cables. Además, el ESP8266 cuenta con un procesador Tensilica L106 de 32 bits con una velocidad de reloj de 80 MHz, lo que le permite realizar cálculos complejos y procesamiento de datos. El módulo también cuenta con una memoria flash de hasta 16 MB para almacenar programas o datos.

Con su interfaz UART, el ESP8266 Figura 16 se comunica fácilmente con otros dispositivos. El módulo tiene tres modos de operación: el modo estación, que permite conectarse a cualquier red wifi de 2.4 GHz; el modo punto de acceso, que permite crear una red con características específicas; y el modo mixto, que fusiona las dos funcionalidades anteriores. El ESP8266 funciona con un voltaje de 3.3V y una corriente de operación de 170 mA en cualquiera de sus tres modos activos. En modo de reposo, su consumo es menor a 1 mA, y tiene la ventaja de manejar un modo de sueño profundo o espera con un consumo por debajo de 20  $\mu A$ . El dispositivo tiene una velocidad máxima de transferencia de datos de 72.2 Mbps, aunque hay que tener en cuenta la configuración de la red y el entorno de operación. Por último, es importante destacar que este módulo es generalmente uno de los más económicos para implementar la comunicación inalámbrica en proyectos de IoT (págs. 11 - 20).



**Figura 16.** Modulo ESP8266 (ESP-01) wifi de 2.4 GHz (Ja-Bots, 2023).

#### *Modulo nRF24L01+ 2.4 GHz*

El nRF24L01+ Figura 17, es un transceptor que funciona en las bandas de 2.400 GHz y 2.525 GHz, lo que le permite alcanzar una cobertura de hasta 100 metros con línea de vista libre. Tiene una velocidad de intercambio de información que oscila entre 250 kbps y 2 Mbps y puede



conectarse con hasta 6 dispositivos con diversas topologías, en comunicación dúplex. Este dispositivo permite establecer conexiones punto a punto o con redes de múltiples nodos (Mesh).

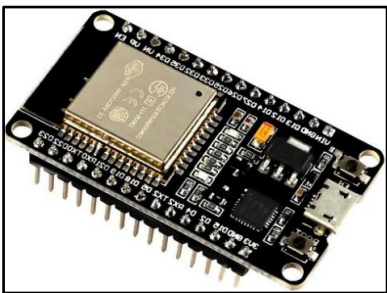
El aparato funciona con voltajes entre 3 y 3.6 V, y consume solo 4.2  $\mu$ A en su modo de espera, en transmisión, consume 115 mA, mientras que en la recepción consume 45 mA. Además, permite la transmisión de paquetes de datos de hasta 32 bytes y se pueden adaptar varios tipos de antena para mejorar su alcance, con mejoras de hasta 2 dBi, (Nodric, 2008, págs. 2 - 11).



**Figura 17.** Transceptor RF nRF24L01 (Electronilab, 2023).

### ***Placa de desarrollo Esp32***

Este microcontrolador Figura 18, cuenta con un doble núcleo de 32 bits que funciona a una velocidad de reloj de 240 MHz. Además, tiene la capacidad de soportar tanto wifi de 2.4 GHz como Bluetooth 4.2. En el caso del wifi, se pueden crear redes según los estándares 802.11 b/g/n/e/i. El dispositivo también cuenta con una memoria SRAM de 520 KB para diversas aplicaciones y 4 MB de memoria flash. El ESP32 funciona con 3.3 V y una corriente de alimentación de 500 mA, en espera consume alrededor de 20 mA, en reposo de 5 $\mu$ A y durante el funcionamiento excesivo, consume hasta 250 mA. En cuanto a la velocidad de transmisión de datos, el módulo es capaz de transferir datos a una velocidad de hasta 150 Mbps, dependiendo del estándar que se esté utilizando, cabe destacar que esta velocidad puede variar según las condiciones del entorno en el que se implemente el dispositivo (Bruno, 2019, págs. 2 - 3).



**Figura 18.** Modulo ESP32 (Sigma Electronica, 2023).

En la Tabla 17 se muestra una comparativa de las características de cada uno de los módulos tenidos en cuenta para crear el subsistema de irradiación wifi de 2.4 GHz.

Tabla 17. Características de los módulos wifi de 2.4 GHz

Características	Modulo ESP8266	nRF24L01	Modulo Esp32
<b>Microprocesador</b>	Xtensa LX106	No aplica	Xtensa LX6
<b>Reloj [MHz]</b>	80	No aplica	240
<b>Memoria RAM [KB]</b>	160	2	4000
<b>Memoria Flash [MB]</b>	4	No aplica	16
<b>Conexión (estándares)</b>	Wifi 802.11 b/g/n	Radiofrecuencia de 2.4GHz	Wifi 802.11 b/g/n y Bluetooth 5.0
<b>Protocolos</b>	TCP/IP, HTTP y MQTT	I2C y SPI	TCP/IP, HTTP y MQTT
<b>Voltaje [V]</b>	3.3	3.3	3.3
<b>Corriente TX [mA]</b>	170	14	250
<b>Corriente RX [mA]</b>	80	13	80

*Nota.* Autoría propia.

### Montaje del subsistema de irradiación wifi de 2.4 GHz

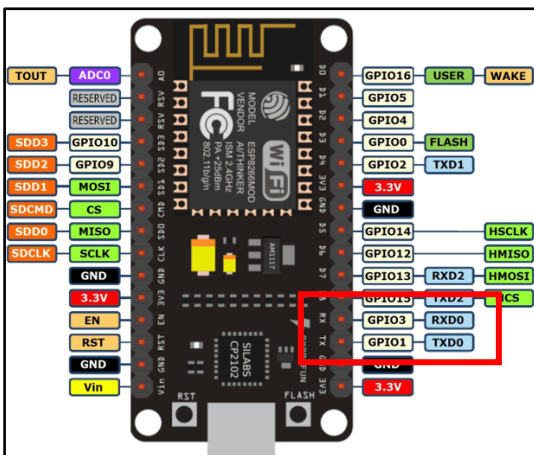
En este punto, se compararon las diferentes características de cada uno de los módulos wifi con el fin de identificar el más adecuado para integrarlo en el circuito previamente diseñado para el subsistema de irradiación LoRa. Para llevar a cabo esto se consideraron cuidadosamente los siguientes apartados:

- Inicialmente, se consideraron los diferentes tipos de conexiones o estándares que ofrecía cada módulo, en los cuales se descartó directamente el nRF24L01, ya que solo opera en la radiofrecuencia de 2.4 GHz y no en la red wifi plenamente;
- También se tomó en cuenta el consumo eléctrico y los voltajes de operación para lograr un sistema más eficiente en términos de energía y, además, se consideraron las capacidades máximas del sistema de alimentación del proyecto. Estos aspectos se explican más adelante en este capítulo;
- Debido a las necesidades específicas del proyecto, se consideró que el módulo seleccionado ofreciera únicamente la tecnología dirigida a suplir las necesidades de los objetivos, es decir solo wifi en este caso;
- También se consideraron los precios, y en este caso, el ESP8266 resultó ser el módulo más económico de los tres considerados, además, al tener en cuenta las características del subsistema de irradiación LoRa, el microprocesador NodeMCU ya tenía incorporado este

módulo, lo que permitió eliminar la necesidad de adquirir un dispositivo adicional, permitiendo plantear la idea de tener un único “nodo” de transmisión y otro receptor;

- Por último, se analizaron los protocolos que manejaba cada módulo, teniendo en cuenta los servicios que se utilizarían, en este punto, era importante que el dispositivo gestionara el protocolo MQTT, ya que fue utilizado más adelante para crear el sistema de monitoreo.

Luego de analizar los aspectos anteriores, se determinó que el módulo más apropiado para crear el subsistema de irradiación wifi era el ESP8266, esto ya que cumple con las características requeridas para satisfacer las necesidades del proyecto, además, a través de la placa de desarrollo NodeMCU V3 (microprocesador encargado del control de los módulos LoRa), es fácil manipular y programar el módulo, por lo cual no fue necesario plantear un circuito complejo para generar las señales dentro de la frecuencia requerida. Lo único relevante fue identificar los protocolos y pines de comunicación serial (GPIO3 y GPIO1) Figura 19, ya que el subsistema de adquisición de datos requirió de una conexión guiada para el intercambio de datos y su posterior transmisión a distintos sitios para su manipulación.



**Figura 19.** Distribución de pines del NodeMCUV3 ESP8266–Lolin (Sigma Electronica, 2023).

Al profundizar en el módulo ESP8266, se identificó que cuenta con una antena integrada impresa en su placa, la cual es omnidireccional y tiene una ganancia de hasta 2 dBi. Aunque este tipo de antenas son muy prácticas para proyectos en espacios reducidos, su alcance está limitado a distancias medias o cortas, dependiendo de las condiciones del entorno donde se utiliza. La cobertura de la antena del ESP8266 es en promedio de 100 metros en exteriores bajo condiciones óptimas, mientras que en interiores se reduce a 30 metros debido a la interferencia electromagnética generada por otros dispositivos y obstáculos que pueden provocar pérdidas de potencia en la señal.

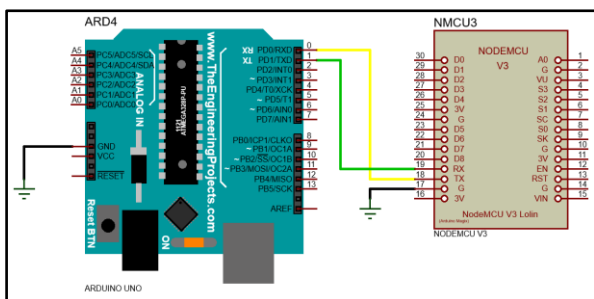
Considerando la información técnica que se presenta en el datasheet del módulo, donde se plantea una potencia de transmisión de 14 dBm y una sensibilidad de recepción de -72 dBm teóricos, y junto con otras características físicas de los transmisores ESP8266, se ha simulado la cobertura del módulo en un área ideal sin pérdidas o interferencias estipuladas Figura 20. Es importante tener en cuenta que estas especificaciones teóricas pueden variar en un entorno real y otras características físicas del dispositivo, como la antena y la configuración de red, también pueden afectar su rendimiento del dispositivo. Se identificó un área aproximada de irradiación del dispositivo de 145 metros con potencias mayores a -59 dBm.



**Figura 20.** Cobertura ideal del ESP8266 (Autoría propia).

***Circuito planteado para el subsistema de irradiación wifi***

Debido a que el módulo ESP8266 ya viene integrado en la placa de desarrollo NodeMCU, no fue necesario diseñar ningún circuito adicional para su funcionamiento. Únicamente se requirieron conexiones de comunicación serial entre el NodeMCU “cliente” y un Arduino con los pines anteriormente identificados para que el dispositivo de irradiación wifi pudiera obtener los datos que posteriormente enviaría como cliente hacia otra placa de desarrollo del mismo tipo que funcionaría como “servidor”. De esta manera, se estableció un enlace entre ambos dispositivos y se intercambiaron información de forma correcta.



**Figura 21.** Circuito planteado para el correcto funcionamiento del ESP8266/NodeMCU transmisor wifi (Autoría propia).

### **Comunicación entre los dispositivos de irradiación wifi**

Para (López, 2020) Estos dispositivos wifi cuentan con una amplia variedad de estándares IEEE 802.11, los cuales permiten obtener una percepción más detallada de sus características según las capacidades físicas de cada dispositivo. Los estándares son esenciales para lograr una conexión efectiva entre varios dispositivos de forma inalámbrica y permitir su posterior intercambio de información. Algunas de las características más importantes de estos estándares en los dispositivos son: la velocidad de transmisión de datos, la frecuencia en la que operan, el alcance de su la señal, la seguridad de los dispositivos y la simultaneidad de conexión de dispositivos, en la Tabla 18 se observa un resumen de algunas de las características más importantes de cada estándar (págs. 35 - 39).

Tabla 18. Estándares de comunicaciones de redes inalámbricas

<b>Características</b>	<b>802.11a</b>	<b>802.11b</b>	<b>802.11g</b>	<b>802.11n</b>	<b>802.11ac</b>	<b>802.11ax</b>
<b>Velocidad max. [Mbps]</b>	54	11	54	600	680	9.6 Gbps
<b>Frecuencias [GHz]</b>	5	2.4	2.4	2.4 y 5	5	5.4 y 5
<b>Alcance max. [m]</b>	35	140	40	70	35	120
<b>Ancho de banda [MHz]</b>	20	22	20	20 a 40	20 a 40	20 a 160

*Nota.* La tabla fue construida con los aportes de (Salazar, REDES INALÁMBRICAS, 2020) .

Los módulos ESP8266 tienen características adicionales que fueron importantes de analizar para tener una percepción más precisa de cómo se comportan estos dispositivos en aplicaciones y proyectos. Estas características parametrizan los protocolos manejados por la placa de desarrollo teniendo en cuenta el desempeño de la antena que poseen, en la Tabla 19 se pueden observar estas características

Tabla 19. Características de comportamiento en la recepción y transmisión del módulo ESP8266

<b>Estándares de la placa</b>	802.11 b/g/n
<b>Rango de frecuencias [MHz]</b>	2400 a 2483.5
<b>Potencia de transmisión [dBm]</b>	802.11 b: +20
	802.11 g: +17
	802.11 n: +14
<b>Sensibilidad de recepción [dBm]</b>	802.11 b: -91
	802.11 g: -75
	802.11 n: -72

*Nota.* La tabla fue construida con los aportes de (Díaz & Guarnizo, 2020).

En su momento para identificar el estándar bajo el cual el módulo ESP8266 estaba trabajando, se agregó una función específica en el bloque de instrucciones del programa, esta función es,

“WiFi.printDiag(Serial)”, que permite diagnosticar e identificar varias características del dispositivo, como se ve a continuación.

```
Diagnóstico...
Mode: NULL
PHY mode: N
Channel: 1
AP id: 0
Status: 255
Auto connect: 1
SSID (0):
Passphrase (0):
BSSID set: 0

MAC Address = F6:CF:A2:D5:DE:A8
```

**Figura 22.** Diagnóstico del dispositivo ESP8266 (Autoría propia).

En la Figura 22 se muestran las siguientes características de configuración que tiene el módulo0020ESP8266:

- Mode: indica el tipo de funcionamiento en el que se encuentra configurado el dispositivo, que puede ser cualquiera de los tres siguientes: STA (Modo estación): indica que el dispositivo está trabajando como cliente y está disponible para conectarse a una red wifi previamente establecida; AP (Punto de acceso): Este permite crear un nodo de acceso intermediario entre el dispositivo cliente y el dispositivo que tiene conexión a internet; Mixto: el dispositivo alterna entre la configuración "STA" y "AP", según sea necesario.
- PHY mode: indica el estándar que está utilizando el módulo.
- Channel: Muestra el canal dentro de la frecuencia de 2.4 GHz que se está utilizando para transferir información de forma inalámbrica. La frecuencia de 2.4 GHz se divide en catorce canales, los cuales son programables en el módulo.
- "Status: Permite identificar el estado de la conexión, mostrando valores que varían de 0 a 6.
- SSID: Identifica el nombre de la red wifi cuando el dispositivo está configurado en modo punto de acceso.
- Passphrase: Muestra la contraseña para acceder a la red creada por el punto de acceso.
- Dirección MAC: es un identificador único que permite establecer conexiones remotas de forma precisa.

Con las características previamente definidas del módulo ESP8266, se analizó la manera en la que se forman y envían las tramas en una red wifi, utilizando los estándares establecidos para identificar el comportamiento de transmisión y recepción de cada uno de los módulos que establecen el subsistema de irradiación wifi.

Las tramas que se envía en una red wifi son componentes claves para el intercambio de información entre los varios dispositivos que la componente, para (Salazar, Redes inalámbricas, 2017) estas tramas de igual manera que las de LoRa están compuestas de varios apartados, donde se incluye bits que representan la información necesaria para enviar información de manera inalámbrica de un dispositivo a otro, debido a que estas tramas son enviadas usando el espectro de forma inalámbrica están expuestas a interferencia de muchos tipos, a atenuaciones en su señales debido a distintos factores, por estos motivos es necesario crear tramas que permitan tener redundancia en la transmisión de su información y así de alguna manera obtener los datos de manera confiable y segura.

