



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Diseño de dispositivo para adquisición de imágenes y transmisión de información por medios inalámbricos para monitoreo visual de cultivos

Cristhian Danilo Viveros Delgado

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería de Sistemas e Industrial
Bogotá D.C, Colombia

2023

Diseño de dispositivo para adquisición de imágenes y transmisión de información por medios inalámbricos para monitoreo visual de cultivos.

Cristhian Danilo Viveros Delgado

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Telecomunicaciones.

Director:

José Francisco Ruiz Muñoz

Codirector:

Luis Fernando Niño Vásquez

Línea de Investigación:

Redes y Sistemas de Telecomunicaciones

Grupo de Investigación:

Laboratorio de Investigación en Sistemas Inteligentes

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Sistemas e Industrial

Bogotá, Colombia

2023

(Lema)

«Nada en la vida es para ser temido, es solo para ser comprendido. Ahora es el momento de entender más, de modo que podamos temer menos».

Marie Curie

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Cristhian Danilo Viveros Delgado

01/08/2023

Primero de agosto de dos mil veintitrés.

Agradecimientos

A Dios, por guiar mi camino y permitirme la oportunidad de cumplir mis sueños y metas en ésta prestigiosa alma máter.

A la Universidad Nacional de Colombia, de la cual me siento orgulloso de haber pertenecido, y a quien estoy eternamente agradecido, por abrirme las puertas y haberme brindado la oportunidad de desarrollar y culminar mis estudios de Pregrado y Posgrado.

A mi madre, Jimena, y a mi padre, Libardo, por ser los pilares fundamentales en cada proyecto que he emprendido en mi vida, siendo la mayor inspiración para este logro, a su apoyo incondicional, su aliento y motivación en este proyecto de vida que he emprendido.

A mi hermana, Isabella, por ser la fuente de inspiración para mostrarle que podemos cumplir nuestros sueños y lograr lo propuesto, por ser ese apoyo emocional y de consejo moral para continuar luchando por mis metas.

A mi director, José Francisco Ruiz Muñoz, a mi codirector Luis Fernando Niño Vásquez, quienes, con su calidad humana, sus conocimientos y su trayectoria en la academia, aceptaron guiar mi camino de desarrollo académico y me proporcionaron las herramientas y el conocimiento necesario para culminar con éxito este proyecto, impulsando mi interés por la investigación, el desarrollo y la generación de conocimiento.

A los docentes de la Universidad Nacional de Colombia, que, con su dedicación y esfuerzo, han aportado conocimiento, contribuyendo en el desarrollo del presente trabajo.

A mis amigos y compañeros de la Universidad Nacional de Colombia, quienes me han brindado su apoyo, me han impulsado a seguir adelante a continuar con este gran sueño

Resumen

Diseño de dispositivo para adquisición de imágenes y transmisión de información por medios inalámbricos para monitoreo visual de cultivos.

Una de las mayores necesidades para la humanidad es la comunicación e intercambio de información, la cual ha impulsado el desarrollo constante de tecnologías que mejoran la transmisión de datos. Entre ellas, las plataformas digitales destacan por su capacidad para impulsar la productividad en diversos sectores, especialmente en la agricultura rural. Las plataformas y tecnologías de transmisión digitales tienen el potencial para impulsar de manera significativa la productividad y el desarrollo en el sector rural. No obstante, su implementación a gran escala sigue siendo limitada, especialmente en las zonas rurales, las cuales enfrentan la brecha digital, la cual limita el acceso a estas tecnologías.

Para abordar este desafío, se propone el uso de tecnologías de automatización, robótica y domótica, combinadas con sistemas de monitoreo en tiempo real de actividades agrícolas. Con el propósito de ofrecer una solución efectiva y económicamente eficiente, este trabajo presenta el diseño de un dispositivo de comunicación inalámbrica, equipado con un sensor de imagen que permitirá monitorear los cultivos mediante la adquisición de imágenes, las cuales serán enviadas a la nube mediante tecnología Wi-Fi. El diseño es cimentado mediante un análisis metódico de las necesidades de las poblaciones rurales y las diferentes tecnologías disponibles para la aplicación del dispositivo. El diseño se valida mediante una prueba de concepto, obteniendo como resultado un prototipo funcional, delineando el camino para futuros desarrollos del dispositivo final.

Palabras clave: Tecnologías de la información, monitoreo visual, variables agrícolas, zona rural, digitalización.

Abstract

Design of an image acquisition and wireless information transmission device for visual crop monitoring.

Sharing information and communication are ones of the humanity's major needs which leads to the constantly development of technologies that enhance data transmission. Among them, digital platforms have proven their ability to boost productivity in various sectors, particularly in rural agriculture. Digital platforms and transmission technologies have the potential to increase productivity and development in the rural sectors, However, the implementation of these technologies is limited, especially in rural areas, which face with a digital divide and technological backwardness that restricts the rural development. To address this challenge, the integration of automation, robotics, and domotics technologies is considered, along with real-time monitoring systems for agricultural activities. With the purpose of an effective and cost-efficient proposal, this work presents the design of a wireless communication device, equipped with an image sensor enabling crop monitoring through image acquisition. This information is sent to the cloud via Wi-Fi technology. The design is based on a methodical analysis of the rural population needs and various technologies available for the device's application. The design is validated through a proof of concept, resulting in a functional prototype with low data loss, delineating the future development way of the final device.

Keywords: Information technology, Visual monitoring, Agricultural variables, Rural regions, digitalization.

Este Trabajo Final de maestría fue calificado en octubre de 2023 por el siguiente evaluador:

PhD. Luis Fernando Díaz Cadavid
Profesor Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad Nacional de Colombia

Contenido

	Pág.
Resumen	VI
Abstract	VII
Lista de figuras	11
Lista de tablas	12
Definición de conceptos	13
Lista de símbolos	16
Introducción	17
1. Marco teórico	19
1.1 El monitoreo en la agricultura	19
1.2 Adquisición y procesamiento de imágenes en la agricultura.....	20
1.3 La agricultura digital	21
1.4 La brecha digital	23
1.5 Desarrollo digital en Colombia.....	25
2. Justificación	27
3. Objetivos	29
3.1 Objetivo general	29
3.2 Objetivos específicos	29
4. Metodología	30
4.1 Primera fase	31
4.2 Segunda fase	31
4.3 Tercera fase	31
4.4 Cuarta fase.....	31
5. Diseño del dispositivo	33
5.1 Definición de los requerimientos.....	34
5.2 Identificación de las funcionalidades	36
5.3 Diagrama de bloques	36
5.4 Hardware	37
5.4.1 Adquisición de imágenes	37
5.4.2 Procesamiento y transmisión en radiofrecuencia	38

5.4.3 Regulación de potencia	45
5.5 Arquitectura de red	48
5.6 Prácticas recomendadas para el diseño	50
5.6.1 Prácticas para la etapa de transmisión en radiofrecuencia a 2.4 GHz	51
5.6.2 Prácticas para circuitos de bajo voltaje.....	54
5.7 Placa de desarrollo - Prueba de concepto	55
5.8 Código fuente	57
5.8.1 Firmware	57
5.8.2 Código Google Apps	57
6. Escenario de implementación.....	58
7. Resultados	63
8. Conclusiones	68
8.1 Conclusiones	68
8.2 Recomendaciones	69
A. Anexo: Firmware - Código ESP32.....	70
B. Anexo: App Google - Código Google Drive	76
Bibliografía	78

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1:	Implementación teórica para monitoreo de plantaciones. 21
Figura 1-2:	Tecnologías inalámbricas en la futura agricultura digital. 22
Figura 1-3:	Crecimiento del valor agregado en el sector de las TIC en Colombia. ... 26
Figura 1-4:	Productividad y utilización laboral entre países latinoamericanos. 26
Figura 4-1:	Metodología - Fases 30
Figura 5-1:	Diagrama de flujo del dispositivo 34
Figura 5-2:	Representación de las funcionalidades en diagrama de bloques. 37
Figura 5-3:	Descripción general - Cámara OV2640 38
Figura 5-4:	Topología típica de una red LoRa 40
Figura 5-5:	Modelo de comunicación IoT basado en FPGA y módulo Wi-Fi 42
Figura 5-6:	Descripción general - Módulo ESP32 45
Figura 5-7:	Descripción general - Regulador de voltaje 46
Figura 5-8:	Cable puente USB a UART 46
Figura 5-9:	Representación del dispositivo en diagrama de bloques de alto nivel.... 47
Figura 5-10:	Arquitectura de un sistema IoT 48
Figura 5-11:	Topologías de red para aplicaciones IoT con tecnología ZigBee 49
Figura 5-12:	Comparación - Tipos de antena 53
Figura 5-13:	Diseño de Antena F invertida con patrón meandro recomendada. 53
Figura 5-14:	Circuito de acople en línea de transmisión 54
Figura 5-15:	Modulo ESP32 - Certificaciones en radiofrecuencia 55
Figura 5-16:	Descripción general - Kit de desarrollo AI-Thinker ESP32 CAM 56
Figura 6-1:	Placa de desarrollo AI-Thinker ESP32 + Cámara - Anverso 58
Figura 6-2:	Placa de desarrollo AI-Thinker ESP32 + Cámara - Reverso 59
Figura 6-3:	Punto de acceso Tenda. 59
Figura 6-4:	Reservación de IPs en el punto de acceso. 60
Figura 6-5:	Escenario de implementación - plantas a monitorear 61
Figura 6-6:	Escenario de implementación - ubicación de cámaras 61
Figura 6-7:	Escenario de implementación 62
Figura 7-1:	Carpetas de las imágenes en Google Drive 63
Figura 7-2:	Primera imagen contra segunda imagen - Planta de interior 64
Figura 7-3:	Evolución de la planta de interior 64
Figura 7-4:	Evolución de la germinación de los frijoles 65

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 5-1: Requerimientos del dispositivo	35
Tabla 5-2: Etapas consideradas en el diseño del dispositivo.	36
Tabla 5-3: Tecnologías de comunicación inalámbrica comunes en aplicaciones IoT ..	39
Tabla 5-4: Listado de materiales.....	47
Tabla 7-1: Registro de Inicio y finalización en las sesiones de monitoreo por día	66
Tabla 7-2: Estadísticas transmisión de imágenes CAM1 (Planta de interior)	66
Tabla 7-3: Estadísticas transmisión de imágenes CAM2 (Germinación de frijoles)	67

Definición de conceptos

Agricultura digital: se refiere a la implementación de diversas técnicas digitales y herramientas tecnológicas con el objetivo de monitorear, operar y controlar de forma precisa y remota las condiciones de los cultivos. Esto se logra mediante la obtención y procesamiento de datos en tiempo real, permitiendo una toma de decisiones informada y una gestión eficiente de los recursos agrícolas (Lajoie-O'Malley et al., 2020; Wu et al., 2021; Yong et al., 2002; Zhang Y et al., 2021).

Brecha digital: Se refiere a la desigualdad en términos de acceso, uso y aprovechamiento de las Tecnologías de la Información y las comunicaciones (TIC) entre distintos segmentos de la población, lo cual genera disparidades económicas y limita las oportunidades de desarrollo en comparación con aquellas comunidades que tienen un acceso estable a estas tecnologías (Foster, 2000; Prieger, 2013; Várallyai et al., 2015).

BLE (Bluetooth Low Energy): Es una tecnología de comunicación inalámbrica que se utiliza en dispositivos IoT y se basa en el estándar Bluetooth. Diseñado para ser eficiente en términos de consumo de energía, BLE permite la creación de corto alcance y bajo consumo. Esta tecnología ha encontrado aplicaciones en monitoreo de cultivos, control de dispositivos agrícolas y gestión de datos en tiempo real en el sector agrícola. Gracias a su bajo consumo de energía y su alcance limitado, BLE se ha convertido en una opción popular para la conectividad inalámbrica en dispositivos IoT en el ámbito agrícola brindando conectividad confiable y eficiente (Farooq et al., 2019; Molla et al., 2022). BLE posibilita el establecimiento de redes inalámbricas de área personal (WPAN por sus siglas en inglés) con un rango de comunicación de hasta 100 m (Molla et al., 2022).

Inclusión digital: Se refiere al proceso de integración de diversas comunidades y minorías en las tecnologías digitales, con el objetivo de promover la equidad en el acceso a las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) y herramientas digitales. Esto se logra

a través de políticas que fomentan la capacitación digital, el acceso a dispositivos inteligentes y el acceso a internet (Yates & Carmi, 2020).

IoT (Internet of things): Se refiere a la interconexión de objetos inteligentes a través de Internet, permitiendo su comunicación y colaboración para realizar diversas funciones y facilitar el monitoreo y control inteligente. Algunas aplicaciones comunes incluyen casas inteligentes en la domótica y actividades de monitoreo y sensado conectados a Internet, transformando la forma en que interactuamos con nuestro entorno y optimizando aspectos de la vida cotidiana, impactando sectores como la agricultura, la salud, la logística y la industria (Zhang Y et al., 2021).

LoRa: Es una tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance desarrollado por la Alianza LoRa TM cuyo funcionamiento se basa en el protocolo de comunicación LoRa. Su objetivo principal es facilitar la interoperabilidad entre múltiples operadores y mejorar la productividad agrícola (Farooq et al., 2019; Molla et al., 2022). LoRa permite establecer redes de área amplia de baja potencia (LPWAN por sus siglas en inglés), habilitando la transmisión de datos a largas distancias con un consumo de energía eficiente. Esta tecnología ha encontrado aplicaciones en diversas industrias, como la agricultura, la logística y las ciudades inteligentes, al permitir la conexión de dispositivos y sensores para el monitoreo y control remoto de diferentes procesos y actividades, con un rango de comunicación que varía desde distancias cortas, de menos de 10 cm, hasta distancias de hasta 100 km, LoRa es ideal para aplicaciones que requieren una amplia cobertura y una larga vida útil de la batería (Molla et al., 2022).

SMM (Social Media Marketing): Es la estrategia de mercadeo que utiliza plataformas de redes sociales para promocionar productos o servicios. Se centra en crear contenido atractivo, establecer relaciones con la comunidad en línea y analizar datos para mejorar las estrategias. El SMM aumenta el conocimiento de marca, genera tráfico web y mejora las conversiones. (Han et al., 2021).

TIC (Tecnologías de la Información y las Comunicaciones): Se refiere a un conjunto de infraestructuras, tecnologías, recursos y herramientas utilizados para facilitar la comunicación, el intercambio de información y el procesamiento de datos. Incluye diversos aspectos, como las telecomunicaciones, los sistemas de difusión de medios, los sistemas inteligentes, el internet y los dispositivos inteligentes, que se conectan mediante conexiones cableadas e inalámbricas. Estas tecnologías desempeñan un papel

fundamental en la unificación de la comunicación y el acceso a la información, permitiendo la transmisión eficiente de datos y la interconexión de personas y dispositivos a nivel global (Rosario et al., 2021; Zhang Y et al., 2021).

Wi-Fi: Es una tecnología que se basa en una compilación de estándares de protocolos de comunicación inalámbrica conocidos como IEEE 802.11. Estos estándares operan en diferentes anchos de banda, como 2.2, 2.4, 5 y 60 GHz (Farooq et al., 2019; Molla et al., 2022). El Wi-Fi permite el establecimiento de redes inalámbricas de área local (WLAN por sus siglas en inglés), es ampliamente utilizada en hogares, oficinas, espacios públicos y otras áreas para brindar conectividad a Internet de manera conveniente y flexible sin necesidad de cables. El rango de comunicación del Wi-Fi puede variar desde distancias cortas, de menos de 10 cm, hasta distancias de aproximadamente 1 km (Molla et al., 2022).

ZigBee: Es una tecnología de comunicación inalámbrica desarrollado por la Alianza ZigBee. Esta tecnología se caracteriza por sus especificaciones de alta tasa de transferencia de datos y bajo consumo de energía, lo cual lo hace adecuado para aplicaciones que requieren transmisión rápida con un consumo eficiente de energía. ZigBee se utiliza en gran variedad de aplicaciones, incluyendo la monitorización de cultivos, el control de riego y la gestión de la cadena de suministro agrícola. Gracias a su capacidad de comunicación inalámbrica de bajo consumo, ZigBee ha demostrado ser una solución eficiente para la conectividad en entornos agrícolas y otras aplicaciones de IoT (Farooq et al., 2019; Molla et al., 2022). ZigBee permite el establecimiento de redes inalámbricas de área personal (WPAN por sus siglas en inglés), que abarcan distancias de hasta 100 m (Molla et al., 2022).

Zona rural: Se refiere a un área geográfica situada fuera de las ciudades y áreas urbanas, donde las actividades económicas principales se centran en la agricultura, la ganadería y la vida en granjas. Estas zonas se caracterizan por tener una baja densidad de población y una mayor dependencia de los recursos naturales para el sostenimiento de la comunidad (Liu et al., 2019; Prieger, 2013; Rijswijk et al., 2021; Zhang Y et al., 2021).

Lista de símbolos

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Amperio	A	Unidad de Corriente
Hz	Hercio	Hz	Unidad de frecuencia
dB	Decibelio	dB	Logaritmo de la Relación entre dos valores
dBi	Decibelio respecto a antena isotrópica	dBi	Ganancia de antena respecto a antena isotrópica
m	Metro	m	Unidad de longitud
V	Voltio	V	Fuerza Electromotriz
Ω	Ohmio	Ω	Resistencia Eléctrica

Nota: Los prefijos que se utilizan con los símbolos de las unidades de medida se adhieren a las definiciones del Sistema Internacional de Unidades (SI).

Introducción

Una de las mayores necesidades para la humanidad es compartir información y comunicarse. Esta necesidad ha llevado al desarrollo de diversas tecnologías para asegurar la transmisión de información y mejorar el tiempo de comunicación. Estas tecnologías han permitido, por ejemplo, llegar al desempeño de actividades virtuales (Clare, 2021; Ginossar et al., 2021; Kormos & Wisdom, 2021) que han potenciado tanto las condiciones de vida como la productividad donde han sido implementadas (Prieger, 2013). Las nuevas tecnologías y plataformas digitales ofrecen la oportunidad de potenciar la productividad de las regiones. La precisión que manejan dichas tecnologías en conjunto con la disponibilidad de datos en tiempo real puede mejorar considerablemente el tiempo de producción y la calidad de los productos (Han et al., 2021). El sector agrícola rural es uno de los campos de aplicación con potencial para aplicar dichas tecnologías, y a la vez uno de los más marginados digitalmente (Birner et al., 2021; Fountas et al., 2020).

La agricultura digital ofrece oportunidades para acelerar la transformación agrícola, ofreciendo una mejora en la productividad, la oferta de productos y la calidad de éstos mediante las herramientas digitales (Han et al., 2021). Tecnologías como las aplicaciones y plataformas digitales que se pueden llevar en dispositivos móviles pueden impulsar el desarrollo de las poblaciones agrícolas, que normalmente son las poblaciones digitalmente marginalizadas (Birner et al., 2021; Fountas et al., 2020), en consecuencia, la correcta aplicación de las tecnologías que comprenden la agricultura digital en el sector rural implica la implementación de diseños novedosos y el mejoramiento de las TIC, la mejora de su infraestructura y el acceso a banda ancha. Sin embargo, existe una distribución desigual en el acceso y disponibilidad de estas tecnologías de comunicación (Anastasiou et al., 2021; Gerli & Whalley, 2021). Esto es lo que se conoce como brecha digital, la cual se manifiesta al contrastar el desarrollo tecnológico y su influencia en la productividad, economía y educación en poblaciones con alta y baja disponibilidad tecnológica (Dwivedi et al., 2020; Lai & Widmar, 2021).

