

2023



IBERO

De:
Planeta Formación y Universidades

Diseño de un modelo de red experimental IoT que permita monitorear las variables agroambientales en un cultivo de café utilizando analítica de datos para evaluar sus resultados.

William Ruiz Martínez -
Corporación universitaria
Iberoamericana, Bogotá-
Colombia;
Jaime Andrés Arévalo -
Corporación universitaria
Iberoamericana, Bogotá-
Colombia;
Jorge Enrique Herrera Rubio -
Universidad de Pamplona,
Pamplona-Colombia;
Cesar Osimani - Universidad Blas
Pascal, Córdoba-Argentina.

Programa de Ingeniería de
Software
Corporación Universitaria
Iberoamericana



Diseño de un modelo de red experimental IoT que permita monitorear las variables agroambientales en un cultivo de café utilizando analítica de datos para evaluar sus resultados.

Design of an experimental IoT network model to monitor agro-environmental variables in a coffee crop using data analytics to evaluate its results.

Nombre Autores

William Ruiz Martínez; Jaime Andrés Arévalo;

Nombre Coautores

Jorge Enrique Herrera Rubio - Universidad de Pamplona, Pamplona-Colombia; Cesar Osimani - Universidad Blas Pascal, Córdoba-Argentina.

Nombre estudiante

Mario Enrique Santiago Insignares

Ingeniería de Software

Diciembre, 06 de 2023

Agradecimientos

(Los autores desean expresar sus agradecimientos al sr. Mauricio Rodríguez, propietario de la finca “Las Acacias” y a su equipo de colaboradores, quienes nos prestaron una valiosa colaboración para realizar los estudios sobre el café y sus variables agroambientales y que además nos ilustraron con valiosa información de primera mano sobre el proceso productivo del café.)

Resumen

El café que se produce en este estudio es reconocido mundialmente por su suavidad, atribuida a las condiciones climáticas específicas de su cultivo. Sin embargo, la calidad del café depende de diversas variables agroambientales como temperatura, humedad, tipo de suelo e índice pluviométrico. La monitorización manual de estas variables es compleja y poco práctica, por lo que este proyecto propone la implementación de un modelo de red experimental para caracterizar estas variables en un cultivo de café. Se utilizarán técnicas de analítica descriptiva, prescriptiva y predictiva para evaluar datos actuales e históricos, y así predecir el comportamiento de estas variables, optimizando la toma de decisiones.

El estudio se enfoca en alcanzar varios objetivos a través de una investigación experimental aplicada. Primero, revisará estudios teóricos y proyectos similares para establecer las características principales de las variables agroambientales en el cultivo de café y los factores que afectan la producción y calidad del grano. Luego, diseñará y configurará un modelo de red experimental que registre y analice datos de estas variables, proporcionados por nodos sensores. Estos datos se compararán con parámetros establecidos para determinar variaciones. Finalmente, se generarán modelos de Machine Learning para evaluar las variables en términos de tiempo y espacio, con el objetivo de predecir resultados y su impacto en la toma de decisiones. Este enfoque busca optimizar la calidad del café mediante la monitorización y análisis avanzado de las condiciones de cultivo.

Palabras Clave:

Café, redes inalámbricas de sensores, Internet de las cosas, agricultura de precisión, variables agroambientales, analítica de datos, modelos de aprendizaje.

Abstract

The reality of Colombian agriculture in relation to the dissemination and adoption of information and communication technologies is almost non-existent, which is why currently productive processes related to crops such as coffee continue to be carried out empirically or manually; That is why in the present work we present an approach to what we have called the "Digital Coffee Farmer", where it is sought that coffee farmers in the region can make use of technology to improve the conditions of their crops, which is why we focus on wireless sensor networks (WSN) allowing the coffee farmer, through the use of this tool, to be able to monitor the most important agro-environmental variables for his crop and by applying automatic learning techniques to determine the incidence of these variables in the projection of future harvests or in the expected production.

Keywords:

Coffee, wireless sensor networks, Internet of Things, precision agriculture, agro-environmental variables, data analytics, learning models.

Tabla de Contenido

Introducción.....	12
Objetivos	14
General.....	14
Específicos.....	15
El problema de investigación.....	15
Descripción del problema de investigación	15
Formulación del problema de investigación	17
Capítulo 1 – Fundamentación conceptual y teórica	18
1.1. Resumen del proyecto.....	18
1.2. Justificación	19
1.3. Alcance del proyecto.....	20
1.4. Estado del arte.....	22
1.5. Marco teórico	25
1.5.1. El Internet de las cosas	27
1.5.2. La agricultura de precisión	35
1.6. ¿Que son las redes inalámbricas de sensores (WSN)?.....	37
1.6.1. Componentes de una red inalámbrica de sensores (WSN)	39
1.6.2. Aspectos básicos en la selección de un sensor inalámbrico	41
1.7. Tecnologías de comunicación inalámbricas.....	44
1.7.1. ZigBee.....	44
1.7.2. Wifi	45

1.7.3.	LoRa y LoRaWAN.....	47
1.7.4.	Protocolo de Internet de las cosas de banda estrecha (NB-IoT) ...	48
1.7.5.	Wi-Fi ah (HaLow).....	49
1.8.	Arquitecturas usadas en redes inalámbricas de sensores (WSN).....	52
1.9.	Topologías físicas en las redes de sensores inalámbricos (WSN).....	54
1.10.	El café colombiano	57
1.10.1.	Origen del café en nuestro país.....	58
1.10.2.	El café y su entorno	62
1.10.3.	Taxonomía del café.....	64
1.10.4.	El café y sus variables agroambientales	71
2.	CAPÍTULO II -Aplicación y desarrollo.....	78
2.1.	Tipo y diseño de investigación	78
2.2.	Población o entidades participantes.....	78
2.3.	Definición de variables o categorías	79
2.4.	Procedimiento e instrumentos.....	82
2.4.1.	Interpretación y análisis de los resultados obtenidos.....	94
2.5.	Consideraciones éticas	98
2.6.	Alcances y limitaciones.....	98
2.7.	Diseño de la red inalámbrica de sensores	100
2.8.	Selección y configuración de los sensores.....	100
2.9.	Componentes de la solución tecnológica planteada	101

2.10.	Arquitectura de la red inalámbrica de sensores	103
2.11.	Características del cultivo a monitorear	104
3.	Capítulo III - Resultados	107
3.1.	Resultados esperados.....	107
4.	CAPITULO IV-Conclusiones.....	112
4.1.	Cumplimiento de objetivos del proyecto.....	112
4.2.	Aportes a líneas de investigación de grupo y a los ODS.....	112
4.3	Impacto del proyecto.....	113
4.4	Producción asociada al proyecto	114
4.5	Líneas de trabajo futuras.....	114
5.	Referencias bibliográficas.....	116

Índice de Tablas

Tabla I-Ventajas y desventajas de las topologías WSN	56
Tabla II-VARIABLES agroambientales del cultivo del café	81
Tabla III-Ficha técnica de la entrevista Café La Morelia	84
Tabla IV-Ficha técnica de la entrevista en la Finca las Acacias	87
Tabla V- Ficha técnica de la entrevista Propietario Finca las Acacias	92
Tabla VI-Criterios para la selección de los sensores inalámbricos.....	100
Tabla VII-Características técnicas de nodos sensores y Gateway	101
Tabla VIII-Componentes de la red inalámbrica de sensores. Fuente: Didácticas Digitales	102
Tabla IX-Ubicación y otros datos de interés de la finca objeto de estudio.	104

Índice de Figuras

Figura 1-Proyeccion de dispositivos del Internet de las cosas (Fuente: BBVA API-MARKET)	29
Figura 2-Áreas y subáreas de aplicación del IdC (Tomado de Borgia 2014)..	31
Figura 3-Etapas de la agricultura de precisión (Tomado de: FIA).....	36
Figura 4- Modulo sensor de humedad y temperatura (Fuente: iberobotics)	39
Figura 5- Gateway WSN -LG308N-915(Fuente: Didácticas electrónicas).....	41
Figura 6-Componentes de un nodo sensor (Fuente: (Calvo Garcia, 2017)) ...	43
Figura 7-Pila de protocolos para el estándar ZigBee (Fuente: IEEE).....	44
Figura 8-Pila de protocolos LoRaWAN (Fuente: (Pérez & Risc, 2020))	48
Figura 9-Rangos y frecuencias del Wifi-Halow(Fuente: (Meneses Vidal & Urrutia Quirá, 2021))	50
Figura 10-Arquitectura Centralizada o por rangos (Fuente: (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam , & Cayirci, 2002))	53
Figura 11-Arquitectura de conjunto o distribuida (Fuente: (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam , & Cayirci, 2002))	54
Figura 12-Diferentes tipos de topologías en redes de sensores inalámbricas (Fuente: (Fernández Barcell, 2019)).....	55
Figura 13- Topologías propuestas para el estándar ZigBee (Fuente: (Fernández Barcell, 2019)).....	56
Figura 14-Composicion interna del grano de café (Fuente: (Café de Colombia, 2010))	63

Figura 15- Tallos y ramas de un árbol de café (Fuente: (Café de Colombia, 2010)).....	65
Figura 16- Una hoja de un árbol de café (Fuente: (Café de Colombia, 2010))	66
Figura 17- Flor de un árbol de café (Fuente: (Café de Colombia, 2010)).....	67
Figura 18-Fruto del café (Fuente: (Mundo cafeto, 2020))	69
Figura 19 -Etapas del desarrollo del fruto del café ((Fuente: Arcila y Jaramillo, 2003))	69
Figura 20- Semilla o grano de café (Fuente: (Café de Colombia, 2010)).....	71
Figura 21-Arquitectura propuesta para la red WSN (Fuente: propia)	103
Figura 22 -Ubicación de los nodos sensores en la red WSN propuesta (Fuente: propia)	104
Figura 23-Quemaduras en las hojas de un árbol de café (Fuente: Finca las Acacias).....	106
Figura 24-Calculo nodo servidor1 a 85 metros del Gateway con frecuencia de 915 MHz (Fuente: propia)	107
Figura 25-Calculo nodo servidor 2 a 250 metros del Gateway con frecuencia de 915 MHz (Fuente: propia)	108
Figura 26-Temperatura promedio en el municipio de Salento (Quindío) en el mes de Julio de 2023(Fuente: (Weather Spark, n.d.)	109
Figura 27-Datos de entrenamiento de un modelo perceptrón multicapa .	110

Introducción

Para nadie es un secreto que el apoyo por parte del gobierno al sector agrícola en nuestro país no ha sido el más idóneo a través del paso de los años, las ayudadas brindadas por las entidades gubernamentales a los agricultores son nulas, ineficientes o muchas veces se basan en políticas y procedimientos mal definidos, que en muchos casos están en manos de intereses políticos para su aprobación y ejecución.

Es por ello por lo que se presentan innumerables inconvenientes a la hora de optimizar los procesos de cosecha y producción ya que durante muchos años este sector como dijimos anteriormente no ha recibido la atención que demanda. Es innegable que nuestro país tiene un enorme potencial agrícola que no ha sido explotado en forma correcta, las políticas y directrices gubernamentales terminan siempre por quedarse cortas frente al panorama existente, además de que otros factores como el alto precio de los insumos, abonos y fertilizantes aunado a los altos intereses con que se presta dinero a los agricultores terminan por desincentivar la inversión y el interés en el campo. Pero no todos son malas noticias, la llegada y difusión de la Industria 4.0 implica la propuesta de una nueva revolución que combina técnicas avanzadas de producción y operaciones que con el uso de tecnologías inteligentes permitirán la integración en las organizaciones, personas activas. De acuerdo con lo expuesto por: (Agricultura 4.0, 2022)

“Tal es su impacto que ya encontramos términos como Agricultura 4.0 a un conjunto de tecnologías centradas en la digitalización de los procesos agrícolas. Se trata de equipos, software y sistemas que pueden mejorar el proceso de producción de principio a fin, haciéndolo más rápido, económico y sostenible. En la práctica, esto significa una gigantesca combinación de tendencias y datos en tiempo real. La información extraída de este proceso sirve de guía para que los

productores tomen decisiones más acertadas en sus empresas agrícolas. Además, está la automatización de funciones a gran escala a través del Internet de las Cosas y la Inteligencia Artificial”.

Según lo expuesto por (Pusdá Chulde, 2022), La agricultura de precisión (AP) automatiza actividades mediante la recopilación y análisis de datos agrícolas para la toma de decisiones con el objetivo de mejorar la producción agrícola.

Uno de los grandes problemas que se presentan actualmente son los efectos sobre la agricultura, ya que no existe un monitoreo y control constante de las variables ambientales que inciden en el desarrollo de este, desde el proceso de la siembra hasta la obtención del producto final. De esta forma la agricultura de precisión hace su aparición permitiendo implementarse en cualquier tipo de cultivo y labor, siempre y cuando exista variabilidad espacial (es decir espacios utilizables), sin importar la zona donde se quiera llevar a cabo. En forma muy general se pueden llevar a cabo la adaptación de aspectos específicos dependiendo de cada sistema productivo, variables como: el clima, la temperatura, la humedad, el tipo de suelo, el material genético y sistema de gestión.

Según lo que nos referencian (García Díaz & Gordillo Rodríguez, 2022):

El café, un producto emblemático y que caracteriza a Colombia en el mercado internacional, es uno de los principales productos exportados del país y el cual posiciona a Colombia en el tercer lugar en cuanto a volumen de exportación a nivel mundial, de allí su relevancia para la economía nacional. Considerando la creciente tendencia de producción y consumo de productos sostenibles, se han tomado iniciativas que permiten desarrollar economías con un valor superior. Se ha demostrado que, aquellas zonas en las que existe un mayor número de proyectos sostenibles implementados y propuestos, son las que tienen mayor desempeño e importancia a nivel nacional.

Por otra parte, los autores (Oviedo & Sierra, 2019), afirman:

Que el café hace parte de los productos de exportación que tienen mayor importancia en la economía colombiana. Para los años 1970, el café era el producto más exportado en Colombia, sin embargo, veinte años después, el café es el tercer producto más exportado en Colombia luego del petróleo y el carbón.

Por motivos como los anteriormente expuestos, se propone la implementación de un modelo de red inalámbrica experimental de sensores que permitan establecer la caracterización de las variables agroambientales en un cultivo de café y mediante el empleo de modelos de aprendizaje automático permita evaluar la información resultante y posteriormente predecir los resultados a obtener con la finalidad de optimizar el proceso de toma de decisiones en un cultivo del café.

Mediante el diseño y configuración de esta red inalámbrica experimental de sensores se busca brindar al campesino tradicional una invaluable herramienta de tecnificación agrícola, que le permita aumentar sus beneficios económicos, la reducción del impacto ambiental y por ende el mejoramiento de su calidad de vida, desde otro punto de vista la agricultura de precisión propende por la obtención de un producto de mayor calidad con la consabida optimización de recursos, además de funcionar como un elemento predictivo para evitar posibles pérdidas de cosechas por falta de gestión, supervisión y acción oportuna.

Objetivos

General

Diseñar un modelo de red experimental IoT que permita monitorear las variables agroambientales en un cultivo de café utilizando analítica de datos para evaluar sus resultados.

Específicos

- Establecer a través de fuentes secundarias y primarias de información, las principales variables agroambientales relacionadas con el cultivo del café.
- Identificar factores o condiciones que inciden en procesos como la siembra, cosecha, selección y procesamiento final del grano.
- Identificar las tecnologías inalámbricas y protocolos de comunicación más idóneos que permitan garantizar la conectividad de la red experimental IoT entre sus diferentes componentes.
- Presentar el diseño de un modelo lógico de red experimental IoT que permita monitorear las variables agroambientales en el cultivo del café.

El problema de investigación

Descripción del problema de investigación

El agro colombiano es uno de los sectores que a través de los años han sufrido mayor abandono e indiferencia por parte del estado colombiano y los organismos que lo representan.

Según lo expuesto por (Centro ODS, 2021):

El conflicto armado, el narcotráfico, la dificultad en el acceso a la tierra, la desigualdad y la exclusión social, son otros de los factores que han incidido en forma negativa en la agricultura colombiana. Por otra parte, Darío Fajardo Montaña, profesor e investigador de la Universidad Externado señala “Es preocupante la caída en la producción de alimentos en las últimas décadas. “Hemos ido perdiendo nuestra capacidad de abastecimiento alimentario y hay un problema enorme por falta de asistencia técnica”, en conclusión, nuestro país ha dejado de ser productivo y se encuentra dependiendo en gran parte de las importaciones.

De acuerdo con (Revista Semana, 2022):

Juan Manuel Cerón director de la División Agropecuaria de Colanta a nivel nacional, expone que Hay baja adopción de tecnología y poca innovación en el campo colombiano. La tecnología para el sector agropecuario está desarrollada en el mundo y es implementada con éxito en muchos países. Necesitamos que Colombia identifique la tecnología apropiada para sus condiciones, la importe y adapte a cada proceso productivo, o, mejor aún, adquiera la capacidad de desarrollar la tecnología que requiere el campo para producir más, a menor costo, con mayor rentabilidad y competitividad. Para esto se necesita una política pública para la innovación, el desarrollo y transferencia tecnológica. Las entidades que deben cumplir esta labor están en deuda con el campo colombiano (Revista Semana, 2022).

Según lo que nos presenta (Infobae Colombia, 2022):

AgTech Instacrops es una plataforma especialista en desarrollo de hardware y software que integra fuentes de datos y de inteligencia artificial con la finalidad de recolectar información sobre los parámetros claves y variables agroambientales de los cultivos, afirmó que es necesario trabajar para optimar la productividad, ya que de acuerdo a reportes recogidos de la productividad del agro en Colombia, esta puede aumentar hasta en un 33 % en cultivos tradicionales como papa y café gracias al uso e implementación de la tecnología. Desde otro punto de vista, Hugo Arrubla, director Comercial de Instacrops en Colombia explica que esto también se debe a la resistencia cultural los productores que muchas veces no ven la implementación de estas tecnologías como una inversión importante de sus negocios. “La desventaja frente a esta resistencia, es la pérdida de competitividad, una consecuencia crítica teniendo en cuenta que esto junto a una baja rentabilidad son las principales razones por las que quiebran las iniciativas agrícolas”

Como hemos podido analizar en relación a cada uno de los autores anteriores, encontramos una gran cantidad de problemas que aquejan nuestro campo colombiano, de entre los principales podemos destacar la poca tecnificación del agro y la resistencia de muchos productores a cambiar sus métodos de cultivo y adoptar nuevos retos y tecnologías ya que muchas veces no se quiere invertir porque se desconoce la tecnología o no se confía en ella, este problema no es ajeno al sector cafetero donde la tecnificación es poca o muchas veces casi que inexistente y procesos como el monitoreo de las variables agroambientales del cultivo es llevado a cabo por los caficultores de forma artesanal y manual, lo que ocasiona que muchas veces no se tenga un control exacto y verdadero de la caracterización de estas variables que inciden en procesos como la siembra, recolección, presupuesto del costo de un cultivo y su rentabilidad y finalmente la calidad del grano para poder competir ante los exigentes mercados europeos y americanos.

Formulación del problema de investigación

¿Cómo puede la integración de tecnologías como el IoT y la analítica de datos, mejorar la producción en la industria cafetalera, mediante la evaluación de las condiciones agroambientales de los cultivos?

Capítulo 1 – Fundamentación conceptual y teórica

1.1. Resumen del proyecto

Nuestro café está catalogado como uno de los más suaves del mundo debido a las condiciones climáticas en las que se lleva a cabo su cultivo. Pero como todo cultivo, el café cuenta con un conjunto de variables agroambientales como: la temperatura, humedad del aire, tipo de suelo e índice pluviométrico entre otras que inciden en sus características y por lo tanto en su calidad resultante.

Establecer manualmente el comportamiento de dichas variables se torna bastante complejo y poco funcional en estos momentos, es por ello por lo que nuestro estudio propone como objetivo principal: la implementación de un modelo de red experimental para la caracterización de estas variables agroambientales en un cultivo de café empleando analítica descriptiva, prescriptiva y predictiva para evaluar la información actual e histórica y posteriormente predecir el comportamiento de dichas variables para optimizar el proceso de toma de decisiones.