Estas tramas o paquetes transmitidos en una red wifi son elementos cruciales para el intercambio de información entre los distintos dispositivos que conforman dicha red. Al igual que en el caso de las tramas de la tecnología LoRa, estas tramas están compuestas por varios apartados, compuestos por bits que representan la información necesaria para enviar datos de forma inalámbrica de un dispositivo a otro. Debido a que estas tramas son transmitidas de forma inalámbrica usando el espectro, están expuestas a diversos tipos de interferencias y atenuaciones en su señal, lo que puede afectar su calidad y confiabilidad. Por este motivo, es necesario crear tramas que permitan tener redundancia en la transmisión de la información para asegurar la recepción de los datos de manera confiable y segura (págs. 23 - 25), estas tramas Figura 23 se componen de la siguiente manera:

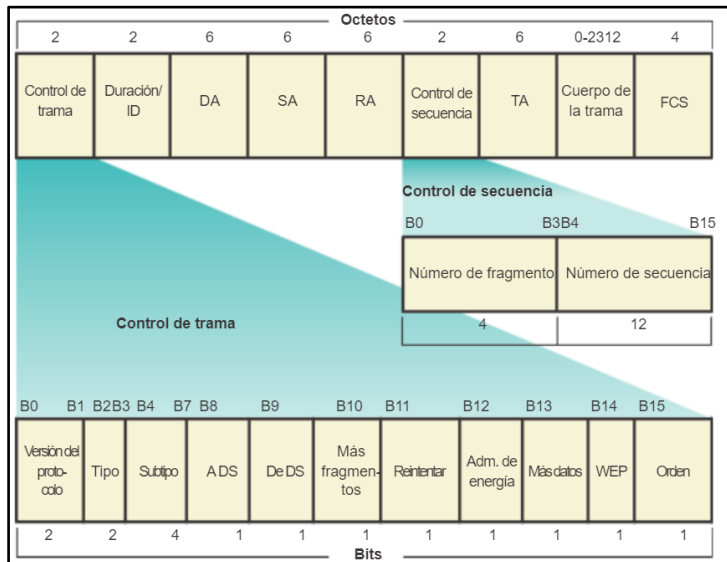
- Control de trama (2 Bytes): En la trama se indicará la versión del protocolo utilizado, el tipo y subtipo de la trama. Además, se establecerá si la trama entra o sale de un sistema de distribución y si hay más fragmentos de datos. Si se trata de una retransmisión de una trama anterior, se indicará también. Por otro lado, se especificará si el nodo ahorra energía y si almacenará más datos en su buffer.

En cuanto a la seguridad, se indicará si hay información encriptada utilizando WEP (Privacidad Equivalente a Cableado). Por último, se establecerá si la trama ya está estrictamente ordenada y no requiere ningún tipo de ordenamiento posterior.

- Duración/ID (2 Bytes): se estipula el tiempo en microsegundos necesario para transmitir la trama. Esto es importante para determinar la eficiencia de la transmisión de datos y para garantizar una transmisión oportuna y confiable de la información.
- DA (2 Bytes): En este apartado se encuentra la dirección MAC del nodo que representa el destinatario final, esta información es impórtate debido a que asegurar que la trama sea entregada al destinatario correcto y garantizar la integridad de la transmisión de los datos.
- SA (6 Bytes): En este apartado se encuentra la dirección MAC del nodo que inició la trama.
- RA (6 Bytes): Este campo de la trama contiene la dirección MAC del destinatario final al cual se dirige la información transmitida.
- Control de secuencia (2 Bytes): En este apartado se indica el número de fragmento enviado, cuando la cantidad de datos a enviar es demasiado grande para ser transmitida en una sola trama, se divide en distintos fragmentos, cada uno con su propio número de identificación, esta medida se utiliza para garantizar la integridad de los datos y asegurar que la información llegue correctamente al destinatario final. Al indicar el número de fragmento enviado, se facilita la reconstrucción del paquete de información en el destinatario final.
- TA (6 Bytes): Contiene la dirección MAC del destinatario final de la trama al que va dirigido la información transmitida.
- Cuerpo de la trama / datos (0 a 2312 Bytes): Este campo de la trama contiene la información que se desea transmitir. En la mayoría de los casos, esta información se presenta en forma de un paquete IP, el cual incluye un encabezado con detalles importantes, como las direcciones IP de origen y destino, el número de secuencia, la longitud del paquete, entre otros. El incluir el paquete IP en la trama es importante para la transferencia de información entre dispositivos en una red. El encabezado del paquete IP proporciona información adicional necesaria para enrutar correctamente los paquetes de datos y asegurar que lleguen al destinatario correcto.
- FCS (4 Bytes): Este campo de la trama contiene información que permite verificar que la trama no ha sido dañada durante su transmisión. Se utiliza un modo de detección de



errores llamado checksum cíclico de trama (FCS), que se calcula teniendo en cuenta el contenido de la trama y este generalmente se adjunta al final de esta.

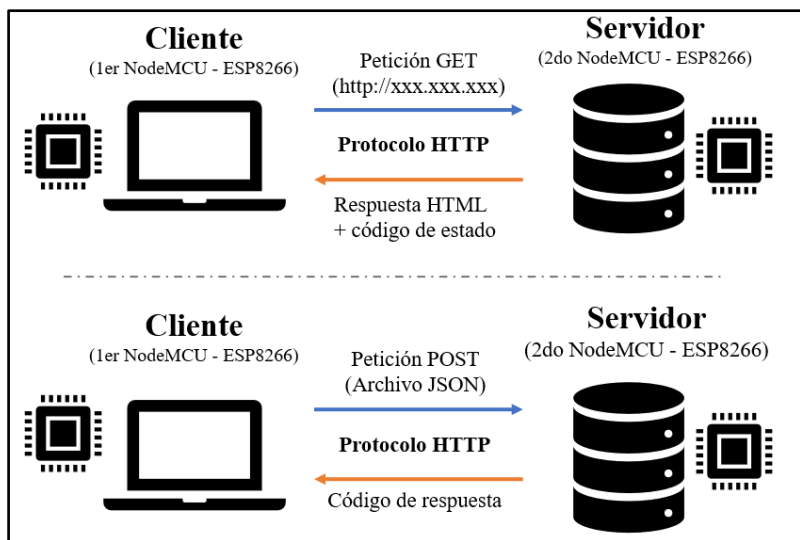


**Figura 23.** Composición trama inalámbrica 802.11 (INSTITUT SA PALOMERA, 2019).

A partir de esta información, fue posible determinar el tamaño aproximado de las tramas. Se tuvo en cuenta el tamaño en bytes de los datos de las lecturas de los sensores del sistema de adquisición de datos, que se había calculado en 18 bytes para la comunicación serial entre el Arduino y la placa de desarrollo. Se observó que las tramas wifi requieren más información, con un tamaño de hasta de 32 bytes. Por lo tanto, se pudo inferir que el tamaño total del paquete a transmitir es de alrededor de 50 bytes.

En el proyecto para intercambiar información entre los dos dispositivos ESP8266 (cliente y servidor), se presentaron dos opciones: utilizar las solicitudes GET o POST del protocolo Hypertext Transfer (HTTP), Figura 24. La decisión de cual implementar se tomó en base a la siguiente información. Las solicitudes GET permiten al cliente hacer una petición al servidor para obtener un contenido determinado, normalmente se solicitan dominios en particular, por lo cual el servidor devuelve al cliente la información solicitada, en este caso de ejemplo el contenido de la página web solicitada, el envío de información en este método se hace a través de la URL (Localizador Uniforme de Recursos) y por lo tanto está expuesta a cualquier dispositivo que pueda acceder a la red. Las peticiones POST funcionan de manera inversa a las solicitudes GET. En este caso, el cliente envía al servidor una petición para enviar una información determinada. Generalmente, dicha información se incluye en el cuerpo del mensaje HTTP, lo que brinda mayor seguridad en el intercambio de información al evitar la exposición de los datos a clientes intermediarios. De esta

manera, se pueden enviar archivos JSON, formularios u otros tipos de datos que resulten útiles para que el servidor los procese y los almacene en bases de datos o los someta a procedimientos previamente establecidos en el sistema, esto según (Gomez & Cervantes, 2017, págs. 53 - 54), en Tabla 20 se muestra una comparativa de los dos tipos de peticiones y su comportamiento en los módulos ESP8266.



**Figura 24.** Comportamiento de peticiones entre los módulos ESP8266 (Autoría propia).

Tabla 20. Características peticiones GET y POST

Características	GET	POST
<b>Ubicación de la información transportada</b>	URL.	Cuerpo.
<b>Principal propósito</b>	Obtener archivos HTML.	Actualización de datos en un servidor.
<b>Seguridad</b>	Muy vulnerable, la información está contenida en el URL, además, se almacenan en el cache de los navegadores.	Seguro, la información está dentro del cuerpo de la solicitud, además, no se almacena en el cache de ningún navegador.
<b>Rango de información</b>	Hasta 2048 caracteres.	Ilimitado dentro de la capacidad de transmisión de la red.

*Nota.* La tabla fue construida con los aportes de (Gomez & Cervantes, 2017).

Al momento de querer establecer una conexión inalámbrica entre los dispositivos ESP8266, fue muy importante determinar el tipo de protección que se utilizará para asegurar la protección de la información transmitida, aparte de la contraseña de la red. En las conexiones inalámbricas existen varias formas de proteger la información durante su transmisión, a continuación, y según (Instituto

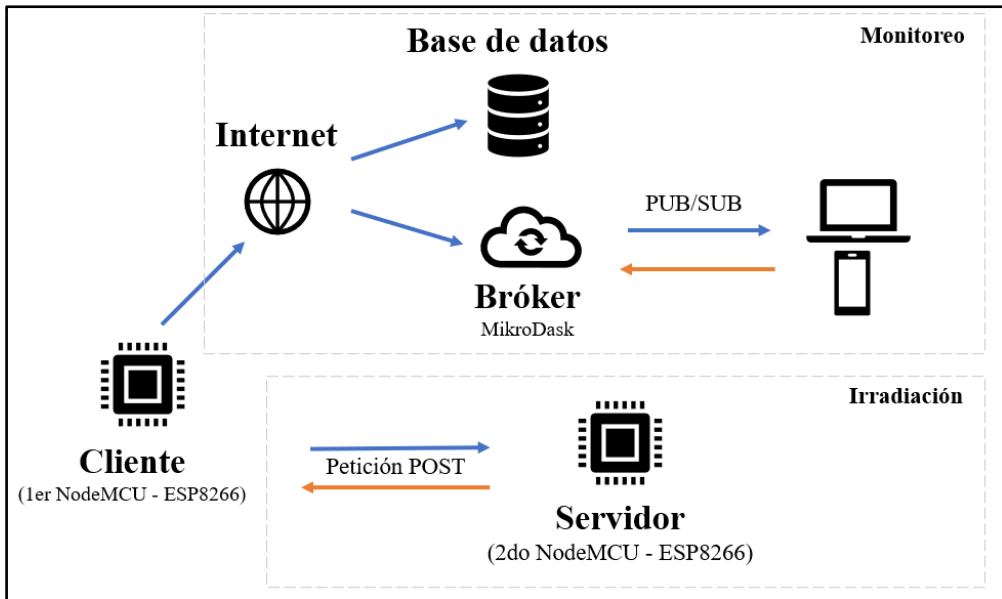
Nacional de Ciberseguridad, 2019, págs. 21 - 23), se presentan algunas opciones de seguridad que pueden ser empleadas en los dispositivos para la transmisión de señales:

- **Wired Equivalent Privacy (WEP):** Esta forma de protección es muy vulnerable a los ataques y no se recomienda su uso en la creación de redes en la actualidad.
- **Wifi Protected Access (WPA):** Esta forma de protección es mucho más avanzada y utiliza un tipo de cifrado basado en la modulación por desplazamiento de fase (PSK), con la cual se crea una clave que se comparte entre los dispositivos.
- **Wifi Protected Access 2 (WPA2):** Este tipo de protección utiliza claves de autenticación que se comparten entre dispositivos, estas claves son certificados únicos.
- **Wifi Protected Access 3 (WPA3):** Esta es una de las formas de seguridad más fuertes disponibles actualmente y ofrece una mejor protección contra ataques de fuerza bruta.

### ***Programación placas de desarrollo NodeMCU-ESP8266***

Con la información expuesta, se logró comprender el comportamiento de los dispositivos en la transferencia de información, lo que permitió establecer los principales parámetros para programar cada una de las placas de desarrollo NodeMCU. Esta fase se dividió en dos partes: la primera consistió en la programación del módulo "Servidor", encargado de crear la red según las condiciones requeridas, recibir peticiones y permitir la lectura de la potencia o RSSI.

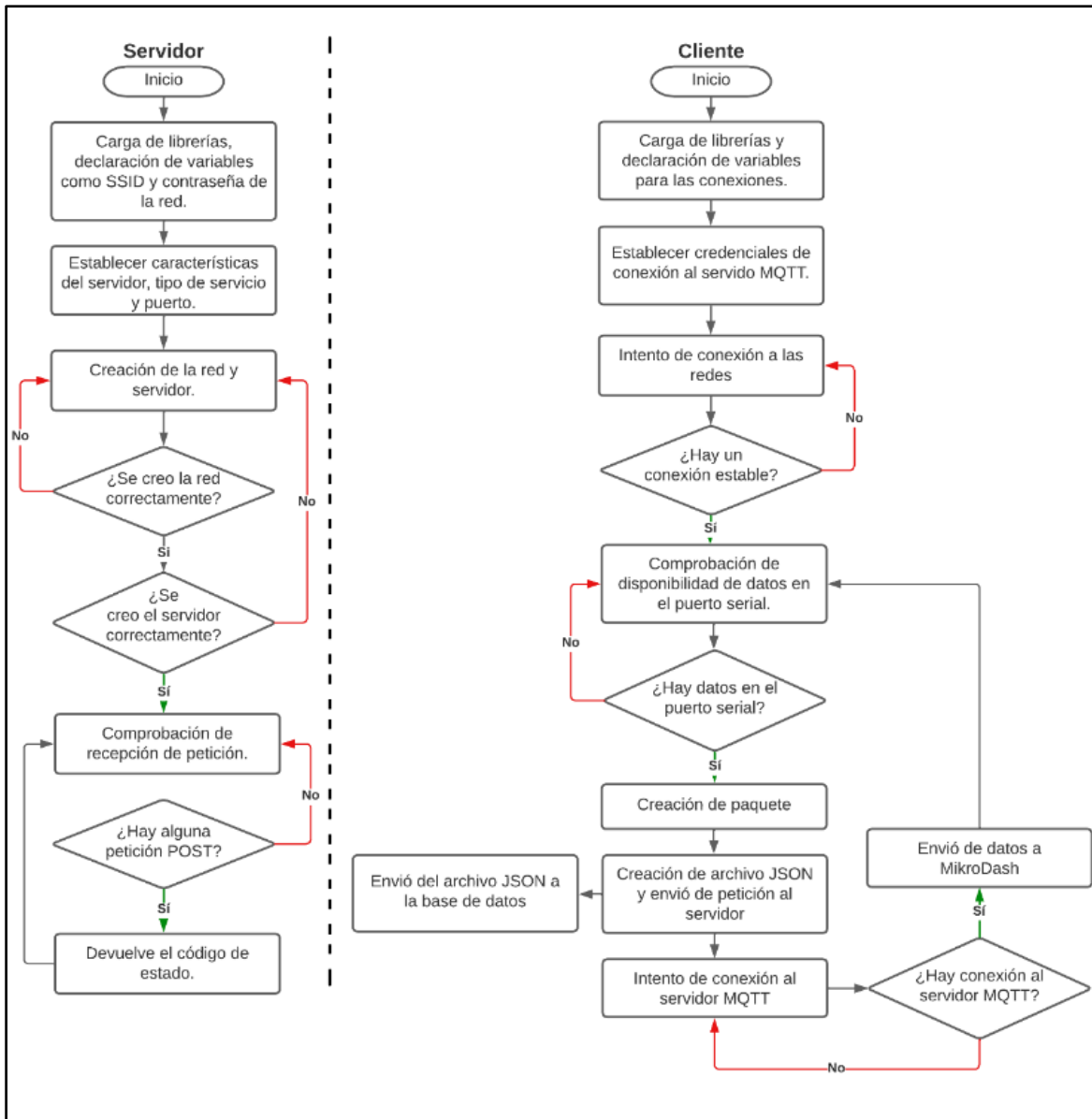
En segunda parte, se programó el módulo "cliente", encargado de recibir a través de comunicación serial las lecturas de los sensores que previamente manipulo el Arduino Uno, el cual es responsable del subsistema de adquisición, además, este se encarga de realizar las peticiones POST al módulo "servidor", se eligieron este tipo de peticiones principalmente por la seguridad con la que se transmite la información. Asimismo, este dispositivo funciona en modo estación (STA) lo que permite alternar su conexión entre dos redes: la creada en el ESP8266 y otra con acceso a Internet, se lleva a cabo este cambio debido a que con el módulo "servidor" se establece el enlace para realizar la petición y obtener el RSSI de la conexión, mientras que la conexión a la red conectada a internet se realiza para enviar la información a la base de datos y realizar la conexión al Broker que trabaja con el protocolo MQTT. Este protocolo permite, a través de tópicos, recibir mensajes PUB/SUB e interactuar con los terminales finales para realizar el monitoreo. Esta conmutación se realiza aproximadamente cada 30 segundos. En la Figura 25 se muestra una ilustración que representa de mejor manera el comportamiento de las placas de desarrollo, tanto para el subsistema de monitoreo como para el de irradiación.