A raíz de los avances tecnológicos recientes en interconectividad de dispositivos, y la emergencia sanitaria por COVID-19 (Dwivedi et al., 2020), la necesidad a la migración digital ha incrementado, las actividades digitales y tecnologías automáticas para cubrir la necesidad de conexión entre personas y cosas se han convertido en necesidades imperativas para preservar, continuar y sostener la economía (Anastasiou et al., 2021; Prieger, 2013; Zerrer & Sept, 2020; Zhang Y et al., 2021). La persistencia de la brecha digital en las regiones rurales genera un retraso educativo, tecnológico (Anastasiou et al., 2021; Liu et al., 2019), productivo y económico que, además de ponerlas en desventaja y desigualdad de oportunidades frente a la población urbana (Liu et al., 2019), afecta a largo plazo la productividad y economía del país (Prieger, 2013), creando la necesidad de promover el desarrollo y uso de las TIC, especialmente en Colombia, donde el creciente desarrollo digital actual no ha sido suficiente para incrementar la economía (OCDE, 2019). El monitoreo en tiempo real mediante la comunicación de banda ancha y tecnologías inalámbricas aplicadas al control de condiciones para cultivos y actividades productivas concentradas en las regiones rurales se pueden potenciar con la precisión y exactitud de las tecnologías de automatización, robótica y domótica que actualmente se han y se están desarrollando (Duncan et al., 2021; Lajoie-O'Malley et al., 2020; Murciego et al., 2020; Wu et al., 2021; Zhang Y et al., 2021). Estudios y aplicaciones recientes en cuanto a aplicación de tecnología de adquisición de datos y análisis de estos se basan en el monitoreo de las variables agrícolas como temperatura, humedad (Codeluppi et al., 2020; Mesa et al., 2021), mejora en la calidad (Mizrach, 2008) y obtención (Clodoveo et al., 2017) de productos agrícolas, en donde se han desarrollado propuestas, investigaciones y prototipos de dispositivos de sensado y transmisión de información. Sin embargo, en algunas situaciones como las planteadas en (Chambers et al., 2019) donde se necesita identificar insectos polinizadores para el cultivo de vainilla en Florida, o en (Yuan et al., 2021) donde se resalta la necesidad de identificar las plagas y enfermedades en cultivos, la adquisición de imágenes se convierte en una herramienta de gran ayuda para la inspección visual de cultivos y el impulso de la agricultura inteligente.

En este documento se presenta una revisión de los trabajos previos sobre agricultura digital, centrándose en la teoría, concepto y herramientas para el monitoreo de variables agrícolas. El objetivo principal es analizar la ingeniería detrás de las tecnologías de agricultura digital y presentar el diseño de un dispositivo que adquiera imágenes y transmita información de forma inalámbrica para el monitoreo de cultivos.

1. Marco teórico

1.1 El monitoreo en la agricultura

La aplicación de tecnologías de monitoreo de variables agrícolas se ha convertido en un componente fundamental para impulsar el sector agrícola y mejorar la productividad de los cultivos. En la literatura, se han identificado diversos estudios que resaltan los esfuerzos en el desarrollo de tecnologías que faciliten y automaticen las actividades de monitoreo, y donde se destacan los beneficios de su aplicación en la evaluación y optimización de las variables agrícolas.

Por ejemplo, (Mizrach, 2008) realizó una revisión y estudio de resultados para la caracterización de frutas y vegetales mediante ultrasonido, encontrando que su aplicabilidad es viable para la evaluación no destructiva de la calidad de frutas y vegetales, así como para el monitoreo de su crecimiento y maduración en las etapas de pre y post cosecha. (Schmilovitch & Mizrach, 2013) resaltan que la determinación de estas medidas de calidad lleva a la aplicación óptima de procesos de cultivación y cuidado adecuados para producción de calidad y generación de valor en el campo productivo agrícola.

Además, (Clodoveo et al., 2017) desarrollaron un prototipo con tecnología de ultrasonido para la extracción de aceite de oliva virgen, corroborando que su aplicación experimental contribuye a la recolección eficiente del aceite de los tejidos de oliva. (Codeluppi et al., 2020) diseñaron una plataforma de monitoreo de temperatura y humedad basada en tecnología LoRaWAN para la recolección, intercambio, procesamiento y visualización de datos de monitoreo; por otra parte, (Zhang & Wang, 2021) estudiaron el diseño conceptual en hardware y software de un dispositivo de control remoto mediante una red de dispositivos sensores inalámbricos de temperatura y humedad, con el fin de recolectar y transmitir información en tiempo real y ejecutar acciones no humanas para el control de dichas variables agrícolas.

Asimismo, (Mesa et al., 2021) desarrollaron un módulo terminal remoto con censado de temperatura y humedad, con transmisión de información mediante USB y Bluetooth, (Luján

Soto et al., 2021) estudiaron la importancia del monitoreo visual de suelos en la ejecución de agricultura para la regeneración de estos, concluyendo que el monitoreo visual de suelos es prometedor para la solución de dicha problemática. (Nigam et al., 2022) resaltan la importancia del monitoreo remoto visual para aumentar la precisión en la determinación de características de salud de la plantación, puntualizando que, con la adición de otras variables de censado, se podría complementar el estado general de la plantación.

En resumen, los estudios revisados evidencian el interés en la inclusión de la tecnología a través de los años para mejorar actividades de monitoreo de variables agrícolas. La aplicación de estas tecnologías permite una evaluación más precisa y detallada de las variables agrícolas, lo que conduce a una producción de calidad y generación de valor en el campo productivo agrícola. Por tanto, la inclusión del uso de tecnologías de monitoreo es fundamental para impulsar el sector agrícola y mejorar la productividad de los cultivos.

1.2 Adquisición y procesamiento de imágenes en la agricultura

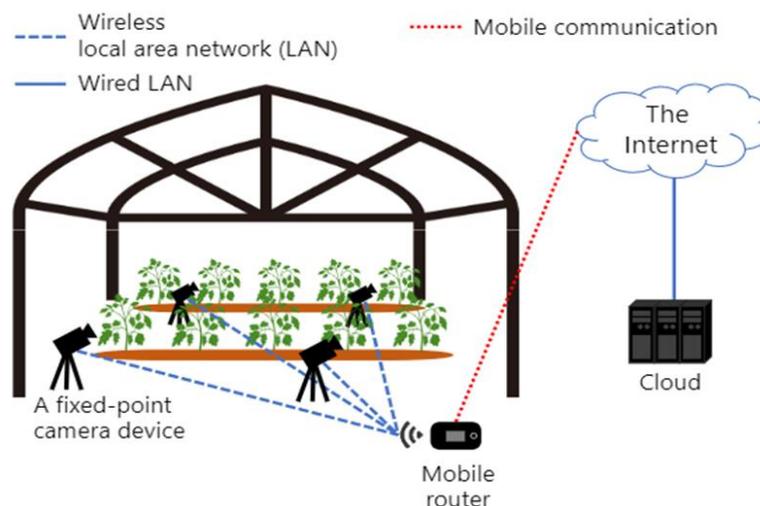
En el marco teórico de la agricultura, la aplicación de tecnología automática y sistemas inteligentes está en aumento para mejorar las actividades de monitoreo, producción y control de calidad de los productos (Güldenring & Nalpantidis, 2021). El uso de la tecnología automatizada puede mejorar la eficiencia en las tareas como el seguimiento del crecimiento y reproducción de las plantaciones o cultivos, la clasificación de las plantaciones o la identificación de enfermedades (Chambers et al., 2019; Ge et al., 2021; Rasti et al., 2021). Sin embargo, estas actividades suelen ser realizadas de forma manual utilizando inspección visual o dispositivos especializados como el microscopio (Barbedo, 2016). Por lo tanto, la automatización de estas actividades a través del reconocimiento visual desempeña un papel importante en la aplicación de inteligencia artificial y tecnologías digitales en la agricultura, especialmente, en la inspección y monitoreo visual (Yuan et al., 2021).

La transmisión de imágenes en la agricultura requiere una alta capacidad de procesamiento en los dispositivos debido a su alto contenido de información. Además, la implementación de redes inalámbricas WPAN, como Bluetooth y Zig-bee, resulta en un alto costo en su implementación debido a los altos requisitos de procesamiento (Kawai, 2021). En contraste, la transmisión de imágenes a través de redes WLAN, como la conexión a Internet, ofrece la ventaja de realizar procesamiento, tratamiento o

almacenamiento en la Nube, lo que reduce la carga de procesamiento en los dispositivos implementados (Kawai, 2021).

Una implementación sencilla y efectiva en el escenario de agricultura es propuesta por (Kawai, 2021). Consiste en un dispositivo fijo de monitoreo y adquisición de imágenes que utiliza métodos eficientes de compresión de imágenes con una pérdida mínima de calidad y los transmite a la Nube mediante tecnología inalámbrica compatible con Wi-Fi para su posterior procesamiento. Este enfoque se puede ver en la Figura 1-1

Figura 1-1: Implementación teórica para monitoreo de plantaciones.



Fuente: (Kawai, 2021)

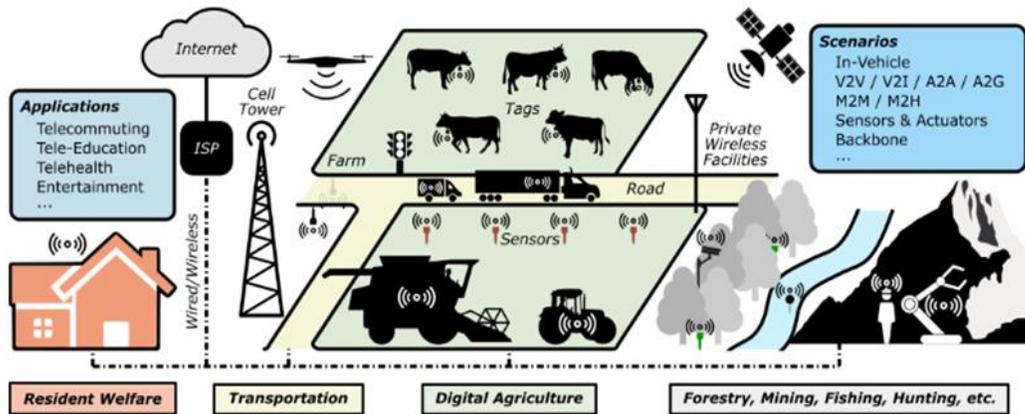
Así entonces, la implementación de la tecnología automatizada y el reconocimiento visual en la agricultura pueden mejorar significativamente la eficiencia y la calidad de los productos agrícolas. Además, la transmisión de imágenes a través de redes WLAN y la Nube puede reducir la carga de procesamiento en los dispositivos y mejorar la eficiencia general del sistema.

1.3 La agricultura digital

Las actividades agrícolas desempeñadas en las zonas rurales como el monitoreo, ya mencionado en subsecciones anteriores, se pueden potenciar con la precisión y exactitud de las tecnologías de automatización, robótica y domótica que actualmente se han y se están desarrollando (Duncan et al., 2021; Lajoie-O'Malley et al., 2020; Murciego et al., 2020; Wu et al., 2021; Zhang Y et al., 2021), la incorporación de dichas tecnologías en el

ámbito agrícola se conoce como Agricultura Digital, temática de gran interés en el sector investigación dada su capacidad de potenciar los sistemas de producción agrícola, cadenas de valor y sistemas alimentarios a través de tecnología innovativa (Mesa et al., 2021). Estos desarrollos comprenden tecnologías de IoT, realidad aumentada, inteligencia artificial, robótica, censado y automatización, los cuales, como se ilustra en la Figura 1-2, requieren conectividad omnipresente (Klerkx et al., 2019), .

Figura 1-2: Tecnologías inalámbricas en la futura agricultura digital.



Fuente: (Zhang Y et al., 2021)

La implementación de la agricultura digital abarca de manera importante el ámbito social como el tecnológico, buscando una transición suave para la comunidad rural (Rijswijk et al., 2021) se resaltan como componentes principales, que a su vez comprenden los retos en su implementación en zonas rurales.

- Capacitación de las comunidades rurales sobre la digitalización: El conocimiento de los beneficios de la digitalización ayuda a disminuir la resistencia a la misma (Esteban-Navarro et al., 2020; Martínez-Domínguez & Mora-Rivera, 2020; Rosario et al., 2021)
- Reducción del costo de infraestructura usando solo las características necesarias: Es importante implementar tecnologías no sobredimensionadas que estén al alcance económico de las comunidades (Chiha et al., 2020; Prieto-Egido et al., 2020).
- Aplicación de las nuevas generaciones de redes móviles: son una gran apuesta a la reducción de la latencia en el acceso a la red y el aumento del compartir datos en tiempo real, mejorando la calidad de vida de la población rural en un mundo encaminado hacia la digitalización (Cavalcante et al., 2021; Oinas-Kukkonen et al., 2021; Zhang Y et al., 2021).

- Implementación de plataformas de comunicación móviles: Dado el desarrollo creciente e influencia de las nuevas tecnologías en la automatización y el IoT, el desarrollo de plataformas de comunicación móviles mediante el uso de drones o vehículos automáticos pueden facilitar el acceso y cobertura en zonas remotas (Michels et al., 2020; Ye & Yang, 2020; Zhang Y et al., 2021).
- Comercio digital: La introducción de las tecnologías TIC en las zonas rurales puede impulsar el comercio digital, como se ilustra en el desarrollo del caso de estudio de (levoli et al., 2019). En esta implementación se abren nuevas puertas al tratar el comercio de productos locales y agrícolas facilitando su venta y distribución de manera remota. De esta manera, se promueve el comercio y turismo digital de las zonas rurales (Ferreira et al., 2020) a través de SMM (Han et al., 2021) dando a conocer el gran potencial que puede tener la zona rural, activando o mejorando su actividad productiva con la posibilidad de aportar en la oferta, ofreciendo un aporte en la economía (Feltrin et al., 2021; Räsänen & Tuovinen, 2020).
- Planteamiento de Smart Villages: Mediante una aproximación bibliométrica realizada en (Anastasiou et al., 2021; Zerrer & Sept, 2020) se concluye que el desarrollo de las TIC en las zonas rurales implica una planeación de políticas y tecnologías innovativas. El concepto de Smart Village o Pueblo Inteligente no solo comprende la implementación tecnológica en las zonas rurales y sus sectores productivos, sino también la adaptación progresiva de la población de dichas zonas.

Por lo tanto, la agricultura digital comprende un conjunto amplio de estrategias de inclusión social y desarrollo tecnológico agrícola, donde intervienen las TIC, el acceso y tratamiento de información digital y el acceso a banda ancha, cuyas problemáticas deben ser mitigadas para su correcta implementación.

1.4 La brecha digital

El acceso desigual a la banda ancha y las tecnologías digitales ha emergido como un tema relevante en las últimas décadas, con implicaciones tanto para la economía de las naciones como para la mejora de las condiciones de vida de la población mundial (Prieger, 2013). A pesar de la importancia de estas tecnologías, su distribución y acceso no son equitativos entre las comunidades. La inclusión de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) como elementos clave para el crecimiento y desarrollo social se ha

convertido en una prioridad para organizaciones y gobiernos, quienes buscan implementar políticas y estrategias de inclusión digital para reducir la brecha digital y las disparidades en el acceso a la banda ancha (Várallyai et al., 2015).

La marginalización digital en las zonas rurales (Várallyai et al., 2015; Zhang Y et al., 2021) se ha agravado debido a la crisis sanitaria provocada por la pandemia de COVID-19. Durante el año 2020, se implementaron políticas de confinamiento que obligaron a las personas a aislarse, lo que hizo que los medios digitales se convirtieran en una necesidad. La pandemia ha resaltado aún más las desigualdades digitales existentes entre la sociedad urbana y rural, las cuales ya eran conocidas y han sido objeto de políticas y estudios previos a la crisis (Prieger, 2013). Aunque ya se habían desarrollado políticas, estrategias y planes de acción para aumentar la cobertura y el acceso a la banda ancha en las zonas rurales, el aumento en el uso de las tecnologías digitales durante el confinamiento ha impactado significativamente al sector educativo.

La educación a distancia se ha convertido en una necesidad imperante para estudiantes y educadores de todas las comunidades (Lajoie-O'Malley et al., 2020; Wu et al., 2021). Sin embargo, la población estudiantil y docente de las zonas rurales se ha visto afectada por la baja o nula accesibilidad a la conexión a Internet (Gu, 2021), así como por la falta de conocimientos y capacitación en el uso de las TIC (Chiles et al., 2021; Dwivedi et al., 2020; Kormos & Wisdom, 2021). Estos factores se relacionan con el aumento de la deserción estudiantil en las zonas rurales (Beunoyer et al., 2020; Matamala, 2021). Además, en el sector de la salud, la brecha digital ha demostrado ser un factor determinante para la salud de las personas. La telemedicina, la telesalud y la teleasistencia han mejorado la comunicación entre pacientes y profesionales de la salud (Curioso, 2019), así como las actividades de monitoreo y control de la salud a través de videollamadas y teleasistencia médica. Sin embargo, estos beneficios dependen directamente de la conectividad a Internet del paciente (Clare, 2021; Greenberg et al., 2018; Greenberg-Worisek et al., 2020). En el sector productivo y económico, la pandemia ha obligado al confinamiento de la fuerza laboral. Si bien la industria ha evolucionado mediante la implementación del teletrabajo, el sector agrícola y las actividades basadas en el campo, que requieren una presencia física importante, también se han visto afectados debido a la brecha digital en las zonas rurales (Lai & Widmar, 2021). Estos efectos y consecuencias también afectan a la población rural en Colombia (Mendoza-Lozano et al., 2021; Velasquez, 2013), lo que reduce las oportunidades económicas, políticas y sociales de la población en el país en desarrollo,

agravando su retraso en términos de desarrollo tecnológico en comparación con los países desarrollados (Velasquez, 2013).

Dado el descubrimiento de los beneficios que ofrece la migración hacia el mundo digital, es probable que las actividades virtuales persistan incluso después de la pandemia. Esto, junto con la falta de los componentes necesarios para la agricultura digital mencionados anteriormente, aumenta aún más los efectos de la brecha digital, especialmente, en el sector productivo (Lai & Widmar, 2021). Por lo tanto, uno de los mayores obstáculos para la implementación exitosa de la transformación digital en la agricultura es la brecha digital, que limita el acceso a la banda ancha y, por consiguiente, a las tecnologías que hacen posible esta transformación (Birner et al., 2021; Han et al., 2021).