Por otra parte, mediante una investigación aplicada de tipo experimental nos proponemos alcanzar los siguientes resultados: consultar los referentes teóricos sobre estudio o proyectos de características similares al proyecto propuesto, establecer las principales características de las variables agroambientales relacionadas con el cultivo del café y los factores que inciden en la producción y calidad final del grano, diseñar y configurar un modelo de red experimental para registrar y analizar las mediciones de las variables agroambientales arrojadas por los nodos sensores y compararlas con un conjunto de parámetros ya establecidos para determinar su variación; posteriormente generar modelos de Machine Learning que permitan evaluar las variables y su comportamiento en un tiempo y espacio específico con la finalidad de predecir los resultados obtenidos y su relevancia para el proceso de toma de decisiones.

1.2. Justificación

La innovación en la agricultura se ha convertido en una ayuda muy importante para cualquier tipo de cultivo, lo que nos permite optimizar los recursos y tiempo para mejorar la productividad en los procesos y el ciclo de vida del cultivo.

De acuerdo con lo que nos propone (nutricontrol, 2020), en su sitio Web, El IoT consiste en el uso de dispositivos que se encuentran a nuestro alrededor y que cuentan con acceso a internet, para que se comuniquen entre sí y al mismo tiempo puedan recolectar y enviar información sobre sus funciones o características a un servidor o repositorio en la Web.

La implementación y desarrollo de tecnologías IoT en los entornos agrícolas se refiere tanto a los componentes de hardware y software asociados a esta tecnología, como a la implementación y desarrollo de sistemas informáticos o de análisis de datos, que son vitales para el proceso de toma de decisiones en los cultivos.

Al presente se calcula que hay más de 8.400 millones de dispositivos conectados en el mundo, esto permite que la cantidad de datos y la información que se pueda obtener a través de ellos para poder ser aplicada al sector agro sea de gran importancia, entre las principales características que ofrece la tecnología encontramos:

- Analizar variables ambientales (suelo, clima...)
- Monitorizar el suelo y cultivo, y recoger información ambiental.
- Estudiar procesos de evolución de los cultivos.
- Crear modelos específicos de Machine Learning.
- Implementar sistemas de ayuda a la decisión para la optimización de procesos.

- Medir los diferentes sensores sociales para componentes que afectan la toma de decisiones: predecir la demanda, programar la recolección, adaptar la cosecha a los precios.

El Internet de las cosas (IoT), busca simplificar la vida humana mediante la conexión y monitoreo de múltiples dispositivos conectados a Internet, uno de dichos dispositivos son los sensores inalámbricos que permitirán ayudar a los agricultores a minimizar la intervención humana innecesaria en los cultivos, programar oportunamente fumigaciones preventivas, mejorar la calidad del producto cosechado, minimizar las cotas de producción afectada por las plagas, reducir los costos de operación del cultivo y tener un control y monitoreo más preciso de sus cultivos.

Mediante la implementación de un modelo de red experimental, los caficultores estarían en posibilidad de consultar el monitoreo de las variables agroambientales de tipo físico (Temperatura, humedad, vientos, índice de lluvias) y en base a índices o patrones previamente establecidos, hacer comparativos sobre dichos valores pudiendo establecer la aparición de enfermedades, cambios bruscos de temperatura y otras alertas que sean peligrosas para sus cultivos, lo que les permitiría diseñar con antelación planes de contingencia para prevenir o por lo menos minimizar daños graves en los cultivos.

1.3. Alcance del proyecto

El proyecto de diseño de un modelo de red experimental IoT que permita monitorear las variables agroambientales en un cultivo de café utilizando analítica de datos para evaluar sus resultados lo podemos estructurar en varias etapas:

1. Una etapa de acondicionamiento, donde se procederá al diseño lógico y físico de la red experimental, por otra parte, mediante software de simulación hacer las pruebas respectivas para establecer

la comunicación entre Gateway y nodos sensores y garantizar el correcto envío y transmisión de datos.

2. Una etapa donde se procederá a la configuración e implementación de la red inalámbrica de sensores en el sitio objeto de estudio, con la finalidad de recolectar los datos de las variables agroambientales del cultivo del café en un tiempo específico.
3. Una etapa de analítica de datos, donde ya con los datos recolectados se procederá a comparar esta data con una serie de parámetros ya establecidos y a determinar mediante la aplicación de modelos de Machine Learning variaciones significativas que permitan obtener información importante en la caracterización y comportamiento de las variables anteriormente mencionadas en un periodo de tiempo y en un terreno de cultivo previamente establecidos.
4. Una etapa de proyección o predicción, donde por medio de la aplicación de modelos predictivos de Machine Learning se pueda como su nombre lo indica predecir futuros comportamientos de las variables agroambientales en un cultivo de café y con base en la información resultante poder optimizar el proceso de toma de decisiones por parte del caficultor.

En este proyecto pretendemos llevar nuestro alcance hasta la etapa del diseño físico y lógico de la red experimental de sensores, teniendo en cuenta que no contamos con los dispositivos físicos (Nodos sensores y Gateway), para hacer la implementación de la red anteriormente mencionada.

1.4. Estado del arte

En los últimos años se ha empezado a hablar con propiedad de términos como agricultura de precisión e Internet de las cosas, este último ha impactado de gran forma, sectores como la agricultura y la ganadería, a continuación, vamos a presentar varios trabajos que han permitido implementar soluciones de IoT para poder monitorear variables agroambientales en varios tipos de cultivos, veamos:

En este trabajo que nos presentan (Montoya Muñoz & Caicedo Rendon ,2020), los autores proponen un enfoque con la finalidad de proporcionar una recolección de datos confiable que se centra en la detección y tratamiento de valores atípicos en la agricultura inteligente basada en IoT. En otro trabajo presentado por (Varshitha & Choudhary, 2022), se presenta un enfoque en el Bagging¹, que es una técnica de aprendizaje automático (ML) utilizada para implementar la predicción de la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos. En consideración se han tenido en cuenta algunos parámetros del suelo como el pH, nitrógeno, fósforo, potasio (NPK), humedad, temperatura, carbono orgánico, contenido de humedad y precipitaciones para predecir la fertilidad del suelo y el rendimiento del cultivo. En el trabajo de (Abad Buri & Farez Sigcha, 2018), los autores presentan el diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos (WSN), utilizando protocolos ZigBee y GPRS para la comunicación entre los nodos sensores y cuya finalidad es la de establecer el control de variables climáticas incidentes en la producción de un cafetal, así mismo los autores proponen desarrollar un sistema de bajo costo, autosustentable energéticamente y con una adecuada interfaz hombre-maquina, que permita al agricultor en cualquier momento el evaluar las condiciones climáticas en la plantación, sirviendo estas para facilitar la facultad de tomar en cuanto a medidas

¹ Método de aprendizaje por conjuntos que se usa comúnmente para reducir la varianza dentro de un conjunto de datos ruidoso.

preventivas y correctivas correspondan, optimizando el desarrollo y producción del café.

Mediante este trabajo de revisión documental, (Espinoza García, Álvarez Martínez, & Chora García, 2019), los autores nos presentan una revisión bibliográfica de cómo el internet de las cosas está íntimamente ligado a la agricultura de precisión, para esto se aplicó una investigación indagando diversas fuentes como revistas indexadas, libros, páginas oficiales y gubernamentales. Como resultado se determinó que existe una relación inherente entre el internet del todo y la agricultura de precisión y sienta las bases para idear proyectos sustentables basados en IoT para el desarrollo de la Provincia de Los Ríos que es agrícola por excelencia. Mediante este proyecto (Valderrama Hurtado, 2022), el autor nos presenta un prototipo funcional de un sistema informático, que permita la medición de variables agroambientales como (humedad, temperatura, pH, conductividad y macronutrientes del suelo, temperatura y presencia de precipitación) , a través de cada uno de los sensores caracterizados para tal fin y poder ofrecer así información que le sea útil al usuario en la toma de decisiones sobre el cultivo del café. En esta investigación propuesta por (Meneses Vidal & Urrutia Quirá, 2021), se plantea llevar a cabo la medición de nutrientes como: Nitrógeno(N), Fósforo(P) y Potasio(K) comúnmente llamado el trio NPK; mediante un dispositivo que facilite la obtención de estos valores en tiempo real, los cuales serán cargados a un servidor en la nube, donde estarán disponibles para que puedan ser usados en un proceso de análisis de información, a través de la tecnología inalámbrica SIGFOX, contribuyendo así, en un futuro a una mejor toma de decisión con respecto a la aplicación de fertilizantes en un cultivo de café.

En el documento presentado por (Falguni , Jamar, & Churi, 2018), se presentan los desafíos futuros de IoT, como los aspectos técnicos (conectividad, compatibilidad y longevidad, estándares, análisis y acciones inteligentes, seguridad), de negocios (inversión, modelo de

ingresos modesto, etc.), sociales (demandas cambiantes, nuevos dispositivos, gastos, confianza del cliente, etc.) y desafíos legales (leyes, regulaciones, procedimientos, políticas, etc.). En la propuesta de (Ossa Duque, 2017), se describe el diseño de una plataforma de monitoreo remoto y control de variables ambientales para agricultura de precisión, flexible y de bajo costo. Para la construcción de dicha plataforma se emplearon tecnologías con redes inalámbricas de sensores, basadas en protocolo de comunicación ZigBee, utilizando sistema embebido Arduino, mediante software y hardware libre. La red está compuesta por un nodo central (coordinador) y dos nodos donde se encuentran conectados los sensores para las lecturas de las variables medioambientales y estas se exhiben en un entorno gráfico. Finalmente, los datos son subidos a la nube para que el usuario pueda acceder a la información en tiempo real desde cualquier lugar. Por otra parte, en el siguiente artículo presentado por (Bahadur Sinha & Dhanalakshmi, 2021), se genera una rigurosa discusión sobre los principales componentes, nuevas tecnologías, problemas de seguridad, desafíos y tendencias futuras involucrados en el ámbito de la agricultura. Se presenta un informe bastante detallado sobre los avances recientes en este campo. El objetivo de esta encuesta es ayudar a los investigadores potenciales a detectar problemas relevantes sobre el IoT y, en función de los requisitos de aplicación, adoptar tecnologías adecuadas. Además, se ha destacado la importancia de IoT y la analítica de datos para la agricultura inteligente.

En el trabajo presentado por (Alarcón López, Quimbayo Castro, García Perdomo, & Marín Zambrano, 2022), se plantea como objetivo; el recopilar información acerca de las redes de sensores inalámbricas WSN usando la metodología PRISMA, y de cómo estas han sido utilizadas en diversos países como apoyo a la agricultura; encontrando resultados a partir de metaanálisis usando el lenguaje de programación R, y así, determinar el

tamaño del efecto y pertinencia de estas intervenciones tecnológicas para futuros proyectos.

En la presente investigación los autores (Ordoñez Olmedo & Murillo Poveda , 2021), nos presentan el desarrolló un sistema Web junto con su respectiva aplicación móvil mediante herramientas de programación para optimizar el control y monitoreo de los parámetros o factores de producción del café, debido a los problemas que presentan en la actualidad los cafetales son muy importantes como la reducción de productividad en los sembríos, falta de competitividad, alteraciones de los precios internacionalmente, la mala calidad del cafeto, problemas de humedad y la falta de inversión en el sector cafetalero. Mediante el presente trabajo (Cadena Chavarro & Pulido Feo, 2021), los autores describen los bloques principales de la solución que corresponden a una WSN basada en 6LoWPAN, un Border Router y una plataforma en la nube. A lo largo del documento, se detalla información con respecto a las funcionalidades, desarrollo, protocolos, códigos fuentes y pruebas necesarias para el desarrollo de la solución. La implementación de este proyecto en un cultivo pequeño permite brindar una versión prototipada para futuros desarrollos de optimización en procesos agrícolas. Además, de llegar a ser una alternativa de uso transversal para otras aplicaciones.

1.5. Marco teórico

En el presente documento se aborda el diseño lógico y físico de una red experimental de sensores inalámbricos (WSN), en un cultivo de café en la finca “Las Acacias” ubicada en el municipio de Salento (Quindío), con el objetivo de monitorear un conjunto de variables agroambientales y establecer un conjunto de alertas o advertencias que permitan detectar a tiempo una serie de situaciones adversas sobre el rendimiento de los cultivos con la finalidad de diseñar e implementar los cursos de acción a tomar.

Cabe aclarar que para el desarrollo de este proyecto no se tiene en cuenta o tampoco es objeto de estudio las condiciones de calidad del suelo, ya que este por sí solo significara el desarrollo de otro proyecto de características diferentes.

Por las razones anteriormente presentadas, enfocaremos el desarrollo del presente marco teórico en los siguientes referentes científicos y tecnológicos:

- El internet de las cosas y su impacto en las tecnologías relacionadas con el agro.
- La agricultura de precisión como un nuevo enfoque tecnológico destinado a mejorar, automatizar y controlar todo tipo de cultivos y las variables que inciden en la producción y calidad de sus productos finales, así como sus aplicaciones potenciales y beneficios más representativos.
- Componentes de las redes inalámbricas y estándares más utilizados con sus respectivas características de índole técnico.
- El café y las variables agroambientales que más inciden en la calidad del producto final y que pueden ser tomadas como referentes de control y medición para la toma de decisiones y generación de alertas para detectar o anticipar situaciones adversas durante las diferentes etapas del cultivo del grano.
- Referentes de tipo teórico, investigativo y científico de organizaciones que tienen alguna incidencia en el país y la región sobre el cultivo del grano y la calidad final del mismo.

1.5.1. El Internet de las cosas

De acuerdo con lo presentado por (Rose, Eldrige, & Chapin, 2015), el término **“Internet of Things”** (IoT) o Internet de las cosas, fue presentado por Kevin Ashton en el Auto-ID Center del Instituto Tecnológico de Massachusetts en 1999, Este grupo realizaba una serie de investigaciones en el campo de la identificación por radiofrecuencia en red (RFID) y además sobre el uso de tecnologías de sensores emergentes.

Cabe aclarar que los laboratorios de investigación estaban conformados por siete universidades ubicadas en cuatro continentes, seleccionadas por Auto-ID Center para diseñar la arquitectura de Internet de las cosas (IdC) como es conocido en español. Aunque el concepto de interconectar dispositivos y personas mediante internet tradicional y las redes sociales realmente no es nuevo y ha existido desde antes, el modelo de interconectar dispositivos, gente y todo lo demás creando nuevos servicios, si es relativamente nuevo, tanto que aún se halla en una etapa de desarrollo y refinación.

Podríamos afirmar que el elemento clave del Internet de las cosas (IdC) para convertir toda clase de objetos comunes en una interfaz de Internet con el mundo real, es el microcontrolador o tarjeta programable, como el encontrado en plataformas como: Arduino, plataforma de desarrollo de hardware libre, que junto a una amplia variedad de tecnologías modernas, tales como las redes de sensores y actuadores, GPS, RFID, comunicaciones inalámbricas, localización en tiempo real, entre otros, y por supuesto, Internet, forman esta enorme red, con el objetivo de que todas las cosas conectadas con esta red puedan servir dentro de un sistema automatizado con fines diversos, entre ellos tenemos: la identificación de objetos en tiempo real, la localización, seguimiento, monitoreo y activación de eventos de diversa índole, incluso yendo hacia lo que se ha denominado como Planeta Inteligente donde la inteligencia se apodera de cada aspecto de nuestra vida (Perez & Guerra, 2015).

Internet de las cosas (IdC), algunas veces denominado "Internet de los objetos", lo cambiará todo, incluso a nosotros mismos. Si bien puede parecer una declaración arriesgada, hay que tener en cuenta el impacto que Internet ha tenido sobre la educación, la comunicación, las empresas, la ciencia, el gobierno y la humanidad. Claramente Internet es una de las creaciones más importantes y poderosas de toda la historia de la humanidad.

Ahora debemos tener en cuenta que IdC representa la próxima evolución de Internet, que será un enorme salto en su capacidad para reunir, analizar y distribuir datos que podemos convertir en información, conocimiento y en última instancia, sabiduría. En este contexto, IdC se vuelve inmensamente importante.

Ya están en marcha proyectos de IdC que prometen cerrar la brecha entre ricos y pobres, mejorar la distribución de los recursos del mundo para quienes más los necesitan y ayudarnos a comprender el planeta para que podamos ser más proactivos y menos reactivos. Aun así, son varias las barreras que amenazan con retrasar el desarrollo de IdC, como la transición a IPv6, el establecimiento de un conjunto de normas en común y el desarrollo de fuentes de energía para millones (incluso miles de millones) de sensores diminutos (Evans, Dave., 2011).

Antes de analizar el estado actual de IdC, es importante ponerse de acuerdo en una definición. Según el Grupo de soluciones empresariales basadas en Internet (IBSG, Internet Business Solutions Group) de Cisco, IdC es sencillamente el punto en el tiempo en el que se conectaron a Internet más "cosas u objetos" que personas.

En 2003, había aproximadamente 6,3 mil millones de personas en el planeta, y había 500 millones de dispositivos conectados a Internet. Si dividimos la cantidad de dispositivos conectados por la población mundial, el resultado indica que había menos de un dispositivo (0,08) por persona. De acuerdo con la definición de Cisco IBSG, IdC aún no existía en 2003 porque la cantidad de cosas conectadas era relativamente

escasa, dado que apenas comenzada la invasión de los dispositivos omnipresentes, como los smartphones. Por ejemplo, el Director General de Apple, Steve Jobs, no presentó el iPhone sino hasta el 9 de enero de 2007 en la conferencia Macworld.

El crecimiento explosivo de los smartphones y las Tablet PC elevó a 12,5 mil millones en 2010 la cantidad de dispositivos conectados a Internet, en tanto que la población mundial aumentó a 6,8 mil millones, por lo que el número de dispositivos conectados por persona es superior a 1 (1,84 para ser exactos) por primera vez en la historia (Evans, Dave., 2011).

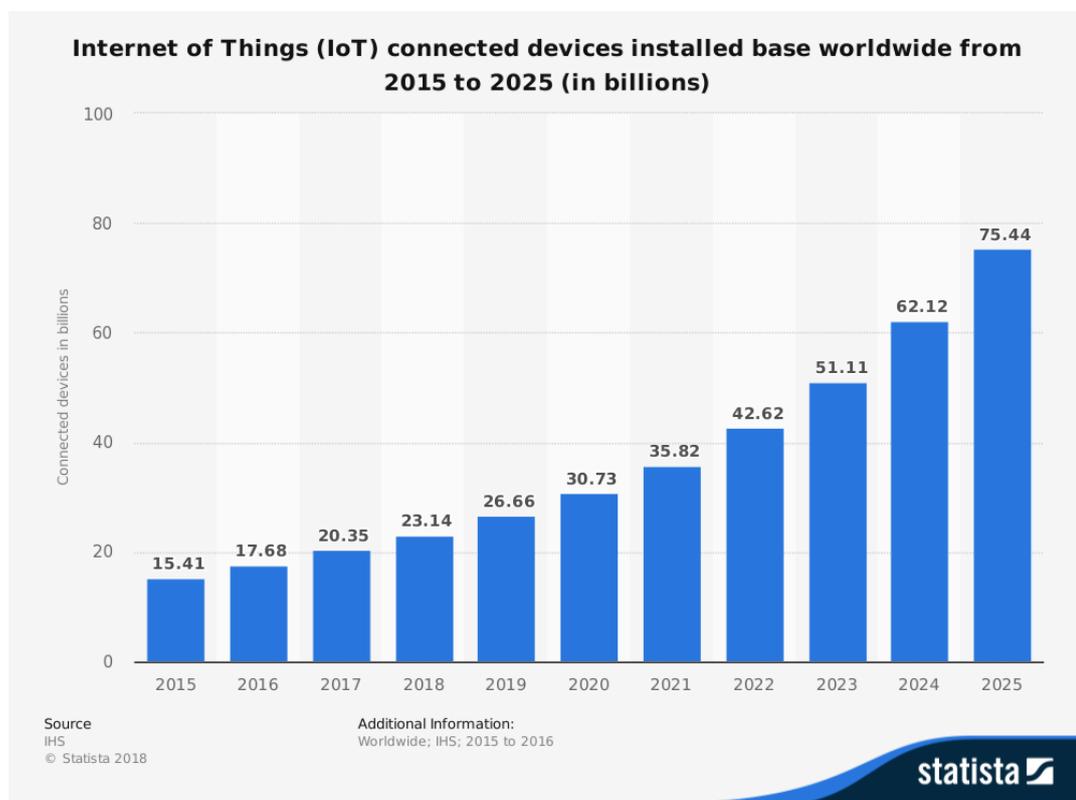


Figura 1-Proyección de dispositivos del Internet de las cosas (Fuente: BBVA API-MARKET)

De acuerdo con (Rose, Eldrige, & Chapin, 2015), diferentes empresas y organizaciones dedicadas a la investigación han publicado una amplia gama de proyecciones sobre el potencial impacto que tendrá la IoT sobre Internet y sobre la economía en los próximos cinco a diez años.