**Figura 25.** Comportamiento en la red de los módulos ESP8266 (Autoría propia).

Para programar el módulo "servidor", se incluyeron las siguientes librerías: ESP8266WiFi.h, que permite utilizar diversas funciones para configurar los parámetros como el nombre de la red (SSID): "PROYECTO\_DE\_GRADO\_J&N\_ESP8266", la contraseña de acceso a la red, el canal en el que operará la red: 6, el máximo de conexiones permitidas: 8, el tipo de seguridad: WPA2, entre muchas otras características. Además, se incluyó ESPAsyncWebServer.h, que permite adecuar el módulo para que permita crear un servidor con IP estática y el servicio HTTP a través del puerto 80. Este servicio permitió intercambiar las peticiones POST mencionadas anteriormente.

Para programar el módulo "cliente", se utilizó las mismas librerías que en el caso del módulo "servidor". Estas permitieron establecer las variables necesarias para conectar a las dos redes requeridas para su correcto funcionamiento, según lo establecido en el proyecto. Además, se incluyeron PubSubClient.h y Arduino\_JSON.h, que permiten la conexión al nodo Broker, declarando las credenciales para la conexión a la plataforma de monitoreo y la creación de archivos de tipo JSON. Estos archivos se usaron para recibir los mensajes de suscripción del Broker y enviar la información a la base de datos, en la Figura 26 se muestra el diagrama de flujo que muestra mejor el comportamiento básico que tiene el código de programación de cada uno de los módulos, además, en la *Anexo 1* se encuentra de manera detallada cada uno de los códigos utilizado en las placas de desarrollo.



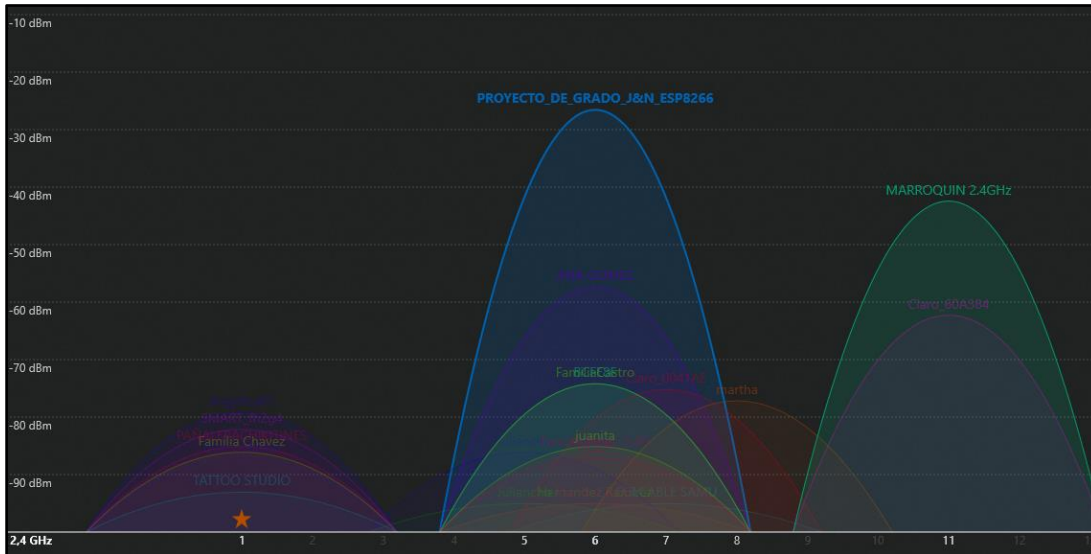
**Figura 26.** Diagrama de flujo de la programación de los módulos ESP8266 (Autoría propia).

Con los parámetros previamente establecidos, se cargaron los códigos a cada uno de los módulos, lo que permitió crear la red y el servidor, tal como se muestra en la Figura 27. Esto permite que este dispositivo pudiera para recibir la conexión del módulo cliente en una fase posterior.

```
[-] Servidor configurado - Direccion IP del servidor: 192.168.4.1, Red 2.4 GHz - Canal: 6
```

**Figura 27.** Confirmación de la creación de la red y el servido de manera correcta (Autoría propia).

Gracias al software wifi Analyzer, se pudo confirmar en la Figura 28 y Figura 29, que la red se estableció en el canal asignado, con el SSID correspondiente. Asimismo, se pudo observar el ancho de banda utilizado dentro del rango de espectro, el nivel de seguridad, el protocolo utilizado y otra información relevante.



**Figura 28.** Canal de la red wifi creada con el ESP8266 (Autoría propia).

DATOS DE RED	
SSID	PROYECTO_DE_GRADO_J&N_ESP8266
Canal	6
Frecuencia	2,437 GHz (2,427-2,447) *
Ancho de banda	20 MHz *
Protocolo	802.11g
INFORMACIÓN DEL DISPOSITIVO	
BSSID	F6:CF:A2:D5:DE:A8
DATOS DE IP	
IPv4 privado	192.168.4.2
Subred privada	255.255.255.0
SEGURIDAD	
Autenticación	RSNA-PSK (WPA2)
Cifrado	AES-CCMP
INFRAESTRUCTURA	
Tipo o clase	Red de infraestructura
Conectividad	Acceso local
Interfaz	IEEE 802.11 interfaz de red inalámbrica

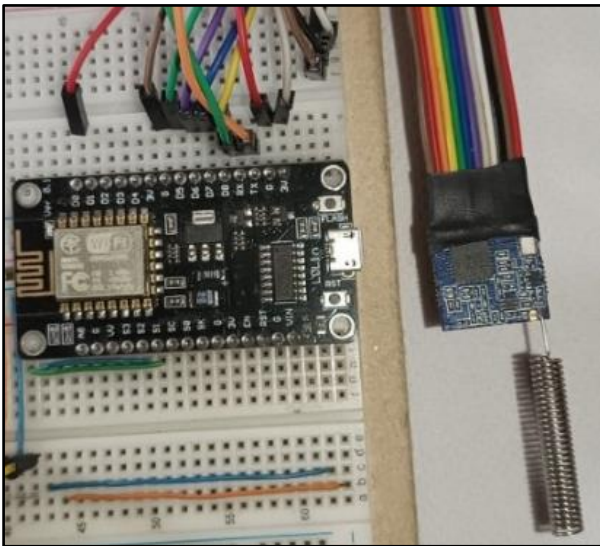
**Figura 29.** Información de la red creada – Software wifi Analyzer (Autoría propia).

### **Montaje físico del sistema de irradiación LoRa y wifi**

En esta sección, se presentarán los elementos físicos que conforman el montaje de irradiación, incluyendo los circuitos y el maquetado utilizados para proteger los componentes del proyecto.

#### ***Circuitos físicos del sistema de irradiación LoRa y wifi de 2.4 GHz***

Teniendo en cuenta los módulos y dispositivos analizados en el capítulo y sus correspondientes pines y conexiones descritas anteriormente, se han propuesto el siguiente circuito, Figura 30, que involucran el microprocesador NodeMCU, los módulos LoRa XL1278 SMT y el módulo ESP8266.



**Figura 30.** Circuito real del módulo LoRa y placa de desarrollo NodeMCU (Autoría propia).

#### ***Maqueta física para el sistema de irradiación***

Con la creación de los diferentes circuitos, surgió la necesidad de diseñar una estructura estable y segura que permitiera acomodar de manera óptima los dispositivos que controlaban el sistema de irradiación, así como los sensores y los demás componentes electrónicos que forman parte del proyecto, el diseño de la estructura incluye dos cajas de cartón, material que no modifica la cantidad de potencia recibida por las plantas, una para proteger el transmisor, otra para el receptor y el circuito de adquisición de datos, y una maceta que permite exponer la planta a la irradiación de cualquiera de las dos frecuencias estudiadas, esto se demuestra en la Figura 31.



**Figura 31.** Montaje estructural para la protección de todos los circuitos e irradiación de las plantas (Autoría propia).



## **Sistema de adquisición de datos, transmisión y monitoreo de variables**

En esta sección, se ha llevado a cabo un análisis detallado de los sensores que se integraron en el subsistema de censado del cultivo. En este análisis se han considerado diversos factores, como el voltaje de operación y el tipo de datos que genera cada sensor, ya sea analógico o digital. Esta evaluación previa es fundamental para poder seleccionar el microcontrolador adecuado que se encargue de capturar y procesar los datos que cada uno de los sensores generará.

Una vez seleccionados los sensores, se procedió a realizar la caracterización, calibración y programación correspondiente para cada uno de ellos. Esta fase es crucial para garantizar que los datos recopilados sean precisos y confiables, y permita una correcta interpretación de los resultados obtenidos. Con una calibración y caracterización adecuadas, se asegura que los datos generados por los sensores de las dos materas sean coherentes y estén en línea con las expectativas del proyecto, lo que facilita la toma de decisiones y la generación de alarmas más adelante.

Para concluir, se presenta la manera en la que se logró transmitir la información entre los diferentes dispositivos y servicios necesarios para monitorear todas las variables relevantes del proyecto. Además, se describe cómo se almacenaron estas variables en la nube, lo que permitió tener un acceso fácil y seguro a los datos generados por los sensores y otros dispositivos. Este proceso de transmisión y almacenamiento de datos es esencial para poder realizar los análisis posteriores, tomar decisiones y garantizar la integridad de la información.

### **Subsistema de adquisición de datos**

Este es el responsable de adquirir de manera constante y efectiva con rangos de un minuto todas las variables requeridas por el proyecto. Este intervalo de tiempo fue considerado debido al tiempo de procesamiento de las variables y a las distintas conexiones inalámbricas que los dispositivos realizan tanto al subsistema de irradiación como a los servicios utilizados para el almacenamiento y monitoreo de las variables. Permitiendo evitar errores de carga y pérdida de datos por parte del subsistema. Este intervalo de tiempo es idóneo para detectar cambios rápidos en las variables sin afectar el rendimiento de los dispositivos, lo que posibilita la implementación inmediata de medidas correctivas en los cultivos estudiados

### **Microprocesador de control para el censado de las variables**

En el subsistema de adquisición de datos, el microprocesador se encargó de controlar todas las lecturas de cada uno de los sensores. Se hizo necesario incorporar este componente ya que los microprocesadores que controlan el sistema de irradiación (NodeMCU - ESP8266) no contaban

con suficientes pines analógicos para manejar todos los sensores requeridos. Por esta razón, se estableció una comunicación serial entre este dispositivo y cada uno de los sistemas de irradiación, esto con el fin de poder obtener, transmitir y procesar los datos de los sensores de manera adecuada y que permitan establecer la conexión con la plataforma de monitoreo y demás servicios.

### ***Arduino Uno.***

Este microprocesador Figura 32, es uno de los más populares y utilizados en el mundo del Internet de las cosas (IoT). Incorpora el microcontrolador ATmega328P y es capaz de funcionar con un rango de voltajes de entrada de 7 a 12 V, sin embargo, para su correcto desempeño utiliza solo 5V, gracias a un regulador de voltaje que proporciona una alimentación adecuada a los componentes electrónicos que lo conforman.

Los pines de este dispositivo tienen una corriente máxima de aproximadamente 20 mA, excepto el pin de 3.3V que cuenta con una corriente de 50 mA. En cuanto a su capacidad de memoria, este microprocesador cuenta con 32 KB de memoria flash, 2 KB de SRAM y 1 KB de EEPROM.

La velocidad de su reloj interno es de 16 MHz, y en cuanto a la distribución de sus pines, cuenta con 14 entradas/salidas programables, de las cuales 6 se pueden utilizar como modulación por ancho de pulso (PWM), y posee seis entradas analógicas, además, tiene tres formas de comunicación serial: SPI, I2C y UART (Receptor-Transmisor Asíncrono Universal), siendo este último el más utilizado para la transmisión de información a otros dispositivos.



**Figura 32.** Arduino Uno (Arduino Store, 2023).

### **Sensores seleccionados para censar el cultivo**

En este apartado se profundiza en las características de los sensores que se han seleccionado para obtener los datos correspondientes a cada una de las variables que se han establecido como objetivo en el proyecto.

### ***Sensor de temperatura – DS18B20 tipo Sonda***

Este dispositivo es capaz de medir temperaturas en un amplio rango de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$ , con una precisión teórica de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , Figura 33. Cuenta con una resolución ajustable/programable de 9 a 12 bits, Tabla 21, y puede ser alimentado con una tensión de entre 3 y 5.5 V, lo que permite obtener una lectura digital en grados Celsius. Su alta resolución lo hace ideal para su uso en proyectos que requieran una gran precisión, como sistemas de control o monitoreo. Además, su construcción resistente al agua lo hace adecuado para ambientes con alta humedad constante, (Bausa, y otros, 2020, págs. 25 - 28).



**Figura 33.** Sensor de DS18B20 tipo sonda (Ja - Bots, 2023).

Tabla 21. Resolución en bits según la temperatura obtenida por el sensor DS18B20

	<b>Signo</b>				<b>Numero entero</b>								<b>Parte decimal</b>			
<b>Temperatura</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>	<b>B5</b>	<b>B6</b>	<b>B7</b>	<b>B8</b>	<b>B9</b>	<b>B10</b>	<b>B11</b>	<b>B12</b>	<b>B13</b>	<b>B14</b>	<b>B15</b>	<b>B16</b>
<b>+125</b>	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0
<b>+ 0.5</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<b>- 0.5</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
<b>- 55</b>	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0

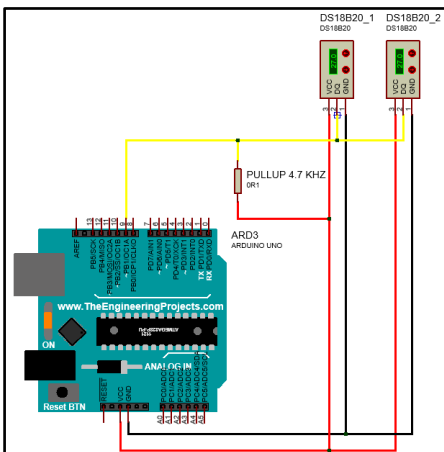
*Nota.* La tabla fue construida con los aportes de (Shadapuri, 2018).

Los dispositivos de este tipo suelen contar con tres pines para su conexión: uno de alimentación (normalmente 5V), uno para el transporte de datos (que debe conectarse a un pin digital del dispositivo controlador) y una conexión a tierra. Lo que hace que este tipo de sensores sea especial es el uso del protocolo OneWire, que permite una conexión en forma de bus, permitiendo que varios dispositivos pueden conectarse a una sola interfaz de conexión, con un maestro y varios esclavos compartiendo la línea de señal y utilizando una tierra común. Cada dispositivo se identifica mediante un número de identificación único de 64 bits asignado por el maestro, esto permite diferencia que lectura transmite cada sensor. Además, se utiliza una resistencia pullup de 4.7 K (esta varía de acuerdo con la extensión de la sonda) entre la alimentación y el bus de datos

(pin digital 9) para garantizar la correcta transferencia de tensiones entre los dispositivos que componen el circuito.

Dado que el proyecto no requiere una alta frecuencia de lecturas (solo cada 30 segundos), se configuró el sensor con una resolución de doce bits. Permitiendo obtener valores con una mayor cantidad de decimales, lo que se traduce en lecturas más precisas, esta resolución cuenta con un tiempo de 750 ms para cada captura de datos. Para programar el dispositivo y configurar el bus de comunicación, se utilizó las librerías "OneWire.h" y "DallasTemperature.h". Estas librerías permiten ajustar todos los parámetros necesarios del sensor y del bus de comunicación de manera sencilla y eficiente, el código de programación utilizado se encuentra en el *Anexo 1*.