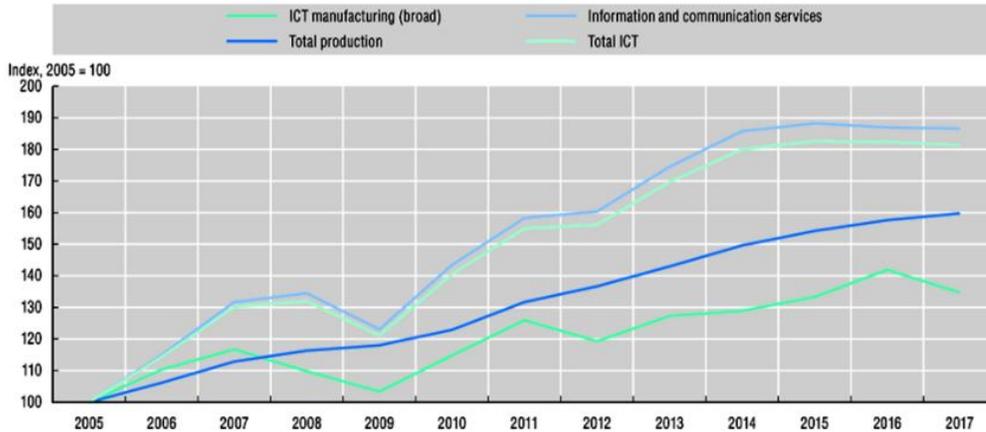
El acceso desigual a la banda ancha y a las tecnologías digitales, especialmente, en las zonas rurales, ha generado una brecha digital que afecta diversos sectores como la educación, la salud y la economía. La pandemia de COVID-19 ha agravado esta situación al poner de manifiesto las disparidades digitales existentes. Para reducir esta brecha y fomentar la inclusión digital, es necesario implementar políticas y estrategias que mejoren la conectividad y el acceso a la banda ancha en las comunidades rurales. Esto permitirá aprovechar plenamente los beneficios que ofrecen las tecnologías digitales en términos de desarrollo económico, social y personal.

1.5 Desarrollo digital en Colombia

Según el informe de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2019), Colombia padece de una infraestructura pobre para las TIC y altos costos de transporte desde el año 2000. Esto ha generado la necesidad de invertir en el sector de las telecomunicaciones para expandir y actualizar las redes de banda ancha, así como mejorar la calidad de la infraestructura de comunicación. En un mundo cada vez más tecnológico, el desarrollo digital proporciona una oportunidad para que Colombia compita a nivel internacional (Pacheco et al., 2020).

No obstante, el crecimiento económico de Colombia se ha visto limitado debido a la desaceleración económica global, lo que ha llevado a buscar nuevas formas de crecimiento, como la transformación digital. Esta transformación ofrece la oportunidad de diversificar las actividades económicas en el país (OCDE, 2019). Como se observa en la Figura 1-3 el valor agregado en el sector de las TIC en Colombia ha experimentado un crecimiento en la última década gracias a la diversificación de los servicios de las TIC.

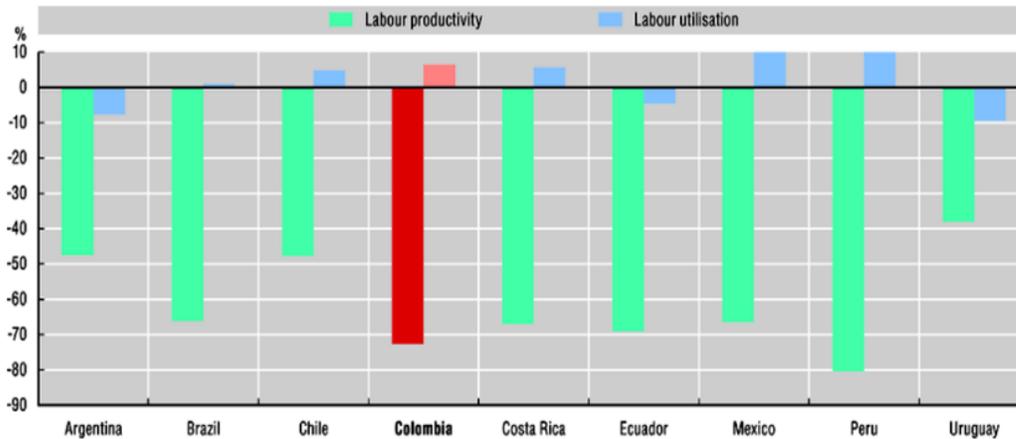
Figura 1-3: Crecimiento del valor agregado en el sector de las TIC en Colombia.



Fuente: (OCDE, 2019)

Sin embargo, también se destaca que Colombia enfrenta desafíos en su productividad, encontrándose entre los países latinoamericanos con índices porcentuales más bajos. La Figura 1-4 muestra las diferencias en productividad y utilización laboral, utilizando el Producto Interno Bruto per cápita como indicador. Estos bajos niveles de productividad tienen un impacto negativo en la economía y en la calidad de vida de la población.

Figura 1-4: Productividad y utilización laboral entre países latinoamericanos.



Fuente: (OCDE, 2019)

En respuesta a estos desafíos, el gobierno colombiano ha incluido en su Plan Nacional de Desarrollo la promoción del desarrollo y uso de las TIC como una estrategia para incrementar la productividad nacional. Esta iniciativa busca impulsar la transformación digital en diferentes sectores de la economía colombiana, con el objetivo de mejorar la competitividad y el desarrollo socioeconómico del país

2. Justificación

Durante la revisión de literatura, se identifica que los desarrollos en tecnologías y dispositivos de monitoreo para la agricultura se centran en el censado de humedad y temperatura durante el crecimiento de las plantaciones (Zhang & Wang, 2021) así como en la identificación de patrones de calidad y actividades de extracción de productos mediante ultrasonido (Mizrach, 2008; Schmilovitch & Mizrach, 2013). Sin embargo, no se ha encontrado propuestas o diseños que incorporen la adquisición de imágenes como una variable para el monitoreo de cultivos, actividades como la identificación de enfermedades y plagas a través de la apariencia de hojas (Kawai, 2021; Kurmi & Gangwar, 2021; Singh et al., 2020; Yuan et al., 2021), el conteo de productos (Kawai, 2021), el monitoreo del crecimiento (Rasti et al., 2021) y la clasificación de plantaciones (Ge et al., 2021; Güldenring & Nalpantidis, 2021) donde la inspección visual es crucial; la incorporación de esta variable de monitoreo junto con un post-procesamiento basado en sistemas inteligentes y autónomos en la agricultura podría impulsar la productividad en el sector de las TIC en las zonas agrícolas y rurales (Kawai, 2021).

Los desafíos que enfrenta la tecnología en las actividades de monitoreo basadas en inspecciones visuales, como la complejidad de transmitir imágenes de manera efectiva, los costos en las tecnologías y su complejidad en la implementación han generado una dependencia en la recolección manual de imágenes y su posterior transmisión a través de dispositivos de almacenamiento externo, como teléfonos celulares, tarjetas de memoria y cámaras digitales, todo esto requiere la presencia constante de personal (Kawai, 2021). El desarrollo de un dispositivo que permita el monitoreo visual y la transmisión inalámbrica de manera autónoma permite abarcar dichos retos desde un enfoque tecnológico, ofreciendo una mayor precisión en los procesos de monitoreo, la reducción o eliminación de personal presente (Kawai, 2021). Además, la incorporación de inteligencia artificial en el procesamiento posterior a la adquisición de imágenes podría potenciar y automatizar aún más estos procesos, de lo anterior, se plantea una importante interrogante: ¿cómo integrar

la adquisición de imágenes en un dispositivo de monitoreo y transmisión de información agrícola?

En los antecedentes, se observa que Colombia ha experimentado un aumento en el valor agregado de las TIC; sin embargo, la baja productividad y la economía en declive exigen impulsar el crecimiento económico mediante la implementación de las TIC (OCDE, 2019). Además, Los beneficios de las tecnologías digitales en la agricultura para el desarrollo rural han sido destacados en diversos estudios (Duncan et al., 2021; Lajoie-O'Malley et al., 2020; Murcieto et al., 2020; Wu et al., 2021; Zhang Y et al., 2021), en adición, con el reconocimiento de la importancia tecnologías de adquisición de imágenes y transmisión inalámbrica en sistemas agrícolas inteligentes y autónomos (Yuan et al., 2021), se evidencia que el desarrollo de un dispositivo que ayude al monitoreo visual en la agricultura, incorporando tecnología de adquisición de imágenes y aplicando conocimientos de ingeniería de telecomunicaciones para proponer un diseño óptimo agregue valor a la producción agrícola desde un enfoque automatizado y tecnológico.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Proponer la etapa de diseño de un dispositivo de adquisición de imágenes y transmisión de información de manera inalámbrica para el monitoreo de cultivos

3.2 Objetivos específicos

- Identificar las características y requerimientos del dispositivo de acuerdo con su aplicación.
- Representar a través de un diagrama de alto nivel, las etapas funcionales del dispositivo para ofrecer una visión general del sistema
- Determinar las prácticas de diseño y topología de red adecuada para el correcto funcionamiento del dispositivo, de acuerdo con su aplicación en una red de más de un dispositivo de monitoreo
- Evaluar la etapa de diseño del dispositivo a través del uso de kits de desarrollo con la finalidad de validar su factibilidad.

4. Metodología

En el diseño de la metodología para el desarrollo del dispositivo de que trata el presente escrito, se toman como referencia, dada su afinidad con el presente trabajo, los pasos en el procedimiento del diseño y construcción de un sistema de medición de temperatura y humedad propuesto en el desarrollo de (Gutiérrez, 2012) y se complementan con la experiencia profesional del autor del presente, adaptándola al alcance del presente trabajo, definiéndola en cuatro fases necesarias para alcanzar el objetivo general propuesto, las cuales se ilustran en la Figura 4-1.

Figura 4-1: Metodología - Fases



Fuente: Autoría Propia

Las fases de consolidación del diseño, prototipado, ajuste y ensamblaje del dispositivo final se dejan a consideración para futuras investigaciones.

4.1 Primera fase

Comprende la identificación de las especificaciones y funcionalidades requeridas por el dispositivo de acuerdo con su aplicación en el monitoreo de cultivos, es importante en esta fase, identificar que funciones y qué características debe cumplir el dispositivo para poder realizar un diseño correcto, la presente fase estaría alineada con el propósito del primer objetivo específico.

4.2 Segunda fase

La segunda fase es la conformación de los bloques funcionales del dispositivo, con base en las funcionalidades y especificaciones identificadas. En esta fase se busca representar el dispositivo en dichos bloques para poder identificar los componentes electrónicos clave de cada uno de ellos, estos componentes aseguran la funcionalidad de dicho bloque, con esta fase se pretende dar una visión general de lo que sería el dispositivo y está alineada con el propósito del segundo objetivo específico.

4.3 Tercera fase

La tercera fase comprende la exploración, investigación e identificación de las prácticas de diseño de circuitos adecuadas para la aplicación del dispositivo, las prácticas de diseño comprenden lo que es el definir los valores de los componentes electrónicos, como se conectan, qué variables físicas y eléctricas se ven involucradas en éstas conexiones y qué valores son los adecuados, esta fase también comprende recomendaciones para la etapa de comunicación inalámbrica, tanto para el diseño de la antena como para la configuración de red óptima para un sistema de monitoreo inalámbrico con más de un dispositivo. Esta fase está alineada con el propósito del tercer objetivo específico

4.4 Cuarta fase

La cuarta fase comprende la evaluación y validación mediante una prueba de concepto, en esta fase se busca corroborar el diseño, las prácticas y sugerencias identificadas como adecuadas, construyendo un prototipo con uno o más kits de desarrollo que puedan proveer las funcionalidades deseadas del dispositivo, para así poder comprobar que el

diseño propuesto es adecuado y la propuesta de diseño es viable. Esta fase está alineada con el propósito del cuarto objetivo específico.

5. Diseño del dispositivo

La etapa de diseño desempeña un papel crítico en el desarrollo de la tecnología, ya que sienta las bases para la creación de productos y servicios innovadores y exitosos.

La definición precisa de los requerimientos y especificaciones en la etapa de diseño es fundamental para evitar errores costosos y retrasos en el desarrollo tecnológico. Establecer los requisitos adecuados desde el principio ayuda a garantizar que el producto final cumpla con las necesidades y expectativas de los usuarios, así como con los objetivos empresariales (Kim & Joines, 2020), especialmente, en la industria eléctrica y electrónica. Para lograr un alto nivel de rendimiento y superar los desafíos en esta industria, es crucial analizar las características tecnológicas destacadas en el diseño, considerando también aspectos sociales en la creación de productos. Al establecer requisitos claros y tener en cuenta estas características, se puede asegurar un rendimiento óptimo y satisfacer las demandas del mercado y usuario final en esta industria (Suppipat & Hu, 2022), así mismo, las actividades relacionadas con el diseño de tecnología deben ser actualizadas y optimizadas de acuerdo con las pruebas, alcance futuro y resultado de pruebas (Wang et al., 2020).

Además, a partir del desarrollo de (Ellis & Berry, 2013; Li & Kim, 2023) se evidencia que un proceso estructurado y metódico para la definición de requerimientos en la etapa de diseño mejora la comunicación entre los equipos de diseño, desarrollo y usuarios finales, permitiendo una comprensión clara de los objetivos y funcionalidades esperadas del producto final, la definición precisa y completa de los requerimientos en la etapa de diseño se correlaciona positivamente con una mayor eficiencia y éxito en un proyecto.

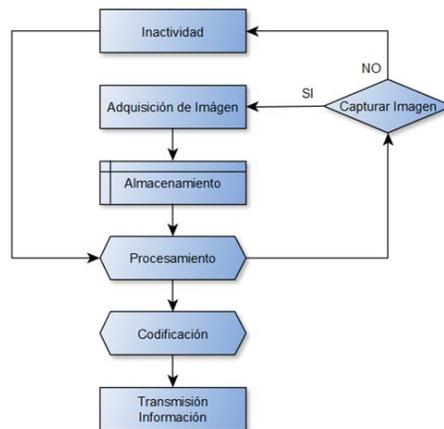
Es fundamental tener en cuenta las necesidades de las comunidades rurales al diseñar el dispositivo; por lo tanto, los requisitos y especificaciones deben basarse en lo mencionado en el capítulo 1.

5.1 Definición de los requerimientos

Se define como propósito principal del dispositivo final el adquirir imágenes y facilitar su transmisión de manera inalámbrica para un posterior almacenamiento en Nube.

Uno de los requerimientos funcionales para el dispositivo se basa en la premisa de adquirir imágenes, el dispositivo debe contar con una etapa de adquisición de imágenes para capturar las variables ópticas del entorno. Siguiendo con la premisa “Transmisión de información por medios inalámbricos”, se identifica, a partir del desarrollo del equipo de enlace entre sensores ZigBee y Bluetooth de los autores (Vancea & Orha, 2018) y el prototipo de dispositivo de enlace de sensores Bluetooth de los autores (Murad et al., 2021; Taşkin et al., 2021), que el dispositivo necesita una etapa de procesamiento de información, y su adecuación para la transmisión hacia el dispositivo de enlace hacia Internet, de acuerdo a sus estudios, y de acuerdo con los desarrollos de (Wibowo, 2020; Yan & Wang, 2018) donde se diseñan dispositivos capaces de medir variables y transmitir dicha información vía Wi-Fi hacia Internet, se prevé la necesidad de una etapa de codificación, balanceo de señal y transmisión de información a través de una antena. Además, se considera una etapa de almacenamiento inmediatamente después de la adquisición de imágenes, en caso de que el procesador almacene la información de manera volátil, considerando la alta cantidad de información que una imagen contiene. El funcionamiento del dispositivo se puede resumir entonces mediante el diagrama de flujo de la Figura 5-1, donde se facilita la percepción de los requerimientos funcionales.

Figura 5-1: Diagrama de flujo del dispositivo



Fuente: Autoría propia

Además, es importante resaltar el contexto de la aplicación a la que se someterá el dispositivo para la definición de los requerimientos no funcionales. El dispositivo está pensado para ser aplicado en una red de monitoreo de más de un dispositivo, el diseño se espera abordar acorde a las necesidades de las poblaciones rurales resaltadas en la sección 1.3. Por tanto, la reducción del costo en la implementación del dispositivo, el dispositivo no requiera de mayor complejidad en su instalación y funcionamiento, y, la inclusión de las plataformas de comunicación existentes en las zonas rurales, priman como requerimientos no funcionales en el presente diseño. Se condensan entonces en la Tabla 5-1 los requerimientos que derivan de las consideraciones expuestas.

Tabla 5-1: Requerimientos del dispositivo

Requerimiento	Tipo	Descripción
R-1	Funcional	El dispositivo deberá contar con una etapa de adquisición de imágenes.
R-2	Funcional	El dispositivo deberá contar con una etapa de procesamiento de información.
R-3	Funcional	El dispositivo deberá ser capaz de transmitir información mediante una tecnología de comunicación inalámbrica.
R-4	Funcional	El dispositivo deberá contar con una antena para la transmisión de información
R-5	No Funcional	Los parámetros para la selección de la tecnología de comunicación inalámbrica deberán ser el factor económico y dimensionamiento adecuado para monitoreo de cultivos.
R-6	No Funcional	El factor económico deberá ser el principal parámetro para la selección de los componentes.
R-7	No Funcional	La topología de red deberá ser escogida de acuerdo con la aplicación tipo IoT, donde primará el factor económico, y la simplicidad de la red.
R-8	No Funcional	El funcionamiento del dispositivo deberá ser de tipo "Conectar y Usar"

5.2 Identificación de las funcionalidades

A partir de los requerimientos funcionales, se identifican las funcionalidades del dispositivo, las cuales se encuentran referidas en la Tabla 5-2, los cuales se categorizan por tipo, donde pueden ser fundamentales u opcionales, con la finalidad de identificar si son estrictamente necesarias para que el dispositivo abarque los retos contemplados en la subsección 1.3. Además, se agrega una descripción a modo de contexto.

Tabla 5-2: Etapas consideradas en el diseño del dispositivo.

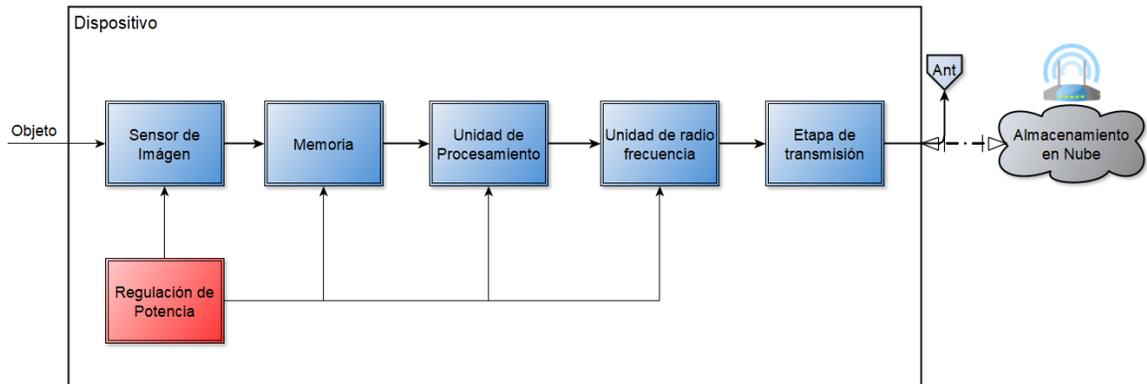
Funcionalidad	Tipo	Descripción
Adquisición de imagen	Fundamental	Esta etapa consta de un componente o conjunto de componentes que permitan la correcta detección de la imagen.
Almacenamiento Local	Posiblemente Opcional	Es posible que la unidad de procesamiento del dispositivo requiera de almacenamiento local para adecuar la información recibida de la etapa de adquisición de imagen
Unidad de Procesamiento	Fundamental	La imagen adquirida debe procesarse y adecuarse para su posterior transmisión mediante codificación en radiofrecuencia
Codificación en radio frecuencia	Fundamental	La información debe ser codificada, de acuerdo con la tecnología de comunicación escogida, para asegurar la correcta transmisión y recepción, sin pérdida de calidad y datos en la información.
Transmisión y recepción inalámbrica	Fundamental	El dispositivo debe estar dotado de una etapa de transmisión y recepción en radio frecuencia, para ser capaz de conectarse a una red de dispositivos mediante una puerta de enlace.