La empresa americana Cisco ha proyectado que para el año 2019 habrá más de 24 mil millones de objetos conectados a Internet, aunque Morgan Stanley anticipa que para el año 2020 habrá 75 mil millones de

dispositivos conectados en red. Considerando un período de tiempo más amplio, Huawei sube la apuesta y anticipa que en 2025 habrá 100 mil millones de conexiones a el Internet de las cosas (IoT). El McKinsey Global Institute sugiere que el impacto financiero de la IoT sobre la economía global puede llegar a ascender de \$3.9 a \$11.1 mil millones en 2025.5 Aunque la variabilidad de las predicciones las vuelve cuestionables, en conjunto permiten entrever una influencia y un crecimiento significativos.

1.5.1.1. Aplicaciones del Internet de las cosas (IdC)

De acuerdo con (Mora Gonzalez, 2015), el Internet de las cosas tendrá muchas aplicaciones potenciales: por ejemplo, en la industria al detalle, en el campo de la educación, la agricultura, la biología y los animales, en los bosques, la agricultura, la industria de la medicina, la automovilística, la salud y el monitoreo de infraestructura, como puentes y edificios.

Existen otras perspectivas enfocadas más en el aspecto doméstico, conocido como la Domótica, una de las áreas de mayor potencial es en el monitoreo, seguimiento y control de aspectos de la vida cotidiana como activar la cafetera; revisar el contenido del refrigerador para ver si hay leche; el monitoreo de pacientes, el seguimiento de flotillas; el monitoreo y propagación de enfermedades y plagas; el estado de salud en tiempo real; la contención y predicción de información para apoyar a los profesionales en el campo de la agricultura; y el apoyo a decisiones políticas en escenarios de pandemia, por ejemplo.

Desde una perspectiva de proactividad, uno de los usos potenciales más significativos, y que más interés despierta, es en el monitoreo de las “cosas”, lo cual permitirá un mantenimiento predictivo y preventivo mucho más adecuado para los objetos en cuestión.

(Borgia, 2014), presenta una visión más amplia o taxonomía como se muestra en la Figura 2, donde se aprecian 24 subáreas de Aplicación en la industria, bienestar de la salud, y ciudades inteligentes. Cabe resaltar en esta clasificación o taxonomía el impacto en la agricultura a través del

manejo de sistemas de irrigación automáticos y el monitoreo de la producción agrícola a través de sistemas de sensores inalámbricos.

De acuerdo con (Rose, Eldrige, & Chapin, 2015):

Al considerar el potencial de que la tecnología de los objetos inteligentes y la Internet de las Cosas aborde los desafíos del desarrollo de manera significativa, las oportunidades parecen ser convincentes. Por ejemplo, la aplicación de redes de sensores a diferentes desafíos ambientales, la calidad y el uso del agua, el saneamiento, la salud y las enfermedades, el cambio climático y el monitoreo de los recursos naturales podría tener un fuerte impacto más allá de la gestión de los recursos.

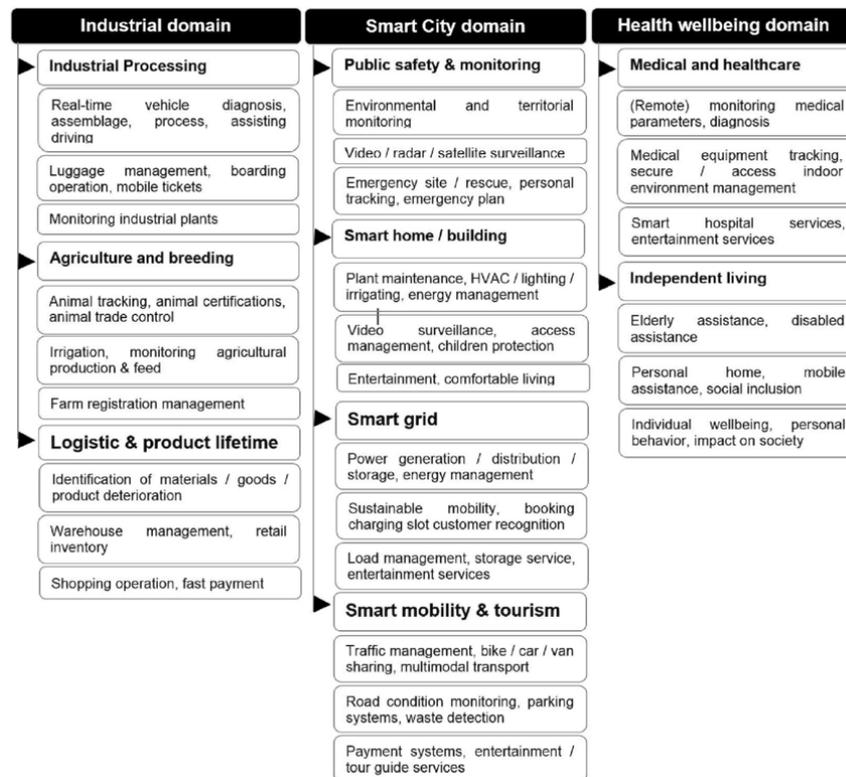


Figura 2-Áreas y subáreas de aplicación del IdC (Tomado de Borgia 2014)

Por otra parte, la data recolectada mediante este tipo de dispositivos y aplicaciones se podrían emplear con éxito en entornos de investigación con la finalidad de ayudar a los científicos a realizar contribuciones únicas al conocimiento.

La creciente población mundial, especialmente a través de las economías emergentes, se anticipa a que los desafíos relacionados con el acceso a alimentos de calidad, seguros y asequibles aumentarán con el tiempo. El potencial uso de la Internet de las cosas (IdC), para combatir el hambre y promover una agricultura sostenible ha recibido especial atención, quizás más que cualquier otro problema relacionado con el desarrollo, por ejemplo: gestión de ciclos de producción agrícola, control de enfermedades y plagas, aumento de las materias primas gracias a la automatización de cosechas, sean algunos de los logros que se integran a la cadena de valor con el objetivo de mejorar la sostenibilidad ambiental y mejorar la productividad alimenticia.

Por ejemplo, en la actualidad se cuenta con sensores para monitorear la temperatura y la ubicación, las cadenas de frío, especialmente las que facilitan el transporte y la distribución de las vacunas para mantenerlas a las temperaturas indicadas y hacer los procesos más seguros, por lo que un porcentaje mayor de los envíos llegan a su destino en excelentes condiciones.

El sector agrícola también ha recibido numerosos beneficios del IdC. Ahora es posible alimentar y monitorear el ganado de forma más específica a través de etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID), que contienen toda la información del ejemplar en un chip. Por otra parte, se pueden monitorear variables como: la exposición a la luz solar, así como los niveles de saturación de agua y la presencia de nutrientes esenciales como el fósforo y el nitrógeno, a través de sensores electroquímicos.

1.5.1.2. El internet de las cosas (IdC) y su aplicación en la agricultura

Según lo expuesto por (Calvo Garcia, 2017):

El sector de la agricultura en una visión general en nuestro país se ha caracterizado por desarrollarse con una escasa o baja tecnificación.

El auge de nuevas tecnologías y el anhelo de tener un control automatizado de los elementos que nos rodean viene permitiendo la monitorización y el análisis de parámetros ambientales en los campos de cultivo, para generar importantes mejoras en la productividad, optimizar los recursos del lugar y producir una sostenibilidad económica y medioambiental. En la actualidad, los equipos técnicos que crean un terreno inteligente están compuestos de dos tecnologías principales. La primera de ellas son los sensores: la agricultura dispone de una variedad muy extensa de instrumentos agrarios que captan todo tipo de magnitudes físicas significativas para el cultivo. Sensores de temperatura, humedad, luminiscencia, viento y polución son los más populares de un gran abanico de medidores que, junto a una gestión informática, se centralizan y ejecutan de forma autónoma para una mejora potencial en el cultivo.

Según lo que nos propone (NEC, 2014):

La empresa agri-IT (empresa líder en la industria con sede en Holanda), anuncia hoy los resultados de una prueba de "solución de agricultura de precisión" en Rumania que utiliza sensores ambientales y software de análisis de Big Data para maximizar los rendimientos a un costo reducido". Al medir y responder con precisión a la variación en las condiciones de crecimiento dentro de cada campo, la solución ayuda a minimizar el uso y los costos de fertilizantes, pesticidas, agua y combustible, a la vez que maximiza los rendimientos de los cultivos. Las compañías ahora están trabajando para llevar el Sistema de Apoyo a la Decisión de Cultivos (DSS) al mercado, enfocándose inicialmente en los mercados de Europa, Medio Oriente y África (EMEA). La solución proporciona a los agricultores orientación precisa sobre siembra, fertilizantes, riego, protección y recolección a través de una aplicación fácil de usar que utiliza datos de sensores de suelo en el campo y estaciones meteorológicas, combinados con pronósticos meteorológicos locales y conjuntos de datos regionales agregados de

agronomía multianuales. Los sensores registran automáticamente la humedad y la temperatura del suelo 24/7. La velocidad del viento, la dirección, la temperatura, la humedad, la lluvia y los niveles de luz solar también se capturan en toda la granja. Esto se complementa con inspecciones visuales e informes de los agricultores sobre las tasas de crecimiento de los cultivos y los signos de insectos y enfermedades.

En la agricultura, las tecnologías de Internet de las cosas (IdC), se pueden utilizar para aumentar, proteger y optimizar la producción de cultivos, así como para mejorar el almacenamiento y distribución de alimentos (Biggs, Garrity, & LaSalle, 2017). Según (Alarcón López, Quimbayo Castro, García Perdomo, & Marín Zambrano, 2022), “el Crecimiento de la productividad en la agricultura en los últimos cincuenta años ha sido mucho más lento en las regiones en desarrollo del mundo, en parte debido a los grandes costos de la tecnología y la escasez del capital”. Por lo que nos presenta (Cadena Chavarro & Pulido Feo, 2021), la recolección y uso los datos meteorológicos locales ha contribuido a obtener información de primera mano, aunque sigue siendo un aspecto crítico de la agricultura, sobre todo en relación al poco desarrollo de la misma debido a la limitada cobertura, elevados costos y baja aplicación de la tecnología de monitoreo, pero el IdC ahora está permitiendo implementar estaciones de microclima que puedan ser desplegadas y utilizadas para una serie de actividades, incluida la difusión de información a los agricultores sobre los requerimientos de nutrientes, predicción de los patrones climáticos, y la provisión de insumos en el esquema de seguro de cultivos localizados.

(Kumar Verma & Usman, 2016), proponen lo siguiente:

La aplicación del Internet de las cosas mediante el desarrollo de un conjunto de dispositivos encargados de recolectar información primordial de los cultivos y una aplicación para recibir y procesar dicha información, su objetivo es resolver necesidades del agro de los agricultores hindúes en tiempo real. La solución propuesta enviaría la

información obtenida a un servidor central para analizar los datos y reportar a los agricultores las medidas de precaución a tomar para la seguridad de sus cultivos. La solución propuesta es amigable con el medio ambiente a través del uso de energía solar lo cual permite asegurar la duración y portabilidad de los dispositivos en áreas rurales de la india.

A nivel tecnológico, la aplicación de IoT en agricultura encuentra un gran aliado por parte de la computación en la nube para la parte del tratamiento de datos en los siguientes usos descritos en (Badua, 2015): uso eficiente de los insumos como fertilizantes y pesticidas, reducción de costos, control de ganado, agricultura de interiores, invernaderos y establos, piscicultura, monitoreo del almacenamiento en tanques de agua, tanques de combustible, silos, asignación de recursos a demanda sin límite, mantenimiento y actualizaciones realizadas en Back-End, fácil y rápido desarrollo incluyendo la colaboración con otros sistemas en la nube.

1.5.2. La agricultura de precisión

De acuerdo con (Ríos Hernández, 2021), la Agricultura de Precisión es una estrategia de gestión que recoge, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales y los combina con otras informaciones para respaldar las decisiones de manejo de acuerdo con la variabilidad estimada, y así mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola.

Según lo expresado por (Alarcón López, Quimbayo Castro, García Perdomo, & Marín Zambrano, 2022), la agricultura constituye uno de los sectores donde se están implementando las redes inalámbricas de sensores (WSN). Este tipo de tecnología favorece una reducción en el consumo de agua y aplicación de pesticidas y abonos, contribuyendo a la preservación del ecosistema. Adicionalmente, pueden generar alertas sobre la llegada de heladas, inundaciones, incendios, etc. La agricultura

de precisión cubre múltiples prácticas relativas a la gestión de cultivos y cosechas, entre alguna de sus aplicaciones.

Una de las aplicaciones más impactantes de la agricultura de precisión (AP), se encuentra en el control de plagas y enfermedades, ya que, a través de sensores estratégicamente situados, se pueden monitorear parámetros tales como: la temperatura y la humedad relativa del suelo, la temperatura y humedad de las hojas y la radiación solar entre otras, con el fin de detectar rápidamente situaciones adversas y desencadenar los tratamientos apropiados.

En la agricultura de precisión existen dos aproximaciones para la aplicación variable de insumos. La primera de ellas se basa en el muestreo y mapeo de los factores de producción a ser manejados en forma diferencial (fertilidad del suelo, malezas, etc.) y la posterior elaboración de mapas de prescripción para la aplicación variable de los insumos (fertilizantes, herbicidas, etc.). La segunda aproximación es el uso de sensores en forma directa con el suelo y/o el cultivo para la aplicación inmediata de los insumos en forma variable (Cadena Chavarro & Pulido Feo, 2021). En la Figura 3. se pueden apreciar las principales etapas o pasos para la aplicación de la agricultura de precisión (AP).

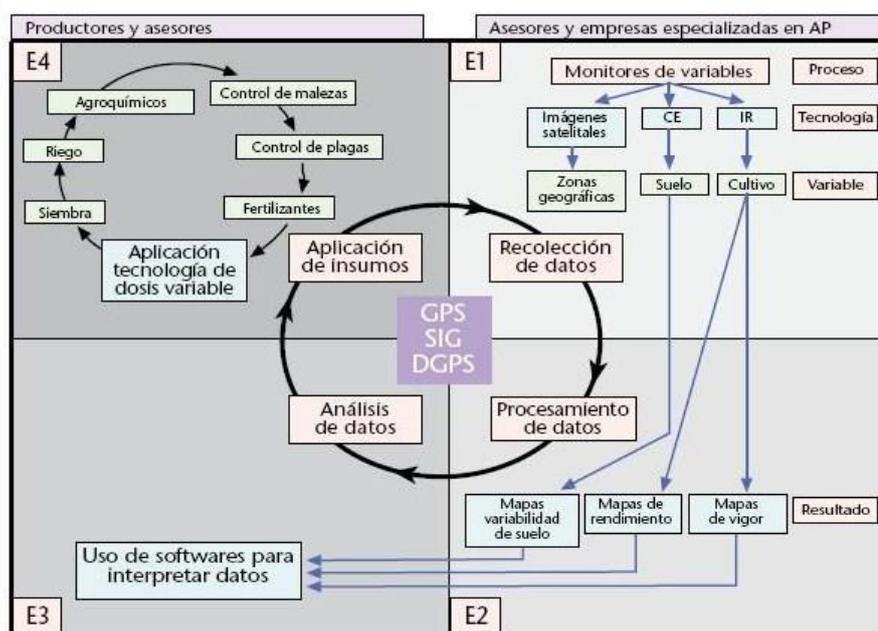


Figura 3-Etapas de la agricultura de precisión (Tomado de: FIA)

1.6. ¿Que son las redes inalámbricas de sensores (WSN)?

De acuerdo con (National Instruments Notas Tecnicas, 2009):

Una red de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network O WSN abreviado) es una red inalámbrica que consiste en dispositivos distribuidos espaciados autónomos utilizando sensores para monitorear condiciones físicas o ambientales. Un sistema WSN incorpora un Gateway o puerta de enlace, que provee conectividad inalámbrica como complemento de redes cableadas y nodos distribuidos. El protocolo inalámbrico que seleccione depende en los requerimientos de la aplicación. Algunos de los estándares disponibles incluyen radios de 2.4 GHz basados en los estándares IEEE 802.15.4 o IEEE 802.11 (Wifi) o radios propietarios, los cuales son regularmente de 900 MHz.

Según lo expuesto por (Ordieres Meré, et al., 2009), la idea de una red de sensores inalámbricos surge gracias a las posibilidades que nos da la tecnología de crear una red de dispositivos de captura constante, que nos permita registrar y almacenar una determinada información, transmitir datos de un dispositivo a otro, y después retransmitir toda la información para almacenarla en una localización central.

Por otra parte (Alarcón López, Quimbayo Castro, García Perdomo, & Marín Zambrano, 2022) nos presentan:

Que toda esta tecnología funcionará con un gasto de energía muy reducido, por lo que una red de este tipo es un flexible y poderoso instrumento para poder monitorizar sistemas complejos, donde situar los sensores puede ser imposible de cualquier otra manera. El objetivo de la recolección de datos por los sensores en la monitorización es la obtención de los datos teniendo como única limitación las características de los sensores. Podemos crear una infraestructura sólida y barata que permita que cada sensor proporcione unas

medidas y una información detallada de una zona localizada, lo cual puede ser difícil de obtener con la instrumentación tradicional. Los dispositivos son unidades autónomas que constan de un microprocesador, una fuente de energía, un radio transceptor y un elemento sensor. A medida que este tipo de redes sean más utilizadas y gracias también, a los avances tecnológicos constantes en las técnicas con semiconductores, los precios de los dispositivos bajarán a la vez que las prestaciones subirán.

Según lo que presentan (Bahadur Sinha & Dhanalakshmi, 2021):

Las aplicaciones en las que podrán utilizarse se multiplicarán, así como las áreas de investigación científica. La agricultura constituye una de las áreas donde se están implementando las redes inalámbricas de sensores (WSN). Este tipo de tecnología favorece una reducción en el consumo de agua y pesticidas, contribuyendo a la preservación del entorno. Adicionalmente, pueden generar alertas sobre la llegada de heladas, inundaciones, incendios, etc. La agricultura de precisión cubre múltiples prácticas relativas a la gestión de cultivos y cosechas, arboles, flores y plantas, ganado, etc.

Entre las aplicaciones más interesantes se encuentra el control de plagas y enfermedades. Por medio de sensores estratégicamente situados, se pueden monitorizar parámetros tales como la temperatura y la humedad relativa del suelo, la temperatura y humedad de las hojas, la radiación solar, con el fin de detectar rápidamente situaciones adversas y desencadenar los tratamientos apropiado (Urbano, Molano, 2013).

De acuerdo con (Pinto Rios, 2015), las redes inalámbricas de sensores (WSN) son redes compuestas por pequeñas estaciones de cómputo llamadas nodos, estos están equipados con sensores que colaboran en una tarea común, las redes inalámbricas de sensores (WSN) requieren una unidad de control central con su interfaz de usuario, enrutadores y Gateways.

1.6.1. Componentes de una red inalámbrica de sensores (WSN)

De acuerdo con (Villon Valdiviezo , 2009) los componentes o elementos de una red de sensores inalámbricos son:

- **Sensores:** En el caso de los sensores, estos dispositivos se encargan de tomar la información del medio donde se encuentran y las convierten en señales eléctricas que son entregadas a un sistema de control, eventualmente pueden ser de cualquier tipo y permiten medir cualquier tipo de variable que queramos medir (luz, temperatura, viento, presión y humedad entre otras). En la figura 4. podemos observar un sensor de humedad y temperatura.



Figura 4- Modulo sensor de humedad y temperatura (Fuente: iberobotics)

- **Actuadores:** Los actuadores son dispositivos que siguiendo las órdenes del sistema de control realizan una serie de acciones que repercuten o tienen incidencia en el mundo real (Ej. Apertura de una válvula, cierre de una membrana, encendido de un bombillo).