El sensor se seleccionó debido a que ofrece múltiples ventajas, entre las cuales se destacan su no necesidad de calibración, su gran precisión gracias al manejo de una amplia cantidad de bits en sus lecturas, su capacidad para conectar múltiples dispositivos a un solo pin, y su inmunidad al ruido y su bajo precio. Teniendo en cuenta algunas de estas características, se diseñó el siguiente circuito Figura 34 para medir la temperatura de las dos plantas, la irradiada y la de control.



**Figura 34.** Diseño circuito planteado para el funcionamiento de los dos sensores DS18B20 (Autoría propia).

#### *Caracterización del sensor y calibración del sensor*

La obtención de datos precisos de la variable de temperatura analizada depende en gran medida del comportamiento del sensor utilizado. Por esta razón, se llevó a cabo una caracterización del sensor, evaluando su comportamiento mediante la comparación de sus mediciones con las de un termómetro digital Tabla 22. De esta manera, se pudo determinar la exactitud del sensor y la fiabilidad de las mediciones obtenidas, Adicionalmente, durante las mediciones experimentales se

registró el valor de voltaje del sensor en cada una de ellas. Esto permitió obtener una percepción del posible consumo eléctrico del dispositivo.

El termómetro digital utilizado para llevar a cabo la caracterización del sensor es el modelo TP101, Figura 35. Para (Lactogandolfo, 2023, pág. 1) este termómetro es ampliamente utilizado en diversas industrias debido a su confiabilidad y precisión, además, gracias a su amplio rango de medición de temperatura, que va desde los -50 hasta los 300 °C, se pudo adaptar adecuadamente para obtener la temperatura de las plantas y evaluar el comportamiento del sensor DS1B20.

La sonda del termómetro digital TP101 está fabricada en acero inoxidable 304, lo que la hace altamente resistente a la corrosión y la exposición a la humedad. Su precisión de +/- 1 °C lo que asegura la obtención de mediciones confiables y precisas, también, la sonda del termómetro mide 10 centímetros de longitud y su voltaje de funcionamiento es de 1.5 V DC. Por estos motivos el TP101 es un termómetro digital altamente eficiente y preciso y resultó ser la herramienta precisa para llevar a cabo la caracterización del sensor de temperatura.



**Figura 35.** Termómetro digital TP101 (YoRobotics, 2023).

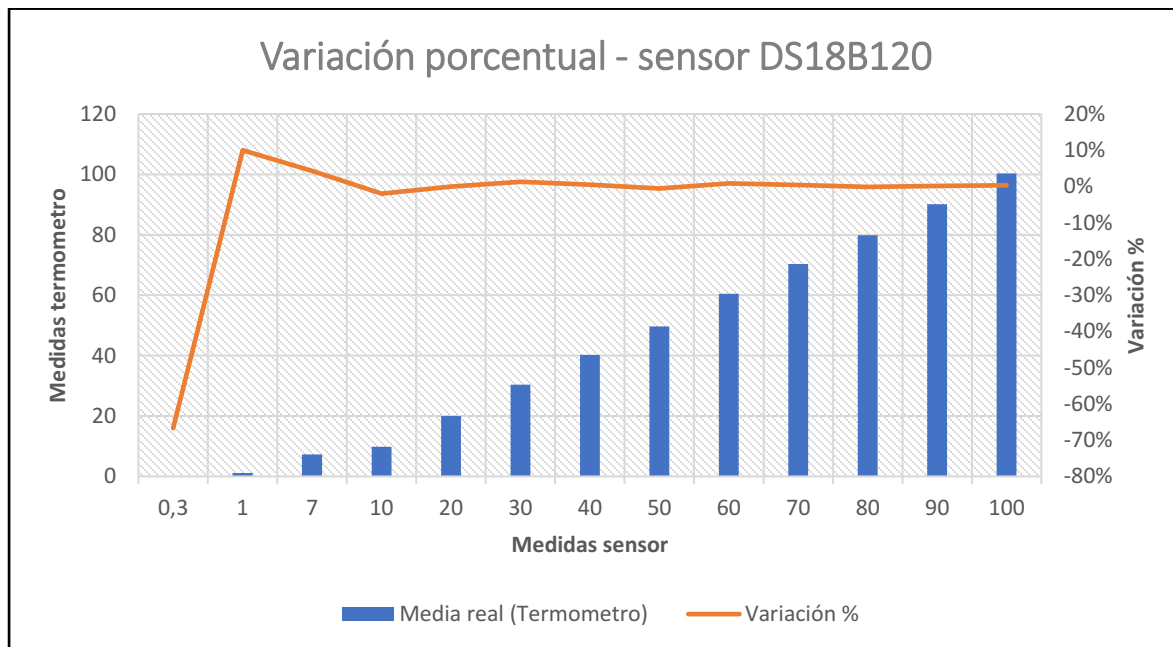
Con el fin de analizar de manera más precisa la exactitud de los sensores, se plantearon diversas tablas y gráficas que serán presentadas en distintas secciones del documento. Estas fueron generadas mediante el uso de la fórmula de variación porcentual (1), lo cual permite evidenciar el desempeño de los sensores en relación con el dispositivo de calibración empleado.

$$\text{Variacion \%} = \left( \frac{V_{-1}}{V_{-2}} \right) - 1 \quad (1)$$
$$\text{Variacion \%} = \left( \frac{\text{Medida Instrumento de medición}}{\text{Medida sensor}} \right) - 1$$

Tabla 22. Medidas prácticas que determinaron el comportamiento del sensor

Sensor ds18b20 - sonda		
Medida Arduino (Sensor) [°C]	Media real (termómetro) [°C]	Variación [%]
0,3	0,1	-67%
1	1,1	10%
7	7,3	4%
10	9,8	-2%
20	20	0%
30	30,4	1%
40	40,2	1%
50	49,7	-1%
60	60,5	1%
70	70,3	0%
80	79,9	0%
90	90,1	0%
100	100,3	0%

Nota. Autoría propia.



**Figura 36.** Grafica comparativa de las medidas del termómetro, el sensor y su variación % (Autoría propia).

La Figura 36 muestra las rectas comparativas que representan las medidas del sensor y el termómetro, con estos datos se confirmó que los sensores realmente no necesitaban algún tipo de calibración ya que se encuentran dentro de rangos de fallo bastante aceptables y que no interfieren

de gran manera en la estabilidad de las plantas, además se observó un comportamiento constante en el valor de variación porcentual independientemente a la temperatura que este censara.

### ***Sensor de humedad de suelo – higrómetro***

Este dispositivo es un sensor capacitivo que permite medir el porcentaje de humedad presente en diferentes tipos de suelo, Figura 37. Su funcionamiento se basa en la capacidad de los suelos para retener la carga eléctrica (capacitancia), variable que cambia en función a la cantidad de humedad presente en el terreno analizado. Los sensores capacitivos son ampliamente utilizados en proyectos de IoT, e implementados en sistemas de riego automático o monitoreo ambiental.



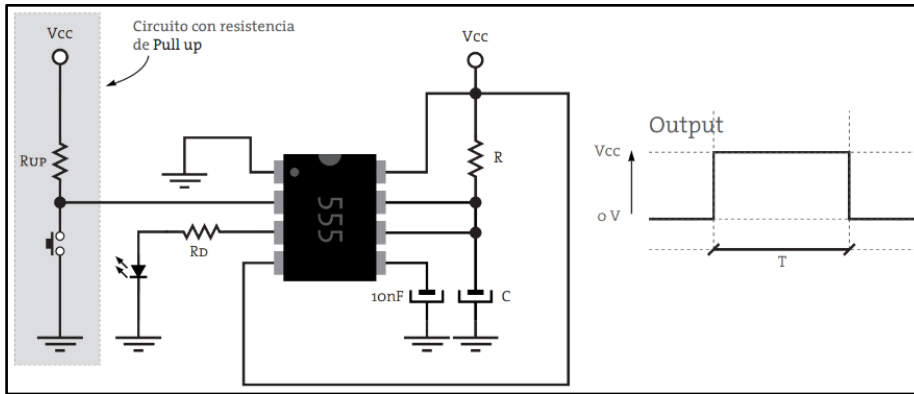
**Figura 37.** Sensor de humedad de suelo capacitivo (Autoría propia).

Una de las principales ventajas de este tipo de sensores es que no se oxidan ni se deterioran con facilidad, incluso cuando se exponen a altos niveles de humedad durante extensos períodos de tiempo. Estos dispositivos tienen una buena precisión, pero no son la mejor opción para proyectos que requieran mediciones extremadamente precisas de la humedad de un cultivo.

Este sensor funciona con voltajes que pueden variar entre 3.3 y 5 voltios, pero se recomienda utilizar el valor máximo de tensión para obtener una mayor precisión en las mediciones, además la corriente de operación típica de dispositivo es de 5 mA.

El sensor está equipado con un circuito Figura 38 que cuenta con un temporizador 555 que genera una señal de pulso cuadrado con ciclo útil constante. Cuando el sensor se expone a cambios de humedad, la señal cambia lo que provoca cambios en el voltaje de la señal, refiriendo a que cuanto mayor sea la humedad, menor será el voltaje, y cuando la tensión sea más alta, corresponderá a una humedad más baja.

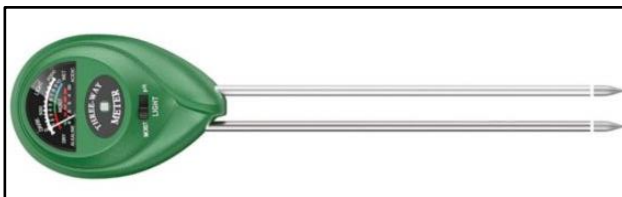
Estos cambios de voltaje se comparan internamente mediante un microcontrolador, que genera un valor analógico con una resolución de 10 bits, referenciando a que los valores se encuentran en el rango de 0 a 1023 y representara el valor de la humedad detectado por el sensor.



**Figura 38.** Circuito básico de operación de un temporizador 555 y su señal (Huergo, 2020)

#### *Caracterización y calibración del sensor*

Para caracterizar y calibrar el sensor, se utilizó un higrómetro análogo. Este dispositivo permitió obtener medidas aproximadas de la humedad presente en el suelo donde se cultivaron las plantas experimentales. El aparato cuenta con la capacidad de medir tres variables diferentes, el PH muestreado, la luminiscencia y la cantidad de humedad en el suelo en un rango de 0 a 100%, además se destaca que este instrumento posee sondas de 10 cm y es altamente eficiente en cuanto a su consumo energético.



**Figura 39.** Higrómetro análogo de medición de humedad (GreenForest, 2023).

Para llevar a cabo el proyecto, fue necesario realizar una rápida y sencilla calibración del dispositivo. Para ello, se consideraron dos variables  $H_{min}$  y  $H_{max}$ . Para la primera, se midió el valor de humedad presente en el aire, utilizando el sensor sin exposición a la humedad del suelo. En segundo lugar, se determinó la lectura en la que el sensor quedaba completamente cubierto por agua. Utilizando estas dos variables, se procedió a mapear todos los valores análogos dentro de un rango de valores entre 0% (lectura sin humedad) y 100% (lectura del sensor en el agua). Este proceso permitió obtener una relación entre los valores mínimos y máximos de humedad que se podrían obtener de acuerdo con la humedad del suelo.

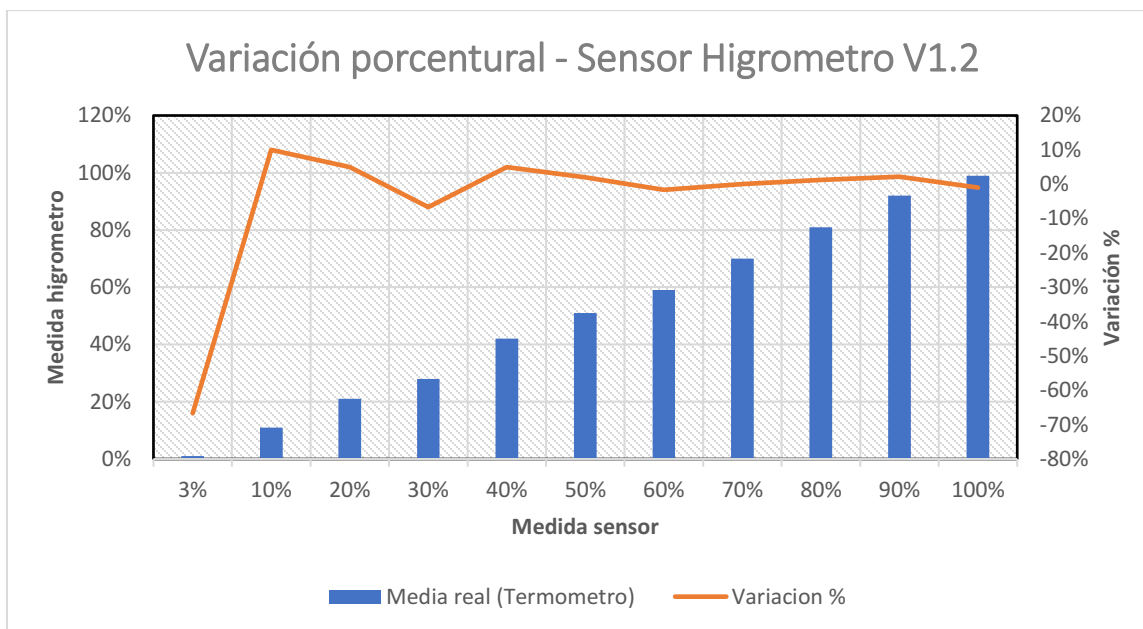


Después de calibrar el sensor, se manipularon los valores para establecer un mínimo y máximo porcentaje de humedad basándose en los datos arrojados por el higrómetro hasta llegar a medidas muy similares. A continuación, en la Tabla 23 se muestran los datos prácticos medidos, que permitieron observar el comportamiento del sensor posteriormente a su calibración y ratificar su comportamiento voltaico, Figura 40, donde se observó que, a menor humedad, mayor voltaje había, y que valores muy bajos indicaban humedades del suelo muy altas.

Tabla 23. Medidas prácticas que determinaron el comportamiento del sensor

Sensor de humedad de suelo Capacitivo – Higrómetro		
Medida Arduino (Sensor) [%]	Media real (termómetro) [%]	Variación [%]
3%	1%	-67%
10%	11%	10%
20%	21%	5%
30%	28%	-7%
40%	42%	5%
50%	51%	2%
60%	59%	-2%
70%	70%	0%
80%	81%	1%
90%	92%	2%
100%	99%	-1%

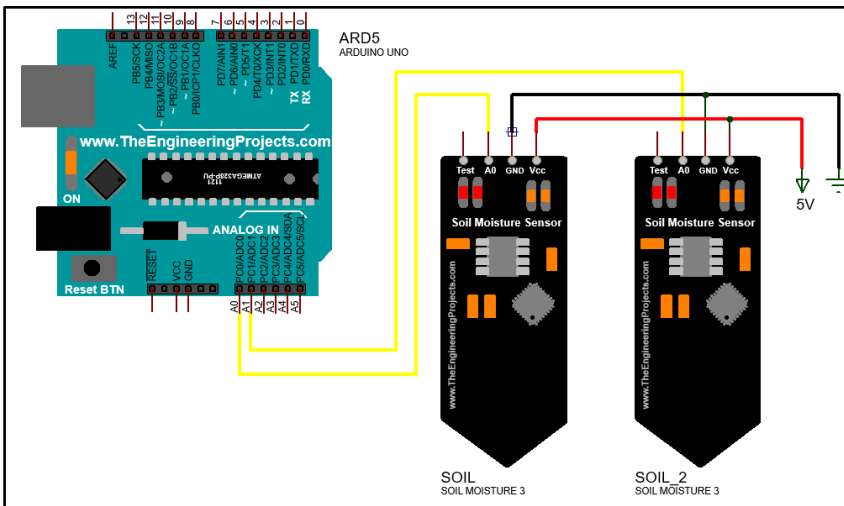
Nota. Autoría propia.



**Figura 40.** Grafica de relación de las medidas del higrómetro, el sensor y su variación % (Autoría propia).

La Figura 40 muestra el comportamiento y la variación porcentual del sensor respecto al instrumento de calibración utilizado, estos datos reflejan que el procedimiento de calibración por medio de la programación fue efectivo y reduce la brecha de diferencia entre los datos reales (instrumento) y los datos obtenidos por el sensor.