5.3 Diagrama de bloques

Una vez identificadas las funcionalidades y etapas del dispositivo, éstas se representan mediante un diagrama de bloques, ilustrado en la Figura 5-2, donde los bloques ofrecen una visión más completa al diagrama de flujo del sistema presentado en la Figura 5-1. En este diagrama de bloques, la información visual del objeto actúa como la excitación del sistema. El diagrama de bloques se enfoca en representar el circuito del dispositivo e incorpora etapas de regulación de potencia, antena de transmisión y recepción, y demás

elementos esenciales para la comunicación, aunque no se ilustren de manera explícita en el diagrama de flujo del sistema.

Figura 5-2: Representación de las funcionalidades en diagrama de bloques.



Fuente: Autoría propia

5.4 Hardware

5.4.1 Adquisición de imágenes

En la etapa de adquisición de imágenes, es imperativo que la cámara ofrezca una resolución adecuada para un análisis visual automatizado. De acuerdo con el estudio de (Geetharamani & J., 2019), se logró una exitosa identificación de enfermedades en una amplia variedad de plantas mediante la implementación de un modelo de red neuronal convolucional de 9 capas, utilizando imágenes con una resolución de no más de 0.6 Megapíxeles (240x240).

De acuerdo con el requerimiento R-1, la etapa de adquisición de imágenes es fundamental, la identificación de la cámara es imperativa, basándose en el anterior estudio y en la experiencia profesional del autor del presente documento, se propone utilizar la cámara OV2640 de 1/4 de pulgada como sensor de imagen. Esta cámara está equipada con un sensor óptico de 2 Megapíxeles (1920 x 1080) que se comunica mediante interfaz paralela DVP (Omnivision, 2006), para su conexión al circuito impreso, la cámara requiere un enchufe de 8x8 mm, que se utilizará como conector para el cable plano flexible incorporado en la misma. Este tipo de conector es ampliamente utilizado en aplicaciones como teléfonos móviles, juguetes y cámaras digitales, lo que proporciona versatilidad al diseño del dispositivo.

Figura 5-3: Descripción general - Cámara OV2640



Fuente: (Omnivision, 2006)

5.4.2 Procesamiento y transmisión en radiofrecuencia

Para lograr la consolidación de las etapas de procesamiento y transmisión en radiofrecuencia, recurrimos a estudios previos como guía para seleccionar las tecnologías a implementar. Optamos por elegir la tecnología de transmisión inalámbrica como una estrategia para facilitar y agilizar el análisis del documento. Esto se debe a que, según la experiencia profesional del autor, los componentes electrónicos relacionados con estas tecnologías ya incluyen una etapa de procesamiento incorporada.

La etapa de transmisión del dispositivo juega un papel de suma importancia en el diseño. Por ende, es fundamental identificar la tecnología de transmisión inalámbrica de acuerdo con los requerimientos específicos de la aplicación del dispositivo. De esta manera, se garantiza una base sólida para el diseño general del dispositivo.

En el ámbito de la aplicación del dispositivo, se eligen tecnologías inalámbricas candidatas basadas en investigaciones relacionadas con aplicaciones similares a aquella que se busca para el dispositivo, buscando de esta manera, que dichas tecnologías se adapten adecuadamente a la aplicación específica. Como resultado de este proceso, las tecnologías seleccionadas como candidatas se registran en la Tabla 5-3.

La selección de la tecnología inalámbrica para el diseño se realizará teniendo en cuenta los requerimientos no funcionales R-5, R-6 y R-8. Se priorizará una tecnología que se

Tabla 5-3: Tecnologías de comunicación inalámbrica comunes en aplicaciones IoT

Tecnología	Trabajos Relacionados
LoRa	<ul style="list-style-type: none"> Estudio y análisis de las Redes LoRa como una Alternativa de Largo Alcance y Bajo Consumo para las Redes de IoT (Augustin et al., 2016). Análisis de Diversas Tecnologías Inalámbricas, Incluyendo LoRa, y sus Características y Ventajas en Aplicaciones de IoT (Molla et al., 2022).
IEEE 802.11 (Wi-Fi)	<ul style="list-style-type: none"> Desarrollo y Simulación de Comunicación Inalámbrica mediante FPGA y Wi-Fi, con Conexión a Internet (Wibowo, 2020) Diseño de un Tanque Inteligente con Sistema de Monitoreo del Nivel de Agua, que Transmite Datos a Internet a través de un Módulo Wi-Fi (Yan & Wang, 2018) Diseño de un Sistema de Medición de Temperatura con Transmisión de Datos mediante Wi-Fi (Rahimoon et al., 2020).
Bluetooth Low Energy	<ul style="list-style-type: none"> Transmisión de información desde sensores de humedad, luz y proximidad incorporando módulos bluetooth y tecnología ZigBee en casas inteligentes (Vancea & Orha, 2018) Desarrollo de un Modelo de Prototipo para la Transmisión de Información mediante Sensores BLE en el Contexto del IoT (Taşkin et al., 2021) Implementación de Tecnologías Bluetooth y ZigBee para la Comunicación entre Etapas de medición en Hogares Inteligentes (Murad et al., 2021)
ZigBee	<ul style="list-style-type: none"> Implementación de tecnología Bluetooth y ZigBee para comunicar etapas de medición en casas inteligentes (Murad et al., 2021) Transmisión de información desde sensores de humedad, luz y proximidad incorporando módulos Bluetooth y tecnología ZigBee en casas inteligentes (Vancea & Orha, 2018)

adapte de manera adecuada a las condiciones de las poblaciones rurales, que tenga un bajo impacto económico y que su utilización sea ampliamente conocida, para asegurar que el dispositivo sea fácil de usar y beneficie a un mayor número de usuarios.

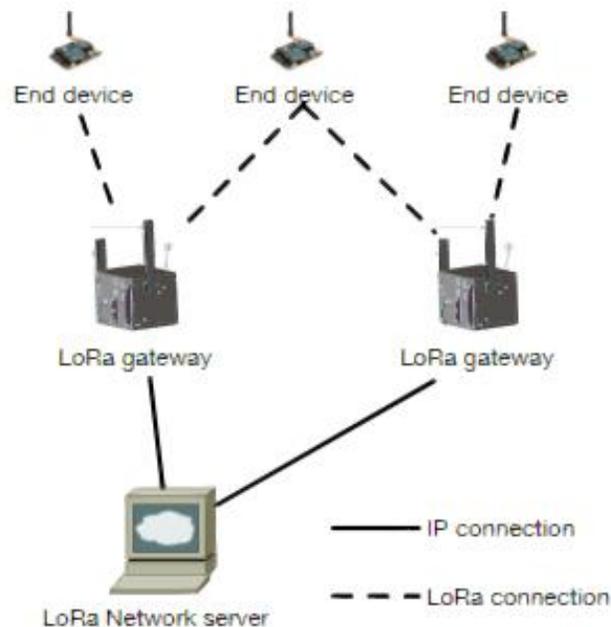
A continuación, se ofrece una descripción general de cada una de las tecnologías candidatas para proporcionar un contraste entre ellas.

- LoRa:** Con el objetivo de cumplir con los requerimientos de las redes IoT de bajo consumo y largo alcance, se ha desarrollado la tecnología LoRa. Esta tecnología se aplica a dispositivos cuyo ancho de banda opera en los rangos de 433 MHz, 868 MHz o 915 MHz, y su capacidad de ancho de banda está directamente vinculada a los estándares internacionales de radiofrecuencia, dependiendo de la región donde se desplieguen (Augustin et al., 2016).

LoRa es una solución viable en situaciones donde la transmisión de información no implica altas tasas de bytes, lo que proporciona un bajo consumo de energía y un alcance que puede abarcar desde unos pocos metros hasta los 100 km de distancia en campo abierto (Molla et al., 2022). Esto la convierte en una opción ideal para aplicaciones que dependen de baterías, donde tanto el consumo de energía como el alcance de la comunicación son fundamentales.

La topología típica de una red LoRa consiste en una estructura en forma de estrella con redundancia. Esto implica la presencia de múltiples dispositivos de enlace o "gateway" que se conectan a un servidor central. Estos dispositivos de enlace permiten que los dispositivos de medición o "dispositivos finales" envíen información al servidor central, que puede ubicarse en la Nube (Augustin et al., 2016). La Figura 5-4 ilustra la topología típica en la implementación de redes LoRa.

Figura 5-4: Topología típica de una red LoRa



Fuente: (Augustin et al., 2016)

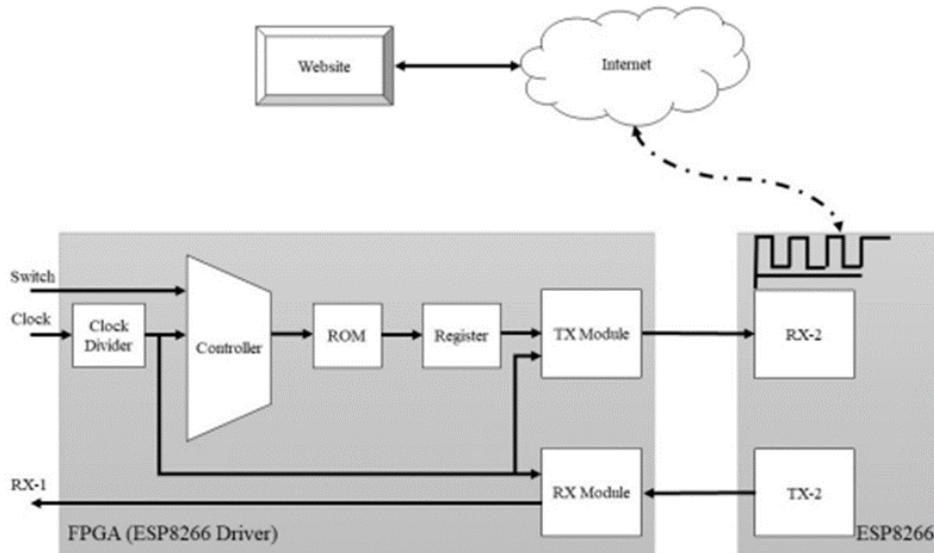
Las redes LoRa ofrecen varias ventajas para aplicaciones IoT, destacando su largo alcance y bajo consumo de energía, lo que la convierte en una tecnología versátil. Sin embargo, su implementación adecuada requiere un conocimiento previo y especializado en su funcionamiento. Es importante tener en cuenta que el costo de los sensores LoRa puede ser elevado y, en algunos casos, puede no compensar

completamente el beneficio del bajo consumo de energía (Augustin et al., 2016; Molla et al., 2022). Además, la implementación de dispositivos de enlace implica, además de un costo adicional, el uso de más de una tecnología de conexión, donde LoRa se utiliza para los sensores y Ethernet o Wi-Fi para la comunicación hacia el servidor.

- **Wi-Fi:** Abreviación de su nombre *Wireless Fidelity*, es una serie de estándares de comunicación WLAN que forman parte del conjunto IEEE 802.11. Esta tecnología y sus protocolos están regulados por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). Wi-Fi se ha convertido en una opción ampliamente utilizada para la conectividad de redes a internet mediante el protocolo de Internet (IP). Los estándares más populares en la tecnología Wi-Fi incluyen las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz, que corresponden a los estándares IEEE 802.11a/b/g/n/ac (Farooq et al., 2019).

Una de las principales ventajas de Wi-Fi es su flexibilidad en cuanto a los anchos de banda utilizados. Además, la tecnología ofrece un rango de comunicación que va desde unos pocos metros hasta distancias de hasta 1 km, dependiendo de diversos factores del entorno y la configuración (Farooq et al., 2019).

Aunque Wi-Fi se utiliza en aplicaciones de IoT, no es tan común como otras tecnologías como LoRa o BLE, las cuales ofrecen un menor consumo de energía. Sin embargo, la implementación de Wi-Fi en entornos IoT es posible y ha sido estudiada y desarrollada en diversas investigaciones (Farooq et al., 2019). Sin embargo, su implementación en ambientes IoT puede llegar a ser factible, como en el desarrollo de un tanque inteligente con sensado de nivel y transmisión de datos a través de Wi-Fi (Yan & Wang, 2018), o en un dispositivo de medición de temperatura con transmisión también vía Wi-Fi (Rahimoon et al., 2020). Además, la implementación de Wi-Fi para la conexión a internet en los dispositivos de enlace de la red IoT es un punto común en los estudios de las otras tecnologías de IoT consultados (Augustin et al., 2016; Murad et al., 2021; Taşkin et al., 2021; Vancea & Orha, 2018) lo cual posibilita que el enlace entre el dispositivo y el punto de conexión a la Nube se vuelva imperceptible, tal como se muestra en la Figura 5-5.

Figura 5-5: Modelo de comunicación IoT basado en FPGA y módulo Wi-Fi

Fuente: (Wibowo, 2020)

La tecnología Wi-Fi ha causado una auténtica revolución en la forma en que nos conectamos a Internet, facilitando la conectividad inalámbrica tanto en hogares como en empresas y lugares públicos. A medida que la demanda de conectividad y ancho de banda sigue creciendo, los estándares de Wi-Fi continúan evolucionando. Gracias a los avances en los radioenlaces, el acceso a internet mediante tecnología Wi-Fi ha llegado a zonas que son consideradas de difícil acceso (Lynggaard, 2015; Zaidi, 2013). En este sentido, Wi-Fi ofrece la posibilidad de usar un *router* o punto de acceso, común en los hogares, como dispositivo de enlace. Esto facilita la conexión y comunicación de los dispositivos IoT con la Nube. Como resultado, la integración de Wi-Fi con los dispositivos finales se ha convertido en una herramienta poderosa para mejorar la conectividad y permitir la interacción eficiente de los dispositivos con la infraestructura en la Nube.

- **BLE:** *Bluetooth Low Energy* (BLE) es una tecnología de comunicación basada en el estándar Bluetooth, diseñada para redes con bajo consumo energético y costos de implementación reducidos. Su banda de frecuencia opera en los 2.4 GHz, permitiendo la transmisión eficiente de datos entre dispositivos cercanos y consumiendo considerablemente menos energía que las versiones anteriores. Además, BLE habilita el establecimiento de redes de área personal inalámbricas (WPAN) y ofrece un rango

de comunicación que va desde unos pocos metros hasta los 100 m (Farooq et al., 2019; Molla et al., 2022).

Debido a sus características y beneficios, BLE se ha convertido en una tecnología ampliamente utilizada en dispositivos de IoT para crear redes de sensores y sistemas de monitoreo inteligentes. donde proporciona versatilidad gracias a su aplicabilidad multinivel y ofrece diseños económicos y ampliamente disponibles en el mercado (Farooq et al., 2019; Taşkin et al., 2021). Existen estudios que han demostrado su utilidad y conveniencia en aplicaciones de monitoreo y entornos IoT, como en el diseño de sistemas de monitoreo para intercomunicación de sensores de temperatura, humedad y proximidad en casas inteligentes, donde la comunicación Bluetooth y ZigBee juegan un papel clave (Murad et al., 2021; Vancea & Orha, 2018). BLE también ha encontrado aplicación en el desarrollo de prototipos para la transmisión de información a través de esta tecnología y su posterior procesamiento y virtualización en la nube (Taşkin et al., 2021). Sin embargo, un factor común en estos desarrollos es la necesidad de un dispositivo de enlace que permita la comunicación entre sensores y acceso a internet mediante módulos Wi-Fi para garantizar la conectividad, lo cual implica un gasto adicional y la necesidad de contar con el conocimiento adecuado para una implementación y manejo adecuado.

- **ZigBee:** ZigBee es una tecnología de comunicación inalámbrica que opera bajo el estándar IEEE 802. Es ampliamente utilizada en ambientes de IoT debido a que, al igual que BLE, ZigBee ofrece un bajo consumo de energía y un diseño de costo reducido, además de su compatibilidad para aplicaciones de comunicación que involucran redes móviles GSM. Entre sus características destacadas, ZigBee ofrece comunicación bidireccional, lo que facilita la formación de redes inalámbricas personales (WPAN) complejas. En este tipo de configuraciones, los dispositivos finales pueden comunicarse tanto con el dispositivo de enlace como entre ellos mismos. Esto lo posiciona como una tecnología conveniente para aplicaciones que requieren recolección de datos, toma de decisiones y posterior procesamiento automatizado en la Nube (Farooq et al., 2019). Además, al igual que BLE, ZigBee también ofrece un rango de comunicación de hasta 100 m, lo que permite una conectividad efectiva en distancias considerablemente amplias (Molla et al., 2022).

En algunos estudios se ha evidenciado la utilidad y conveniencia de Bluetooth y ZigBee en aplicaciones de monitoreo y entornos IoT. Estas tecnologías desempeñan un papel

clave en el diseño de sistemas de intercomunicación de sensores de temperatura, humedad y proximidad en casas inteligentes. Gracias a su eficiente funcionalidad, estas soluciones facilitan la creación de redes inalámbricas de sensores para un monitoreo preciso y efectivo en el hogar inteligente. (Murad et al., 2021; Vancea & Orha, 2018). No obstante, al igual que BLE, para su comunicación en la Nube requiere la presencia de un dispositivo de enlace.

Según el contraste de estas tecnologías y considerando los altos costos asociados a los dispositivos de enlace y los requisitos mencionados anteriormente para la selección, la opción elegida para la comunicación inalámbrica es Wi-Fi. Esta elección se debe a que Wi-Fi puede proporcionar una única tecnología de comunicación inalámbrica tanto para la comunicación de los dispositivos finales, como para el dispositivo de enlace, lo que facilita su implementación desde el dispositivo final hacia un punto de acceso Wi-Fi, como el coloquialmente conocido "*router*" doméstico, o a través de su extensión mediante redes móviles utilizando la funcionalidad "*Wi-Fi Hotspot*" de los dispositivos móviles actuales. Además, su rango de comunicación de 100 m en línea de vista se considera adecuado para una aplicación de monitoreo de cultivos en una zona rural, permitiendo abarcar la extensión de, por ejemplo, un invernadero de manera adecuada y sin sobredimensionarse a la aplicación requerida.

En lo referente a la selección del componente, o módulo para la etapa de comunicación inalámbrica, basándose en los desarrollos IoT que involucran tecnologías Wi-Fi (Murad et al., 2021; Taşkin et al., 2021; Wibowo, 2020; Yan & Wang, 2018), se identifica el módulo Wi-Fi ESP8266 del fabricante Espressif como una opción adecuada para la etapa de transmisión inalámbrica.