“Un sensor de luz le indica al sistema de control que hay poca luz en los aparcamientos que queremos controlar y el sistema determina que hay que activar una serie de farolas, para conseguirlo activa un contactor

(actuador) que provoca que las farolas se iluminen” Los sensores inalámbricos cuentan con un sensor integrado, electrónica de medición y transmisor de radio. La señal de radio es interpretada por un receptor que convierte la señal inalámbrica en una salida deseada, como una corriente analógica, USB o Ethernet, para compartir datos en una red informática.

- **Nodos intermedios:** O los denominados “Routers”, son dispositivos encargados de extender el alcance de la red, rodear obstáculos a la transmisión sin hilos y proveer rutas alternativas para el tránsito de mensajes que se envían al *Gateway*. En la mayoría de los casos, estos nodos estarán conectados vía digital o analógica a un sensor o actuador haciendo el mismo trabajo de entrada-salida que hace un nodo final además del propio.
- **Gateway:** Este dispositivo es clave en el sistema ya que permite servir de interfaz entre la plataforma de aplicación y los nodos que conforman la red, además de permitir el acceso entre el sistema y los entornos, ya que permite manejar diferentes tipos de protocolos, además posee la capacidad de operar en las capas superiores del modelo OSI (Transporte, sesión presentación y aplicación), permitiendo realizar la conversión de protocolos para interconectar redes con protocolos de alto nivel diferentes. Otra de sus características es que poseen mayor capacidad que un Router y un bridge ya que conectan redes de tipos diferentes y aseguran la compatibilidad al transportar los datos (Villon Valdiviezo , 2009). En la figura 5. podemos observar un Gateway específico para redes inalámbricas.



Figura 5- Gateway WSN -LG308N-915(Fuente: Didácticas electrónicas)

- **Red inalámbrica:** Medio de transmisión de la información, típicamente se basa en el estándar 802.15.4 (ZigBee).
- **La estación base:** Es la encargada de conectarse a los nodos de coordinación o intermedios para recolectar los datos de la red, generalmente está conformada por un PC o un sistema embebido de visualización.

1.6.2. Aspectos básicos en la selección de un sensor inalámbrico

- **Tipo de medida:** Es importante entender lo que se está midiendo. Los transmisores inalámbricos (que incorporan la medición y control de proceso inalámbrico) suelen tener una función única. Los sensores están diseñados específicamente para temperatura, presión, caudal, etc., y se deben seleccionar en consecuencia.

- **Precisión y tiempo de respuesta:** La mayoría de los sensores inalámbricos son tan precisos como sus contrapartes cableadas; sin embargo, las lecturas se transmiten típicamente cada cierta cantidad de segundos para conservar la energía de la batería.
- **Rango:** La gama de sensores inalámbricos es muy variable. Algunos están diseñados para corto alcance, aplicaciones interiores hasta 100 metros, mientras que otros sensores pueden transmitir datos a un receptor situado a varios kilómetros de distancia. Independientemente de la capacidad de los sensores, el rango de una señal inalámbrica está siempre limitada por las obstrucciones. La transmisión a través de máquinas, paredes y estructuras degradan la fuerza de la señal y reducen la capacidad de alcance. Como resultado, el rango de un transmisor localizado en el interior es típicamente significativamente menor que el mismo transmisor que transmite afuera en un campo abierto.
- **Frecuencia:** La radio frecuencia de transmisión también es importante considerarla. Las leyes varían según el país y/o región en relación con las partes del espectro inalámbrico que están disponibles para uso sin licencias específicas. Los productos inalámbricos normalmente operan en 868MHz o 2,4GHz (Wifi), y los usuarios no necesitan una licencia de radio para operar en estas frecuencias. Debido a los requisitos regulatorios, los productos pueden estar disponibles sólo en ciertas regiones (Omega Engineering, 2019).

- **Nodo sensor:** Toman los datos recolectados por el sensor a través de sus puertos de datos y envían la información a la estación base. Un nodo sensor tiene que contar con un procesador de consumo reducido, así como de un transceptor radio con la misma característica, a los que hay que agregar un software optimizado para que requiera pocos recursos, haciendo el consumo aún más restrictivo. Así, pues, un nodo sensor, dotado de una pequeña batería del tipo AAA o botón, puede tener una autonomía de hasta dos años. La vida de la batería se extiende, ya que periódicamente un nodo WSN se enciende y transmite datos alimentándose del radio y posteriormente apagándose para conservar energía. La tecnología de radio WSN es capaz de despertar, encenderse y volver a sleep de manera eficiente. Estos incluyen el radio, batería, microcontrolador, circuito analógico y una interfaz a sensor (Villon Valdiviezo , 2009). En la figura 6. podemos observar los componentes de un nodo sensor.

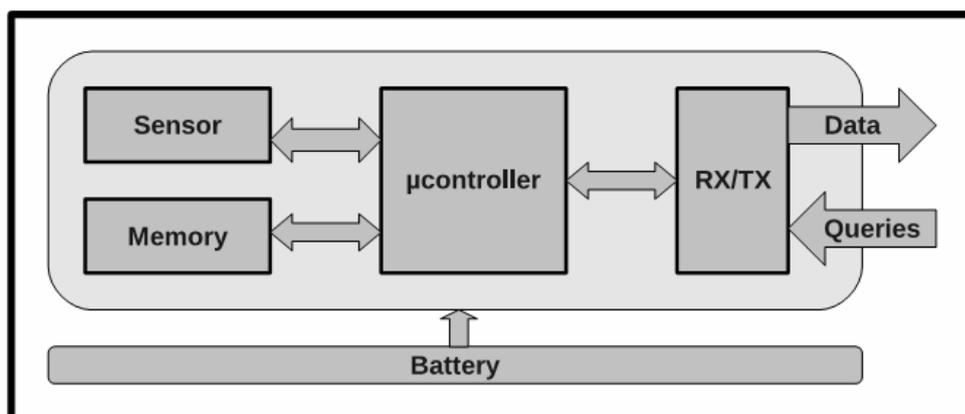


Figura 6-Componentes de un nodo sensor (Fuente: (Calvo García, 2017))

1.7. Tecnologías de comunicación inalámbricas

Podemos encontrar varios estándares o tecnologías para enlazar y comunicar los diferentes componentes que integran una red inalámbrica de sensores, a continuación, haremos una descripción de los principales estándares utilizados actualmente, veamos:

1.7.1. ZigBee

De acuerdo con (Ramirez C, 2012), la Alianza ZigBee (ZigBee Alliance) está formada por una asociación de industrias que trabajan en conjunto para desarrollar normas y productos. ZigBee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de comunicación inalámbrica de alto nivel, para su utilización en aplicaciones de radiodifusión digital de bajo consumo, con base en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (Wireless Personal Área Network o WPAN). La tecnología ZigBee está integrada en una amplia gama de productos y aplicaciones para los consumidores de tipo comercial, industrial y gobierno. La pila de protocolos para el estándar ZigBee la podemos observar en la figura 7.

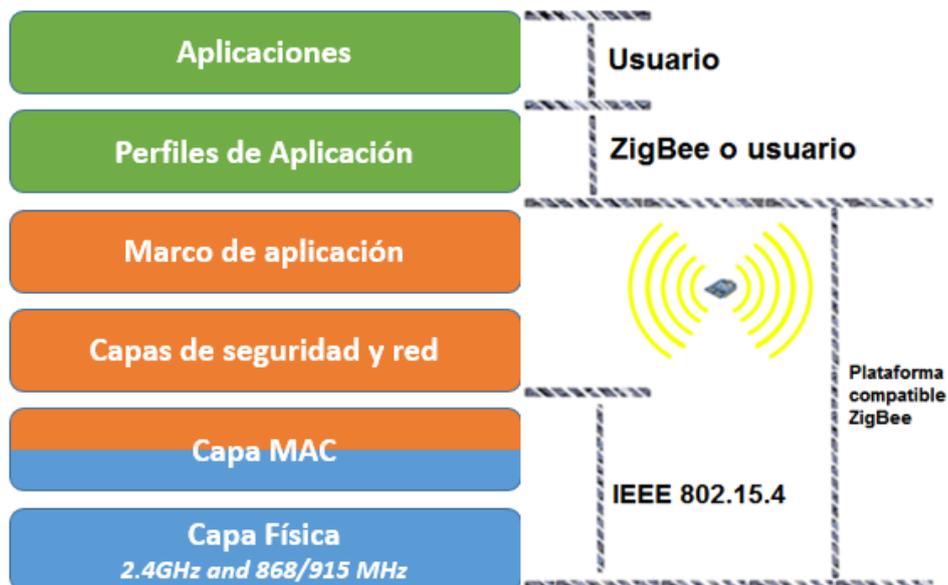


Figura 7-Pila de protocolos para el estándar ZigBee (Fuente: IEEE)

La idea principal sobre la que se ha desarrollado ZigBee ha sido la facilidad a la hora de implementarlo en un sistema de control, o lo que es lo mismo, se busca que de una manera sencilla y rápida se pueda

desarrollar un sistema robusto y duradero fácilmente integrable en una red inalámbrica destinada a la supervisión y el control. Por este motivo, ZigBee pretende cumplir los siguientes requisitos:

- Alta fiabilidad
- Bajo costo
- Bajo consumo
- Es un estándar abierto
- Altamente seguro

En consecuencia, para poder satisfacer todos estos puntos, ZigBee se va a caracterizar por las siguientes características:

- Baja capacidad de transmisión, en torno a 250 Kbps, que nos permitirá desarrollar sistemas de muy bajo costo.
- Protocolo sencillo, pudiendo ser implementado sin ningún tipo de limitación en sistemas microcontroladores de 8 bits.
- Muy bajo consumo energético permitiendo que la fuente de alimentación del sistema pueda durar años.

1.7.2. Wifi

Se trata de un estándar internacional que implementa los niveles inferiores del modelo OSI, en concreto, el nivel físico y el de enlace, sobre un canal inalámbrico. En su concepción se pensó para sustituir a Ethernet (estándar 802.3) en aquellas zonas o puntos donde difícilmente podríamos llegar con un cable. De ahí que los métodos de acceso al medio físico sean similares a los usados en Ethernet. Por otro lado, se trata de un estándar que desde que apareciera en 1997 ha sufrido una constante evolución, encontrando varias versiones de este, veamos (Gutierrez Reina, 2010):

- **802.11a:** En concreto, las redes inalámbricas 802.11a se caracterizan por operar a una frecuencia de 5 GHz y una capacidad de enlace de 54 Mbps.
- **802.11b:** La principal ventaja de este estándar es que ha sido ampliamente usado en todo el mundo para establecer redes inalámbricas por ser el primero que salió de forma comercial. Operan en frecuencia de 2.4GHz y capacidad de transmisión reducida de 11 Mbps.
- **802.11g:** Este estándar surgió como una extensión del 802.11b con el que se pretendía mejorar la capacidad de transmisión del enlace usando el mismo rango de frecuencias, es decir, la banda de 2,4 GHz, aumento de la capacidad de transmisión hasta 54 Mbps.
- **802.11n:** El estándar Wifi n llegó admitiendo las dos bandas de frecuencia que se habían usado hasta ahora. Un dispositivo con Wifi n podía conectarse tanto a redes de 2,4GHz como a redes de 5GHz, y ampliaba el ancho de banda por primera vez desde el desarrollo del estándar. Los 20MHz del inicio se multiplicaban por dos, llegando a los 40Hz, aún con OFDM y 64QAM, pero **elevando la velocidad de transmisión hasta los 600Mbps**, 11 veces más que el máximo permitido por el estándar Wifi g, reemplazado desde entonces.
- **802.11ac:** Es un estándar de transmisión inalámbrica desarrollado por la IEEE Standards Association entre 2008 y 2013, que fue finalmente aprobado a finales de 2013. Gran cantidad de los dispositivos vendidos hoy en día, especialmente smartphones, son compatibles

con Wifi AC. Al igual que Wifi N, Wifi AC es compatible con conexión en la banda de los 5 GHz, mucho menos saturada, con más canales y menos dada a las interferencias. La diferencia es que Wifi AC opera exclusivamente en la franja de los 5 GHz, pero también compatible con los 2,4 GHz consiguiendo una velocidad hasta doce veces más rápida que el estándar anterior.

Este incremento no viene tanto por ninguna tecnología nueva, sino por mejoras construidas sobre lo que ya se tenía en versiones anteriores. Por ejemplo, se aumenta el número de streams MIMO de cuatro a ocho, se aumenta el ancho de banda desde los 20 - 40 Hz hasta los 80 - 160 Hz y se reemplaza la modulación de 64 QAM a 256-QAM (Fernandez, 2018).

1.7.3. LoRa y LoRaWAN

De acuerdo con lo que nos presentan (Pérez & Risc, 2020):

LoRaWAN es un protocolo de comunicación de largo alcance que se utiliza a menudo para diseñar y configurar redes de área amplia de bajo consumo (LPWAN) con un alcance operativo que van desde los 300 metros hasta los 10 kilómetros. Entre los principales protocolos LPWAN, LoRaWAN es uno de los más conocidos y utilizados, dada su arquitectura abierta. A hablar de LoRa y LoRaWAN, se debe especificar que los dos términos se refieren a cosas diferentes: LoRaWAN es un protocolo cuya capa PHY se basa en la modulación LoRa mientras que la capa de Control de Acceso al Medio (MAC) es una arquitectura de red abierta regulada por LoRa Alliance. LoRa en cambio, es una modulación patentada basada en Chirp Spread Spectrum (CSS) que se refiere a la capa física. El protocolo LoRa también está patentado por Semtech Corporation, que es el único productor de chips transceptores LoRa. Por lo tanto, en la pila de protocolos OSI,

LoRaWAN (Capa de red) se basa en LoRa (Capa física), en la figura 8. Podemos observar la pila del protocolo de LoRa y LoRaWAN.

Otra de las diferencias entre LoRa y LoRaWAN es la topología de red, ya que LoRa solo permite enlaces punto a punto, mientras que LoRaWAN, dada su naturaleza de capas de red, define todas las reglas necesarias para crear una topología de red de múltiples estrellas compuesta por muchos nodos finales LoRaWAN y Gateways (pasarelas).



Figura 8-Pila de protocolos LoRaWAN (Fuente: (Pérez & Risc, 2020))

1.7.4. Protocolo de Internet de las cosas de banda estrecha (NB-IoT)

Según lo presentado por (Castro López, 2021):

El Internet de las cosas de banda estrecha (NB-IoT) es un protocolo LPWAN creado por 3GPP que se centra en la cobertura en interiores para aplicaciones de IoT de bajo consumo y bajo costo. Como LTE-M, utiliza un subconjunto de las redes LTE existentes administradas por muchos operadores, para garantizar una alta densidad de conexión en una amplia región. NB-IoT utiliza modulación OFDM para comunicaciones de enlace descendente y SC-FDMA para comunicaciones de enlace ascendente, mientras que el ancho de banda está limitado a una única banda estrecha de hasta 200 kHz. Dado su alto presupuesto de enlace, se utiliza principalmente para aplicaciones de IoT urbanas con dispositivos alimentados por batería (por ejemplo, medidores inteligentes).

Dada su banda muy estrecha, generalmente se asigna dentro de las bandas de guarda de las redes LTE existentes utilizando uno o más bloques de recursos de 180 kHz cada uno. De lo contrario, se puede implementar como red independiente como resultado de una o más operaciones de portadora de frecuencia GSM re-farming operation. Es un *protocolo económico de implementar*, ya que se relaciona con la infraestructura LTE existente de las estaciones base de radio. La implementación del estándar requiere solo una actualización de software de la infraestructura.

Comparado con LoRaWAN, tiene un *costo por nodo más alto*, ya que cada nodo necesita una suscripción con un Proveedor de Servicios de Internet, pero la cobertura general debería ser mayor, permitiendo también una alta densidad de dispositivos por kilómetro cuadrado. Tiene un consumo de energía comparable a LoRaWAN, lo que permite la creación de dispositivos alimentados por baterías que pueden durar algunos años. Se cree que NB-IoT es una gran alternativa a LoRaWAN para aplicaciones de Internet de las cosas de largo alcance, y es mucho mejor que el GSM antiguo pero que aún se usa, dada su mayor eficiencia y menores costos en nodos finales.

1.7.5. Wi-Fi ah (HaLow)

Según lo que nos presenta (Meneses Vidal & Urrutia Quirá, 2021), Wi-Fi HaLow es un nuevo estándar de Wi-Fi anunciado en 2016. Casi todos los estándares de Wi-Fi (IEEE 802.11 a / b / g / n / ac) funcionan a 2,4 GHz o 5 GHz, lo que les permite alcanzar una velocidad de datos relativamente alta pero menor sensibilidad en un amplio rango de funcionamiento con obstáculos y paredes. Por lo tanto, estas versiones de Wi-Fi a menudo se limitan a redes de área local inalámbricas (WLAN) dentro de un rango operativo por debajo de los 50 m. Wi-Fi HaLow resolvió el problema de alcance limitado de los estándares típicos de Wi-Fi utilizando 900 MHz como frecuencia portadora, que puede atravesar paredes fácilmente en comparación con 5 y 2,4 GHz. Además, tiene

un menor consumo de energía en comparación con los estándares Wi-Fi más utilizados. Dada su baja potencia y su rango operativo más amplio, que puede alcanzar hasta 1 kilómetro, podría ser un estándar interesante para las aplicaciones de IoT de LPWAN. Sin embargo, teniendo en cuenta la necesidad de nuevos equipos de radio, ya que utiliza una frecuencia completamente diferente a las otras versiones, en realidad rara vez se utiliza. HaLow se lanzó en 2016, pero en realidad casi no hay productos en el mercado que utilicen este estándar. Esto podría depender en parte de la falta de un estándar global, pero probablemente también se deba al hecho de que existen tecnologías competidoras en el mercado que abordan mejor las necesidades de IoT. En la figura 9. Se puede apreciar el rango de las diferentes frecuencias del protocolo en mención.

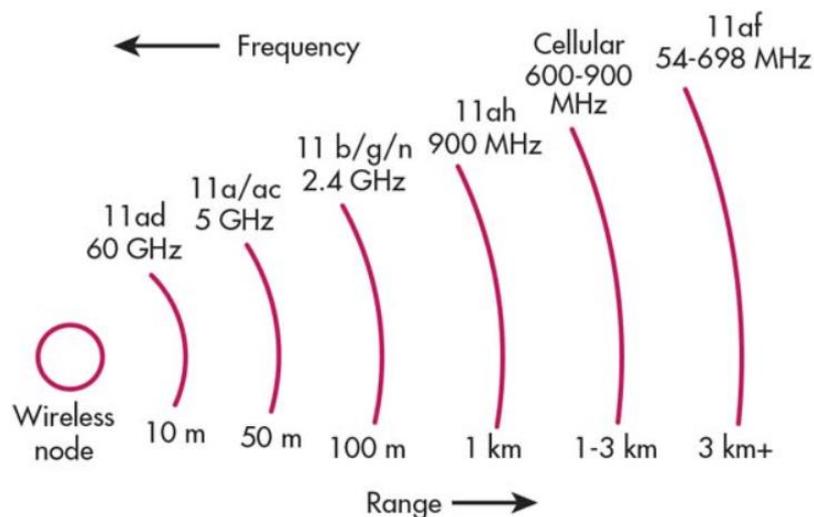


Figura 9-Rangos y frecuencias del Wifi-Halow(Fuente: (Meneses Vidal & Urrutia Quirá, 2021))

1.7.6. Bluetooth

Este corresponde con un estándar de comunicación inalámbrico basado en radiofrecuencia, de bajo costo y consumo energético, originariamente salió al mercado en 1994, desarrollado por la firma sueca Ericsson como un mecanismo alternativo que permitiese sustituir paulatinamente los enlaces cableados de diversos periféricos.