En la Figura 41 se muestra el circuito planteado para obtener las lecturas y controlar los sensores de humedad, cada uno de los sensores se conectó a una alimentación de 5V y su respectiva tierra, en cuanto a la línea de transporte de datos se ocuparon dos pines análogos, el A0 y el A1 cada uno ocupado por un sensor.

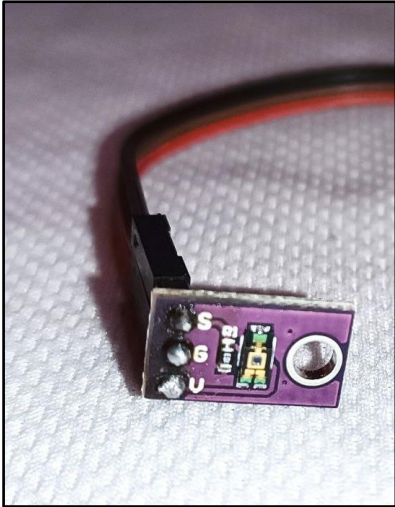


**Figura 41.** Diseño de circuito propuesto para los sensores de humedad (Autoría propia).

### ***Sensor de luminiscencia – Temt6000***

Este sensor se destaca entre otros por su rendimiento siendo un dispositivo compacto y altamente eficiente, Figura 42, en primer lugar, su bajo consumo eléctrico lo hace perfecto para aplicaciones que requieren el uso de las baterías y una alta eficiencia energética de ellas. Además, el sensor es muy sensible a cambios en la longitud de onda, lo que le permite detectar variables con gran precisión en el rango de 350 a 800 nanómetros. Otra ventaja clave del sensor es su capacidad para trabajar con voltajes que oscilan entre 2.7 y 5.5 V, esto representa la compatibilidad con el microcontrolador que controla el subsistema de adquisición de datos que es fundamental para garantizar una integración y funcionalidad correcta de todo el proyecto.

Por último, el consumo de corriente de este sensor es extremadamente bajo, llegando a solo 500 microamperios, esta característica lo convirtió en una opción muy atractiva para la adquisición de la variable de iluminación (Lux) que era necesaria.



**Figura 42.** Sensor TEMT6000 (Autoría propia).

#### *Caracterización y calibración del sensor*

Para caracterizar y calibrar el sensor utilizado en el experimento, se empleó nuevamente un higrómetro analógico. Este dispositivo permitió obtener mediciones aproximadas de la iluminación ambiental presente en el área de cultivo de las plantas experimentales. El higrómetro es capaz de medir tres variables distintas: el pH de la muestra, la humedad y la cantidad de iluminación ambiente, con un rango de 0 a 20000 lux. Cabe destacar que este instrumento cuenta con sondas de 10 cm de longitud y presenta un alto grado de eficiencia en cuanto a su consumo energético.

Después, fue necesario llevar a cabo la calibración del dispositivo. Para ello, se tuvieron en cuenta dos variables:  $I_{min}$  e  $I_{max}$ . En primer lugar, se midió el valor de iluminación presente en un ambiente completamente oscuro, utilizando el sensor sin estar expuesto a ningún tipo de iluminación y totalmente cubierto. A continuación, se determinó la lectura en la que el sensor quedaba completamente expuesto a la luz del sol. Con estas dos variables, se procedió a mapear todos los valores analógicos dentro de un rango de valores entre 0 Lux (lectura sin iluminación) y 20000 Lux (lectura del sensor bajo la luz del sol). Gracias a este proceso, se pudo establecer una relación entre los valores mínimos y máximos de iluminación que se podrían obtener en función del entorno en el que se encuentra el cultivo.

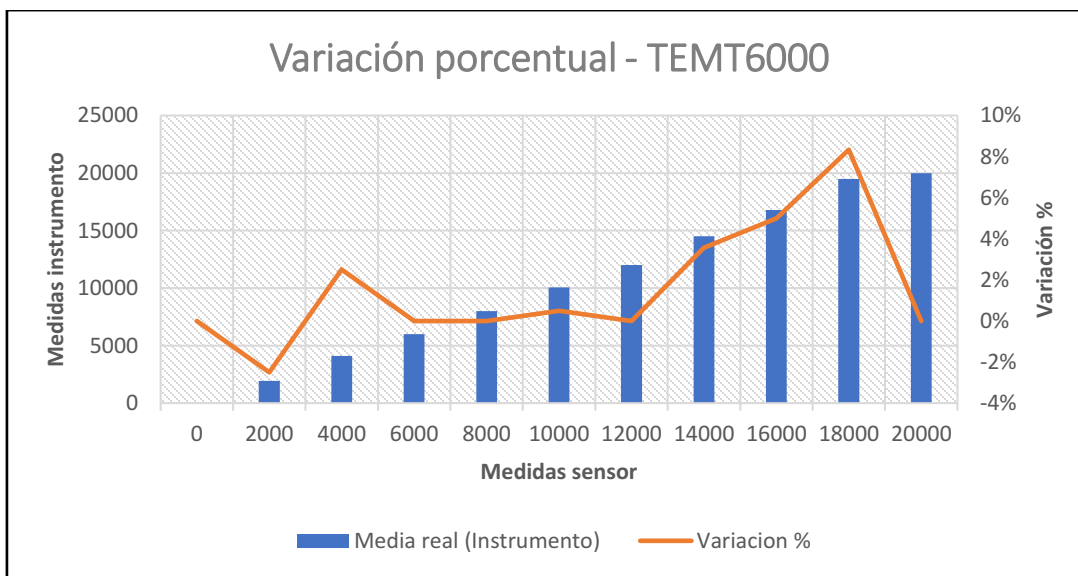
Una vez que el sensor fue calibrado, se ajustaron los valores para establecer un porcentaje mínimo y máximo de iluminación basándose en los datos obtenidos del higrómetro, hasta lograr mediciones muy similares. En la Tabla 24 se presenta los datos prácticos medidos, los cuales permitieron observar el comportamiento del sensor después de su calibración y confirmar su

comportamiento eléctrico. Además, en la Figura 43 se puede observar una representación gráfica de estos datos.

Tabla 24. Medidas prácticas que determinaron el comportamiento del sensor

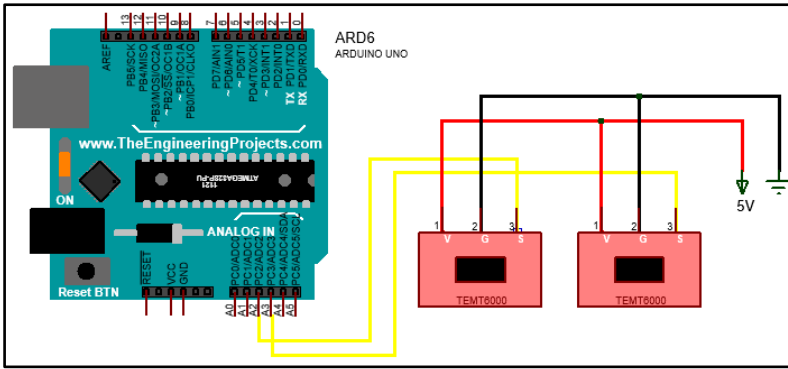
Sensor de iluminación TEMENT6000		
Medida Arduino (Sensor) [Lux]	Media real (Instrumento) [Lux]	Variación [%]
0	0	0%
2000	1950	-3%
4000	4100	2%
6000	6000	0%
8000	8000	0%
10000	10050	0%
12000	12000	0%
14000	14500	4%
16000	16800	5%
18000	19500	8%
20000	20000	0%

Nota. Autoría propia.



**Figura 43.** Grafica de relación de las medidas del sensor, instrumento y su variación % (Autoría propia).

El diseño del circuito para el sensor se muestra en la Figura 44, este enfoca en mostrar las conexiones al microcontrolador Arduino UNO y los requisitos específicos físicos de los sensores. Estos sensores requieren dos pines analógicos disponibles, así como conexiones a los pines GND (tierra) y VCC (alimentación) de 5V.



**Figura 44.** Diseño de circuito propuesto para los sensores de iluminación (Autoría propia).

### *Variables potencia de irradiación LoRa 433 MHz y wifi 2.4 GHz*

En el proyecto fue muy importantes medir la potencia de irradiación no ionizante en las plantas experimentales, esto haciendo referencia al uso de los módulos Lora 1278 y un ESP8266 por varias razones fundamentales. En primer lugar, la radiación no ionizante, aunque no causa daño directo al ADN o tejidos biológicos como los rayos X, puede tener efectos acumulativos y a largo plazo en la salud humana y el entorno. Medir la potencia de esta radiación nos permite monitorear y evaluar si los niveles de exposición están dentro de los límites seguros establecidos por las regulaciones y normativas.

Además, la medición de la potencia de irradiación no ionizante es esencial para asegurar un entorno de trabajo seguro y saludable para los empleados de la planta siempre asegurando una transmisión correcta de datos dentro de los cultivos. Al monitorear regularmente los niveles de irradiación, es posible identificar y corregir cualquier anomalía o situación de riesgo que pueda surgir. Contribuyendo a la prevención de posibles efectos negativos para la salud, como enfermedades relacionadas con la radiación o la fatiga acumulativa en el desarrollo de los cultivos.

La medición de la potencia de irradiación no ionizante también es importante para garantizar el correcto funcionamiento y rendimiento de los dispositivos electrónicos, como el módulo Lora 1278 y el ESP8266. La radiación no ionizante puede interferir con las señales y la comunicación inalámbrica, lo que afecta la calidad y confiabilidad de los datos transmitidos. Al medir y controlar la potencia de irradiación, se pueden tomar medidas correctivas y asegurar un funcionamiento óptimo de estos dispositivos.

A continuación, se presenta una tabla que ilustra los niveles de irradiación según la potencia de recepción. La Tabla 25 es esencial para garantizar el uso seguro de los dispositivos y asegurar una transmisión de datos precisa y confiable.

Tabla 25. Tabla de niveles de irradiación de los módulos de irradiación utilizados

Nivel RX	XL1278 (dBm)	ESP8266 (dBm)
Muy malo	$\leq -120$	$\leq -90$
Malo	-120 a -115	-90 a -80
Regular	-115 a -105	-80 a -70
Bueno	-105 a -95	-70 a -60
Muy bueno	$\geq -95$	$\geq -60$

*Nota.* La tabla fue construida con los aportes de (SEMTECH, 2015) .

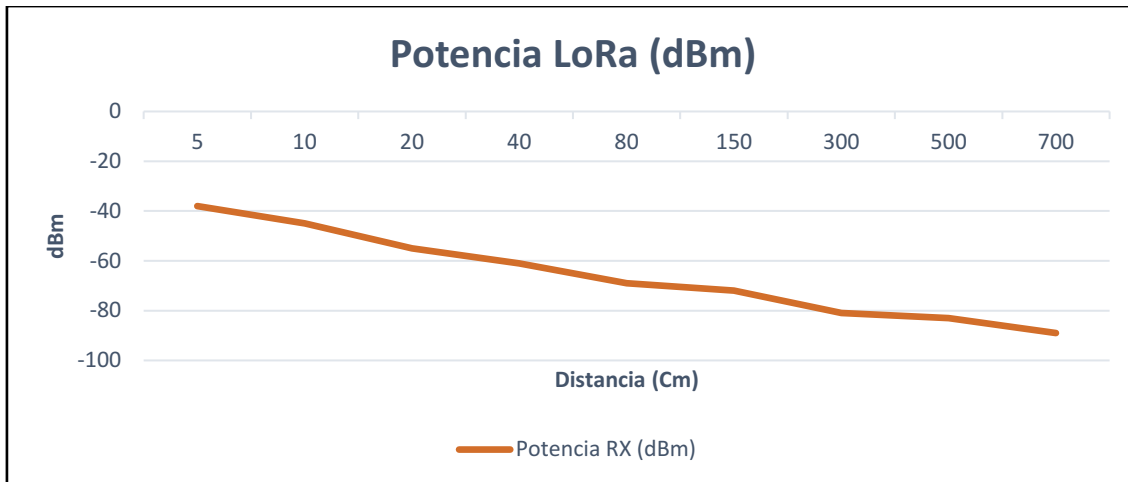
Seguido a esto se llevaron a cabo pruebas prácticas relacionadas con la tabla de niveles de irradiación. El objetivo de estas pruebas fue obtener la potencia de radiación recibida en función a la distancia de separación entre el transmisor y el receptor teniendo en cuenta los dos tipos de tecnología utilizados.

La siguiente información, Tabla 26, revela que la potencia de recepción, también conocida como RSSI, se mantiene en un rango óptimo incluso cuando se manejan distancias considerablemente largas. En este caso en particular, se logró conservar una potencia de irradiación satisfactoria a lo largo de aproximadamente siete metros, teniendo en cuenta que durante la realización de las pruebas no hubo objetos representativos que pudieran interferir en la irradiación. Este resultado demuestra una transmisión adecuada de los paquetes y el funcionamiento idóneo de los dispositivos durante el experimento.

Tabla 26. Valores de irradiación en función a la distancia de Tx y Rx LoRa.

Potencia RX (dBm)	Distancia (Cm)
-38	5
-45	10
-55	20
-61	40
-69	80
-72	150
-81	300
-83	500
-88	700

*Nota.* Autoría propia.



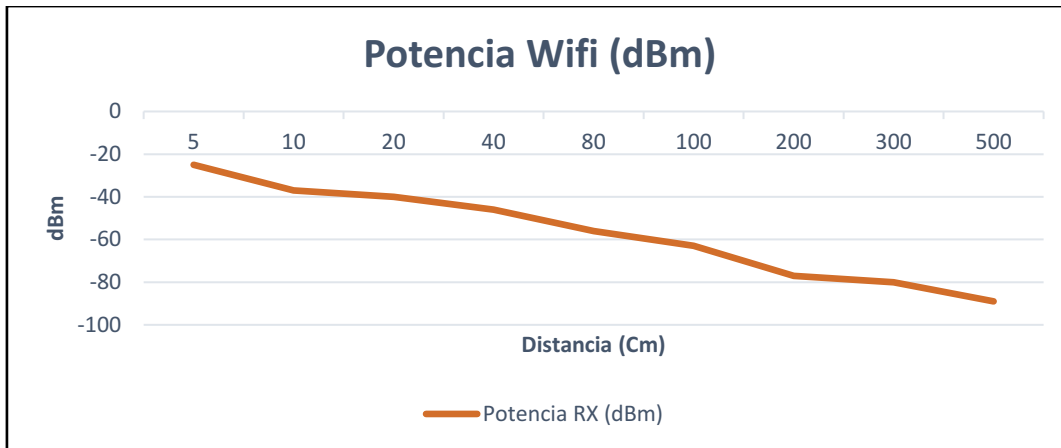
**Figura 45.** Niveles de irradiación reales del módulo LoRa XL1278 (Autoría propia).

En el caso de la irradiación wifi de 2.4 GHz, Tabla 27, se observaron valores de potencia más bajos. Esto se debe a la frecuencia utilizada por el wifi dentro del espectro electromagnético y su corta longitud de onda. A partir de un metro de distancia, la potencia de irradiación comienza a caer dentro de los rangos más bajos. A una distancia de cinco metros, la potencia se considera bastante deficiente, lo cual representa un problema significativo para la transmisión de información.

Tabla 27. Valores de irradiación en función a la distancia de Tx y Rx wifi.

Potencia RX (dBm)	Distancia (Cm)
-25	5
-37	10
-40	20
-46	40
-56	80
-63	100
-77	200
-80	300
-89	500

*Nota.* Autoría propia.



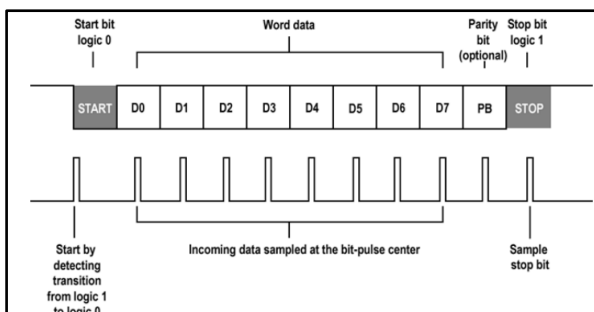
**Figura 46.** Niveles de irradiación reales del módulo ESP8266 (Autoría propia).

### Forma de transmisión de la información entre dispositivos

En cuanto a la comunicación entre dispositivos, se han considerado dos modalidades distintas: la asincrónica y la síncrona. A continuación, se ahondará en cada una de ellas.