El ESP8266 es un SoC (System on a Chip) que ofrece un procesamiento de 32 bits a 80 MHz, con una RAM de hasta 160 kB y compatibilidad con el estándar Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n, operando en una banda de 20 MHz en la frecuencia de 2.4 GHz, además de una antena funcional incorporada para la comunicación (Espressif, 2020). Aunque es una elección sólida para la consolidación de las etapas de procesamiento, adecuación de señal y transmisión inalámbrica, este módulo se considera obsoleto en la actualidad.

Por lo tanto, se opta por su sustituto, el módulo ESP32 del mismo fabricante. El ESP32 ofrece un procesamiento de 32 bits a 160 MHz, con una RAM de hasta 512 kB la cual permite la eliminación de la etapa de almacenamiento, y tiene un modo de bajo consumo. Además de ser compatible con el estándar Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n, también admite Bluetooth en la frecuencia de 2.4 GHz, operando en un ancho de banda de 40 MHz, y

cuyos módulos cuentan con antena impresa incorporada y opción de antena externa vía conector UFL; además, cuenta con una etapa de balanceo y adecuación de la señal para su posterior transmisión por la antena (Espressif, 2021, 2022). Esta elección más actualizada y versátil se considera adecuada para los requerimientos del diseño presente, satisfaciendo los requerimientos R-2, R-3 y R-4.

Figura 5-6: Descripción general - Módulo ESP32

2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth® + Bluetooth LE module
Built around ESP32 series of SoCs, Xtensa® dual-core 32-bit LX6 microprocessor
4/8/16 MB flash available
26 GPIOs, rich set of peripherals
On-board PCB antenna or external antenna connector



Fuente: (Espressif, 2022)

5.4.3 Regulación de potencia

Para asegurar un correcto funcionamiento del Módulo Wi-Fi, es imprescindible suministrar un voltaje regulado de 3.3 V. Para esta etapa de potencia, se ha elegido un regulador similar al especificado en la hoja de datos del módulo (Espressif, 2022). El número de parte seleccionado es el NCP1117 de la marca On Semiconductor, que proporciona un voltaje de salida estable de 3.3 V y es capaz de manejar corrientes de hasta 1 A, además de soportar voltajes de entrada de hasta 18 V (On Semiconductor, 2014).

Gracias a estas características, este regulador resulta ser una opción ideal para alimentar el dispositivo a través de una conexión USB (5 V). Así, es posible alimentar el módulo desde computadoras portátiles, baterías portátiles con conexión USB y cargadores móviles USB, lo que lo hace sumamente versátil y conveniente en diversos entornos de uso.

Figura 5-7: Descripción general - Regulador de voltaje

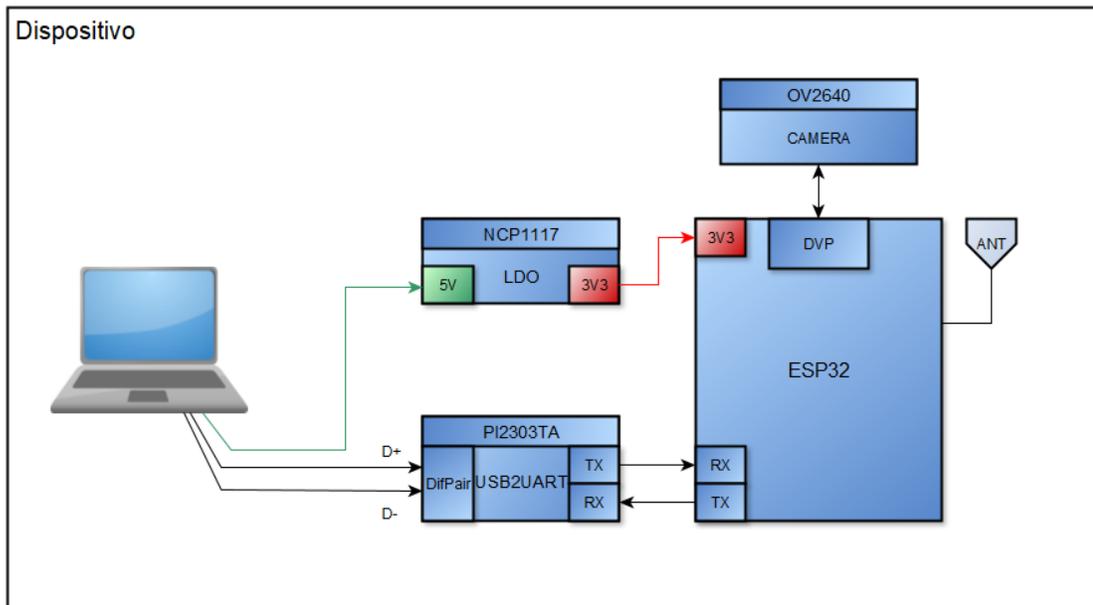
Fuente: (On Semiconductor, 2014)

Después de la descripción y selección de componentes para las etapas funcionales representadas en la Figura 5-2, se procede a representar el circuito del diseño en un diagrama de bloques de alto nivel, en el cual se identifican los componentes y módulos principales para el funcionamiento de cada uno de los bloques, dicha representación, se ilustra en la Figura 5-9, en donde se agrega una etapa adicional para la comunicación y programación del dispositivo a través del cable convertidor USB a UART PL2303TA, el cual soporta la conversión USB 2.0 a UART (Prolific, 2012).

Figura 5-8: Cable puente USB a UART

Fuente: (Prolific, 2012)

Figura 5-9: Representación del dispositivo en diagrama de bloques de alto nivel



Fuente: Autoría Propia

El listado de materiales, detallado en la Tabla 5-4, ha sido consultado en fuentes como el distribuidor mundial de componentes Digi-Key y la plataforma global de comercio electrónico Amazon. Estos proveedores nos muestran un precio competitivo en comparación con los módulos de medición Bluetooth disponibles en el mercado, que tienen un precio aproximado de 25 dólares estadounidenses (USD).

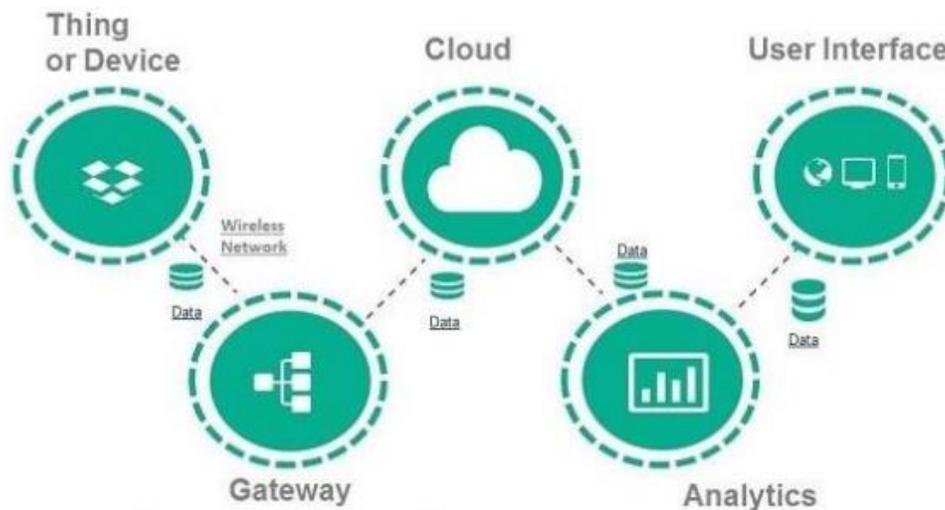
Tabla 5-4: Listado de materiales

Numero de Parte	Precio (USD)	Descripción	Fuente
OV2640	10.00	OV2640 Camera Module 140 Degree Wide Angle CMOS 2MP	Amazon
ESP32-WROOM	1.95	RF TXRX MODULE ANT PCB TRACE SMD	Digi-Key
NCP1117	0.5	IC REG LINEAR 3.3V 1A	Digi-Key
PI2303TA	1.5	Chipset RS-232 Converter	Amazon
Total		13.95	

5.5 Arquitectura de red

Considerando el contexto de la aplicación del dispositivo relacionado con IoT, de los estudios relacionados se ha identificado la arquitectura típica de un sistema o red IoT para monitoreo. Esta arquitectura se ilustra en la Figura 5-10, donde se destaca el dispositivo final encargado de obtener información visual de la planta. Posteriormente, el dispositivo transmitirá dicha información a través del dispositivo de enlace hacia la Nube, donde se llevará a cabo el procesamiento y la posterior visualización de los datos (Murad et al., 2021).

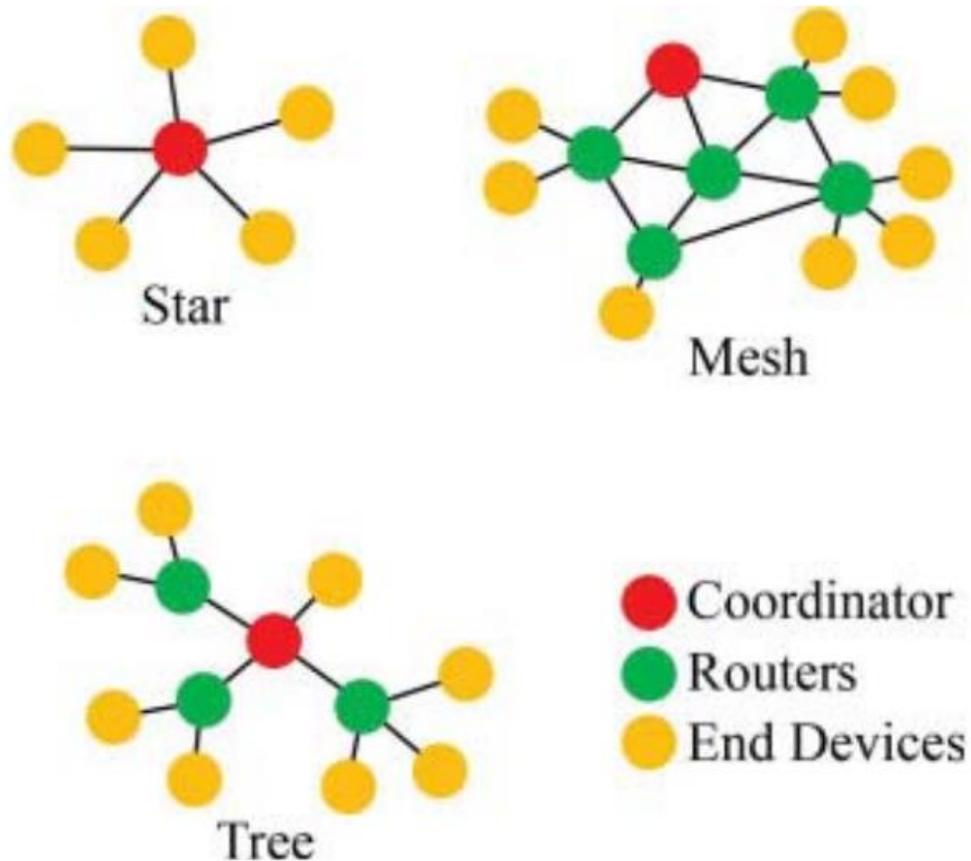
Figura 5-10: Arquitectura de un sistema IoT



Fuente: (Murad et al., 2021)

En un sistema de monitoreo, como el que se describe anteriormente, es crucial definir la topología de red mediante la cual los dispositivos finales se comunicarán y enrutarán la información hacia los dispositivos de enlace. Esta elección debe realizarse de acuerdo con las necesidades específicas de la aplicación (Nourildean et al., 2022). La topología de red representa cómo se interconectan cada uno de los dispositivos en una red. Para la tecnología y aplicaciones ZigBee, se utilizan tres topologías básicas: la topología en estrella, la topología en árbol y la topología en malla (Nourildean et al., 2022), las cuales se ilustran en la Figura 5-11.

Figura 5-11: Topologías de red para aplicaciones IoT con tecnología ZigBee



Fuente: (Nourildean et al., 2022)

- La topología en estrella permite una arquitectura centralizada donde el dispositivo central se comunica con todos los dispositivos finales, pero no permite la comunicación directa entre los dispositivos finales. Esta topología es adecuada para aplicaciones que involucran hasta aproximadamente 30 dispositivos finales. Sin embargo, cuando se supera este límite, se pueden observar pérdidas de datos, disminución del rendimiento y un aumento significativo en el retraso de la comunicación (Nourildean et al., 2022).
- La topología en malla permite una arquitectura más flexible y descentralizada donde los dispositivos finales pueden comunicarse entre sí y también con el dispositivo de enlace a través de dispositivos intermedios. Esto asegura la redundancia en el enrutamiento de la información. La topología en malla es más adecuada para aplicaciones de IoT que involucran múltiples dispositivos en un área cercana. A medida que la red crece, es posible extenderla, pero esto requiere la

adición de dispositivos de enrutamiento adicionales. A pesar de esto, ofrece una menor pérdida de datos, menor pérdida de rendimiento y menor retraso en la comunicación en comparación con la topología en estrella cuando se trata de redes con más de 30 dispositivos finales (Nourildean et al., 2022).

- La topología en árbol también permite una arquitectura descentralizada, donde la red de dispositivos finales se segmenta en subredes, cada subred se comunica mediante un enrutador. Esta topología es adecuada para aplicaciones de IoT que involucran múltiples dispositivos en un área extensa, donde cada subred de dispositivos finales se identifica por su ubicación geográfica. La topología en árbol puede manejar un número similar de dispositivos finales en comparación con la topología en malla. Sin embargo, es especialmente conveniente cuando se requiere un alto rendimiento de transferencia de información en un tiempo determinado, independientemente de la pérdida de datos o el retraso en la conexión (Nourildean et al., 2022).

Dado que las aplicaciones de IoT tienen afinidad con la tecnología Wi-Fi, es posible extrapolar el estudio de la tecnología ZigBee con la aplicación IoT del presente trabajo. Considerando los requerimientos R-7, donde se busca viabilidad económica en la adición de dispositivos y el establecimiento de la red, la topología en estrella es la más adecuada para la aplicación del dispositivo, ya que no se pretende una amplia cantidad de dispositivos finales de medición ni una red de extensa cobertura, tal como se expuso en la sección 1.3, se propone entonces, una arquitectura de red para el escenario de implementación, igual a la propuesta teóricamente en la Figura 1-1 de la subsección 1.2.

5.6 Prácticas recomendadas para el diseño

Según los fabricantes de componentes semiconductores como "Cypress", la etapa de radiofrecuencia es altamente sensible y requiere un diseño adecuado para evitar pérdidas en la transmisión e interferencias. Por esta razón, se han realizado diversos estudios para desarrollar prácticas de diseño que aseguren el correcto funcionamiento y la eficiente transmisión de información a una frecuencia determinada (Pattnayak & Thanikachaiam, 2018). De la misma manera, empresas especializadas en el diseño electrónico, como "Altium Ltd", estudian y resaltan la importancia del voltaje de alimentación en circuitos con etapas de radiofrecuencia (Peterson, 2020).

En esta sección, se consignan las prácticas recomendadas derivadas de los estudios realizados por los fabricantes y diseñadores de circuitos mencionados anteriormente, que garantizan la correcta implementación de la etapa de transmisión de radiofrecuencia Wi-Fi a 2.4GHz, teniendo en cuenta la alimentación externa de 5V. La identificación de estas prácticas será el punto de partida para la selección de la placa de desarrollo que se utilizará en la prueba de concepto.

5.6.1 Prácticas para la etapa de transmisión en radiofrecuencia a 2.4 GHz

De acuerdo con la guía para el diseño de antenas y radiofrecuencia a 2.4 GHz de "Cypress" (Pattnayak & Thanikachaiam, 2018), el tipo de antena y sus parámetros son factores determinantes en la transmisión y recepción de información en radiofrecuencia. En este contexto, se presentan distintas opciones para implementar antenas en dispositivos electrónicos, y entre ellas, las antenas impresas en forma de pistas en el circuito impreso ofrecen una solución económica y eficiente en comparación con las antenas externas.

Existen diversos tipos de antena que ofrecen diferentes beneficios y características, y la elección adecuada dependerá de los requerimientos específicos de la aplicación. A continuación, se presentan algunos de los tipos de antena más comunes:

1. Antena F Invertida (IFA): La antena F Invertida es una antena impresa, lo que significa que está diseñada como una pista de conducción en un circuito impreso con características especiales para radiar y recibir señales de radiofrecuencia. Esta opción es muy popular en dispositivos compactos y de baja potencia debido a su diseño sencillo y a su costo reducido.
2. Antena F Invertida con Patrón Meandro (MIFA): La antena F Invertida con Patrón Meandro es una variante mejorada de la IFA. Su diseño con patrón meandro permite obtener un rendimiento mejorado en términos de eficiencia y directividad. Esta antena es especialmente recomendada para dispositivos móviles y dispositivos IoT debido a su tamaño compacto y características de transmisión y recepción mejoradas en comparación con la IFA convencional.
3. Antenas Chip: Las antenas chip son antenas miniaturizadas y de bajo perfil, fabricadas en sustratos cerámicos o semiconductores. Estas antenas se utilizan comúnmente en dispositivos electrónicos pequeños, como teléfonos móviles, tarjetas RFID y dispositivos IoT. Su diseño compacto las hace ideales para

integrarse en espacios reducidos, y su rendimiento puede optimizarse mediante técnicas de sintonización, sin embargo, estas antenas se agregan como un componente adicional al circuito, lo cual introduce un costo adicional en la lista de componentes y ensamblaje del circuito impreso.

4. Antena de Alambre: La antena de alambre, también conocida como antena de hilo, es una antena simple que consiste en un conductor metálico largo y delgado. Esta antena puede ser configurada en diversas formas. Su facilidad de construcción y versatilidad la hacen popular para aplicaciones experimentales, de radioaficionados y de baja frecuencia.

Dentro de los parámetros importantes de diseño de la antena, además de la impedancia, se encuentran el ancho de banda y la pérdida de retorno. Un ancho de banda adecuado, que debe abarcar aproximadamente 200 MHz sobre la frecuencia central, asegura que la antena funcione en una amplia gama de frecuencias conocidas como canales sobre la frecuencia central, lo cual proporciona versatilidad al prevenir interferencias. Por otro lado, la pérdida de retorno ($S_{1,1}$), que indica la cantidad de energía reflejada por la antena, debe ser menor a 20 dB para lograr una eficiente transferencia de energía entre la antena y la línea de transmisión. Además, se busca que la ganancia de la antena ronde los 2 dBi para mejorar su capacidad de transmisión y recepción de señales.

Estos parámetros están estrechamente relacionados con el ancho de las pistas de la antena, que comúnmente se establece en 0.5 mm para satisfacer los requerimientos de una pista de impedancia controlada. Asimismo, las dimensiones de la antena también influyen en su rendimiento y características de radiación. Por lo tanto, es fundamental considerar todos estos factores durante el proceso de diseño de la antena para garantizar un óptimo desempeño en la transmisión inalámbrica.

En la Figura 5-12 se presentan los distintos tipos de antenas recomendadas para su uso a 2.4 GHz, junto con sus parámetros recomendados.