Como se ha mencionado anteriormente, Bluetooth nace de la mano de Ericsson en 1994 junto con otras grandes compañías del sector tecnológico como son Intel, IBM, Nokia y Toshiba. Este conjunto de multinacionales constituyó en 1998 el Bluetooth Special Interest Group, organismo que se encarga de gestionar y desarrollar las distintas versiones del núcleo de Bluetooth. Más tarde, en 1999, se unirían empresas de la talla de Microsoft, 3Com o Agilent. El trabajo conjunto de los diferentes miembros del Bluetooth SIG permitió una rápida aceptación por parte de los fabricantes; así como la compatibilidad entre dispositivos de los diferentes fabricantes. Este hecho, provocó que las redes Wireless Personal Area Network (WPAN) basadas en Bluetooth estuviesen reguladas por el IEEE bajo la denominación 802.15. Las principales características de esta forma de comunicación son:

- Opera en la banda libre de los 2,4 GHz por lo que no necesitamos adquirir ninguna licencia de emisión.
- Tiene una capacidad máxima de transmisión de hasta 3 Mbps.
- Implementa diversos mecanismos de ahorro energético de forma que el dispositivo no siempre va a consumir la misma potencia con el consiguiente ahorro energético en la batería del dispositivo.
- Posee un precio económico que permite implementarlo en casi cualquier dispositivo sin encarecerlo desmesuradamente.
- Alcance de hasta 100 metros en función de la potencia de emisión que posea el transmisor Bluetooth.
- No obstante, se corresponde con protocolo de comunicaciones cuyo uso queda restringido para enlaces punto a punto, puesto que el sistema de establecimiento de conexiones hace difícil poder realizar redes punto multipunto. Esto se debe a que en un principio estaba

destinado para sustituir a los enlaces establecidos mediante un cable físico (Gutierrez Reina, 2010).

1.8. Arquitecturas usadas en redes inalámbricas de sensores (WSN)

Es importante el poder realizar un adecuado diseño de la red con el objetivo de poder reutilizar ciertos componentes en un futuro desarrollo y poder garantizar el adecuado funcionamiento y cobertura de cada uno de los componentes de la red, además de la compatibilidad entre cada uno de los componentes de hardware y software. Básicamente podemos encontrar dos tipos de arquitecturas, veamos sus principales características y funcionamiento en su parte básica:

De acuerdo con (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam , & Cayirci, 2002), el diseño de la arquitectura de una red de Sensores se ve influenciado por diversos factores tales como la tolerancia a fallas, la escalabilidad y el consumo de energía, por lo tanto, existen entonces dos categorías para el diseño de la arquitectura de una red: por rango geográfico de cobertura y por arquitecturas de nodos en un conjunto con jefe y subalternos, veamos:

- **Rango geográfico de cobertura:** Este primer tipo de arquitectura cuenta con un nodo central, y diversos rangos de alcance que se le denominan saltos (el primer salto es el primer rango de cobertura dentro del cual se encuentra el nodo o los nodos sensores más cercanos al nodo central), también es conocida como arquitectura

centralizada ya que los nodos se comunican únicamente con el nodo central.

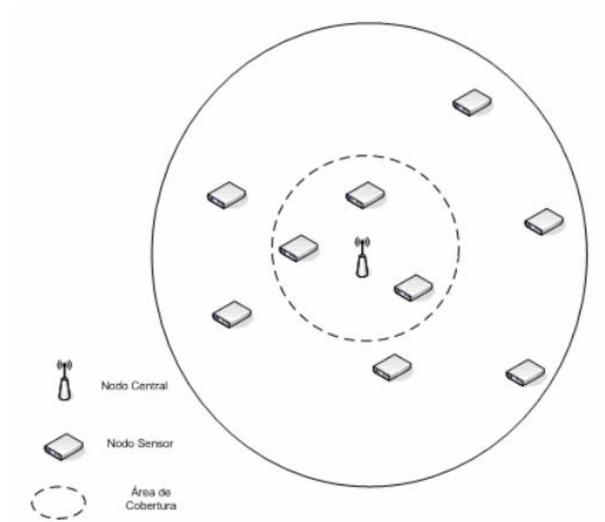


Figura 10-Arquitectura Centralizada o por rangos (Fuente: (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam , & Cayirci, 2002))

Como se observa en la figura 10. se tiene una red de sensores desplegada en forma aleatoria. El nodo central, al iniciar muestra en un rango geográfico determinado qué elementos conforman la red. Por lo que, en el primer rango, se descubren 3 nodos sensores. De manera inmediata se le da una identificación a cada nodo, que corresponde a una dirección única de acuerdo con el número de nodos totales en la red, para tenerlos localizados (Tapia Zurita, 2006).

- **Arquitectura de conjunto o distribuida:** Esta arquitectura permite agregar información a medida que ésta pasa de nodo en nodo. Cuando los nodos recopilan la información de interés, el *clúster-head* (jefe de conjunto) la reúne y la envía a un nodo específico, dependiendo de la necesidad de información requerida por dicho nodo. Este tipo de arquitectura se basa en la creación de conjuntos o arreglos de nodos, gobernados mediante jefes de conjuntos llamados comúnmente *clúster heads*. Los nodos en cada conjunto, tiene la función de intercambiar mensajes con sus respectivos jefes de conjunto (siguen siendo nodos), los cuales en general son el punto de acceso para que los nodos dentro del conjunto se conecten hacia la red alámbrica. (Tapia Zurita, 2006). Podemos observar este tipo de arquitectura en la figura 11. De acuerdo con (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam , & Cayirci, 2002).

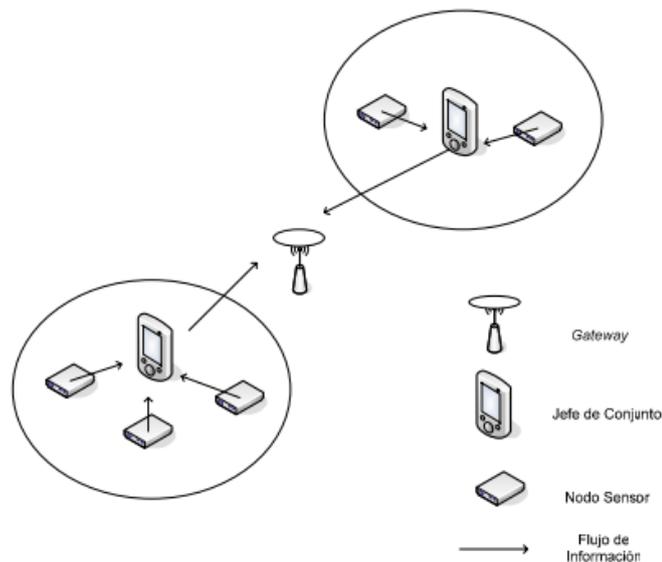


Figura 11-Arquitectura de conjunto o distribuida (Fuente: (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam , & Cayirci, 2002))

1.9. Topologías físicas en las redes de sensores inalámbricos (WSN)

La palabra topología en redes toma dos posibles aspectos: La física referente a como se distribuyen los diferentes dispositivos a nivel hardware que componen la red WSN, por otra parte, la lógica se refiere a

como a la forma en que se transmiten los datos a través de la red. Es por ello que es tan importante el definir las topologías físicas y lógicas acorde con la solución a implementar. Además de la clásica topología de red mallada de WSN, existen dos topologías. La topología de redes en estrella, donde los nodos inalámbricos se comunican con un dispositivo de pasarela (Gateway) que hace de puente de comunicación con una red cableada.

Una solución intermedia emergente y común de WSN es tener dispositivos encaminadores (Routers), que comunican con la pasarela. Los sensores sólo necesitan establecer la comunicación punto a punto con los routers y, por consiguiente, pueden seguir siendo sencillos y de baja potencia, al tiempo que se mejora el rango y la redundancia de la propia red (Gutierrez Reina, 2010). En la figura 12. podemos observar los diferentes tipos de topologías utilizadas en las redes inalámbricas de sensores (WSN).

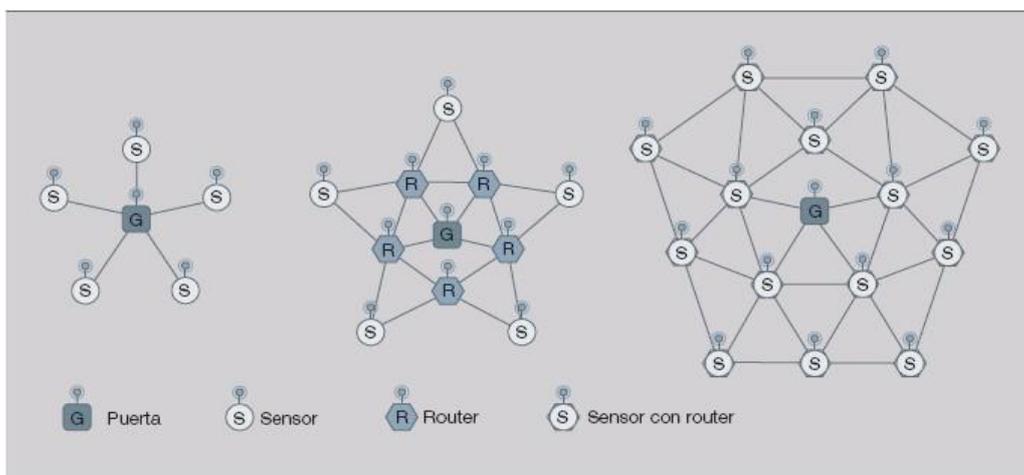


Figura 12-Diferentes tipos de topologías en redes de sensores inalámbricas (Fuente: (Fernández Barcell, 2019))

El estándar IEEE 802.15.4 define dos tipos de dispositivos: el Full Function Device (FFD) y el Reduced Function Device (RFD). El FFD contiene el conjunto completo de los servicios MAC y puede operar como coordinador PAN (Personal Área Network) o como un simple dispositivo de red. El RFD contiene un conjunto reducido de servicios MAC y puede operar únicamente como un dispositivo de red (Urbano, Molano, 2013).

Este estándar asume el uso de las topologías estrella, árbol y punto a punto, y proporciona la estructura para la programación en la capa de aplicación. Su objetivo son las aplicaciones para redes inalámbricas que requieren comunicaciones seguras y estables con baja tasa de envío de datos y reducido consumo energético (Ramirez C, 2012). Podemos observar las topologías propuestas para el estándar ZigBee en la figura 13.

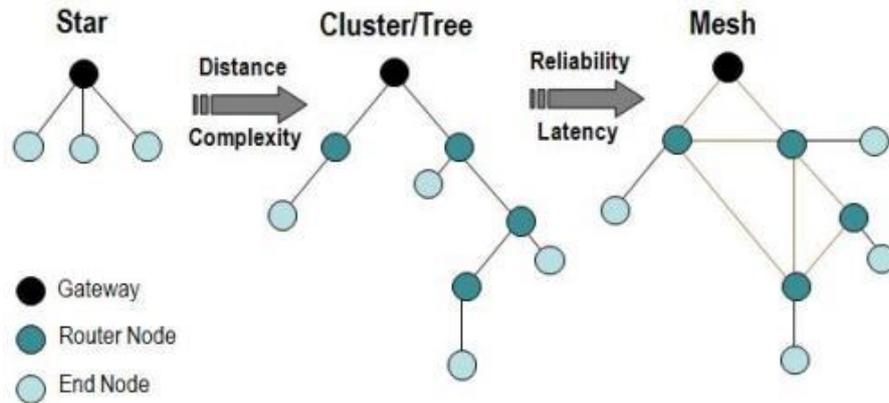


Figura 13- Topologías propuestas para el estándar ZigBee (Fuente: (Fernández Barcell, 2019))

En la tabla 1. se presentan las ventajas y desventajas de cada una de las topologías descritas anteriormente:

Tabla 1- Ventajas y desventajas de las topologías WSN

Topología	Ventajas	Desventajas
Estrella	<ul style="list-style-type: none"> -Gasto energético Homogéneo - Sencillez y rapidez en el desarrollo. - Fácil de desplegar. - Robustez de la red - Baja Latencia 	<ul style="list-style-type: none"> - No siempre es la más funcional, de acuerdo con la aplicación. - Escalabilidad baja, posible aumento en el número de colisiones al aumentar el número de nodos. -Si falla el nodo central cae la red.

Malla	<ul style="list-style-type: none"> -Menor costos de instalación, al no necesitar nodos intermedios (Routers) para alcanzar escalabilidad. - Si fallan uno o varios nodos la red sigue funcionando, ya que existen rutas alternativas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Alta complejidad del sistema. - Alta cantidad de colisiones. - Aumento de la latencia en la red. - Falencia de pruebas de laboratorio e implantación real.
Árbol	<ul style="list-style-type: none"> -Ventajas de la topología Árbol. - Alta escalabilidad. - Reducción en el % de colisiones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se deben incluir más nodos intermedios (Routers), lo que encarece la solución final. - Puede caer una parte significativa de la red al caer un nodo intermedio. - Costoso y difícil de desarrollar el algoritmo de enrutamiento dinámico. - Baja fiabilidad de los algoritmos de enrutamiento.

(Fuente: Propia)

1.10. El café colombiano

De acuerdo con lo que nos presenta (Machado, 2001):

No son pocos los aportes al desarrollo económico, social e institucional del cultivo del café en Colombia. En una perspectiva histórica, el café ha sido el único producto que ha logrado estabilizar el crecimiento económico a través de las exportaciones pese a las recurrentes fluctuaciones de precios en el mercado internacional.

Ayudó, de manera significativa, a conformar un mercado interno irrigando ingresos y generando empleo. Integró económicamente las regiones con apertura de vías de transporte terrestre y el estímulo al desarrollo de los ferrocarriles, y dio ocupación a una ingente masa de campesinos y jornaleros en una economía agraria de vertiente que sostuvo el modelo primario-exportador durante buena parte del siglo.

De otra parte, fue alrededor de este producto que se generó en el país, y en particular, en el sector agropecuario uno de los desarrollos institucionales de mayor impacto en las regiones cafeteras, alrededor de la Federación Nacional de Cafeteros y el conjunto de organizaciones de prestación de servicios a la industria cafetera que se dejaron sentir en todos los rincones y veredas cafeteras.

El café también dio origen a la que tal vez ha sido la agroindustria rural más importante en términos de ingresos, empleo, estabilidad: el procesamiento del grano en la finca (lavado, despulpada y secado y en algunos casos trilla). Finalmente, el café logró articular de manera más estable a la economía con el mercado externo; sirviendo de alguna manera de instancia de aprendizaje y conocimiento para muchos comerciantes y empresarios que después incursionarían en el sector industrial.

1.10.1. Origen del café en nuestro país

Según lo que nos presenta (Bejarano, 1980),

“No existe plena certeza sobre las condiciones en que llegó el café a Colombia. Los indicios históricos señalan que los jesuitas trajeron semillas del grano a la Nueva Granada hacia 1730, pero existen distintas versiones al respecto. La tradición dice que las semillas de café llegaron por el oriente del país, portadas por algún viajero desde las Guayanas y a través de Venezuela. El testimonio escrito más antiguo de la presencia del cafeto en Colombia se le atribuye al sacerdote jesuita José Gumilla. En su libro *El Orinoco Ilustrado* (1730) registró su

presencia en la misión de Santa Teresa de Tabajé, próxima a la desembocadura del río Meta en el Orinoco. El segundo testimonio escrito pertenece al arzobispo- virrey Caballero y Góngora (1787) quien en un informe a las autoridades españolas registró su cultivo en regiones cercanas a Girón (Santander) y a Muzo (Boyacá).

Los primeros cultivos de café crecieron en la zona oriental del país. En 1835 tuvo lugar la primera producción comercial y los registros muestran que los primeros 2.560 sacos se exportaron desde la aduana de Cúcuta, en la frontera con Venezuela. De acuerdo con testimonios de la época se le atribuye a Francisco Romero, un sacerdote que imponía durante la confesión a los feligreses de la población de Salazar de las Palmas la penitencia de sembrar café, un gran impulso en la propagación del cultivo del grano en esta zona del país. Estas semillas habrían permitido la presencia de café en los departamentos de Santander y Norte de Santander, en el nororiente del país, con su consecuente propagación, a partir de 1850, hacia el centro y el occidente a través de Cundinamarca, Antioquia y la zona del antiguo Caldas.

No obstante, esos desarrollos tempranos, la consolidación del café como producto de exportación en Colombia sólo se dio a partir de la segunda mitad del siglo XIX. La gran expansión que tuvo la economía mundial en ese periodo hizo que los hacendados colombianos encontraran atractivas oportunidades en el mercado internacional. Poco a poco Estados Unidos se consolidaba como el consumidor más importante de café en el mundo, mientras Alemania y Francia se convertían en los mercados más interesantes de Europa.

Los grandes hacendados colombianos ya habían tratado de aprovechar las oportunidades que ofrecía la expansión de la economía internacional. Entre 1850 y 1857 se dio en el país un auge exportador de tabaco y quina, y posteriormente al cuero y al ganado en pie. Esos

tempranos esfuerzos de exportación de productos agrícolas colombianos resultaron tremendamente frágiles, pues respondían a una búsqueda de rentabilidad derivada de los altos precios internacionales, más que a la intención de crear una base sólida y diversificada de ventas al exterior. Cuando terminaba la bonanza de precios, la producción del respectivo sector entraba en una fase de decadencia, lo que daba al traste con cualquier intento de consolidación empresarial.

De acuerdo con lo que nos expone (Machado, 2001):

El café también tuvo una expansión especulativa de este corte, generado por la coyuntura de los buenos precios internacionales entre finales de los años setenta del siglo XIX y comienzos del siglo XX. En este periodo la producción anual de café pasó de unos 60.000 sacos de 60 kilos (la unidad de medida internacional para la comercialización del café es un saco de 60 kilos de café verde) a cerca de 600.000. Esta expansión se dio principalmente en las grandes haciendas de los departamentos de Santander y Cundinamarca, cuyos propietarios tenían acceso al mercado bancario internacional para financiar sus proyectos. Por eso no es extraño que a finales del siglo XIX esas dos regiones respondieran por más del 80% de la producción nacional.

Con la caída de los precios internacionales, que se registró en la transición del siglo XIX al siglo XX, la rentabilidad de las grandes haciendas se fue al piso. Como si eso fuera poco, la Guerra de los Mil Días, que tuvo lugar en los primeros años del nuevo siglo, les dio otro duro golpe a los grandes hacendados, ya que les imposibilitó mantener las plantaciones en buenas condiciones; esta circunstancia, sumada a hecho de que estos productores se habían endeudado en el exterior para desarrollar sus cultivos, los arruinó. Las haciendas

cafeteras de Santander y Norte de Santander entraron en crisis, y las de Cundinamarca y Antioquia se estancaron.

La crisis de las grandes haciendas trajo consigo uno de los cambios más significativos de la caficultura colombiana. Desde 1875 se había comenzado a ampliar el número de pequeños productores de café en Santander, en algunas zonas de Antioquia y en la zona del denominado Viejo Caldas. En las primeras décadas del siglo XX ya se había consolidado un novedoso modelo de desarrollo exportador cafetero basado en la economía campesina, impulsado por la migración interna y la colonización de nuevas tierras en el centro y occidente del país, principalmente en los departamentos de Antioquia, Caldas, Valle y el Norte del Tolima. La expansión de esta nueva caficultura, sumada a la crisis de las grandes haciendas, hizo que a principios del siglo XX el occidente colombiano tomara la delantera en el desarrollo cafetero del país.

Esta transformación resultó muy favorable para los propietarios de pequeñas parcelas que estaban incursionando en el sector. El cultivo del café era una opción muy atractiva para los campesinos, en la medida en que ofrecía la posibilidad de hacer un uso permanente e intensivo de la tierra. Bajo el esquema productivo de la agricultura tradicional, basado en el procedimiento de roza y quema, la tierra permanecía improductiva durante un largo período de tiempo. En cambio, el café ofrecía la posibilidad de tener una agricultura intensiva, sin mayores requerimientos técnicos y sin sacrificar el cultivo de productos para la subsistencia, generando las condiciones para el crecimiento de una nueva caficultura, dominada por pequeños propietarios.

Aunque los nuevos cafeteros campesinos demostraron tener una gran capacidad para crecer al margen de las coyunturas de los precios internacionales, Colombia no tuvo un gran dinamismo relativo en el

mercado mundial en este periodo. Como se observa en el siguiente gráfico, en el período entre 1905 y 1935 la industria del café en Colombia creció de una forma dinámica, gracias a la visión de política de largo plazo derivada de la creación de la Federación Nacional de Cafeteros (FNC) en 1927.

La unión de campesinos y pequeños productores en torno a la Federación les ha permitido afrontar retos comunes de logística y comercialización que individualmente no hubiesen podido sortear. Con el tiempo, y a través de la investigación en Cenicafé, fundado en 1938, y del Servicio de Extensión agrícola, se desarrollaron sistemas de cultivo y de trazabilidad que permitieron diferenciar al producto y garantizar su calidad. Actualmente la tierra del café en Colombia comprende todas las cordilleras y zonas montañosas del país, generando ingresos a más de 563,000 familias productoras del grano.