#### *UART (asíncrona)*

Según (Universidad politecnica de Madrid, 2020), el protocolo Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) posibilita la comunicación síncrona, paralela y full duplex entre varios dispositivos. En el caso específico de la comunicación entre un Arduino Uno y un módulo NodeMCU, se empleó este protocolo. La comunicación UART se caracteriza por utilizar bits de inicio y de parada para establecer la comunicación con otros dispositivos. Además, permite velocidades de transmisión de hasta 7.37MHz, dependiendo del rendimiento de los dispositivos utilizados. Esta forma de comunicación incluye un bit de paridad que facilita la verificación del intercambio correcto de información entre los dispositivos. De este modo, es posible identificar tramas con posibles errores para luego retransmitir el tren de bits de manera adecuada para garantizar una transmisión precisa de los datos (págs. 30 - 38).



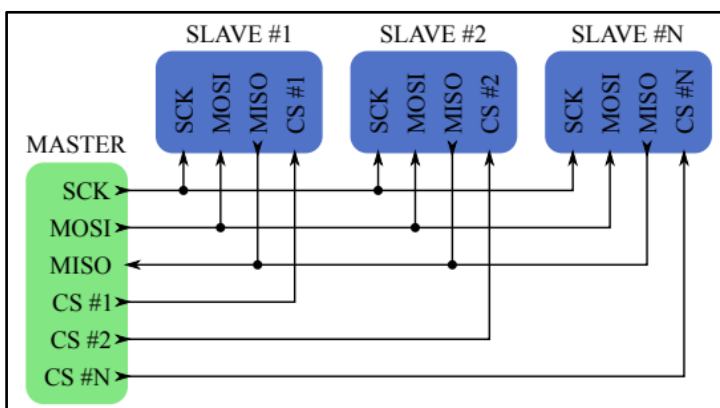
**Figura 47.** Ejemplo tren de bits enviado de manera asíncrona con el protocolo UART (Universidad politecnica de Madrid, 2020)



### ***SPI (síncrona)***

El protocolo Serial Peripheral Interface (SPI) posibilita la comunicación entre varios dispositivos o periféricos, como en el caso específico de la placa de desarrollo NodeMCU y el módulo XL1278. Este protocolo permite compartir múltiples señales de entrada y salida. Un ejemplo de esto es la configuración de una comunicación maestro-esclavo a través de los pines MOSI y MISO para el proyecto. Además, este protocolo utiliza un reloj (SCK) para la sincronización de la transmisión y pines de selección para determinar qué esclavo se va a atender (SS).

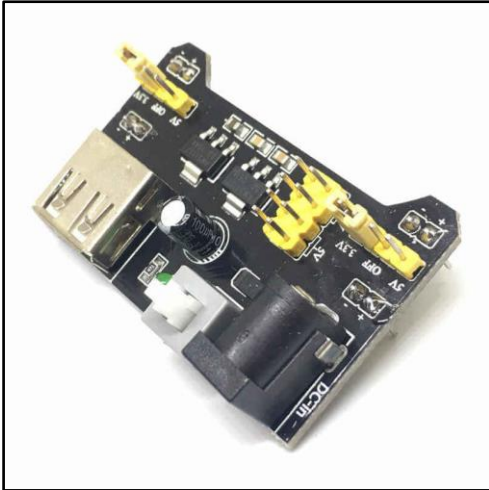
Una característica distintiva de este protocolo es que requiere múltiples conexiones físicas en comparación con otros protocolos. Sin embargo, esta mayor cantidad de conexiones permite lograr una mayor velocidad de transmisión entre los dispositivos. Esta fue una característica destacada que motivó su selección e implementación en el proyecto (Universidad politécnica de Madrid, 2020, págs. 52 - 55).



**Figura 48.** Ejemplo de operación protocolo SPI, maestro-esclavo (Universidad politécnica de Madrid, 2020).

### **Subsistema de alimentación de todo el sistema**

Para satisfacer la demanda de potencia requerida por el sistema, se empleó la placa FUE0017, Figura 49. Esta placa tiene la capacidad de soportar potencias máximas de aproximadamente 2.31 a 3.5 W, con corrientes de 700mA. Con el fin de asegurar un funcionamiento óptimo, la placa se alimenta con 12 voltios. Para regular el voltaje, se utiliza un regulador AMS1117, el cual permite obtener voltajes de operación de 3.3 y 5V en líneas separadas. Esta configuración garantiza una adecuada estabilidad y suministro de energía para el sistema en cuestión, (Bolaños, 2018, págs. 1 - 3).



**Figura 49.** Placa utilizada para la alimentación eléctrica de todo el proyecto (Electronilab, 2023).

La fórmula (2) se utilizó para calcular la potencia requerida por los dispositivos mientras operan simultáneamente. Al realizar este cálculo, se logró comprobar que la fuente de energía proporcionaba la potencia necesaria para alimentar adecuadamente los dispositivos, evitando así posibles fallos en su funcionamiento.

$$P = I * V \quad (2)$$

$$P = (1.5mA * 2) + (5mA * 2) + (100uA * 2) + (100mA) * 5V$$

$$P = 114mA * 5V$$

$$P = 0.57W$$

### **Circuito final de los sistemas de irradiación, censado y monitoreo**

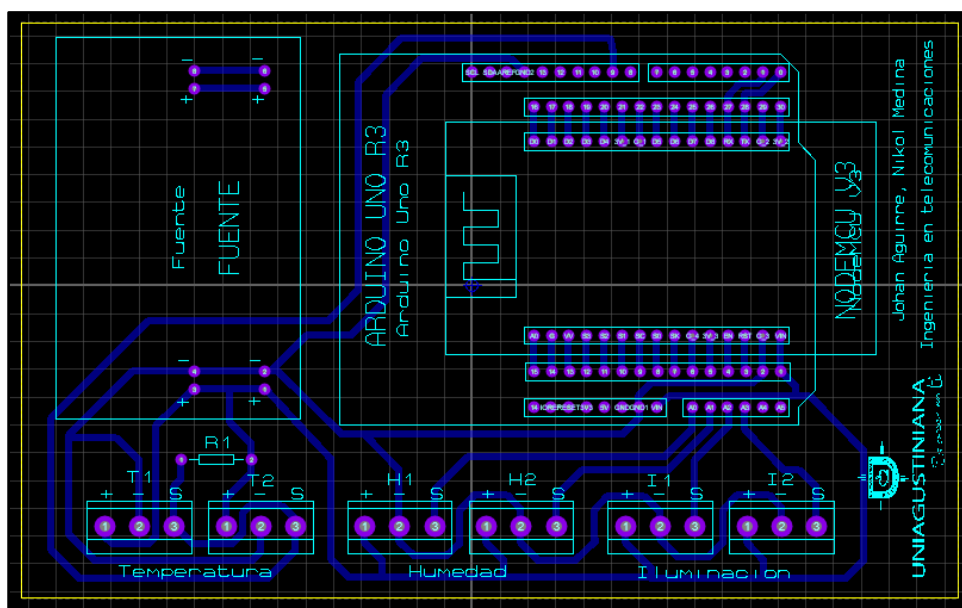
En el *Anexo 2* se presenta un esquema exhaustivo que detalla el diseño final del sistema, abarcando todas sus partes. Para la creación de este esquema, se utilizó la herramienta Proteus, la cual cuenta con diversas herramientas especializadas en el diseño de circuitos. Este completo diseño incluye:

- Sistema de irradiación LoRa (433 MHz);
- Sistema de irradiación wifi (2.4 GHz);
- Sistema de censado;
- Sistema de alimentación;
- Integración de la plataforma de almacenamiento de datos;
- Integración de la plataforma de monitoreo de variables.

## PCB (Circuito impreso)

Con la necesidad de optimizar los circuitos, se desarrolló y produjo un circuito impreso (PCB) diseñado específicamente para simplificar el proceso de montaje y mejorar el rendimiento general. Esto surgió con el propósito de elevar la calidad de presentación del proyecto, agilizar de manera significativa las conexiones de los sensores y fortalecer la resistencia del montaje en sí. El enfoque clave al crear este PCB fue optimizar la disposición de los componentes electrónicos, aprovechando al máximo el espacio disponible y reduciendo la complejidad del montaje. Al tener una estructura precisa y ordenada, se logró una distribución eficiente de los elementos, permitiendo una conexión más fluida y libre de interferencias.

La impresión del circuito en el PCB Figura 50 proporcionó una mayor durabilidad y resistencia a los factores externos, asegurando un funcionamiento confiable incluso en condiciones adversas. Los materiales de alta calidad y la tecnología de fabricación avanzada garantizaron la integridad estructural y la estabilidad eléctrica del PCB, minimizando así la posibilidad de fallos o interrupciones inesperadas, la vista 3D de la placa se muestra en el *Anexo 3*.

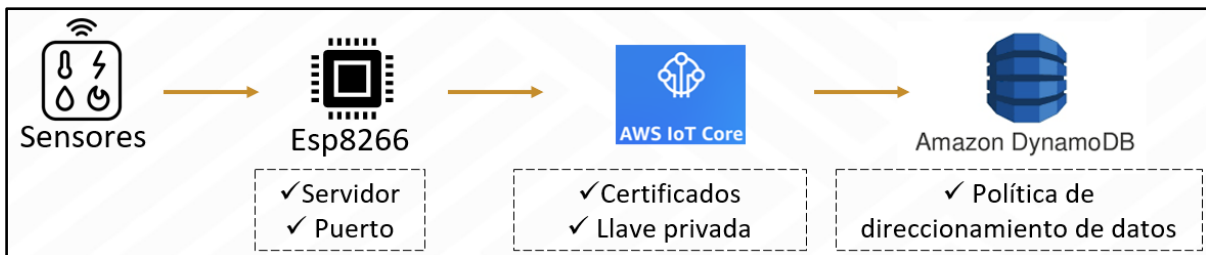


**Figura 50.** Diseño del circuito impreso del sistema (Autoría propia).

## Base de datos DynamoDB – AWS IoT Core

En el sistema de adquisición de datos se integró un servicio de software como servicio (SaaS) llamado DynamoDB, proporcionado por Amazon Web Services (AWS), esta es una base de datos NoSQL que permite almacenar una gran cantidad de datos mediante el paradigma de clave – valor, este permite almacenar los distintos registros con clave únicas para su recuperación. Esta elección

se realizó con el objetivo de mejorar el monitoreo de las diversas variables establecidas, además de permitir la creación de copias de seguridad de las tramas transmitidas y evitar la pérdida de datos. DynamoDB ofrece una solución confiable y escalable para almacenar y gestionar eficientemente los datos adquiridos, el esquema, Figura 51, muestra el cómo se llegan a transferir los datos a la plataforma de AWS.



**Figura 51.** Esquema de transmisión de datos a la base de datos NoSQL DynamoDB (Autoría propia).

En un principio, el Arduino Uno desempeñó un papel fundamental al captar e interpretar las señales eléctricas proporcionadas por cada uno de los sensores. Una vez procesadas, estas señales fueron transmitidas a través del protocolo de comunicación serial UART hacia uno de los módulos ESP8266. El microcontrolador (Arduino uno), haciendo uso de su capacidad de comunicación serial, estableció una conexión con el módulo ESP8266, que actúa como un puente hacia la plataforma AWS IoT Core. Para que esta transmisión sea posible, el módulo ESP8266 debe contar con una configuración específica. Por primera parte, se establece en su programación un puerto de comunicación designado para conexiones seguras (en este caso, el puerto 8883) y se indica la dirección del servidor AWS IoT Core.

Además, el módulo ESP8266 requiere de certificados y una llave privada volcados en su memoria física. Todos estos elementos son esenciales para llevar a cabo la autenticación del dispositivo (NodeMCU-ESP8266) con la plataforma. Los certificados y la llave privada permiten garantizar la seguridad y la integridad de la comunicación entre el dispositivo y la plataforma AWS IoT Core. Esta configuración establecida en el módulo ESP8266 asegura una conexión fiable y segura entre los sensores conectados al Arduino Uno y la plataforma en la nube. Gracias a esta estructura, los datos recopilados por los sensores pueden ser enviados y almacenados en AWS IoT Core para su posterior análisis y uso en diversas aplicaciones en la nube.

Una vez que el dispositivo se autentica satisfactoriamente, el módulo wifi se encarga de agrupar las variables de los sensores, junto con un identificador único (ID) y la fecha correspondiente al

momento de la lectura, en un archivo JSON, Figura 52. Este archivo es publicado mediante el protocolo MQTT / Publish, permitiendo así su transmisión hacia la plataforma AWS IoT Core, en el entorno de AWS IoT Core, los archivos JSON son recibidos y procesados, a través de la creación de políticas de direccionamiento y la configuración de administradores de datos (permiten manipular los archivos entrantes), se establece el flujo adecuado de los datos entrantes. Estas políticas y administradores definen cómo los datos deben ser gestionados, qué acciones se les permiten y qué restricciones aplicarles.

Una vez configuradas las políticas, los archivos JSON, son enviados y almacenados, Figura 53, en DynamoDB, al llegar los datos son acomodados secuencialmente según su orden de llegada, asegurando así la integridad temporal de la información. Este proceso de almacenamiento secuencial permite mantener una línea cronológica de los datos adquiridos, lo que resulta importantes para su posterior análisis y utilización en la plataforma. La combinación de AWS IoT Core, las políticas de direccionamiento, los administradores de datos y DynamoDB garantiza un flujo confiable y eficiente que permite gestionar los datos provenientes del sistema de adquisición de datos.



**Figura 52.** Archivo JSON enviado a la plataforma AWS IoT Core a través del protocolo MQTT(Autoría propia).

fecha	ID	1_Temperatura_1_(C)	2_Temperatura_2_(C)	3_Humedad_1_...	4_Humedad_2_...	5_Distancia_1_(cm)	6_Iluminacion_1_(Lux)	7_Rssi_(dBm)	8_Tipo
2023-05-12 19:54:11	50	21.75	22.12	0	0	248	447	-75	LoRa
2023-05-12 19:53:20	49	21.75	22.12	0	0	251	451	-77	LoRa
2023-05-12 19:52:02	48	21.69	22.19	0	0	250	453	-75	LoRa
2023-05-12 19:51:12	47	21.75	22.19	0	0	250	441	-75	LoRa
2023-05-12 19:50:00	46	21.81	22.12	0	0	250	466	-75	LoRa
2023-05-12 19:29:05	45	21.81	22.25	0	0	250	400	-79	LoRa
2023-05-12 19:28:00	44	21.87	22.51	0	0	251	360	-69	LoRa
2023-05-12 19:27:06	43	21.94	22.25	0	0	250	374	-74	LoRa
2023-05-12 19:25:59	42	21.94	22.51	0	0	250	570	-76	LoRa

**Figura 53.** Tabla de almacenamiento de las variables estudiadas (Autoría propia).

### Broker pub/sub MikroDash para monitoreo

Se implementó la plataforma MikroDash para el monitoreo de las variables, la cual también utiliza el protocolo MQTT para la comunicación de datos. Esta plataforma ofrece la capacidad de crear diversos dashboards para visualizar y supervisar las variables en tiempo real. Si bien es importante destacar que MikroDash brinda una funcionalidad importantes, se debe mencionar que su nivel de seguridad es reducido en comparación con la plataforma AWS IoT Core. A diferencia de AWS, esta utiliza un enfoque más simple para la autenticación, emplea el puerto 1883 utilizado para conexiones no seguras a través del servidor MQTT, y se establece un enlace con el servidor correspondiente, todo esto mediante la declaración en la programación de los módulos.

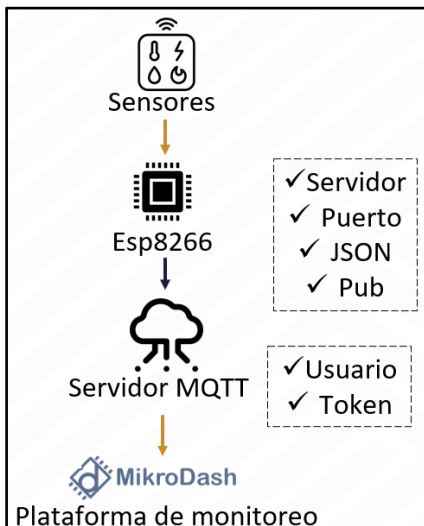
No obstante, para mejorar la seguridad en la plataforma, MikroDash tiene un sistema de autenticación mediante un nombre de usuario (administrador) y un token aleatorio con fechas de caducidad que se pueden cambiar por el administrador. Estos mecanismos añaden una capa adicional de seguridad al asegurar que solo los usuarios autorizados puedan acceder a los datos publicados desde el dispositivo ESP8266 hacia la plataforma.