Dada la afinidad de la antena MIFA, se propone su inclusión en el diseño, en la Figura 5-13 se ilustra el diseño recomendado de la antena MIFA.

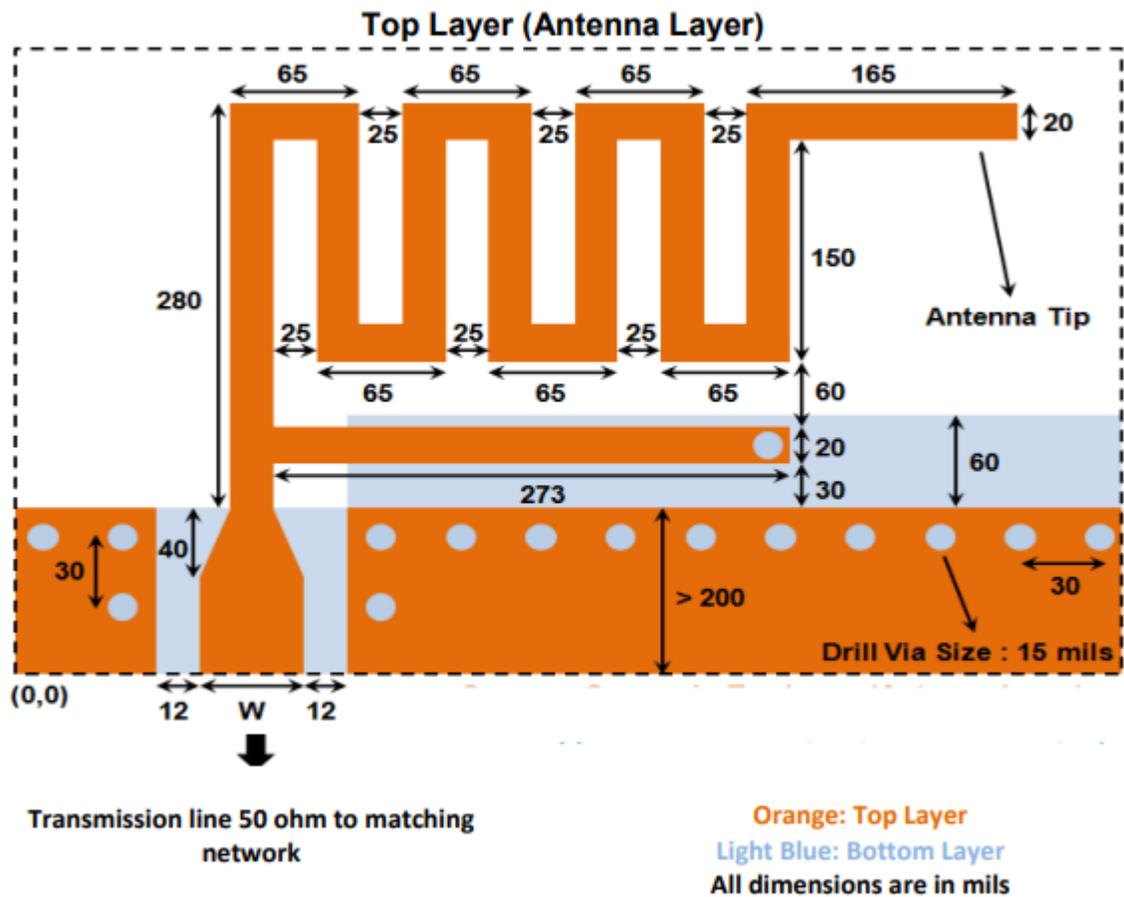
De acuerdo con la guía, la pérdida de retorno también está relacionada con el acople entre la antena y la línea de transmisión que conecta con el dispositivo generador de señal. Para asegurar una adecuada adaptación de impedancia y minimizar la pérdida de retorno, se recomienda utilizar un circuito de acople y balanceo de impedancia. Entre los circuitos adecuados para esta función, se encuentra el circuito de tres impedancias en configuración delta, cuyos valores deben ajustarse mediante un proceso de sintonización. El objetivo de

Figura 5-12: Comparación - Tipos de antena

Properties at 2.44 GHz	MIFA	IFA	Chip Antenna	Wire Antenna
Appearance				
Recommended Applications	Less Area (Mouse, Keyboard, Presenter)	Height Constrain (Heart Rate Monitor)	Small Area (Nano Dongle, BLE Module)	More Height (6 mm) (3D) (Sensor Hub)
Dimensions (mm)	7.2 × 11.1	4 × 20.5	3.2 × 1.6	6 × 30
Dimensions (mils)	284 × 437	157.5 × 807	126 × 63	250 × 1200
Gerber File	Web	Web	Refer to datasheet	
Cost (US\$)	Minimal	Minimal	0.1–0.5	0.1
Bandwidth (MHz) ($S_{11} \leq -10$ dB)	230	220	200	200
Gain (dBi)	1.6	1.1	0.5	2

Fuente: (Pattnayak & Thanikachaiam, 2018)

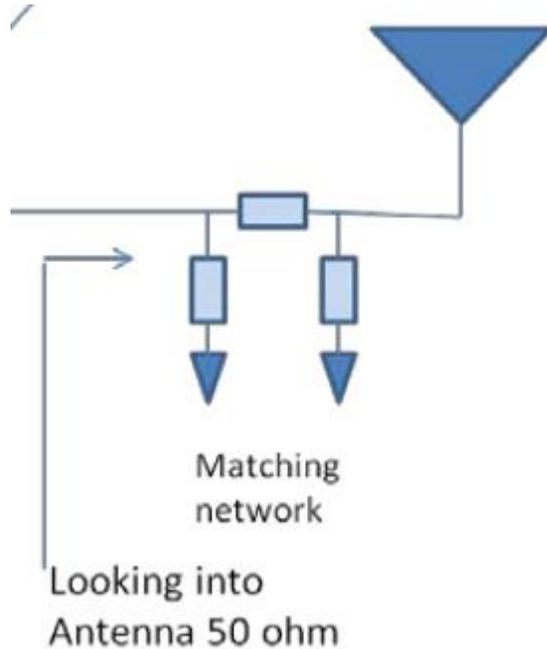
Figura 5-13: Diseño de Antena F invertida con patrón meandro recomendada.



Fuente: (Pattnayak & Thanikachaiam, 2018)

la sintonización es lograr una impedancia de 50Ω a la frecuencia de 2.4 GHz, con un componente inductivo o capacitivo mínimo. En la Figura 5-14, se ilustra un ejemplo práctico de circuito de acople en delta.

Figura 5-14: Circuito de acople en línea de transmisión



Fuente: (Pattnayak & Thanikachaiam, 2018)

Asimismo, es esencial evitar el acoplamiento indeseado con otros componentes de la placa y asegurar un funcionamiento óptimo de la antena. Para lograrlo, la guía recomienda como práctica no ubicar plano de tierra ni pistas de alimentación en la capa inferior a la que se encuentra la antena impresa, de igual manera y como se explicará en el numeral 5.6.2, será importante determinar, de acuerdo con las condiciones del circuito, la separación mínima entre componentes.

5.6.2 Prácticas para circuitos de bajo voltaje.

De acuerdo con la guía de diseño de circuitos impresos de bajo voltaje (<15 V) proporcionada por la empresa de software para automatización y diseño electrónico "Altium Ltd" (Peterson, 2020), se recomiendan prácticas específicas según los estándares de voltaje y espaciado de pistas de conexión y componentes IPC 2221, la distancia mínima entre dos conductores debe ser de 0.1 mm. Sin embargo, es importante destacar que, para

la etapa de conversión y regulación de potencia, este espaciado debe aumentar a 0.13 mm. Además, dado que hay pistas de radiofrecuencia de impedancia controlada a 50 Ω para una frecuencia de 2.4 GHz, las pistas de conexión cercanas a estas pistas de radiofrecuencia deben estar espaciadas al triple del ancho de la pista de radiofrecuencia que por lo general ronda entre los 0.5 mm

5.7 Placa de desarrollo - Prueba de concepto

Según lo desarrollado en la subsección 5.4.2, se ha seleccionado el módulo Wi-Fi ESP-32 del fabricante Espressif. La hoja de datos del módulo (Espressif, 2022) garantiza que el módulo cumple con las prácticas de diseño descritas en la sección 5.6. Este módulo utiliza una antena MIFA, y su rendimiento, acople de impedancia y parámetros de la antena están garantizados gracias a las certificaciones en radiofrecuencia a las que ha sido sometido durante el proceso de diseño.

Figura 5-15: Modulo ESP32 - Certificaciones en radiofrecuencia



PRODUCT SPECIFICATIONS

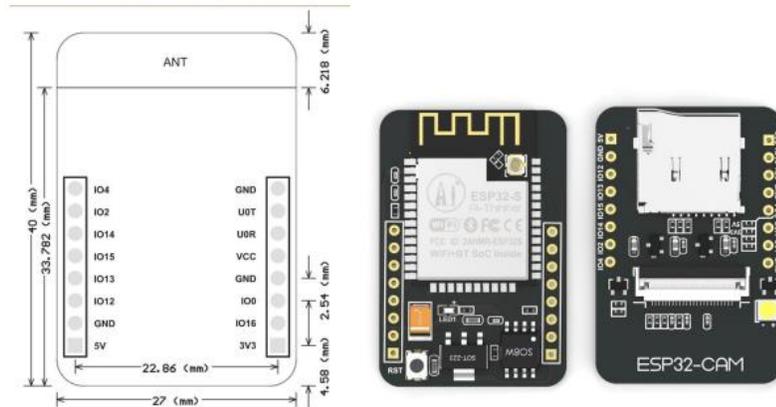
Frequency Range (MHz)	Channel Spacing	Antenna output power	Class of Emissions	Technology	Antenna Type/Gain
2402-2480	1MHz	0.12mW/MHz	F1D, G1D	BT	PCB, 2.99dBi
2402-2480	2MHz	3.35mW/MHz	F1D	BLE	PCB, 2.99dBi
2412-2472	5MHz	7.61mW/MHz	F1D, G1D	802.11b	PCB, 3.28dBi
2412-2472	5MHz	7.56mW/MHz	G1D, D1D	802.11g, n(HT20)	PCB, 3.28dBi
2422-2462	5MHz	2.67mW/MHz	G1D, D1D	802.11n(HT40)	PCB, 2.99dBi
2484	5MHz	7.38mW/MHz	F1D, G1D	802.11b	PCB, 3.42dBi

Fuente: (Espressif, 2022; TIMCO, 2020)

Se propone utilizar el kit de desarrollo ESP32-CAM del fabricante "AI Thinker", la cual incorpora un módulo Wi-Fi de la familia ESP32. Esta elección de placa de desarrollo ofrece

una solución completa y funcional para el proyecto, proporcionando el conector 8x8 requerido para implementar la cámara OV2640 y aprovechar al máximo las capacidades del módulo incorporado ESP32 (AI-Thinker, 2020).

Figura 5-16: Descripción general - Kit de desarrollo AI-Thinker ESP32 CAM



Product Description

Model	ESP32-CAM
Package	DIP-16
Size	27*40.5*4.5 (± 0.2) mm
RAM	Internal 520KB+ external 8MB PSRAM
Wi-Fi	802.11 b/g/n/e/i
Bluetooth	Bluetooth 4.2 BR/EDR and BLE standards
Working Temperature	-20 °C ~ 70 °C
Storage Environment	-40 °C ~ 125 °C , < 90%RH
Support interface	UART、SPI、I2C、PWM
IO	9
Series Rate	Default 115200 bps
Security	WPA/WPA2/WPA2-Enterprise/WPS
SPI Flash	Default 32Mbit

Fuente: (AI-Thinker, 2020)

5.8 Código fuente

Se escoge como medio de almacenamiento en Nube, el servicio de almacenamiento *Google Drive*. En el esfuerzo de satisfacer el requerimiento R-8 para hacer del uso del dispositivo del tipo “Conectar y Usar”, se divide el código fuente en dos secciones.

5.8.1 Firmware

El módulo ESP-32 de la placa de desarrollo Ai-Thinker ESPCAM se programa mediante el código fuente consignado en el Anexo: Firmware - Código ESP32, dicha rutina de programación, en lenguaje de programación Arduino, permite establecer una conexión a una red Wi-Fi de prueba utilizando las credenciales configuradas en un *router* doméstico. Además, habilita la comunicación DVP con la cámara y almacena la información en formato JPG.

El módulo también proporciona un nombre predeterminado, "ESP32-SNAPSHOT-CAM", y una carpeta denominada "ESP32-PICTURES-CAM", que se utiliza para identificar el contenido almacenado en *Google Drive*. Una vez que se ha programado el firmware, el módulo se configura para llevar a cabo estas funciones y transmitir la información al código de *Google Apps* para su almacenamiento en *Google Drive*.

5.8.2 Código Google Apps

El código para almacenamiento en *Google Drive* se escribe en Nube como código ligero, bajo el dominio de *script.google.com*, el cual recibe la información proveniente del módulo ESP-32, conecta con el servicio de almacenamiento *Google Drive*, crea una carpeta y almacena la imagen bajo los nombres establecidos en el código fuente del *firmware* del módulo, el código de *Google Apps* se consigna en el Anexo: App Google - Código Google Drive

6. Escenario de implementación

Para la puesta a prueba de la transmisión de imágenes a través de Wi-Fi, se utilizan dos placas de desarrollo AI-Thinker ESP32. Estas placas se equiparon con la cámara OV2640, la cual se conectó a través de su conector de 8x8 mm ya incorporado en la misma.

En las Figura 6-1 y Figura 6-2 se muestran las dos cámaras que se utilizaron en la prueba de concepto. En cada imagen, se puede observar la placa de desarrollo sin montar la cámara en el lado izquierdo, mientras que en el lado derecho se muestra la placa de desarrollo con la cámara incorporada.

Figura 6-1: Placa de desarrollo AI-Thinker ESP32 + Cámara - Anverso



Fuente: Autoría propia

Figura 6-2: Placa de desarrollo AI-Thinker ESP32 + Cámara - Reverso



Fuente: Autoría propia

En la configuración de cada dispositivo, se carga el firmware para establecer una conexión con un punto de acceso Wi-Fi a Internet. Durante la fase de prueba de transmisión de imágenes, se utilizó un punto de acceso Tenda, conocido coloquialmente como "router". No obstante, es igualmente posible llevar a cabo la prueba utilizando el punto de acceso del teléfono móvil para compartir la conexión mediante plan de datos móviles.

Figura 6-3: Punto de acceso Tenda.



Fuente: Autoría propia

El firmware utilizado para programar los dos dispositivos contiene las credenciales necesarias para acceder a la red Wi-Fi proporcionada por el punto de acceso. Previamente, el punto de acceso se configuró para permitir la asignación dinámica de direcciones IP a través de un servidor DHCP en el rango de 192.168.200.100 a 192.168.200.199.

Una vez que se activa el circuito de cada dispositivo, en la interfaz de usuario del punto de acceso, se pueden encontrar las direcciones IP asignadas a cada dispositivo en la tabla de asignaciones del servidor DHCP. Para este experimento, se asignó de forma dinámica la dirección IP 192.168.200.102 a la Cámara 1 y la dirección IP 192.168.200.103 a la Cámara 2. Esto confirma una exitosa conexión de los dispositivos al punto de acceso, formando una red con una topología en estrella.

Figura 6-4: Reservación de IPs en el punto de acceso.

DHCP Client List				
ID	Client Name	MAC Address	Assigned IP	Lease Time
1	DESKTOP-S5SI0K5	98-3B-8F-AF-EF-FB	192.168.200.100	01:50:33
2	esp32-arduino	E0-5A-1B-74-83-4C	192.168.200.102	01:51:44
3	esp32-arduino	E0-5A-1B-74-88-04	192.168.200.103	01:59:41

Fuente: Autoría propia

Una vez que se ha establecido la conexión de los dispositivos con el punto de acceso, se llevará a cabo la configuración del entorno de implementación. En este entorno, se tiene la intención de realizar un seguimiento de la caída de las hojas de una planta de interior, así como de la germinación de los granos de frijol, las cuales se ilustran en la Figura 6-5. La disposición de las cámaras será la siguiente:

- Para el monitoreo de la planta de interior, la cámara 1 estará dirigida de frente a la misma, donde exhibe una hoja fracturada en proceso de deterioro. Este escenario se puede observar a la izquierda de la Figura 6-6.
- En cuanto al monitoreo de la germinación de los frijoles, la cámara 2 estará enfocada desde arriba, hacia los dos recipientes que contienen frijoles en etapa de germinación. Estos frijoles se encuentran colocados en algodón humedecido. Dicho escenario se visualiza a la derecha de la Figura 6-6

Figura 6-5: Escenario de implementación - plantas a monitorear



Fuente: Autoría propia

Figura 6-6: Escenario de implementación - ubicación de cámaras



Fuente: Autoría propia

La configuración de las cámaras dentro del escenario completo de implementación se encuentra representada en la Figura 6-7. Las cámaras serán alimentadas por una batería portátil para celular, visible en el centro de la Figura 6-7. Esta batería proporcionará los 5V

necesarios para energizar el circuito, los cuales serán regulados a través de los circuitos de los cables de programación de los cuales solo se utilizarán las terminales de puesta a tierra y alimentación.

Figura 6-7: Escenario de implementación



Fuente: Autoría propia

7. Resultados

Las cámaras fueron programadas para capturar una fotografía por minuto, con un intervalo aproximado de 60000 milisegundos, y enviarlas a sus respectivas carpetas en Google Drive. Cada carpeta se identifica mediante un sufijo que indica si corresponde a la cámara 1 o a la cámara 2.

Figura 7-1: Carpetas de las imágenes en Google Drive

Nombre	Propietario	Última modifica... ▼	↓	Tamaño del :	
 ESP32-PICTURES-CAM2	 yo	13:28 yo	—		⋮
 ESP32-PICTURES-CAM1	 yo	13:28 yo	—		⋮

Fuente: Autoría propia

Durante el período de implementación, que abarcó del 10 al 19 de mayo de 2023, se tomaron imágenes en un intervalo de 1 hora por día, y se seleccionaron las imágenes capturadas en los días 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18 y 19. Estas imágenes revelaron una evolución significativa en las plantas. En total, se obtuvieron 939 fotografías, las cuales se organizaron por fecha y se almacenaron en el *dataset* de Google Drive disponible en el [presente enlace](#). En este capítulo, se analizan las imágenes obtenidas y se calcula la tasa de éxito de transmisión de las fotografías a Google Drive.

En relación con las imágenes obtenidas, se excluye la primera captura realizada por la cámara inmediatamente después de ser alimentada por la batería. Dicha imagen, tal cual como se ilustra en la derecha de la Figura 7-2, presenta una calidad deficiente en comparación con las siguientes imágenes tomadas por la misma, parece indicar que el lente de la cámara aún no logra percibir correctamente la luz para obtener una representación clara y descriptiva de su entorno.