1.10.2. El café y su entorno

El café es uno de los cultivos emblemáticos de nuestro país y genera un producto por el cual somos reconocidos a nivel internacional como uno de los granos más suaves del mundo entero. Por tal motivo es interesante el poder conocer un poco sobre la composición del café y como se desarrolla su cultivo en los entornos agrícolas del país.

“En Colombia, así como en Centroamérica, Brasil, Kenia, Etiopía, Asia e India, se cultiva la especie Arábica; mientras que en África, Brasil e Indonesia se cultiva la especie Canephora en su variedad Robusta. En Colombia Cenicafé desarrolló la Variedad Castillo®, recomendada por su excelente comportamiento frente a la roya y otras enfermedades” (Servicio nacional de aprendizaje (SENA), 2014).

Según (Cafe de Colombia, 2010), Se conoce como cafeto o planta productora de café a un arbusto que se da en la región tropical de la tierra perteneciente a la familia de las rubiáceas. Abarca 500 géneros y 8.000 especies. Uno de esos géneros es el Coffea, que lo constituyen árboles,

arbustos, y bejucos, y comprende unas 10 especies civilizadas, es decir, cultivadas por el hombre y 50 especies silvestres. Otra de Las especies más cultivadas son la Arábica y la Canephora, esta última en su variedad Robusta.

“Los granos de café o semillas están contenidos en el fruto del arbusto, los cuales en estado de madurez toman un color rojizo y se les denomina "cereza". Cada una de ellas consiste en una piel exterior que envuelve una pulpa dulce. El fruto del cafeto cuyas semillas tostadas y molidas se utilizan para el consumo humano está compuesto, de afuera hacia dentro, por los siguientes componentes:

- Una cubierta exterior llamada pulpa.
- Una sustancia gelatinosa azucarada que recibe el nombre de mucílago.
- Una cubierta dura que se denomina pergamino o cáscara.
- Una cubierta más delgada y fina llamada película.

Y finalmente el grano o almendra que es la parte del fruto que, una vez tostada y molida, se utiliza para la producción de la bebida del café”, este puede ser apreciado en la figura 14. (Cafe de Colombia, 2010)

“Los cafetos son árboles o arbustos reconocibles por sus hojas simples, opuestas y con estípulas frecuentemente bien desarrolladas. Sus flores

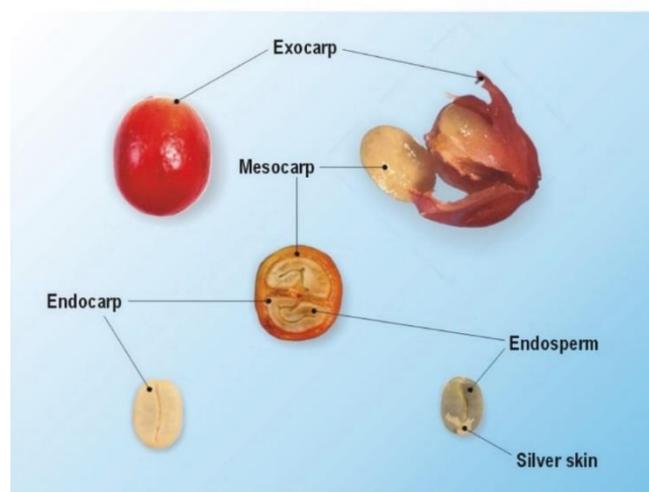


Figura 14-Composicion interna del grano de café (Fuente: (Café de Colombia, 2010))

son pequeñas, tubulosas y blancas. El fruto es una drupa con dos nueces y con pulpa azucarada.

La taxonomía del café, su botánica y fisiología, y las características de la planta, como su raíz, tallo y ramas, hojas, flores, frutos y semillas son particulares y son objeto de análisis e investigación particular por centros especializados como Cenicafé” (Cafe de Colombia, 2010).

1.10.3. Taxonomía del café

En este apartado pretendemos presentar un breve análisis de cada uno de los componentes de un árbol de café, desglosando su raíz, tallo y ramas, la hoja, la flor, el fruto y por último la semilla, esto en aras de conocer más detalladamente su constitución y botánica, veamos:

Según (Cafe de Colombia, 2010), el café pertenece a la familia de las Rubiáceas y al género Coffea. Existen numerosas especies de cafeto y diferentes variedades de cada especie. Las especies más importantes comercialmente pertenecientes al género Coffea, son conocidas como Coffea arábica Linneo (conocida como Arábica o Arábiga) y Coffea canephora Pierre Ex Froehner (conocida como Robusta).

Botánica y fisiología

El cafeto pertenece a la familia de las rubiáceas. Esta familia tiene características fáciles de reconocer:

- Las hojas salen en pares.
- No tienen divisiones y los bordes son lisos.
- En las flores están los órganos de los dos sexos, son flores hermafroditas.
- Generalmente cada fruto tiene dos semillas.

La Raíz

Según lo que nos presentan (Arcila P. , Farfán V, Moreno B, Salazar G, & HIncapie, 2007):

Es un órgano de mucha importancia; a través de ella la planta toma el agua y los nutrientes necesarios para su crecimiento y producción. En la raíz se acumulan sustancias que más tarde van a alimentar las hojas y los frutos, y que hacen que el árbol permanezca anclado y en su sitio. El cafeto tiene una raíz principal que penetra verticalmente en suelos sin limitaciones físicas, hasta profundidades de 50 centímetros. De esta raíz salen otras raíces gruesas que se extienden horizontalmente y sirven de soporte a las raíces delgadas o absorbentes, llamadas también raicillas. Las raíces absorbentes del cafeto son bastante superficiales y se encargan de tomar el agua y los nutrientes minerales. En los primeros diez centímetros de profundidad del suelo se encuentran un poco más de la mitad de estas raicillas y el 86% en los primeros 30 centímetros.

Tallos y ramas



Figura 15- Tallos y ramas de un árbol de café (Fuente: (Café de Colombia, 2010))

“Los aspectos más sobresalientes de la morfología aérea de la planta del café tienen que ver con dos tipos de brotes:

- Ortotrópicos, que crecen verticalmente y comprenden el tallo principal y los chupones.
- Plagiotrópicos, que crecen horizontalmente y comprenden las ramas primarias, secundarias y terciarias.

En los nudos del tallo principal se encuentran varios tipos de yemas:

- Las que dan origen a las ramas primarias.
- Los chupones que son el potencial de brote de la zoca y permanecen mientras se conserve el cogollo del tallo principal.
- Otras yemas que forman flores.

Las ramas primarias no se pueden renovar. Al perderse una rama primaria, el cafeto pierde una zona muy importante para la producción de frutos. En el cafeto la cosecha se produce casi en su totalidad en las ramas nuevas. A mayor número de ramas nuevas, mayor será la cosecha futura” (Arcila P. , Farfán V, Moreno B, Salazar G, & Hincapie, 2007).

La hoja



Figura 16- Una hoja de un árbol de café (Fuente: (Café de Colombia, 2010))

De acuerdo con un estudio de (Cafe de Colombia, 2010), la hoja es un órgano fundamental en la planta porque en ella se realizan los procesos de fotosíntesis, transpiración y respiración. En las ramas, un par de hojas aparece cada 15 o 20 días aproximadamente. Independiente de la densidad de siembra, un cafeto de un año tiene 440 hojas en promedio. A partir del segundo año, la densidad de siembra, al igual que la condición de sol o sombra, influyen notablemente en la cantidad de hojas por planta.

Las hojas duran en un cafetal alrededor de un año. La duración de las hojas se reduce con la sequía, con las altas temperaturas y con una mala nutrición.

Se puede aumentar el crecimiento de ramas y hojas con:

- Aplicación de fertilizantes.
- Las podas.
- Desyerbas.
- Aumento de la luz en el cafetal.

La flor



Figura 17- Flor de un árbol de café (Fuente: (Café de Colombia, 2010))

Según lo que nos presenta (Café de Colombia, 2010):

Las flores son los órganos destinados a reproducir las plantas. Las flores dan origen a los frutos; sin flores no hay cosechas. Las flores del cafeto aparecen en los nudos de las ramas, hacia la base de las hojas, en grupos de 4 o más, sobre un tallito muy corto llamado glomérulo. En la base de cada hoja hay de 3 a 5 glomérulos.

La cantidad de flores presentes en un momento determinado depende de la cantidad de nudos formados previamente en cada rama. El proceso de formación de las flores del cafeto puede durar de 4 a 5 meses, donde se presentan las siguientes etapas:

- Iniciación floral y diferenciación.
- Un corto período de latencia.
- Renovación rápida del crecimiento del botón floral.
- Apertura de las yemas.

La fase final del desarrollo de la flor está condicionada por la suspensión del período de latencia y esto sólo se da por la presencia de lluvia después de un período prolongado de verano, caída repentina de la temperatura o aun, neblina intensa al final de un periodo seco. La fecundación de la flor ocurre cuando un grano de polen se pone en contacto con el óvulo. Si éste recibe el polen de la misma flor, se da la autofecundación. En el cafeto la autofecundación es un poco mayor del 90%”.

El conocimiento del proceso de la floración del cafeto le permite al caficultor establecer:

- La distribución de la cosecha.
- Estimar las necesidades de mano de obra para la recolección.
- Planificar las prácticas culturales al igual que el manejo de plagas y enfermedades.
- Estimar el flujo de ingresos a través del año e identificar las épocas y el origen de problemas que afectan la calidad de la cosecha.

El fruto



Figura 18-Fruto del café (Fuente: (Mundo cafeto, 2020))

Según lo expuesto por (Arcila P. , Farfán V, Moreno B, Salazar G, & Hincapie, 2007), del resultado de la unión del grano de polen con el óvulo se forman el fruto y las semillas. En el desarrollo del fruto del café se pueden distinguir cuatro etapas, en la figura 19, podemos apreciar la relación peso vs. Días de floración.

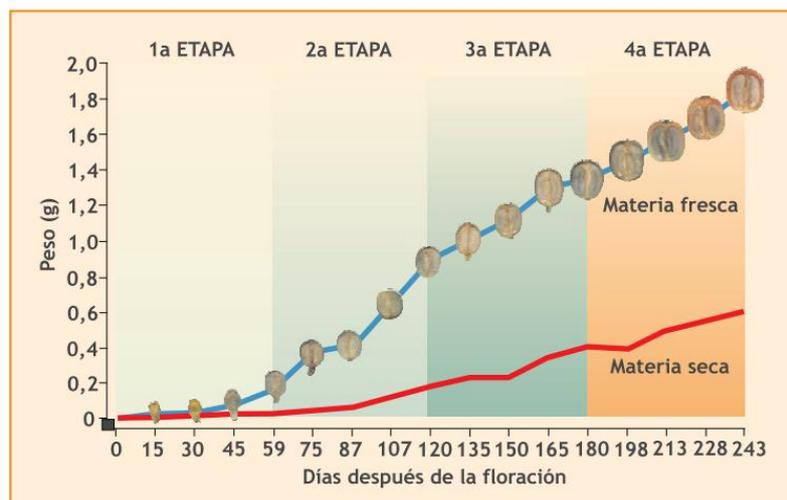


Figura 19 -Etapas del desarrollo del fruto del café ((Fuente: Arcila y Jaramillo, 2003))

Primera etapa:

- Es una etapa donde hay muy poco crecimiento en tamaño y peso del fruto.
- Va desde la fecundación hasta la sexta semana.

Segunda etapa:

- En esta etapa el fruto crece rápidamente en peso y volumen.
- Se necesita el agua, de lo contrario el grano se queda pequeño, hay secamiento, caída de frutos y se presenta el "grano negro".
- También es denominada como la etapa de formación del grano lechoso.
- Va desde la sexta a la décima sexta semana después de la fecundación.

Tercera etapa:

- El crecimiento exterior del fruto casi no se nota.
- Se da una gran demanda de nutrientes.
- Se endurece la almendra.
- Si falta agua, el fruto no termina de formarse bien y se produce el grano averanado.
- Va de la décima sexta a la vigésima séptima semana después de la fecundación.

Cuarta etapa:

- Es la época de maduración o cambio de color del fruto.
- Va de la vigésima- séptima a la trigésima- segunda semanas después de la fecundación.

La semilla



Figura 20- Semilla o grano de café (Fuente: (Café de Colombia, 2010))

De acuerdo con lo expuesto por (Café de Colombia, 2010), el grano se compone de dos partes: Almendra y Pergamino.

La Almendra es dura y de color verdoso, está cubierta de una película plateada cuando está seca, y del embrión que es una planta muy pequeña que está dentro de la almendra y se alimenta de ella en los primeros meses de desarrollo de la planta. La parte roja o amarilla del fruto maduro se conoce con el nombre de pulpa. Protegiendo la semilla, hay una cubierta llamada pergamino que está cubierta de una sustancia azucarada que es el "mucílago" o "baba". Al café seco se le denomina *pergamino*.

1.10.4. El café y sus variables agroambientales

En este apartado pretendemos dar a conocer una serie de variables de tipo agroambiental que de un modo u otro inciden en la siembra y cultivo del café y posteriormente en su futura producción, veamos cada una de ellas a continuación:

Temperatura

Según lo que nos presentan (Arcila P. , Farfán V, Moreno B, Salazar G, & HIncapie, 2007):

- La zona óptima para el cultivo del café arábico se encuentra entre 19 y 21.5 grados centígrados.
- En climas fríos, donde la temperatura media es menor de 19 grados centígrados, las variedades de café se desarrollan menos, su producción es menor y la cosecha se distribuye a lo largo del año.
- En climas calientes, donde la temperatura media es mayor de 21.5 grados centígrados, la vida productiva del cafeto es más corta, la cosecha más temprana y concentrada. El ataque de la roya es más severo y se incrementan plagas como la broca y el minador.

Lluvias

- Se considera apropiada para el cultivo una cantidad de lluvia comprendida entre los 1.800 y los 2.800 milímetros anuales, con una buena distribución en los diferentes meses del año. Se requieren por lo menos 120 milímetros al mes.
- Periodos de mucha lluvia favorecen la presencia de enfermedades como el mal rosado y la gotera.
- El exceso de lluvias también puede afectar la floración del cafetal, disminuyéndola o dañándola.
- Si se presentan sequías excesivas, las hojas del cafeto pueden caerse por falta de agua y se puede incrementar el ataque de plagas como la arañita roja, el minador y la broca (Café de Colombia, 2010).
- “En la región del eje Cafetero se produce café durante casi todo el año gracias a la particular distribución de los ciclos lluviosos, a diferencia de otras regiones y países que tienen un único ciclo de cosecha concentrado. Este régimen de lluvias es el resultado del paso, dos veces por año, de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) ubicada sobre la franja ecuatorial y donde confluyen los vientos alisios provenientes de los hemisferios Norte y Sur, generando dos periodos de lluvias intensas (de marzo a mayo y de octubre a diciembre) que benefician todo el ciclo productivo del café” (Servicio nacional de aprendizaje (SENA), 2014).

Humedad del aire o humedad relativa

Este componente del clima presenta altas variaciones entre el día y la noche. En la zona cafetera el aire es normalmente húmedo (Cafe de Colombia, 2010).

Vientos

- Son los encargados de transportar el vapor de agua y las nubes, haciendo variar algunos componentes del clima como las lluvias, la temperatura y el brillo solar.
- En general, las zonas más adecuadas para el cultivo del cafeto se caracterizan por presentar vientos de poca fuerza (Cafe de Colombia, 2010).

Brillo solar y nubosidad

- La principal fuente de energía para las plantas es la radiación del sol que llega a las plantas dependiendo de la presencia o ausencia de nubes y la orientación de las laderas en relación con la salida del sol. El brillo solar se expresa como el número de horas en las cuales el sol brilla en un período dado.
- El brillo solar en la zona cafetera se encuentra entre 1.600 y 2.000 horas de sol al año (4.5-5.5 horas de sol al día).
- “La siembra del café en la región del eje Cafetero se hace expuesta al sol o bajo la sombra. En general no existe un sistema único y apropiado pues los cultivos se adaptan a su entorno inmediato. El cafetal expuesto al sol tiende a ser más productivo y predomina en zonas de alta retención de humedad en el suelo. Tiene altas densidades de siembra que varían entre 7.500 y 10.000 plantas por hectárea. Cenicafe recomienda que “si los suelos son susceptibles a la erosión, el establecimiento a libre exposición solar debe de ir acompañado de buenas prácticas de conservación de suelos, como siembras en sentido contrario a la pendiente, barreras vivas y manejo de coberturas nobles, entre otras” (Ramirez, Victor Hugo, 2011).

El suelo para el cultivo

- “El suelo es la capa superior de la tierra donde se desarrollan las raíces de las plantas.
- El suelo es esencial para el cafeto porque le facilita el anclaje y le proporciona el agua y los nutrimentos necesarios para su crecimiento, desarrollo y producción.
- Tiene su origen en la desintegración y descomposición lenta de las rocas, causada principalmente por la acción del agua, la temperatura y los vientos. En algunas regiones estos procesos se acompañan de cenizas provenientes de los volcanes. Con el paso del tiempo las partículas formadas se mezclan con los residuos de animales y vegetales en descomposición, dando origen al suelo o capa vegetal.
- El suelo está compuesto por sustancias sólidas (orgánicas e inorgánicas), agua y aire” (Cafe de Colombia, 2010).

Propiedades físicas del suelo

“Entre las principales propiedades tenemos:

- **Color**

En términos generales, el color negro de los suelos indica un buen contenido de materia orgánica. Los suelos oscuros son los mejores para el café y los cultivos, en general.

- **Textura**

- “Está relacionada con el tamaño de los granos o partículas del suelo:
- Las más pequeñas se llaman arcillas.
- Las más grandes reciben el nombre de arenas.
- Las que tienen un tamaño intermedio entre las arcillas y las arenas se llaman limos.
- La cantidad o porcentaje en que se encuentran dichas partículas en un suelo determina su textura.

- Dependiendo de los granos o partículas que estén en mayor número en el suelo, se puede hablar de suelos con textura arenosa, arcillosa o limosa.
- Cuando las partículas están en proporciones iguales, la textura es franca. Los mejores suelos para cultivar café son los llamados francos.
- Cada textura le da propiedades particulares al suelo, en cuanto al drenaje o porosidad y la cantidad de nutrientes, entre otras” (Cafe de Colombia, 2010).

○ **Estructura**

“Es la forma como se agrupan las partículas o granos del suelo y es determinante para el crecimiento y penetración de las raíces.

- Es de gran importancia en la permeabilidad del suelo, en la facilidad para trabajarlos y en la resistencia a la erosión.
- La estructura se puede mejorar o dañar con las labores de cultivo.
- La mejor para el cafeto es la de tipo granular” (Cafe de Colombia, 2010).

○ **Porosidad y permeabilidad**

“Al agruparse los granos o partículas del suelo para formar terrones, quedan entre ellos espacios de tamaño variable denominados poros, que son ocupados por el agua y el aire.

La permeabilidad se refiere a la velocidad con la que el agua y el aire circulan o se mueven a través de los poros del suelo.

- Los suelos arenosos son de permeabilidad alta y los arcillosos de baja permeabilidad.
- Los mejores suelos para el café son los francos, en los cuales la permeabilidad es moderada” (Cafe de Colombia, 2010).

- **Profundidad efectiva**

“Se llama así a la distancia hasta donde las raíces de la planta pueden penetrar fácilmente en busca de agua y alimento. A mayor profundidad efectiva del suelo mejor será el desarrollo radical del cafeto. En general, un suelo para cultivar café es profundo si permite la penetración de las raíces hasta 80 centímetros.

La erosión ocasionada por las inadecuadas prácticas de desyerba del cultivo disminuye la profundidad efectiva del suelo. En resumen, los mejores suelos para el cultivo del cafeto son los francos, de buena profundidad efectiva, con estructura granular, buena aireación y permeabilidad moderada” (Cafe de Colombia, 2010).

Propiedades químicas del suelo: Entre las principales se tienen:

- **Fertilidad:** “Esta propiedad del suelo está estrechamente relacionada con la cantidad disponible de nutrimentos para las plantas.

Los elementos nutritivos que el cafeto requiere en mayor cantidad son: Nitrógeno, Fósforo y Potasio.