Aunque el Broker MikroDash no cuenta con el mismo nivel de seguridad avanzado de AWS IoT Core, el nombre de usuario y el token, contribuyen a salvaguardar la integridad de los datos transmitidos y publicados en la plataforma.

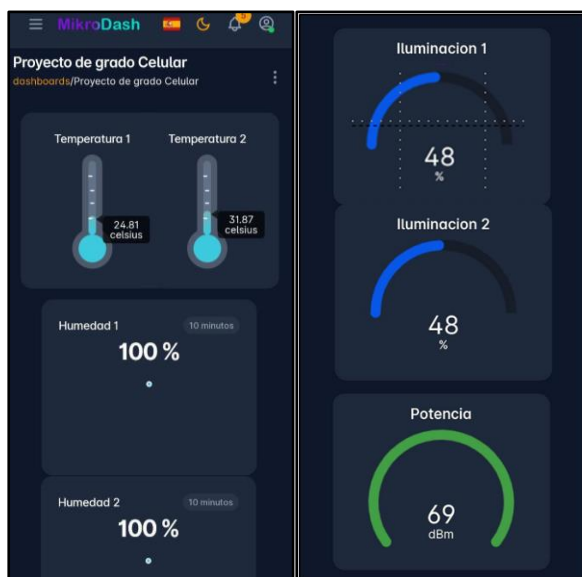
El proceso de publicación de los datos siguió una ruta similar a la del almacenamiento. Primero, el Arduino recibió las señales y las procesó internamente. Luego, las transmitió a la placa de desarrollo NodeMCU a través del protocolo UART, estableciendo una conexión entre ambos dispositivos. Una vez que los datos fueron transferidos al NodeMCU, se inició el proceso de publicación hacia la plataforma MikroDash. Para lograr esto, se utilizaron site diferentes tópicos

designados que actúan como canales de comunicación específicos para cada variable. Cada tópico representa una categoría o tipo de información que se desea publicar y supervisar en la plataforma.

Antes de realizar la publicación, se llevó a cabo un proceso de autenticación para garantizar la seguridad y la integridad en la transmisión de los datos, lo que implica la verificación de credenciales y la validación del dispositivo, una vez autenticados, los datos se publican en MikroDash a través de los tópicos correspondientes, lo que permite su visualización y supervisión en tiempo real mediante los dashboards creados en la plataforma.



**Figura 54.** Esquema de transmisión de datos a la plataforma de monitoreo MikroDash (Autoría propia).



**Figura 55.** Ejemplo de visualización de los Dashboards de monitoreo de las variables (Autoría propia).

### **Implementación del sistema de adquisición para la generación de alertas**

Según (Cortes & Vargas, 2020), la agricultura urbana ha experimentado un notable crecimiento como una forma de producción de alimentos y plantas en entornos urbanos y rurales. Esto permite estudiar el comportamiento de los alimentos frescos para consumo propio y también para su comercialización. En la fundación Mujeres Empresarias Marie Poussepin, una organización sin fines de lucro en Bogotá, Colombia, la agricultura urbana es la actividad principal.

Con este contexto, se identificó una necesidad en el sistema de riego utilizado por las mujeres en la fundación. El sistema actual carece de tecnología para medir la humedad del suelo, controlar el tiempo de riego, monitorear los factores climáticos y determinar las dosis adecuadas de riego. Como solución a esta problemática, se implementó un sistema de sensores de humedad y temperatura en los surcos de cultivo. Estos sensores envían información a un sistema de control, el cual se encarga de iniciar el riego de acuerdo con los parámetros y las necesidades establecidas. Todos los datos recopilados por los sensores son almacenados en la nube mediante IoT (Internet de las cosas), en un servidor web de acceso libre y de fácil descarga de información. Esto permite utilizar los datos con fines estadísticos e investigativos, y además facilita la identificación de parámetros óptimos para cada cosecha en el futuro (pág. 15).

Con el propósito de alcanzar los objetivos de este proyecto, se plantearon diferentes parámetros ambientales que deben tenerse en cuenta para asegurar el desarrollo adecuado de los cultivos. En la Tabla 28 se presenta una recopilación de los rangos ideales para algunos cultivos que se encuentran en Colombia.

Tabla 28. Rangos aproximados para el desarrollo correcto de distintos cultivos

<b>Cultivo</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
Arveja	60 a 80	10 a 20
Trigo	50 a 70	20 a 25
Cebada	60 a 70	15 a 20
Frijol	60 a 80	15 a 30
Arroz	70 a 80	25 a 35
Maíz	60 a 80	30 a 30

*Nota.* Autoría propia.

Para la generación de alertas, se implementó todo el sistema de irradiación y de adquisición de datos, con el objetivo de obtener la información necesaria que permitiera reflejar el comportamiento del cultivo experimental y facilitar el uso de la plataforma de monitoreo de variables MikroDash previamente utilizada. La ventaja de esta opción es que se pueden crear



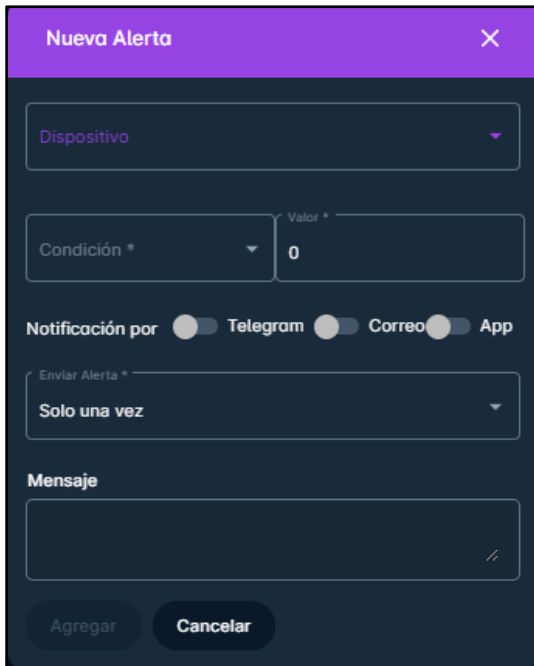
diversas alertas aprovechando las variables publicadas por cada uno de los tópicos inscritos en el Broker de la plataforma. De esta manera, es posible generar alarmas a través de correo electrónico, la aplicación de mensajería instantánea Telegram, así como en cualquier dispositivo móvil o de escritorio que permita la instalación de las aplicaciones de la plataforma.

Es importante destacar que este tipo de alertas se reciben de manera instantánea, sin que sea necesario tener la aplicación en primer plano, y se activan automáticamente cuando la plataforma de monitoreo detecta algún cambio significativo en las variables preconfiguradas. Por supuesto, para aprovechar estas funcionalidades, se deben configurar previamente las restricciones necesarias.

### **Configuración de las alertas**

A continuación, se detalla el procedimiento adecuado para generar diferentes alertas, resaltando las distintas configuraciones que deben considerarse para procesar los datos y generar notificaciones de manera precisa. Una vez iniciada la sesión en la plataforma de monitoreo y accedido al panel de control específico desde el cual se desean generar las alertas, es necesario dirigirse a la pestaña denominada "Notificaciones y Alertas". Luego se debe agregar una nueva alerta mediante los siguientes pasos:

- En la plataforma se debe elegir el tópico o variable a analizar con el fin de generar alertas adecuadas;
- Es necesario seleccionar una condición disponible (mayor que, menor que, igual a o diferente a) y establecer un valor para delimitar la condición;
- A continuación, se deben utilizar los controles deslizantes para seleccionar qué tipo de notificaciones se desean recibir: Telegram (con un Bot previamente configurado en una cuenta), Correo (utilizando una cuenta configurada en los menús de administración) y aplicación (una aplicación de escritorio o dispositivos móviles compatible con cualquier sistema operativo);
- Se configura la frecuencia de envío de cada mensaje, pudiendo elegir entre dos opciones: "solo una vez" o "cada cinco minutos";
- Y, por último, se debe especificar el mensaje que se enviará junto con la notificación.



**Figura 56.** Menú de configuración de la alertas en la plataforma MikroDash (Autoría propia).

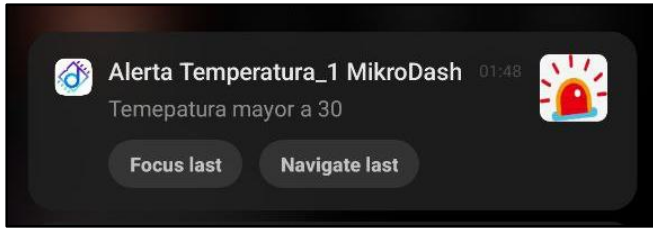
Después de configurar las alertas según los parámetros establecidos anteriormente, el apartado de notificaciones y alertas guardará esta configuración para generar las alertas de manera instantánea en el momento en que se cumpla alguna de las condiciones establecidas.

Notificaciones y Alertas								
Dispositivo	Condición	Valor	Telegram	Correo	App	Enviar Alerta	Mensaje	Acciones
Temperatura_1	Mayor a	30	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Solo una vez	Temperatura mayor a 30	
Temperatura_2	Mayor a	35	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Solo una vez	Temperatura mayor a 35	
Humedad_1	Mayor a	70	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Solo una vez	Humedad excedida!!!	
Humedad_2	Mayor a	70	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Solo una vez	Humedad excedida!!!	
Iluminacion_1	Menor a	50	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Solo una vez	Sin iluminacion suficiente	
Potencia_WiFi	Menor a	-90	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Solo una vez	Sin potencia de irradiación suficiente!!!	

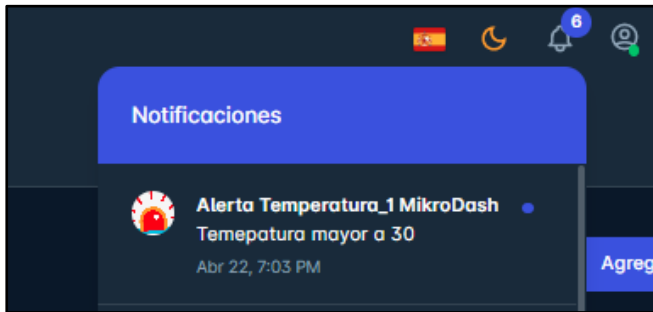
**Figura 57.** Menú de notificaciones y alertas de la plataforma (Autoría propia).

### Obtención de alertas

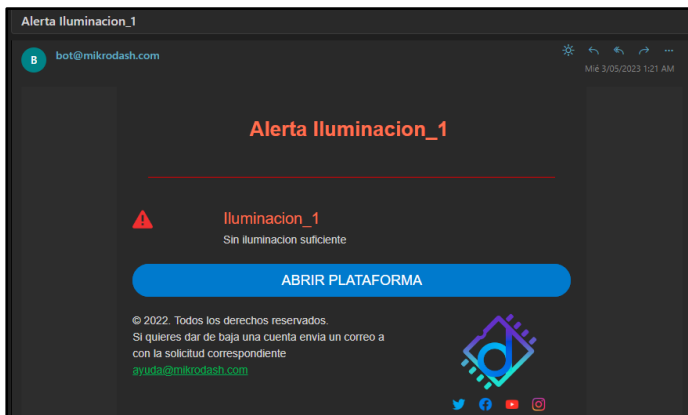
Dado que la plataforma de monitoreo ofrece una amplia gama de servicios para generar alertas, como lo son Telegram, correo electrónico y aplicaciones, y volviendo a destacar que se hace sin tener el aplicativo en ejecución constantes, se presentan ejemplos de algunas alertas generadas durante las pruebas realizadas para el proyecto.



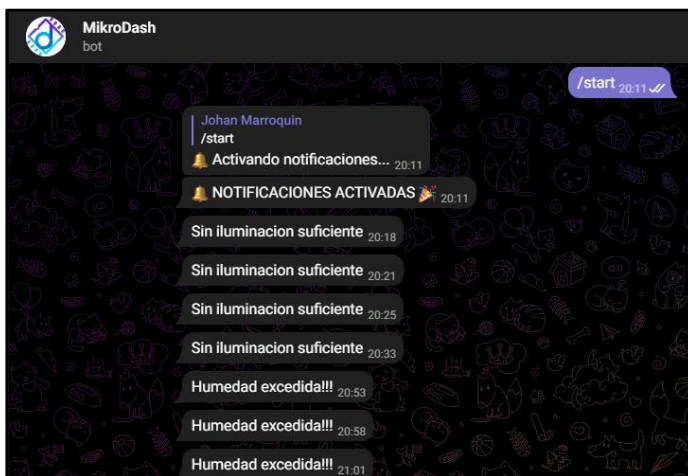
**Figura 58.** Alerta obtenida en un dispositivo móvil (Autoría propia).



**Figura 59.** Alerta obtenida en un dispositivo de escritorio (Autoría propia).



**Figura 60.** Alerta obtenida en un correo electrónico (Autoría propia).



**Figura 61.** Alerta obtenida en la aplicación de mensajería instantánea - Telegram (Autoría propia).

## **Conclusiones**

Con la indagación teórica y desarrollo experimental de los distintos procesos descritos anteriormente, se concluyó que, se realizó un montaje funcional que permitió la irradiación de las plantas utilizando las tecnologías LoRa y wifi. Esto con el uso de módulos y tarjetas de desarrollo con los que se consiguió obtener una irradiación constante con niveles de potencia adecuados que consintió establecer que este sistema tiene el potencial de ser útil para futuros estudios sobre el crecimiento, cuidado y la producción de distintos cultivos, y que también puede mejorar significativamente la eficiencia en la transmisión y control de datos en la industria agrícola o proyectos de IoT.

Además, se logró diseñar un sistema de adquisición de datos, que permitió el monitoreo y transmisión de información de los sensores del cultivo. Mediante la inclusión de múltiples sensores garantizando la adquisición precisa y completa de datos, también, la plataforma de monitoreo y almacenamiento de datos utilizada demostró ser eficiente y flexible, mientras que los diversos protocolos de comunicación utilizados permitieron una transmisión efectiva de los datos.

Y finalmente, la implementación del sistema de adquisición de datos ha posibilitado la generación de alertas en tiempo real de manera ágil y sencilla a través de la plataforma, servicios de mensajería instantánea y correo electrónico. La utilización de diversos sensores, protocolos y dispositivos de transmisión de datos han asegurado la detección temprana de posibles problemas en alguno de los subsistema y cambios importantes en la variables analizadas en los cultivos.

## **Recomendaciones**

Durante el desarrollo del proyecto, se identificaron distintas características que podrían resultar bastante útiles para su continuación y ampliación funcional de este. En primer lugar, se puede mencionar la posibilidad de crear redes LoRaWAN basándose en la conexión de múltiples transceptores LoRa. Esta solución permitiría cubrir cultivos y áreas mucho más extensas, utilizando un único dispositivo receptor como Gateway. En este punto, resulta necesario profundizar en el uso del protocolo de Internet (IP) y todas sus capas, a fin de establecer una infraestructura sólida y eficiente para la transmisión de datos en la red. Permitiendo una mayor flexibilidad y escalabilidad en el monitoreo y control de los cultivos, así como una integración más fluida con otros sistemas y servicios basados en IP.

En el subsistema de wifi, se identificó la posibilidad de utilizar peticiones GET, lo cual puede resultar útil para la creación de sistemas de monitoreo y almacenamiento privados. Esto en situaciones donde no se requiere un nivel elevado de seguridad o cuando se desea mantener la información sin exposición a terceros. Mediante el uso de estas peticiones, es posible desarrollar interfaces de monitoreo local de manera sencilla y sin necesidad de realizar una inversión significativa de recursos. Siendo así, se brinda la ventaja de contar con un sistema de monitoreo personalizado, adaptado a las necesidades específicas del proyecto, sin comprometer la seguridad de los datos o depender de servicios externos y costosos.

Finalmente, en el apartado de censado, se recomienda realizar una calibración lo más precisa posible, se logra utilizando sensores de alta calidad y aplicando diversos métodos de calibración. El objetivo es obtener mediciones de variables que realmente representen el comportamiento de los cultivos. De esta manera, las alertas y notificaciones generadas para tomar acciones correctivas serán precisas y de gran ayuda. La precisión en la calibración de los sensores garantiza que los datos recopilados sean confiables y reflejen con precisión el estado de los cultivos y dispositivos. Permitiendo así la toma de decisiones eficientes, maximizando los beneficios del sistema de monitoreo implementado y evitando alertas innecesarias.