Figura 7-2: Primera imagen contra segunda imagen - Planta de interior

Fuente: Autoría propia

En la Figura 7-3 se ilustra la progresión de la decadencia de una hoja grande en la planta de interior a lo largo de un período de 8 días, como se ilustra. La imagen inicial corresponde al día 10 de mayo y se encuentra en la parte superior izquierda de la figura. A medida que avanzamos en el eje horizontal de la figura, ascendiendo en términos de fechas, observamos la sucesión cronológica de las imágenes. La visualización continúa desde la parte inferior izquierda y culmina en la parte inferior derecha con la imagen correspondiente al día 19 de mayo.

Figura 7-3: Evolución de la planta de interior

Fuente: Autoría propia

En la Figura 7-4 se ilustra la progresión de la germinación de los frijoles a lo largo del período de 8 días, como se ilustra. Al igual que en la Figura 7-3, la imagen inicial corresponde al día 10 de mayo y se encuentra en la parte superior izquierda de la figura. A medida que avanzamos en el eje horizontal de la figura, ascendiendo en términos de fechas, observamos la sucesión cronológica de las imágenes. La visualización continúa desde la parte inferior izquierda y culmina en la parte inferior derecha con la imagen correspondiente al día 19 de mayo.

Figura 7-4: Evolución de la germinación de los frijoles



Fuente: Autoría propia

En la Tabla 7-1 se registran las horas de inicio y finalización de la sesión de monitoreo cada día. Cabe destacar que ambas cámaras comenzaron la toma de imágenes simultáneamente.

La Tabla 7-2 y Tabla 7-3 presentan la organización de la información y los resultados obtenidos durante el escenario de implementación para el monitoreo de la planta de interior y la germinación de los frijoles, respectivamente. Estas tablas registran el número de imágenes recibidas exitosamente, la cantidad esperada, así como el número de imágenes no recibidas y su hora de recepción esperada en *Google Drive*. Además, se calcula la tasa de éxito diaria en la captura de imágenes

Tabla 7-1: Registro de Inicio y finalización en las sesiones de monitoreo por día

Día [mayo]	Hora de Inicio	Hora de Finalización	Imágenes Esperadas
10	10:47	11:46	60
11	10:54	11:53	60
12	10:21	11:20	60
15	16:15	17:14	60
16	10:37	11:36	60
17	10:08	11:07	60
18	11:07	12:06	60
19	11:59	12:58	60

Tabla 7-2: Estadísticas transmisión de imágenes CAM1 (Planta de interior)

Día [mayo]	Imágenes esperadas	Imágenes recibidas	Imágenes no recibidas	Hora de no recepción (hh:mm)	Tasa de Éxito
10	60	56	4	11:11, 11:44, 11:45, 11:46	93.33%
11	60	59	1	11:23	98.33%
12	60	59	1	10:48	98.33%
15	60	57	3	16:25, 15:01, 15:04	95%
16	60	59	1	11:02	98.33%
17	60	59	1	10:46	98.33%
18	60	57	3	11:21, 11:43, 12:04	95%
19	60	59	1	12:30	98.33%
Total	480	465	15	-	96.88%

Tabla 7-3: Estadísticas transmisión de imágenes CAM2 (Germinación de frijoles)

Día [mayo]	Imágenes esperadas	Imágenes recibidas	Imágenes no recibidas	Hora de no recepción (hh:mm)	Tasa de Éxito
10	60	57	3	11:44, 11:45, 11:46	95%
11	60	60	0	N/A	100%
12	60	60	0	N/A	100%
15	60	58	2	16:31, 17:12	96.66%
16	60	60	0	N/A	100%
17	60	60	0	N/A	100%
18	60	58	2	11:30, 12:03	96.66%
19	60	60	0	N/A	100%
Total	480	473	7	-	98.54%

Al examinar tanto la Figura 7-3 como la Figura 7-4, junto con la Tabla 7-2 y la Tabla 7-3, se puede concluir que el dispositivo cumple efectivamente su propósito al capturar estos eventos visibles para el ojo humano..

8. Conclusiones

8.1 Conclusiones

- Al establecer claramente los objetivos y especificaciones, plasmados en los requerimientos del dispositivo desde el principio, se ha logrado una guía coherente y efectiva para la toma de decisiones durante el proceso de desarrollo del proyecto. Esto ha permitido una mejor planificación, selección de componentes, implementación y pruebas, resultando en un diseño más robusto y adaptado a las necesidades específicas de la aplicación del dispositivo en un entorno de monitoreo de plantaciones. La correcta identificación de los requerimientos en la etapa de diseño ha sido un factor determinante para la culminación del proyecto
- La adecuada representación de las funcionalidades derivadas de los requerimientos ha sido un factor clave para el éxito en el diseño del dispositivo, proporcionando una dirección clara y un enfoque estructurado para la selección y la integración de los componentes necesarios. Este enfoque meticuloso y planificado ha resultado en un diseño coherente y eficiente, capaz de cumplir con las expectativas y las especificaciones establecidas.
- La toma de decisiones fundamentadas sobre las prácticas de diseño y la topología de red han evidenciado una operación exitosa y confiable del dispositivo en una red de múltiples dispositivos de monitoreo, lo que es esencial para una gestión eficaz de la información y selección acertada de los elementos involucrados en la prueba de concepto.
- El presente desarrollo y los exitosos resultados de la implementación de la prueba de concepto ha demostrado la viabilidad del diseño del dispositivo para adquisición de imágenes y transmisión de información por medios inalámbricos, el cual ha sido abordado aplicando un enfoque sólido desde la ingeniería de las telecomunicaciones. Este esfuerzo ha sido dirigido con el objetivo de impulsar el crecimiento y la inclusión

digital en las zonas rurales. superando obstáculos tecnológicos y contribuyendo al desarrollo socioeconómico de estas comunidades. Además, los resultados obtenidos brindan una base sólida para futuras investigaciones y posibles implementaciones a mayor escala.

8.2 Recomendaciones

El presente documento representa un paso significativo hacia la inclusión digital de las comunidades rurales desde una perspectiva de ingeniería de las telecomunicaciones. Para futuras investigaciones, se sugiere considerar las prácticas de diseño establecidas en este trabajo para las etapas finales del desarrollo del dispositivo final, que incluyen prototipado, pruebas, ajustes y ensamblaje. Esto permitirá una implementación más efectiva y eficiente del dispositivo.

Una implementación completa del dispositivo final en una red de monitoreo de cultivos requerirá una sólida integración de estas técnicas para lograr una evaluación precisa y oportuna del estado de los cultivos, Se recomienda realizar investigaciones adicionales para explorar a fondo las diferentes técnicas y métodos de análisis de imagen automático. En consecuencia, y de acuerdo con lo observado en el capítulo 7, es de suma importancia llevar a cabo un estudio detallado para mejorar la calidad de la primera imagen capturada al encender la cámara, y abordar de manera más detallada la pérdida de información que se presentó en los resultados, en futuros estudios. Identificar y mitigar las causas de esta pérdida será crucial para mejorar la precisión y confiabilidad del dispositivo en su aplicación práctica.

Es fundamental que las futuras investigaciones estén enfocadas en la inclusión digital de las comunidades rurales, considerando no solo los aspectos tecnológicos, sino también los contextos sociales y económicos. Esto asegurará que el dispositivo final se adapte verdaderamente a las necesidades y realidades de las comunidades rurales, maximizando así su impacto positivo en el desarrollo de estas.

A. Anexo: Firmware - Código ESP32

Código de programación para la placa de desarrollo en lenguaje de programación Arduino

```
// Credenciales Wi-Fi
const char* varSSID      = "SP-Piso3";    // SSID de la red Wi-Fi (router)
const char* varPassword = "727101Piso3"; // Contraseña

String gScript =
"/macros/s/AKfycbz09bqH_eyD6wOQ2PlStHMoEYShudqnUVx4erZbn0z6V52wW0SnPc25g
QS0FnqE8H38jg/exec"; //Path para el script de google drive
String gLineNotifyToken = "gToken=*****"; //Token de
notificación establecido como nulo (*****);
String gFoldername = "&gFoldername=ESP32-PICTURES-CAM1";
String gFilename = "&gFilename=ESP32-SNAPSHOT-CAM1_";
String camImage = "&camFile=";
int gFilenameIndex = 0;

#include <WiFi.h>
#include <WiFiClientSecure.h>
#include "soc/soc.h"
#include "soc/rtc_cntl_reg.h"
#include "Base64.h"
#include "esp_camera.h"

//Variables para la placa de desarrollo AITHINKER ESP-CAM
#define PWDN_GPIO_NUM    32
#define SIOD_GPIO_NUM    26
#define SIOC_GPIO_NUM    27
#define XCLK_GPIO_NUM    0
#define Y2_GPIO_NUM      5
#define Y3_GPIO_NUM      18
#define Y4_GPIO_NUM      19
#define Y5_GPIO_NUM      21
#define Y6_GPIO_NUM      36
#define Y7_GPIO_NUM      39
#define Y8_GPIO_NUM      34
#define Y9_GPIO_NUM      35

#define VSYNC_GPIO_NUM   25
#define HREF_GPIO_NUM    23
#define PCLK_GPIO_NUM    22
```

```
#define RESET_GPIO_NUM    -1

void setup()
{
  WRITE_PERI_REG(RTC_CNTL_BROWN_OUT_REG, 0);

  Serial.begin(115200);
  delay(10);

  WiFi.mode(WIFI_STA);

  Serial.println("");
  Serial.print("Wi-Fi SSID ");
  Serial.println(varSSID);
  WiFi.begin(varSSID, varPassword);

  long int StartTime=millis();
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
  {
    delay(500);
    if ((StartTime+10000) < millis()) break;
  }

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

  Serial.println("");

  if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    Serial.println("Reset");

    ledcAttachPin(4, 3);
    ledcSetup(3, 5000, 8);
    ledcWrite(3,10);
    delay(200);
    ledcWrite(3,0);
    delay(200);
    ledcDetachPin(3);

    delay(1000);
    ESP.restart();
  }
  else {
    //ledcAttachPin(4, 3);
    //ledcSetup(3, 5000, 8);
    //for (int i=0;i<5;i++) {
    //  ledcWrite(3,10);
    //  delay(200);
    //  ledcWrite(3,0);
    //  delay(200);
    //}
  }
}
```

```

    //ledcDetachPin(3);
    // Este código habilitaba el led de la placa de desarrollo como
    flash, se removió puesto que dañaba la calidad de imagen
}

camera_config_t config;

config.pin_sscb_sda = SIOD_GPIO_NUM;
config.pin_sscb_scl = SIOC_GPIO_NUM;

config.pin_d0 = Y2_GPIO_NUM;
config.pin_d1 = Y3_GPIO_NUM;
config.pin_d2 = Y4_GPIO_NUM;
config.pin_d3 = Y5_GPIO_NUM;
config.pin_d4 = Y6_GPIO_NUM;
config.pin_d5 = Y7_GPIO_NUM;
config.pin_d6 = Y8_GPIO_NUM;
config.pin_d7 = Y9_GPIO_NUM;
config.ledc_channel = LEDC_CHANNEL_0;
config.ledc_timer = LEDC_TIMER_0;
config.pin_xclk = XCLK_GPIO_NUM;
config.pin_pclk = PCLK_GPIO_NUM;
config.pin_vsync = VSYNC_GPIO_NUM;
config.pin_href = HREF_GPIO_NUM;
config.pin_pwdn = PWDN_GPIO_NUM;
config.pin_reset = RESET_GPIO_NUM;
config.xclk_freq_hz = 20000000;
config.pixel_format = PIXFORMAT_JPEG;

//Inicialización de buffers para la información de las imágenes
if(psramFound()){
    config.frame_size = FRAMESIZE_UXGA;
    config.jpeg_quality = 10; //0-63 Se elige una calidad intermedia-
mejor (menor número mayor calidad)
    config.fb_count = 2;
} else {
    config.frame_size = FRAMESIZE_SVGA;
    config.jpeg_quality = 12; //0-63 Se elige una calidad intermedia-
mejor (menor número mayor calidad)
    config.fb_count = 1;
}

// Inicialización de la cámara
esp_err_t err = esp_camera_init(&config);
if (err != ESP_OK) {
    Serial.printf("Camera init failed error 0x%x", err);
    delay(1000);
    ESP.restart();
}
sensor_t * s = esp_camera_sensor_get();
s->set_framesize(s, FRAMESIZE_VGA);
}

```

```

void loop()
{
  SendCapturedImage();
  delay(53500); //Tomar captura de nuevo despues de 1 Minuto.
}

String SendCapturedImage() {
  const char* gDomain = "script.google.com"; // Dominio donde se
  encuentra el script para google drive
  String getAll="", getBody = "";

  camera_fb_t * fb = NULL;
  fb = esp_camera_fb_get();
  if(!fb) {
    Serial.println("Camera failed");
    delay(1000);
    ESP.restart();
    return "Camera failed";
  }
  Serial.println("Connect to " + String(gDomain));
  WiFiClientSecure client_tcp;
  client_tcp.setInsecure();
  //Conexión al dominio del script por HTTPS/TCP
  //TCP se escoje sobre UDP para evitar pérdida de información en la
  transmisión a Google Drive.
  //En la siguiente sección de código se ejecuta el código de google
  drive para el almacenamiento de la imagen.
  if (client_tcp.connect(gDomain, 443)) {
    Serial.println("Connection successful");

    char *input = (char *)fb->buf;
    char output[base64_enc_len(3)];
    String imageFile = "data:image/jpeg;base64,";
    for (int i=0;i<fb->len;i++) {
      base64_encode(output, (input++), 3);
      if (i%3==0) imageFile += urlencode(String(output));
    }

    gFilenameIndex = gFilenameIndex + 1;
    String gFilenameIndexString= String(gFilenameIndex);
    String gFilenameComplete = gFilename + gFilenameIndexString +
    ".jpg";
    String Data =
    gLineNotifyToken+gFoldername+gFilenameComplete+camImage;

    client_tcp.println("POST " + gScript + " HTTP/1.1");
    client_tcp.println("Host: " + String(gDomain));
    client_tcp.println("Content-Length: " +
    String(Data.length()+imageFile.length()));
    client_tcp.println("Content-Type: application/x-www-form-
    urlencoded");
  }
}

```

```

client_tcp.println("Connection: keep-alive");
client_tcp.println();

client_tcp.print(Data);
int Index;
for (Index = 0; Index < imageFile.length(); Index = Index+1000) {
    client_tcp.print(imageFile.substring(Index, Index+1000));
}
esp_camera_fb_return(fb);

int waitTime = 10000;
long startTime = millis();
boolean state = false;

while ((startTime + waitTime) > millis())
{
    Serial.print(".");
    delay(100);
    while (client_tcp.available())
    {
        char c = client_tcp.read();
        if (state==true) getBody += String(c);
        if (c == '\n')
        {
            if (getAll.length()==0) state=true;
            getAll = "";
        }
        else if (c != '\r')
            getAll += String(c);
        startTime = millis();
    }
    if (getBody.length()>0) break;
}
client_tcp.stop();
Serial.println(getBody);
}
else {
    getBody="Connected to " + String(gDomain) + " failed.";
    Serial.println("Connected to " + String(gDomain) + " failed.");
}

return getBody;
}

String urlencode(String str)
{
    String encodedString="";
    char c;
    char code0;
    char code1;
    char code2;

```

```
for (int i =0; i < str.length(); i++){
    c=str.charAt(i);
    if (c == ' '){
        encodedString+= '+';
    } else if (isalnum(c)){
        encodedString+=c;
    } else{
        code1=(c & 0xf)+'0';
        if ((c & 0xf) >9){
            code1=(c & 0xf) - 10 + 'A';
        }
        c=(c>>4)&0xf;
        code0=c+'0';
        if (c > 9){
            code0=c - 10 + 'A';
        }
        code2='\0';
        encodedString+='%';
        encodedString+=code0;
        encodedString+=code1;

    }
    yield();
}
return encodedString;
}
```

B. Anexo: App Google - Código Google Drive

Código para *Google Apps* que recibe la imagen del dispositivo y la transmite a *Google Drive*, lenguaje de programación JavaScript

```
function doPost(e) {

    var gFilename = e.parameter.gFilename;
    var gFile = e.parameter.gFile;
    var gFoldername = e.parameter.gFoldername;
    var gToken = e.parameter.gToken;

    var contentType = gFile.substring(gFile.indexOf(":")+1,
gFile.indexOf(";"));
    var gData = gFile.substring(gFile.indexOf(",")+1);
    gData = Utilities.base64Decode(gData);
    var blob = Utilities.newBlob(gData, contentType, gFilename);

    // Enviar el archivo recibido a Google Drive
    var gFolder, gFolders = DriveApp.getFoldersByName(gFoldername);
    if (gFolders.hasNext()) {
        gFolder = gFolders.next();
    } else {
        gFolder = DriveApp.createFolder(gFoldername);
    }
    var file = gFolder.createFile(blob);
    file.setDescription("Uploaded by " + gFilename);

    var pictureURL =
"https://drive.google.com/uc?authuser=0&id="+pictureID;
    var pictureID =
file.getUrl().substring(file.getUrl().indexOf("/d/")+3,file.getUrl().indexOf("view")-1);

    // Crear notificación
    var lineNotify = "Line Notify: ";
    try {
        var lineUrl = 'https://notify-api.line.me/api/notify';
```

```
var lineNotifyresponse = UrlFetchApp.fetch(lineUrl, {
  'headers': {
    'Authorization': 'Bearer ' + gToken,
  },
  'method': 'post',
  'payload': {
    'message': pictureURL
  }
});
lineNotify += lineNotifyresponse.getContentText();
} catch(error) {
  lineNotify += error;
}

return
ContentService.createTextOutput(gFoldername+"/"+gFilename+"\n"+pictureURL+"\n"+lineNotify);
}
```

Bibliografía

- AI-Thinker. (2020). *AI-Thinker ESP32-CAM*. https://docs.ai-thinker.com/_media/esp32/docs/esp32-cam_product_specification_zh.pdf
- Anastasiou, E., Manika, S., Ragazou, K., & Katsios, I. (2021). Territorial and human geography challenges: How can smart villages support rural development and population inclusion? *Social Sciences*, *10*(6). <https://doi.org/10.3390/socsci10060193>
- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). A study of Lora: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors (Switzerland)*, *16*(9). <https://doi.org/10.3390/s16091466>
- Barbedo, J. G. A. (2016). A review on the main challenges in automatic plant disease identification based on visible range images. *Biosystems Engineering*, *144*, 52–60. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2016.01.017>
- Beaunoyer, E., Dupéré, S., & Guitton, M. J. (2020). COVID-19 and digital inequalities: Reciprocal impacts and mitigation strategies. *Computers in Human Behavior*, *111*. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106424>
- Birner, R., Daum, T., & Pray, C. (2021). Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges. *Applied Economic Perspectives and Policy*, *43*(4), 1260–1285. <https://doi.org/10.1002/aepp.13145>
- Cavalcante, A. M., Marquezini, M. V., Mendes, L., & Moreno, C. S. (2021). 5G for Remote Areas: Challenges, Opportunities and Business Modeling for Brazil. *IEEE Access*, *9*, 10829–10843. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3050742>
- Chambers, A. H., Moon, P., Edmond, V., & Bassil, E. (2019). Vanilla Cultivation in Southern Florida. *EDIS*, *2019*(6). <https://doi.org/10.32473/edis-hs1348-2019>
- Chiha, A., van der Wee, M., Colle, D., & Verbrugge, S. (2020). Techno-economic viability of integrating satellite communication in 4G networks to bridge the broadband digital divide. *Telecommunications Policy*, *44*(3). <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2019.101874>
- Chiles, R. M., Broad, G., Gagnon, M., Negowetti, N., Glenna, L., Griffin, M. A. M., Tami-Barrera, L., Baker, S., & Beck, K. (2021). Democratizing ownership and participation