- El cafeto necesita en menor cantidad de Calcio - Magnesio, Azufre - Hierro, Zinc - Manganeso, Boro – Cobre. La carencia de alguno de estos nutrimentos afecta el normal crecimiento y desarrollo de la plantación cafetera al igual que su producción potencial, tanto en calidad como en cantidad de café. Un suelo que presente mediana a baja fertilidad se puede mejorar con la aplicación de fertilizantes, en general, se puede decir que para el cultivo del cafeto son más importantes las buenas condiciones físicas del suelo que su fertilidad natural” (Cafe de Colombia, 2010).
- **Grado de acidez o PH:** “Esta medida varía entre 1 y 14. Los suelos buenos para café deben tener una acidez entre 5 y 5.5. Al cafeto no le convienen suelos con valores de la acidez por debajo de 5 o por encima de 5.5, pues se dificulta la nutrición del cultivo” (Cafe de Colombia, 2010).

- **Materia orgánica:** “Está representada por los residuos descompuestos de plantas y animales. La pulpa de café descompuesta aporta materia orgánica a los suelos. La materia orgánica tiene mucha importancia para obtener una alta productividad del cultivo. Influye en forma decisiva en el mejoramiento de las condiciones físicas del suelo, favorece la retención de humedad y es el principal sustrato para el desarrollo de pequeños organismos que la transforman en una gran fuente de alimento para el cafeto. Los suelos buenos para cultivar café deben tener contenidos de materia orgánica mayores al 8%” (Cafe de Colombia, 2010).

2. CAPÍTULO II -Aplicación y desarrollo

2.1. Tipo y diseño de investigación

La investigación es aplicada con un enfoque experimental, el cual implica la manipulación de una o más variables independientes para observar sus efectos sobre variables dependientes en condiciones controladas (Sampieri, Collado, & Lucio, 2014). Este tipo de investigación busca establecer relaciones causales entre las variables y controlar los posibles factores que puedan influir en los resultados. Se establecen grupos de comparación, donde uno recibe la manipulación experimental (grupo experimental) y el otro actúa como referencia (grupo de control). La asignación de participantes a estos grupos se realiza de manera aleatoria o controlada para minimizar sesgos y garantizar la validez interna del estudio (Sampieri, Collado, & Lucio, 2014). La metodología experimental permite realizar inferencias sobre la relación causal entre las variables al controlar factores externos y manipular las condiciones de estudio de manera precisa (Sampieri, Collado, & Lucio, 2014), siendo ampliamente utilizado en diversas disciplinas para investigar fenómenos y validar teorías a través de experimentos controlados.

2.2. Población o entidades participantes

Debido a que las condiciones del cultivo del café son cambiantes dependiendo de ciertas variables, como: El terreno, la altura y tipo de café, temperatura y humedad ambiental y temperatura del suelo por nombrar algunas, pudimos establecer que el objeto de nuestro estudio es caracterizar las condiciones del cultivo del café en la finca “Las Acacias” del municipio de Salento (Quindío), ya que como comentamos anteriormente es complejo determinar condiciones generales para todos los terrenos y cultivos de café en la región.

Por estas situaciones y características especiales pudimos determinar que nuestra población se concentra en la misma finca objeto de estudio y se encuentra integrada por el propietario y trabajadores del predio, así mismo aunque no presenta una influencia o connotación directa en el

proyecto si es bueno acotar que la “Federación Nacional de Cafeteros”, realiza asistencia técnica a la finca a través de un ingeniero agrónomo encargado de hacer visitas periódicas y emitir conceptos sobre el estado y desarrollo de los cultivos, además de presentar sugerencias para mejorar y optimizar los lotes del cultivo en el predio anteriormente mencionado.

2.3. Definición de variables o categorías

La estructura de la información se compone de cuatro elementos básicos. A pesar de su simplicidad, son altamente dinámicos, ya que permiten diversas combinaciones entre estos elementos y abordan una amplia gama de situaciones prácticas.

Estos cuatro componentes son:

- Temperatura ambiental
- Lluvias
- Humedad ambiental
- Suelo
- Electroconductividad
- Propiedades químicas del suelo
- Temperatura y humedad del suelo

Temperatura ambiental: La temperatura ambiental se refiere a la medida del calor o frío del aire en un lugar específico. Generalmente se mide en grados Celsius (°C) o grados Fahrenheit (°F). Esta variable es crucial en la agricultura, ya que afecta el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Lluvias: Las lluvias se refieren a la cantidad de precipitación que cae en forma de agua desde las nubes hasta la superficie de la Tierra. Se mide en milímetros o pulgadas y es fundamental para el suministro de agua necesario para el riego y el crecimiento de los cultivos.

Humedad ambiental: La humedad ambiental se refiere al nivel de vapor de agua presente en el aire. Se mide en porcentaje y puede variar según la ubicación y las condiciones climáticas. La humedad del aire también influye en la salud de las plantas y la eficiencia de la fotosíntesis.

Suelo: El suelo se refiere a la capa superior de la corteza terrestre compuesta por minerales, materia orgánica, agua y aire. Es el medio en el que crecen las plantas y se compone de diferentes horizontes, cada uno con sus propias características.

Electroconductividad: La electroconductividad, también conocida como conductividad eléctrica (CE), medida en decisiemens por metro (dS/m), se utiliza para evaluar la capacidad de un medio para conducir la electricidad. Especifica cuántos decisiemens (dS), una décima parte de un siemen (S), fluyen a través de un metro cúbico del medio. Un siemen es la unidad del Sistema Internacional de conductividad eléctrica.

Esta medida es especialmente relevante en la agricultura y la ciencia del suelo, donde se emplea para evaluar la salinidad del suelo. Suelos con una CE más alta a menudo indican una mayor concentración de sales y minerales disueltos. Estos valores más altos pueden tener efectos adversos en el crecimiento de las plantas (Munns & Tester, 2008)

Propiedades químicas del suelo: Las propiedades químicas del suelo incluyen diversos parámetros como el pH, la concentración de nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, etc.), la concentración de sales y otros compuestos químicos en el suelo. Estas propiedades afectan directamente la capacidad del suelo para soportar el crecimiento de los cultivos.

Temperatura y humedad del suelo: Estas variables hacen referencia a la temperatura del suelo y la cantidad de agua presente en el suelo. La temperatura del suelo influye en la germinación de las semillas y en el metabolismo de las raíces de las plantas. La humedad del suelo es esencial para el crecimiento de las plantas y se relaciona con la disponibilidad de agua para las raíces.

Estas variables son fundamentales en la agricultura y en la gestión de cultivos, ya que influyen en el éxito de la producción y la salud de las plantas.

Para el desarrollo del proyecto titulado "Implementación de un Modelo de red experimental IoT para evaluar las condiciones agroambientales en un cultivo de café y, mediante la aplicación de análisis de datos, evaluar sus resultados", se consideraron como base las siguientes variables, las cuales podemos identificar con mayor claridad en la tabla Nro. 2:

Tabla II-VARIABLES agroambientales del cultivo del café

Variable	Indicadores
Temperatura ambiental	<p>Zona óptima para el cultivo del café arábico: 19 a 21.5°C</p> <p>Desarrollo del café en climas fríos (temperatura < 19°C)</p> <p>Desarrollo del café en climas calientes (temperatura > 21.5°C)</p>
Lluvias	<p>Cantidad apropiada de lluvia: 1,800 a 2,800 mm anuales</p> <p>Efectos de períodos de mucha lluvia en el cultivo</p> <p>Efectos de sequías excesivas en el cultivo</p> <p>Régimen de lluvias en la región del eje Cafetero</p>
Humedad ambiental	<p>Variaciones de humedad entre el día y la noche varían entre: 40% a 80%.</p>

Suelo	Composición y origen del suelo
Electro conductividad	Capas del suelo y su relevancia para el crecimiento de raíces
Color	Indicador de contenido de materia orgánica
Textura	Granulometría del suelo y sus propiedades
Estructura	Agregación de partículas y su influencia en el crecimiento de raíces
Porosidad y permeabilidad	Espacios y velocidad de movimiento del agua y aire en el suelo
Profundidad efectiva	Penetración de raíces en busca de agua y nutrientes
Propiedades químicas del suelo	Nutrientes esenciales para el crecimiento del cafeto
Fertilidad	Niveles óptimos de acidez para el cultivo entre 4.9 a 5.6.
Grado de acidez o pH	Importancia y cantidad deseada de materia orgánica en el suelo entre 11.4 a 12.6.
Materia orgánica	La temperatura y humedad ideal del suelo en los cafetales en Colombia es la siguiente: (Ocampo López, Castañeda Peláez, & Vélez Upegui, 2017)
Temperatura y humedad del suelo.	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura: entre 18 y 23 °C. • Humedad: entre el 70 y el 85 %

Fuente: (Grind, 2018)

2.4. Procedimiento e instrumentos

Para la fase de recolección de datos optamos por la entrevista, ya que deseamos obtener datos de primera mano en relación con las variables agroambientales del cultivo del café.

Entrevistas

Las entrevistas son una técnica de recolección de datos ampliamente utilizada en investigaciones cualitativas y cuantitativas. En este contexto, se refiere a la interacción directa entre el investigador y los participantes, en la que se hacen preguntas estructuradas o semiestructuradas con el

objetivo de obtener información específica relacionada con los aspectos del entorno ambiental y agrícola que se están investigando.

Son conversaciones planificadas y dirigidas que tienen como objetivo recopilar información detallada, reflexiva y contextualizada de los participantes sobre temas específicos. Estas pueden llevarse a cabo de manera presencial, telefónica o virtual, dependiendo de las circunstancias y la logística del estudio.

- **Objetivo:**

El objetivo principal de utilizar entrevistas en esta investigación es obtener percepciones, experiencias y conocimientos detallados de los participantes sobre los aspectos ambientales y agrícolas en estudio. Las entrevistas permiten profundizar en la comprensión de las variables previamente definidas, capturando matices y detalles que enriquecen el análisis de los fenómenos investigados.

- **Variables por utilizar:**

En las entrevistas, se abordarán las siguientes categorizaciones de variables relacionadas con el entorno ambiental y agrícola:

- Aspectos ambientales
- Aspectos técnicos

En este documento se encuentran las transcripciones de dos entrevistas: Una en Café La Morelia y la otra en Finca Las Acacias.

Si bien, la entrevista en la Finca Las Acacias fue acordado previamente con fecha y hora, ambos encuentros fueron espontáneos y casuales. Se desarrollaron de manera natural en respuesta a temas y preguntas que surgieron durante la conversación.

Estas entrevistas siguen un formato tradicional y estructurado, y ofrecen una visión auténtica y sin filtros de las ideas y perspectivas en ese momento particular. Las respuestas y comentarios aquí registrados

reflejan la espontaneidad de la charla y pueden variar en profundidad y enfoque.

Esta transcripción se proporciona con fines informativos. Se ha trabajado diligentemente para reflejar con precisión tanto el contenido como el espíritu de la conversación tal como se llevó a cabo. La charla se enfoca en comprender la labor diaria de los caficultores.

Entrevista Café La Morelia

Tipo de entrevista: Informal o conversación.

Tipo de preguntas: Abiertas y descriptivas.

Cantidad de entrevistados: Catadores expertos.

Tabla III-Ficha técnica de la entrevista Café La Morelia

FICHA TECNICA	
Lugar:	Café La Morelia
Entrevistador:	César Osimani
Entrevistados:	Catadores expertos
Fecha de Realización:	30 de agosto de 2023

Preguntas:

1. En un día común, ¿qué hacen los trabajadores para llevar adelante la finca? ¿Qué hacen para detectar si hay hongos, bacterias? ¿Qué producto colocan para evitar que la hoja se quemé con las heladas?

Visualmente, las plantas, sus hojas son como el cabello de las personas, reflejan el estado de la planta. Cuando empieza a perder brillo, a ponerse algo amarillenta, es un indicio de que se está viendo afectada la planta del café. En ese momento, comienzan a hacerse trabajos de calificación del suelo. La planta tiene en el suelo todos sus componentes, todos los

minerales para que la planta se alimente. Como cuando una persona está enferma, se le sella la boca, por más que le pongan el mejor plato de comida al frente, no se lo come. Eso mismo le pasa a la planta del café. Cuando la planta entra en ese estado es porque la planta no está absorbiendo los atributos de la tierra. En ese momento se calcifica el suelo, que es agregar un poco de cal alrededor del tallo sin tocar la planta, y eso hace que se le descosa la boca a la planta.

Los caficultores también, aproximadamente cada 2 meses, hacen abonamientos a la tierra, en busca de ayudar al crecimiento de la planta. La planta ya tiene su propia fotosíntesis y los atributos de la tierra, pero también es ayudada con abono con materias orgánicas para ayudarle a su evolución.

Cuando la planta está en proceso de flora, es un indicativo de que la planta se va a empezar a cargar de café. Y puede pasar de 35 a 40 semanas para que esté el fruto.

Hay una plaga que es la roya, que en los años 80 causó bastantes problemas, ya no se ve tanto la roya, pero hay otra que se llama la broca, que ataca mucho cuando el campo está florando, que pone los huevos sobre la flor, entonces cuando ya germina el grano, internamente ya tiene el insecto y se lo consume. Entonces cuando el café está florando se hacen tratamientos de insecticidas para evitar que le pegue la broca.

Los trabajadores del campo, no todos conocen esto. Como guía turístico, me metí al campo, aprendí de los tiempos de cosecha, recolección, la germinación, los tiempos del café, la etapa del tostado, de barismo y preparación.

En el café hay dos especies principales: Café en robusta y café arábico. Dentro del café arábico hay 123 varietales, en el robusta, hay alrededor de 98 varietales. El café arábico es café de buena calidad, no quiere decir que el robusta no lo sea, pero el arábico tiene menos porcentaje de cafeína.

Todo el café tiene un dulce natural, que es como una babita que recubre el grano de café internamente. El café arábico tiene un mayor porcentaje de mucílago que el café robusto. Dado a esto, cuando se hacen los procesos de fermentación se le pueden elevar mejores notas, la pueden resaltar más notas apretadas, resalta mejor acidez. En cambio, el otro café se usa más para café comerciales, el brasilero en este momento es el primer exportador, pero sólo cultiva plantas robustas.

En Europa y en algunas partes también de América, la tostión siempre es más alta, entonces el café es más amargo, por lo que, si no tiene un tipo de edulcorante, es más complejo tomarlo, más bien en bebidas con leche. Al café hay que probarlo, así como lo acabas de probar, para saber a qué puede llegar a saber en boca el café.

Aquí en la región de la finca la Moreira no tenemos heladas, porque no cambia demasiado el clima. Puede revisar estudios en el CENICAFE, que es un laboratorio colombiano del café. Diseñan especies, la vuelven más fuertes, entre otras.

2. ¿Usan algún tipo de tecnología?

La tecnología no está porque quizás los costos son altos y el caficultor no tiene demasiada ganancia con la producción del café, es decir, "No le sale lo comido por lo servido".

Colombia es el único país de mundo en donde hay producción constante, no maneja estaciones, entonces hay un proceso constante evolutivo en las plantas. Cuando las plantas están florando, también tiene café, tiene café maduro, tiene café verde. Cada 2 meses hay que recoger el café. Por ejemplo, en Brasil y Vietnam, que son altos productores del café, no tienen esas condiciones. Las estaciones definen que sólo van a tener dos cosechas al año. Una planta que está florando, esa misma planta puede tener también café verde, café maduro y café que está creciendo. Cuando la flor cae empieza el proceso de crecer el grano, los que estaban madurando ya están maduros, los que estaban en crecimiento ya están verdes, y así sucesivamente.

Entrevista en la Finca las Acacias

En la siguiente entrevista básicamente se tratan los siguientes aspectos:

- La producción de café en la Finca las Acacias.
- Control de plagas y enfermedades
- Técnicas y prácticas agrícolas
- Condiciones climáticas y factores externos

Tipo de entrevista: Informativa o Expositiva.

Tipo de preguntas: Informativa y abiertas.

Cantidad de entrevistados: El propietario de la Finca las Acacias.

FICHA TECNICA	
Lugar:	Finca Las Acacias
Entrevistador:	César Osimani
Entrevistado:	Jesús Mauricio Rodríguez Escobar
Fecha de Realización:	31 de agosto de 2023
Cargo:	Propietario de Finca Las Acacias

Preguntas:

1. ¿Cuántas cosechas tienen ustedes en el año?

En la Finca Las Acacias hay una única producción en el año, es una producción fuerte y está limitada principalmente por el control de la broca. La detectan a simple vista, porque ven un orificio en el grano. Y tienen que recolectar los granos perjudicados en tiempos de no cosecha para que no se propague la broca, ya que se propaga muy rápidamente. Y esta es la manera en que tienen baja infestación en el lote. Los técnicos del comité de cafeteros también recomiendan tratamientos para nuestras plantas.

Todos los que trabajan en los cafetales conocen cómo detectar la broca. Hacen estadísticas, por ejemplo, recolectar 100 granos y determinan la cantidad de granos afectados por la broca. Para mantener los niveles de broca controlados, se recolectan los granos maduros y los granos caídos, para que no contagien a los otros granos.

Los cafetales que están a 1400 o 1500 metros, producen 2 cosechas anuales, mientras que en Las Acacias estamos a 1850 metros, sólo tenemos una cosecha al año. Nuestros cafetales se demoran 9 meses desde que florecen hasta coger el fruto. En las Acacias florecen en agosto o septiembre, por lo que se coge el fruto en abril y mayo. Se depende

mucho de las lluvias y los cambios de temperatura. La mayoría de las plantas florecen por estrés, por cambios de temperaturas. La planta se estresa y tiende a hacer su supervivencia con las semillas, florecer y dar fruto.

El café de altura, como el de las Acacias, es más ácido, por eso se siente más fuerte, es un café más apetecido. La federación bonifica a las Acacias por el tipo de café, es un café de altura, al igual que todos los cafetales por encima de los 1600 metros. Para hacer rendir el café de altura, lo mezclan con café de menos altura, por ejemplo, el de la Morelia, y así hace rendir más el café de altura, sin perder la calidad.

Cenicafé hace mucha investigación, y mezclan variedades de café que son resistentes a la roya. Entonces, la federación muchas veces te daba beneficios, te daban las semillas, con la idea que cambies el café porque habían investigado que era más beneficioso y mayor producción con algún tipo de café particular, por ejemplo, era resistente a la roya. Querían que el café de Colombia aumente su producción, quizás descuidando la calidad, querían estar al nivel de producción de Brasil. Cenicafé sacó una variedad de café que era más resistente a la roya, pero tuvo algunos imprevistos, por ejemplo, el fruto era muy duro de recoger, también con el paso de 2 o 3 cosechas, el grano se hacía muy pequeño. Entonces, el caficultor empezó a volver de nuevo a la caturra, que es el grano de Café Arábica de calidad. Las Acacias usa el café variedad Castillo. Con esta variedad, se tiene menores cantidades de roya. Pero en estos momentos, agosto de 2023, hay algunos cafetales que luego de 5 años con la variedad de Castillo, les comenzó a dar la roya de nuevo, y en cantidades preocupantes.

2. En un día normal, ¿qué se hace?

Si se siembra un lote nuevo, se demora 3 años para dar café. Y esta etapa es de las más importantes, como un niño, es el período que tiene que estar mejor la planta. Para que crezca un árbol fuerte y que dé buenos

frutos. Entonces, en el día a día se revisa que no se ponga la hoja amarilla, porque le pueda faltar algún nutriente. Entonces hay que recurrir a la asistencia técnica, que vengan y le recomienden qué echar a las plantas.

En las Acacias se hacen análisis de suelo cada 2 años, tomando 5 muestras de los lotes. Y los técnicos le recomiendan productos para abonar el terreno. A veces los productos orgánicos no alcanzan a cubrir los nutrientes que se necesitan, entonces se recurre a los productos químicos.

Muchas veces los productos no se pueden aplicar porque si hace mucho calor, el producto se cristaliza y las plantas no lo toman. Muchas veces se recomiendan entre vecinos, que a otro caficultor le sirvió tal cosa, entonces se comparte esta información, pero muchas veces tampoco funciona y la inversión en aplicar ese producto se perdió y no sirvió. Entonces, poder disponer de estas mediciones y recomendaciones por parte del “Caficultor digital” puede ser muy interesante. Además, si se está bien de fósforo y lo recargamos con más fósforo y no hacía falta, puede ser muy perjudicial.

Los análisis del suelo, se hace generalmente cuando se va a plantar. Cuando la planta ya está adulta, para nutrirlo bien, puede ser difícil porque ya trae falencias anteriores, quizás desde la siembra.

3. ¿Tienes lotes nuevos?