## Referencias

- AG electronica S.A. (2019). *A000005: ARDUINO NANO*. Obtenido de <https://agelectronica.lat/pdfs/textos/A/A000005.PDF>
- Agencia Nacional del Espectro. (2016). *RESOLUCIÓN 711 DE 2016*. Obtenido de [https://normograma.mintic.gov.co/mintic/docs/resolucion\\_ane\\_0711\\_2016.htm](https://normograma.mintic.gov.co/mintic/docs/resolucion_ane_0711_2016.htm)
- Amazon Web Services, Inc. (2023). *Amazon Web Services, Inc.* Obtenido de ¿Qué es IoT?: <https://aws.amazon.com/es/what-is/iot/#:~:text=El%20t%C3%A9rmino%20IoT%2C%20o%20Internet,como%20entre%20los%20propios%20dispositivos>.
- Ambiente, M. d. (1993). *LEY 99 DE 1993*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-99-1993.pdf>
- Andrade, M., & Peñuela, J. (2019). *SISTEMA DE TELEMETRÍA INALÁMBRICO PARA LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE SEGURIDAD EN UN TANQUE DE PRODUCCIÓN*. Bogotá. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/16026/AndradeHerreraMauricio2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arduino Store. (2023). *Arduino Store*. Obtenido de <https://store.arduino.cc/products/arduino-micro>
- Arduino Store. (2023). *Arduino Store*. Obtenido de <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3-smd>
- Armesto Arenas, A. (2015). *Efectos de la radiación electromagnética sobre la germinación del maíz*. Bogotá. Obtenido de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/9016/10373>
- Bausa, J., Garcia, C., Zaragoza, B., Gil, A., Moreno, D., & Galiana, A. (2020). *SENSORES DE TEMPERATURA*. Argentina. Obtenido de [https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/14089/mod\\_resource/content/0/SensoresTemperatura.pdf](https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/14089/mod_resource/content/0/SensoresTemperatura.pdf)
- Bolaños. (2018). *Fuente para protoboard 3.3v o 5V, 700ma*. Argentina. Obtenido de <https://www.bolanosdj.com.ar/MOVIL/ARDUINO2/FuenteProtoboard.pdf>
- Bruno, A. (2019). *ESP 32 NodeMCU*. Argentina. Obtenido de [https://www.microelectronicash.com/downloads/ESP32\\_MANUAL.pdf](https://www.microelectronicash.com/downloads/ESP32_MANUAL.pdf)

- Cadavid Cortes, V., & Vargas Garcia, M. F. (2020). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO Y MONITOREO DE VARIABLES AMBIENTALES MEDIANTE IOT EN LOS CULTIVOS URBANOS DE LA FUNDACIÓN MUJERES EMPRESARIAS MARIE POUSSEPIN*. Bogotá. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/5dbe9100-e30b-4c32-a627-a0492baa7f56/content>
- Congreso de Colombia. (2013). *LEY No. 102 DE 2013*. Obtenido de <http://leyes.senado.gov.co/proyectos/images/documentos/Textos%20Radicados/proyectos%20de%20ley/2013%20-%202014/PL%20102-13%20Contaminacion%20Electromagntica.pdf>
- Congreso de la republica. (2009). *Ley 1341 de 2009*. Obtenido de [https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=36913](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=36913)
- Congreso de la republica. (2019). *LEY 1978 DE 2019*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=98210#:~:text=El%20permiso%20de%20uso%20del,internacionales%20del%20mercado%2C%20no%20afecten>
- Cortes, V., & Vargas, M. (2020). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO Y MONITOREO DE VARIABLES AMBIENTALES MEDIANTE IOT EN LOS CULTIVOS URBANOS DE LA FUNDACIÓN MUJERES EMPRESARIAS MARIE POUSSEPIN*. Bogotá. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/5dbe9100-e30b-4c32-a627-a0492baa7f56/content>
- D'Ambrosio, U., Garnatje, T., Gras, A., Parada, M., & Vallés, J. (2018). *Inventario Español de los Conocimientos Tradicionales relativos a la Biodiversidad Agrícola*. España. Obtenido de [https://digital.csic.es/bitstream/10261/197260/1/Pisum\\_sativum.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/197260/1/Pisum_sativum.pdf)
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2015). *El cultivo de la arveja en Colombia*. Bogotá. Obtenido de [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol\\_Insumos31\\_mar\\_2015.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos31_mar_2015.pdf)
- Diaz Soto, L. (2006). *Las radiaciones no ionizantes y su efecto sobre la salud humana*. Cuba. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/mil/v35n3/mil08306.pdf>

- Diaz, J., & Guarnizo, L. (2020). *Sistema distribuido de captura y visualización de espectro para la banda ISM de 2.4 GHz*. Santiago de Cali. Obtenido de <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/12279/T09128.pdf;jsessionid=BFD16062565560CB7EDA513BD61BA185?sequence=17>
- DNA Tech. (2023). *XL1278 LORA MODULE*. Obtenido de <https://www.dnatechindia.com/xl-1278-SMT-433-MHz-LORA-module-sx1278.html>
- Ebyte. (2020). *E220-900T30D User Manual*. Sichuan. Obtenido de <https://www.ebyte.com/en/downpdf.aspx?id=1214>
- EDS Robotics. (2022). *EDS Robotics*. Obtenido de EDS Robotics: <https://www.edsrobotics.com/blog/tipos-sensores-mas-usados/>
- Electronilab. (2023). *Electronilab*. Obtenido de <https://electronilab.co/tienda/modulo-transceptor-rf-nrf24l01-2-4-ghz-antena-sma-lna-y-pa/>
- Flego, F., & Garcia, E. (2017). *Agricultura de Precisión*. Argentina. Obtenido de <https://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf>
- Galindo Pacheco, J. R. (2020). *Manual de recomendaciones técnicas para su cultivo en el departamento de Cundinamarca*. Bogotá. Obtenido de [http://investigacion.bogota.unal.edu.co/fileadmin/recursos/direcciones/investigacion\\_bogota/Manuales/12-manual-arveja-verde-2020-EBOOK.pdf](http://investigacion.bogota.unal.edu.co/fileadmin/recursos/direcciones/investigacion_bogota/Manuales/12-manual-arveja-verde-2020-EBOOK.pdf)
- Gallego, L., Torres, J., & Agudelo, L. (2014). *Análisis integral del marco normativo colombiano en materia de exposición pública a radiaciones electromagnéticas emitidas por estaciones base de telefonía móvil*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/ojum/v13n25/v13n25a02.pdf>
- Gomez, M., & Cervantes, J. (2017). *Introducción a la Programación Web con Java: JSP y Servlets, JavaServer Faces*. Mexico. Obtenido de [https://www.cua.uam.mx/pdfs/revistas\\_electronicas/libros-electronicos/2017/java/Java.pdf](https://www.cua.uam.mx/pdfs/revistas_electronicas/libros-electronicos/2017/java/Java.pdf)
- Granados, C. (2017). *Programando directamente un ESP8266*. Barcelona. Obtenido de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/105042/Memoria\\_TFG\\_Carles\\_Ubach.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/105042/Memoria_TFG_Carles_Ubach.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- GreenForest. (2023). *GreenForest*. Obtenido de <https://greenforest.com.co/producto/medidor-de-humedad-del-suelo-3-en-1-humedad-luz-y-ph/>



- Guevara, R., & Serna, E. (2013). *UNA PROPUESTA DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE LA INTERFERENCIA ENTRE REDES WIFI POR SOLAPAMIENTO DE CANALES*. Medellín. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v23n2/v23n2a01.pdf>
- Heredia Rivadeneria, A. E., & Lucero Andrade, P. F. (2021). *Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada*. Ecuador. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/35875/1/Trabajo%20de%20Titulaci%C3%B3n.pdf>
- Hoperf. (2019). *Low Power Long Range Transceiver Module*. Guandong. Obtenido de <https://www.hoperf.com/data/upload/portal/20190801/RFM95W-V2.0.pdf>
- Huergo, L. (2020). *Temporizador 555*. Argentina. Obtenido de <http://www.huergo.edu.ar/tcweb/pdf/APCap11.pdf>
- INSTITUT SA PALOMERA. (2019). *Control de acceso al medio - Trama de enlace de datos*. Girona. Obtenido de <https://www.sapalomera.cat/moodlecf/RS/1/course/module4/4.4.4.8/4.4.4.8.html>
- Instituto Nacional de Ciberseguridad. (2019). *Seguridad en red wifi*. España. Obtenido de <https://www.incibe.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/guia-de-seguridad-en-redes-wifi.pdf>
- Instituto Nacional de Ciberseguridad. (2019). *Seguridad en red Wifi*. España. Obtenido de <https://www.incibe.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/guia-de-seguridad-en-redes-wifi.pdf>
- Ja - Bots. (2023). *Sonda sensor de Temperatura DS18B20*. Obtenido de <https://ja-bots.com/producto/sonda-sensor-de-temperatura-ds18b20/>
- Ja-Bots. (2023). *Ja-Bots*. Obtenido de <https://ja-bots.com/producto/modulo-inalambrico-nodemcu-v3-esp8266-ch340/>
- Ja-Bots. (2023). *Ja-Bots*. Obtenido de <https://ja-bots.com/producto/modulo-wifi-serial-esp-01-esp8266/>
- Lactogandolfo. (2023). [http://www.lactogandolfo.com/index.php?route=product/download/get&download\\_id=24](http://www.lactogandolfo.com/index.php?route=product/download/get&download_id=24). Mexico. Obtenido de [http://www.lactogandolfo.com/index.php?route=product/download/get&download\\_id=24](http://www.lactogandolfo.com/index.php?route=product/download/get&download_id=24)

- Lauriac, N. (2016). *Diseño e implementación de un sistema de monitoreo*. Lausanne: Avenue de Montchoisi. Obtenido de [https://www.tdh.ch/sites/default/files/161019\\_tdh\\_guidemonitoring\\_es\\_version\\_impression.pdf](https://www.tdh.ch/sites/default/files/161019_tdh_guidemonitoring_es_version_impression.pdf)
- López, F. (2020). *EL estandar IEEE 802.11 Wireless LAN*. España. Obtenido de <https://www.dit.upm.es/~david/tar/trabajos2002/08-802.11-Francisco-Lopez-Ortiz-res.pdf>
- Mager Stellman, J. (1998). *ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO*. Madrid. Obtenido de <https://higieneysseguridadlaboralcv.files.wordpress.com/2012/04/oit-enciclopedia-de-salud-y-seguridad-en-el-trabajo.pdf>
- Manrique Latorre, M., Buitrago Márquez, L. M., & Hernandez Guitierrez, J. (2019). *Redes LoRaWAN. Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT*. Bogotá. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/22411/?jsessionid=007B3B5EBC81372B792B82B3A95322B3?sequence=1>
- Marino Dodge, J. C. (2018). *IoT Fácil con ESP8266*. Bogotá. Obtenido de <https://acis.org.co/archivos/Conferencias/2018/Conferencia0504.pdf>
- Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones de Colombia. (2021). *RESOLUCIÓN 647 DE 2021*. Obtenido de [https://normograma.mintic.gov.co/mintic/docs/pdf/resolucion\\_ane\\_0647\\_2021.pdf](https://normograma.mintic.gov.co/mintic/docs/pdf/resolucion_ane_0647_2021.pdf)
- Monetro, V. (2016). *Efectos atérmicos de la radiación wifi (RF-MI) sobre la germinación, desarrollo vegetativo y patrones de metilación de Arabidopsis thaliana en cultivo hidropónico*. Chile. Obtenido de [http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/1961/2/Tesis\\_Efectos\\_Atermicos\\_de\\_la\\_radiacion.Image.Marked.pdf](http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/1961/2/Tesis_Efectos_Atermicos_de_la_radiacion.Image.Marked.pdf)
- Morales, M. (2015). *Internet of things (IoT) en la transformación digital de las empresas*. Barcelona: Incipy. Obtenido de <https://www.fundacionseres.org/Lists/Informes/Attachments/987/150923%20internet-of-things.pdf>
- Moscoso, J. (2017). *LOS MÉTODOS MIXTOS EN LA INVESTIGACIÓN EN EDUCACIÓN: HACIA UN USO REFLEXIVO*. Canada. Obtenido de <https://www.scielo.br/j/cp/a/CWZs4ZzGJj95D7fK6VCBFxy/?format=pdf&lang=es>

- Nodric. (2008). *nRF24L01+*. Noruega. Obtenido de [https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss\\_Preliminary\\_Product\\_Specification\\_v1\\_0.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf)
- Oracle. (2023). *Oracle*. Obtenido de <https://www.oracle.com/co/internet-of-things/what-is-iot/>
- Ramirez Velazco, D. S. (2020). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO REMOTO, PARA UN CULTIVO DE PAPA EN LA VEREDA PANTANO GRANDE, DEL MUNICIPIO DEL COCUI (BOYACÁ)*. Bogotá. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/23153/2020danielramirez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ruiz, J. (2007). *Manual de Programación Arduino*. San Francisco. Obtenido de <https://arduinoobot.pbworks.com/f/Manual+Programacion+Arduino.pdf>
- Salazar, J. (2017). *Redes inalámbricas*. Obtenido de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01\\_R\\_ES.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01_R_ES.pdf)
- Salazar, J. (2020). *REDES INALÁMBRICAS*. Republica Checa. Obtenido de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01\\_R\\_ES.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01_R_ES.pdf)
- Sandino Mora, J. D. (2014). *DESARROLLO DE PROYECTOS EN MONITOREO DE CULTIVOS AGRÍCOLAS A TRAVÉS DE LA VISIÓN DE MÁQUINA*. Bogotá. Obtenido de [https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13158/5\\_Informe\\_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13158/5_Informe_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Semle, A. (2016). *Protocolos IIoT para considerar*. Argentina. doi:[https://editores-srl.com.ar/sites/default/files/aa2\\_semle\\_protocolos\\_ilot.pdf](https://editores-srl.com.ar/sites/default/files/aa2_semle_protocolos_ilot.pdf)
- Semtech. (2015). *DATASHEET SX1276/77/78/79*. California. Obtenido de [https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3179/sx1276\\_77\\_78\\_79.pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3179/sx1276_77_78_79.pdf)
- SEMTECH. (2015). *SX1276/77/78/79*. Camarillo. Obtenido de [https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3179/sx1276\\_77\\_78\\_79.pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3179/sx1276_77_78_79.pdf)
- Shadadpuri, S. (2018). *Análisis, caracterización y calibración de sensores de bajo coste para Arduino*. España. Obtenido de <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/10280/Analisis%2CcaracterizacionycalibraciondesensoresdebajocosteparaArduino.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sigma Electronica. (2023). *Sigma*. Obtenido de <https://www.sigmaelectronica.net/producto/esp-32/>

Sigma Electronica. (2023). *Sigma*. Obtenido de Sigma:  
<https://www.sigmaelectronica.net/producto/nodemcu-v3/>

Suárez, R. (2011). *Conservación de alimentos por irradiación*. Obtenido de  
<http://ve.scielo.org/pdf/saber/v27n3/art11.pdf>

Torrente, O. (2013). *ARDUINO Curso práctico de formación*. México. Obtenido de  
[https://cienciasvirtuales.com/wp-content/uploads/2016/11/Arduino\\_Curso\\_Practico\\_de\\_Formacion.pdf](https://cienciasvirtuales.com/wp-content/uploads/2016/11/Arduino_Curso_Practico_de_Formacion.pdf)

Uniagustiniana. (22 de Septiembre de 2020). *Uniagustiniana*. Obtenido de  
<https://twitter.com/uniagustoficial>

Universidad politecnica de Madrid. (2020). *Sistemas Electrónicos Digitales*. Madrid. Obtenido de  
<https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/tema%203.8%20serie.pdf>

Universitaria Agustiniiana. (2018). *Estilo APA para la presentación de trabajos de grado*. Bogotá, Bogotá, Colombia.

Weebly. (2023). *INTRODUCCIÓN A LOS SENSORES*. Obtenido de  
[https://tableroalparque.weebly.com/uploads/5/1/6/9/51696511/introducci%C3%93n\\_a\\_los\\_sensores.pdf](https://tableroalparque.weebly.com/uploads/5/1/6/9/51696511/introducci%C3%93n_a_los_sensores.pdf)

YoRobotics. (2023). *YoRobotics*. Obtenido de <https://yorobotics.co/producto/termometro-sonda-cocina-sensor-temperatura-tp101-50-300c>