- in the 4th Industrial Revolution: challenges and opportunities in cellular agriculture. *Agriculture and Human Values*, 38(4), 943–961. <https://doi.org/10.1007/s10460-021-10237-7>
- Clare, C. A. (2021). Telehealth and the digital divide as a social determinant of health during the COVID-19 pandemic. *Network Modeling Analysis in Health Informatics and Bioinformatics*, 10(1). <https://doi.org/10.1007/s13721-021-00300-y>
- Clodoveo, M. L., Paduano, A., Di Palmo, T., Crupi, P., Moramarco, V., Distaso, E., Tamburrano, P., Amirante, R., Sacchi, R., Corbo, F., & Pesce, V. (2017). Engineering design and prototype development of a full scale ultrasound system for virgin olive oil by means of numerical and experimental analysis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 37, 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.01.004>
- Codeluppi, G., Cilfone, A., Davoli, L., & Ferrari, G. (2020). LoraFarM: A LoRaWAN-based smart farming modular IoT architecture. *Sensors (Switzerland)*, 20(7). <https://doi.org/10.3390/s20072028>
- Curioso, W. H. (2019). Building capacity and training for digital health: Challenges and opportunities in Latin America. *Journal of Medical Internet Research*, 21(12). <https://doi.org/10.2196/16513>
- Duncan, E., Glaros, A., Ross, D. Z., & Nost, E. (2021). New but for whom? Discourses of innovation in precision agriculture. *Agriculture and Human Values*, 38(4), 1181–1199. <https://doi.org/10.1007/s10460-021-10244-8>
- Dwivedi, Y. K., Hughes, D. L., Coombs, C., Constantiou, I., Duan, Y., Edwards, J. S., Gupta, B., Lal, B., Misra, S., Prashant, P., Raman, R., Rana, N. P., Sharma, S. K., & Upadhyay, N. (2020). Impact of COVID-19 pandemic on information management research and practice: Transforming education, work and life. *International Journal of Information Management*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102211>
- Ellis, K., & Berry, D. M. (2013). Quantifying the impact of requirements definition and management process maturity on project outcome in large business application development. *Requirements Engineering*, 18(3). <https://doi.org/10.1007/s00766-012-0146-3>
- Espressif. (2020). ESP8266. In *Datasheet*. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266-technical_reference_en.pdf
- Espressif. (2021). ESP32-C3-DevKitC-02. In *Product Page*. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32c3/hw-reference/esp32c3/user-guide-devkitc-02.html>

- Espressif. (2022). ESP32-WROOM. In *Datasheet*.
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf
- Esteban-Navarro, M.-Á., García-Madurga, M.-Á., Morte-Nadal, T., & Nogales-Bocio, A.-I. (2020). The Rural Digital Divide in the Face of the COVID-19 Pandemic in Europe—Recommendations from a Scoping Review. *Informatics*, 7(4), 54.
<https://doi.org/10.3390/informatics7040054>
- Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Abid, K., & Naeem, M. A. (2019). A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Farming. In *IEEE Access* (Vol. 7, pp. 156237–156271). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949703>
- Feltrin, L., Jaldén, N., Trojer, E., & Wikström, G. (2021). Potential for Deep Rural Broadband Coverage With Terrestrial and Non-Terrestrial Radio Networks. *Frontiers in Communications and Networks*, 2. <https://doi.org/10.3389/frcmn.2021.691625>
- Ferreira, B., Morais, D., Szabo, A., Bowen, B., & Jakes, S. (2020). A gap analysis of farm tourism microentrepreneurial mentoring needs in North Carolina, USA. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development*, 1–17.
<https://doi.org/10.5304/jafscd.2020.101.025>
- Foster, S. P. (2000). The digital divide: Some reflections. *International Information and Library Review*, 32(3–4). <https://doi.org/10.1006/iilr.2000.0136>
- Fountas, S., Espejo-Garcia, B., Kasimati, A., Mylonas, N., & Darra, N. (2020). The Future of Digital Agriculture: Technologies and Opportunities. *IT Professional*, 22(1), 24–28.
<https://doi.org/10.1109/MITP.2019.2963412>
- Ge, L., Zou, K., Zhou, H., Yu, X., Tan, Y., Zhang, C., & Li, W. (2021). Three dimensional apple tree organs classification and yield estimation algorithm based on multi-features fusion and support vector machine. *Information Processing in Agriculture*.
<https://doi.org/10.1016/J.INPA.2021.04.011>
- Geetharamani, G., & J., A. P. (2019). Identification of plant leaf diseases using a nine-layer deep convolutional neural network. *Computers & Electrical Engineering*, 76, 323–338.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPELECENG.2019.04.011>
- Gerli, P., & Whalley, J. (2021). Fibre to the countryside: A comparison of public and community initiatives tackling the rural digital divide in the UK. *Telecommunications Policy*, 45(10). <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2021.102222>
- Ginossar, T., Brakey, H. R., Sussman, A. L., Price, B., Kano, M., Davis, S., & Blair, C. K. (2021). “You’re going to have to think a little bit different” barriers and facilitators to using mhealth to increase physical activity among older, rural cancer survivors.

- International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(17).
<https://doi.org/10.3390/ijerph18178929>
- Greenberg, A. J., Haney, D., Blake, K. D., Moser, R. P., & Hesse, B. W. (2018). Differences in Access to and Use of Electronic Personal Health Information Between Rural and Urban Residents in the United States. *Journal of Rural Health*, 34, s30–s38. <https://doi.org/10.1111/jrh.12228>
- Greenberg-Worisek, A., Ferede, L., Balls-Berry, J., Marigi, I., Mendez, E. V., Bajwa, N., Ouk, M., Orellana, M., & Enders, F. (2020). Differences in electronic personal health information tool use between rural and urban cancer patients in the United States: Secondary data analysis. *JMIR Cancer*, 6(2). <https://doi.org/10.2196/17352>
- Gu, J. (2021). Family conditions and the accessibility of online education: The digital divide and mediating factors. *Sustainability (Switzerland)*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/su13158590>
- Güldenring, R., & Nalpantidis, L. (2021). Self-supervised contrastive learning on agricultural images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106510>
- Gutiérrez, J. A. (2012). *Diseño y construcción de un sistema de medición y transmisión de información inalámbrico para la apicultura*. Universidad Nacional de Colombia.
- Han, H., Xiong, J., & Zhao, K. (2021). Digital inclusion in social media marketing adoption: the role of product suitability in the agriculture sector. *Information Systems and E-Business Management*. <https://doi.org/10.1007/s10257-021-00522-7>
- Ievoli, C., Belliggiano, A., Marandola, D., Milone, P., & Ventura, F. (2019). Information and Communication Infrastructures and New Business Models in Rural Areas: The Case of Molise Region in Italy. *European Countryside*, 11(4), 475–496. <https://doi.org/10.2478/euco-2019-0027>
- Kawai, T. (2021). Video slice: image compression and transmission for agricultural systems. *Sensors*, 21(11). <https://doi.org/10.3390/s21113698>
- Kim, B., & Joines, S. (2020). The Role of Design in Technology Driven Ergonomics Product Development. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 955, 3–14. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20227-9_1
- Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. In *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* (Vols. 90–91). <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>
- Kormos, E., & Wisdom, K. (2021). Rural Schools and the Digital Divide. *Theory & Practice in Rural Education*, 11(1). <https://doi.org/10.3776/tpre.2021.v11n1p25-39>

- Kurmi, Y., & Gangwar, S. (2021). A leaf image localization based algorithm for different crops disease classification. *Information Processing in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/J.INPA.2021.03.001>
- Lai, J., & Widmar, N. O. (2021). Revisiting the Digital Divide in the COVID-19 Era. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(1), 458–464. <https://doi.org/10.1002/aepp.13104>
- Lajoie-O'Malley, A., Bronson, K., van der Burg, S., & Klerkx, L. (2020). The future(s) of digital agriculture and sustainable food systems: An analysis of high-level policy documents. *Ecosystem Services*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101183>
- Li, J., & Kim, K. S. (2023). Kano-QFD-based analysis of the influence of user experience on the design of handicraft intangible cultural heritage apps. *Heritage Science*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00903-w>
- Liu, J., Zhang, L., & Tian, Z. (2019). Social And Economic Effect Study of China's Urban-rural Digital Divide Based on Project Management Theory. *DEStech Transactions on Social Science, Education and Human Science*, esem. <https://doi.org/10.12783/dtssehs/esem2019/29776>
- Luján Soto, R., de Vente, J., & Cuéllar Padilla, M. (2021). Learning from farmers' experiences with participatory monitoring and evaluation of regenerative agriculture based on visual soil assessment. *Journal of Rural Studies*, 88, 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.10.017>
- Lynggaard, P. (2015). Improving Internet Coverage in Rural Africa by Using Passive Repeaters in the Home. *Nordic and Baltic Journal of Information and Communications Technologies* (2016) 2016(1) 65-80. <https://doi.org/10.13052/nbict.2016.004>
- Martínez-Domínguez, M., & Mora-Rivera, J. (2020). Internet adoption and usage patterns in rural Mexico. *Technology in Society*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2019.101226>
- Matamala, C. (2021). Digital capital in higher education: Digital strengths and weaknesses to face distance education. *International Journal of Sociology of Education*, 10(2), 115–142. <https://doi.org/10.17583/rise.2021.5964>
- Mendoza-Lozano, F. A., Quintero-Peña, J. W., & García-Rodríguez, J. F. (2021). The digital divide between high school students in Colombia. *Telecommunications Policy*, 45(10). <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2021.102226>
- Mesa, J. E. C., Lombana, N. B., & Socha, F. A. L. (2021). Remote terminal module, for data acquisition, monitoring and control of agro-industrial processes-agricultic. *Ingeniare*, 29(2). <https://doi.org/10.4067/S0718-33052021000200245>

- Michels, M., Fecke, W., Feil, J. H., Musshoff, O., Lülfs-Baden, F., & Krone, S. (2020). "Anytime, anyplace, anywhere"—A sample selection model of mobile internet adoption in German agriculture. *Agribusiness*, 36(2). <https://doi.org/10.1002/agr.21635>
- Mizrach, A. (2008). Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and vegetables in pre- and postharvest processes. *Postharvest Biology and Technology*, 48(3), 315–330. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.10.018>
- Molla, D. M., Badis, H., George, L., & Berbineau, M. (2022). Software Defined Radio Platforms for Wireless Technologies. *IEEE Access*, 10. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3154364>
- Murad, M., Bayat, O., & Marhoon, H. M. (2021). Design and implementation of a smart home system with two levels of security based on IoT technology. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 21(1), 546–557. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v21.i1.pp546-557>
- Murciego, A. L., Jiménez-Bravo, D. M., Martínez, D. P., Román, A. V., & Lazo, G. L. (2020). Voice assistant and route optimization system for logistics companies in depopulated rural areas. *Sustainability (Switzerland)*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/su12135377>
- Nigam, R., Rao, M., Dias, N. R., Hariharan, A., Choraria, A., Tendolkar, A., & Manohara Pai, M. M. (2022). Grow-IoT (smart analytics app for comprehensive plant health analysis and remote farm monitoring using smart sensors). *Journal of Physics: Conference Series*, 2161(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2161/1/012059>
- Nourildean, S. W., Mohammed, Y. A., & Abdulhadi, M. T. (2022). INVESTIGATING THE IMPACT OF NETWORK TOPOLOGIES ON THE IOT-BASED WSN IN SMART HOME MONITORING SYSTEM. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(9–120), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266990>
- OCDE. (2019). *Colombia in the digital transformation: Opportunities and challenges* (pp. 13–27). <https://doi.org/10.1787/5b895408-en>
- Oinas-Kukkonen, H., Karppinen, P., & Kekkonen, M. (2021). 5G and 6G Broadband Cellular Network Technologies as Enablers of New Avenues for Behavioral Influence with Examples from Reduced Rural-Urban Digital Divide. *Urban Science*, 5(3). <https://doi.org/10.3390/urbansci5030060>
- Omnivision. (2006). OV2640 MPixel product brief. In *Datasheet*. <https://www.ovt.com/search-results/?search=OV2640>
- On Semiconductor. (2014). 1.0 A Low-Dropout Positive Fixed and Adjustable Voltage Regulators. In *Datasheet*. <https://www.sigmaelectronica.net/manuals/NCP1117L.pdf>
- Pacheco, C. A., Quintero, B. T., & Coronel-Rojas, L. A. (2020). Advance in the computational tools that support the cooperative sector in Colombia. *Journal of*

- Physics: Conference Series*, 1513(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1513/1/012017>
- Pattnayak, T., & Thanikachaiam, G. (2018). *Antenna Design and RF Layout Guidelines*. Cypress Semiconductor. <http://www.cypress.com/go/AN91445>
- Peterson, Z. (2020). *PCB Trace and Pad Clearance: Low vs. High Voltage*. Altium Ltd. <https://resources.altium.com/p/pcb-trace-and-pad-clearance-low-vs-high-voltage>
- Prieger, J. E. (2013). The broadband digital divide and the economic benefits of mobile broadband for rural areas. *Telecommunications Policy*, 37(6–7), 483–502. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2012.11.003>
- Prieto-Egido, I., Aragon Valladares, J., Muñoz, O., Cordova Bernuy, C., Simo-Reigadas, J., Auccapuri Quispetupa, D., Bravo Fernández, A., & Martínez-Fernández, A. (2020). Small rural operators techno-economic analysis to bring mobile services to isolated communities: The case of Peru Amazon rainforest. *Telecommunications Policy*, 44(10). <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.102039>
- Prolific. (2012). PL2303TA USB to Serial Bridge Controller. In *Datasheet*. https://www.prolific.com.tw/US/ShowProduct.aspx?p_id=153&pcid=41
- Rahimoon, A. A., Abdullah, M. N., & Taib, I. (2020). Design of a contactless body temperature measurement system using Arduino. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 19(3). <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v19.i3.pp1251-1258>
- Räisänen, J., & Tuovinen, T. (2020). Digital innovations in rural micro-enterprises. *Journal of Rural Studies*, 73, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.09.010>
- Rasti, S., Bleakley, C. J., Holden, N. M., Whetton, R., Langton, D., & O'Hare, G. (2021). A survey of high resolution image processing techniques for cereal crop growth monitoring. *Information Processing in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/J.INPA.2021.02.005>
- Rijswijk, K., Klerkx, L., Bacco, M., Bartolini, F., Bulten, E., Debruyne, L., Dessein, J., Scotti, I., & Brunori, G. (2021). Digital transformation of agriculture and rural areas: A socio-cyber-physical system framework to support responsabilisation. *Journal of Rural Studies*, 85, 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.05.003>
- Rosario, P.-M., Carolina, P.-R., Montserrat, N.-C., & Elena, M.-M. (2021). Determinant factors of individuals' decision to emigrate in rural Spain: The role of ICT-based public policies. *Technology in Society*, 67. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101777>
- Schmilovitch, Z., & Mizrach, A. (2013). Instrumental assessment of the sensory quality of fruits and vegetables. *Instrumental Assessment of Food Sensory Quality*, 446–466e. <https://doi.org/10.1533/9780857098856.3.446>

- Singh, V., Sharma, N., & Singh, S. (2020). A review of imaging techniques for plant disease detection. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 229–242. <https://doi.org/10.1016/J.AIIA.2020.10.002>
- Suppipat, S., & Hu, A. H. (2022). A scoping review of design for circularity in the electrical and electronics industry. In *Resources, Conservation and Recycling Advances* (Vol. 13). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200064>
- Taşkın, D., Taşkın, C., & Yazar, S. (2021). Container-based virtualization for bluetooth low energy sensor devices in internet of things applications. *Tehnicki Vjesnik*, 28(1). <https://doi.org/10.17559/TV-20180528134139>
- TIMCO. (2020). *ESP32 Radio Equipment Certification*. https://www.espressif.com/sites/default/files/2743-20_TIMCO%20MIC%20Radio%20Certificate%20ESP32-WROOM-32E.pdf
- Vancea, A. P., & Orha, I. (2018). Smart home automation and monitoring system. *Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering*, 11(1), 40–43. <https://doi.org/10.2478/cjece-2018-0007>
- Várallyai, L., Herdon, M., & Botos, S. (2015). Statistical Analyses of Digital Divide Factors. *Procedia Economics and Finance*, 19. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(15\)00037-4](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(15)00037-4)
- Velasquez, A. (2013). Digital Divide in Colombia: The Role of Motivational and Material Access in the Use and Types of ICTs. *International Journal of Communication*, 7(0), 16.
- Wang, Y., Zhao, W., Zhao, L., Nie, L., Zhong, G., Watts, C., & Gunn, J. P. (2020). Design of electronics system for Langmuir probes on ITER. *Fusion Engineering and Design*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.111429>
- Wibowo, F. W. (2020). Wireless communication design of internet of things based on FPGA and WiFi Module. *Journal of Physics: Conference Series*, 1577(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1577/1/012035>
- Wu, M., Kozanoglu, D. C., Min, C., & Zhang, Y. (2021). Unraveling the capabilities that enable digital transformation: A data-driven methodology and the case of artificial intelligence. *Advanced Engineering Informatics*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101368>
- Yan, F., & Wang, F. (2018). Intelligent fish tank based on WiFi module. *Journal of Autonomous Intelligence*, 1(1). <https://doi.org/10.32629/jai.v1i1.16>
- Yates, S. J., & Carmi, E. (2020). What do digital inclusion and data literacy mean today? *Internet Policy Review*, 9(2), 1–14. <https://doi.org/10.14763/2020.2.1474>

- Ye, L., & Yang, H. (2020). From digital divide to social inclusion: A tale of mobile platform empowerment in rural areas. *Sustainability (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/su12062424>
- Yong, L., Xiushan, L., Degui, Z., & Fu, L. (2002). The main content, technical support and enforcement strategy of digital agriculture. *Geo-Spatial Information Science*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/BF02863497>
- Yuan, Y., Chen, L., Wu, H., & Li, L. (2021). Advanced agricultural disease image recognition technologies: A review. *Information Processing in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.01.003>
- Zaidi, Z. (2013). On the reliability of WiFi multihop backhaul connections for rural areas. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2013.6554934>
- Zerrer, N., & Sept, A. (2020). Smart villagers as actors of digital social innovation in rural areas. *Urban Planning*, 5(4), 78–88. <https://doi.org/10.17645/up.v5i4.3183>
- Zhang, J., & Wang, Y. (2021). Design of remote control device using wireless sensor network and its use in intelligent monitoring of farmland information. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021(1). <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01997-1>
- Zhang Y, Love DJ, Krogmeier JV, Anderson CR, Heath RW, & Buckmaster DR. (2021). Challenges and Opportunities of rural wireless communications. *Electrical Engineering and Systems Science > Signal Processing*. <https://arxiv.org/abs/2108.05405v1>