Sí, estoy trazando el sector para un lote nuevo y estoy esperando hacer tiempo para el estudio del suelo. Es común que el suelo sea muy distinto en la misma finca, así para planificar un lote nuevo, hay que hacer estudio de ese sector, por más que esté muy cercano a otro lote donde ya se tenga el estudio del suelo, ya que puede ser muy distinto. Me ha pasado que un lote está bien de magnesio, y el lote del lado esté con niveles no adecuados.

4. ¿Presentan problemas de hongos?

Sí, claro. Por la humedad. En este piso térmico de las Acacias, está lo que se llama piso descendente. Por los cambios de temperatura, sobre todo a la madrugada, al cogollo de la planta se quema y comienza a matar la planta desde la copa hacia abajo. Es el peor enemigo que se tiene aquí. Un día amanece marchito, al día siguiente amanece negro y ya. Y no queda otra que intervenirlos con productos químicos. Si el cogollo se quema, pueden pasar meses hasta salir otro cogollo. Y este tiempo perdido es muy crítico. Entonces, puede ser que un cafetal que me iba a dar café en 3 años, me lo está dando a los 4 años.

La broca se desarrolla más en las fincas más cálidas, y esas fincas tienen que fumigar sí o sí. La broca puede poner 6000 huevos. En un abrir y cerrar de ojos, la broca se puede repartir por los lotes. La broca es un gorgojo, que entra al grano, cuando el grano está a los 120 días de haber florecido, abre el hueco, entra, come y deposita los huevos.

5. ¿Qué tipo de abonos utilizan?

Ya se conocen cuál abono sirve para la finca, que salen del análisis del suelo, la mayoría son productos químicos. Y salen de las recomendaciones de los asistentes técnicos. Se abona en forma de medialuna esparciendo alrededor del tallo. También muchas veces se puede recomendar, dejar crecer la maleza, sobre todo en épocas de verano, mucho sol, para que el sol no mate los microorganismos, entonces se deja maleza para que el sol no penetre tanto. Y ayuda a mantener algo de humedad. Se deje la maleza noble, que es la más suave, la maleza más dura se trata de mantenerla controlada.

No se riega, se depende de las lluvias. Es muy costoso y no se puede usar el agua.

Entrevista Propietario Finca las Acacias

En la siguiente entrevista básicamente se tratan los siguientes aspectos:

- Sistema productivo de la Finca las Acacias.
- Cantidad y diseño de siembra de los árboles de café
- Efectos del clima en el cultivo de café
- Disponibilidad de mano de obra

Tipo de entrevista: Informativa o Descriptiva.

Tipo de preguntas: Cerradas.

Cantidad de entrevistados: El propietario de la Finca las Acacias.

Tabla V- Ficha técnica de la entrevista Propietario Finca las Acacias

FICHA TECNICA	
Entrevistador:	Jaime Andrés Arévalo Galindo
Entrevistado:	Jesús Mauricio Rodríguez Escobar
Fecha de Realización:	3 de junio de 2023
Cargo:	Propietario Finca las Acacias
Escolaridad:	Tecnólogo en producción agropecuaria
Profesión:	Pensionado

Preguntas:

1. ¿Qué sistema productivo tiene la finca las acacias?

El sistema productivo de la finca se basa en la producción de café, turismo, ganadería, especie menores (conejos y gallinas) y elaboración de compostaje.

2. ¿Cuántos árboles tiene la finca y que diseño de siembra tiene?

La finca cuenta con 20.000 árboles productivos, distribuidos en 4.5 hectáreas, con una distancia de siembra de 1.20 m entre árboles y 2.0 m entre calles.

3. ¿Qué tipo de topografía tiene la finca?

El 90 % de la finca tiene una topografía montañosa.

4. ¿Qué variedades de café tiene sembrado?

Las variedades sembradas son: Castilla y Cenicafe

5. ¿Qué registros de cosecha o de producción lleva?

El agricultor no lleva registro de su producción.

6. ¿A cuánto tiempo de sembrado empiezan la cosecha de café?

Los árboles de café en la finca empiezan a producir a los 3 años de sembrado, a diferencia del café sembrado a menor altura que empieza a producir a los dos años.

7. ¿Cuáles son los costos de producción de un árbol de café sembrado en Salento?

Los costos de producción de un árbol de café en Salento cuestan dos veces más que un árbol sembrado en clima caliente.

8. ¿Qué registro climático lleva en el sistema productivo y que efectos tiene el clima en el cultivo de café?

El agricultor no tiene ni lleva un registro de las condiciones climáticas, aunque los efectos de

este se presenta en los cambios de temperatura, es decir pasar de temperaturas altas en el día y en las noches temperaturas muy bajas que generan en las plantas una quemadura en sus hojas, como se observa en la figura. El árbol al sufrir esta quemadura se retrasa el rebrote dos meses afectando directamente la producción del cultivo.

9. ¿Cuáles son los meses de mayor producción?

Las épocas de cosecha con mayor producción son entre abril y junio.

10. ¿Cada cuando hace la soca?

En la finca hacen soca o renovación cada 8 años.

11. ¿Qué relación existe en la cantidad de café seco pergamino y el café en cereza?

Para obtener un bulto de café seco pergamino, se debe cosechar 5 bultos de cereza.

El pago a las personas que cosechan el grano se encuentra entre 1.000 y 1.200 el Kg.

12. ¿Es fácil conseguir mano de obra?

No hay mano de obra en el campo debido a la migración de los jóvenes a la ciudad, porque las actividades del campo son muy fuertes y no pagan bien.

2.4.1. Interpretación y análisis de los resultados obtenidos

En esta sección, se presentarán las conclusiones derivadas de las entrevistas realizadas en la investigación. La importancia de este proceso

radica en su capacidad para proporcionar una visión más amplia de los temas discutidos en las entrevistas, lo que a su vez permitirá tomar decisiones fundamentadas en el contexto de la investigación. En las siguientes líneas, se analizará la relevancia de estos hallazgos en relación con los objetivos y el alcance de las entrevistas.

Veamos algunas conclusiones de la entrevista realizada por el Dr. César Osimani con Catadores Expertos en la Finca la Morelia:

1. En Café La Morelia, se enfatiza la importancia de mantener la salud de las plantas de café, ya que su aspecto refleja su estado. Cuando las plantas muestran signos de deterioro, se toman medidas para mejorar la absorción de nutrientes, como la calificación del suelo.
2. Los caficultores realizan abonamientos periódicos para promover el crecimiento de las plantas, contribuyendo así a su evolución.
3. Se resaltó la influencia de la variedad del café, como el arábico y el robusto, en el sabor del café, con el arábico teniendo un mayor contenido de mucílago y matices de sabor más destacados.
4. A pesar de la tecnología disponible, su adopción en la finca es limitada debido a los costos y las restricciones en las ganancias de los caficultores, lo que contrasta con la producción constante de café en Colombia en comparación con otros países con estaciones de cosecha.
5. La entrevista subrayó la importancia de probar y apreciar el café, especialmente en regiones como Café La Morelia, donde no se ven afectadas por heladas, y se mencionó la labor de investigación y

desarrollo de nuevas variedades de café realizada por el CENICAFE, un laboratorio colombiano del café.

A continuación, se presentan algunas conclusiones clave derivadas de la entrevista realizada por el Dr. César Osimani, al Sr. Jesús Mauricio Rodríguez Escobar en la Finca Las Acacias:

- 1. Dependencia de la broca:** La producción en la Finca Las Acacias está fuertemente condicionada por la presencia de la broca, un insecto que afecta los granos de café. La detección temprana y la recolección de granos afectados en tiempos específicos son estrategias clave para controlar su propagación.
- 2. Manejo de la producción y calidad del café de altura:** A pesar de las dificultades climáticas y los desafíos asociados con la altitud, el café de Las Acacias se considera de alta calidad y es apreciado por su sabor más fuerte. La federación bonifica este tipo de café, aunque a veces se mezcla con granos de menor altura para aumentar la producción sin perder calidad.
- 3. Desafíos climáticos y enfermedades:** Las variaciones climáticas, cambios de temperatura y problemas como la roya presentan desafíos significativos para la producción de café. La altitud y el piso térmico de Las Acacias generan problemas específicos, como la quema de cogollos debido a cambios de temperatura.
- 4. Necesidad de asistencia técnica y análisis del suelo:** La asistencia técnica y los análisis de suelo son críticos para mantener la salud de las plantas y la calidad del café. La falta de registro de la producción y

la dependencia de recomendaciones externas destacan la necesidad de herramientas digitales para facilitar la toma de decisiones.

5. Escasez de mano de obra y migración: La migración de los jóvenes a las ciudades debido a la falta de empleo y las duras condiciones de trabajo en el campo plantea un desafío para la disponibilidad de mano de obra. Esto destaca la importancia de soluciones que aborden problemas de recursos humanos en la producción de café.

A Continuación, algunas conclusiones de la entrevista realizada por el MSc. Jaime Andrés Arévalo Galindo al Sr. Jesús Mauricio Rodríguez Escobar Propietario Finca las Acacias:

1. La finca Las Acacias opera un sistema productivo diversificado que incluye la producción de café, turismo, ganadería, cría de especies menores como conejos y gallinas, y la elaboración de compostaje.
2. La finca cuenta con aproximadamente 20,000 árboles de café distribuidos en 4.5 hectáreas, con un diseño de siembra que establece una distancia de 1.20 metros entre árboles y 2.0 metros entre calles.
3. El 90% de la topografía de la finca es montañosa, lo que puede influir en la producción de café y en la gestión agrícola.
4. En cuanto a las variedades de café, la finca cultiva las variedades Castilla y Cenicafe.
5. La disponibilidad de mano de obra en la finca es limitada debido a la migración de jóvenes a la ciudad, ya que las actividades en el campo

se consideran intensas y poco remunerativas. Esto puede afectar la producción y la gestión del cultivo de café en la finca.

Estas conclusiones reflejan los desafíos y prácticas clave en la producción de café en estas fincas, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones en el ámbito cafetero.

2.5. Consideraciones éticas

Este proyecto se enmarca como sin riesgo. Por otra parte, la ética en la investigación agrícola de esta naturaleza abarca diversos aspectos cruciales, incluyendo la recopilación de datos, el tratamiento de la información de los agricultores, la privacidad y el uso responsable de la tecnología. Es fundamental garantizar que los agricultores participantes sean informados de manera completa y transparente sobre la recopilación de datos y su propósito. Se debe obtener el consentimiento informado y la colaboración voluntaria de los agricultores, respetando sus derechos y valores culturales. La confidencialidad de los datos personales y la protección de la información sensible son aspectos esenciales para preservar la privacidad de los agricultores y mantener la confianza en el proyecto. Además, se deben establecer protocolos de seguridad de datos y ciberseguridad para evitar el acceso no autorizado o el uso indebido de la información.

2.6. Alcances y limitaciones

A continuación, se detallan tanto los avances significativos como las restricciones identificadas durante la ejecución del proyecto:

Alcances:

- 1. Desarrollo del modelo Caficultor Digital:** Se logró avanzar significativamente en el diseño y conceptualización del modelo de caficultor digital. Este modelo se basa en la replicación de la experiencia y toma de decisiones del caficultor humano, utilizando técnicas de Machine Learning y redes neuronales.

2. **Diseño de la red experimental IoT:** Se ha propuesto un diseño para una red experimental IoT destinada a la recolección de datos agroambientales en un cultivo de café específico. Esto incluye la selección de sensores y tecnologías de bajo costo para su implementación en la finca.
3. **Construcción de un Dataset de prueba:** Se ha trabajado en la construcción de un Dataset de prueba que servirá como base para entrenar y ajustar el modelo de inteligencia artificial.
4. **Exploración de modelos de predicción:** Se realizaron pruebas con modelos de predicción, incluyendo una red neuronal multicapa (MLP) y un árbol de decisión J48. Aunque los resultados actuales no son totalmente satisfactorios debido a la escasez de datos reales, se ha establecido como base para futuras mejoras.

Limitaciones:

1. **Escasez de datos reales:** La principal limitación identificada reside en la escasez de datos reales disponibles para entrenar y validar el modelo.
2. **Carencia de Datasets de dominio público:** La falta de Datasets específicos y disponibles públicamente, especialmente aquellos relacionados con propiedades del suelo y datos meteorológicos ha afectado la experimentación y validación del modelo propuesto.
3. **Resultados inferiores a lo esperado:** Los resultados obtenidos hasta el momento, especialmente en términos de precisión de los modelos de predicción, han sido inferiores a las expectativas. Esto se atribuye principalmente a la falta de datos reales y la complejidad inherente de replicar la experiencia del caficultor humano.
4. **Necesidad de realizar la implementación de sensores:** La implementación completa de la red IoT y la adquisición de datos en tiempo real aún no se han llevado a cabo, lo que limita la capacidad del modelo para aprender de situaciones y condiciones específicas del cultivo.

2.7. Diseño de la red inalámbrica de sensores

En esta fase se lleva a cabo el análisis de requerimientos, mediante el cual podemos establecer la cantidad de nodos sensores a implementar, la ubicación del Gateway, la ubicación de los lotes de café a sensorizar, así como también determinar la variedad del cafetal, por otra parte se llevó a cabo el diseño lógico y físico de la red de sensores, en la parte lógica se establece el diseño de la red de acuerdo a la topología seleccionada, estrella en este caso por ser la topología más eficiente y más rápida de implementar. a continuación, se procederá con el diseño físico donde se ubicarán cada uno de los dispositivos en su lugar designado.

De igual forma dentro del entorno a analizar se debe tener en cuenta: el tipo de suelo, clima, variedades de café, control de plagas y enfermedades, métodos de riego, cosecha y procesamiento, condiciones estas que se deben monitorear y controlar para garantizar que el café resultante sea de buena calidad. Para el caso de los cultivos se puede utilizar una matriz de decisión para evaluar y comparar diferentes opciones en función de los criterios presentados, la cual podemos observar en la Tabla 6.

Tabla VI-Criterios para la selección de los sensores inalámbricos

Criterio de evaluación	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
Precisión	2	3	4	5
Fiabilidad	5	4	3	2
Costo	2	3	4	5
Facilidad de configuración	4	4	4	5
Peso significativo	13	10	15	17

2.8. Selección y configuración de los sensores

Se consideran aspectos técnicos de los componentes electrónicos como: rango de medición, exactitud, precio, consumo energético, entre

otros; permitiendo así seleccionar los dispositivos que mejor se adapten a los requerimientos para lograr un funcionamiento óptimo e integral. En la tabla 7 podemos apreciar con más claridad las principales características técnicas de los dispositivos seleccionados para el proyecto.

Tabla VII- Características técnicas de nodos sensores y Gateway

Cantidad	Tipo de dispositivo	Marca
1	Gateway LoRaWAN Pico LG308N	Dragino
2	Sensores de temperatura y humedad ambiental LoRaWAN LSN50v2-S31	Dragino
2	Sensores de humedad del suelo y EC con LoRaWAN-LSE01-AU915	Dragino

2.9. Componentes de la solución tecnológica planteada

De acuerdo con (Egas, Viracocha, & Rivera, Implementación de una red inalámbrica de sensores para la gestión de luminarias utilizando IPv6, 2019), las redes inalámbricas de sensores (WSN) se caracterizan porque los nodos están conformados por microcontroladores que tienen una baja capacidad de procesamiento, operan con baterías, a bajas velocidades de transmisión y son diseñadas para estar operativas por largos períodos de tiempo. Un sistema WSN incorpora un Gateway o puerta de enlace, que provee conectividad inalámbrica como complemento de redes cableadas y nodos distribuidos. El protocolo inalámbrico que seleccione depende en los requerimientos de la aplicación. Algunos de los estándares disponibles incluyen radios de 2.4 GHz basados en los estándares IEEE 802.15.4 o IEEE 802.11 (Wifi) o radios propietarios, los cuales son regularmente de 900 MHz. La arquitectura que se ha propuesto para el desarrollo del sistema de la red de sensores inalámbricos (WSN), se encuentra compuesta por 2 nodos sensores y un Gateway con las siguientes características técnicas y se puede visualizar en la tabla 8.

Tabla VIII-Componentes de la red inalámbrica de sensores. Fuente: Didácticas Digitales

Dispositivo y cantidad	Características básicas	Imagen
<p>2 [Sensores de temperatura y humedad ambiental LoRaWAN LSN50v2-S31]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Rango de temperatura: -40 a + 80°C - Exactitud: ± 0.2 @ 0-90°C - Rango de humedad: 0 ~ 99.9% RH - Exactitud: $\pm 2\%$ RH (0 ~ 100%RH) - LoRaWAN v1.0.3 Class A - Banda: AU915 	
<p>2 [Sensores de humedad del suelo y EC con LoRaWAN-LSE01-AU915]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Bandas: CN470/EU433/KR920/US915 - LoRaWAN 1.0.3 Class A - Monitorea la humedad y temperatura del suelo - Monitorea la conductividad eléctrica del suelo - Cubierta a prueba de agua IP66 	
<p>1 Gateway [LoRaWAN PicoLG308N]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 10M/100M RJ45 Ports x 2 - Wifi : 802.11 b/g/n - LoRaWAN Wireless - Frequency Band: 2.4 ~ 2.462GHz - Power Input: 12 V DC, 2 A 	

2.10. Arquitectura de la red inalámbrica de sensores

La arquitectura que se ha propuesto para el desarrollo del sistema de la red de sensores inalámbricos (WSN), se encuentra compuesta por 2 nodos sensores compuestos cada uno de ellos por 1 sensor de temperatura y humedad ambiental LoRaWAN LSN50v2-S31 y un sensor de humedad y temperatura del suelo y EC con LoRaWAN- LSE01-AU915, cada uno de estos sensores cuenta con su propio módulo de comunicación el cual enviara los datos recolectados al Gateway. En la figura 21. Se puede apreciar con más claridad la arquitectura propuesta.

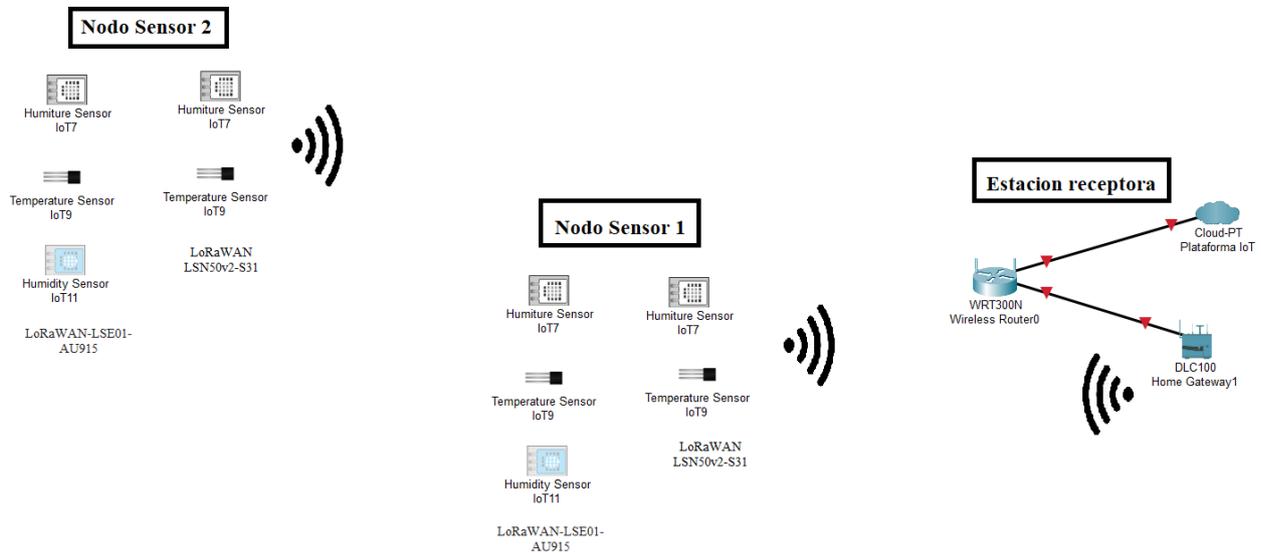


Figura 21-Arquitectura propuesta para la red WSN (Fuente: propia)

El nodo 1 se encuentra a una distancia de 85 Metros con relación al Gateway y se encuentra sembrado con un cultivo de café con variedad Castilla, el segundo nodo se encuentra a una distancia de 250 metros y se encuentra sembrado igualmente con un lote de café de variedad Castilla, en la figura 22, se pueden apreciar con más claridad la ubicación tanto de los nodos sensores como del Gateway y router en el terreno.

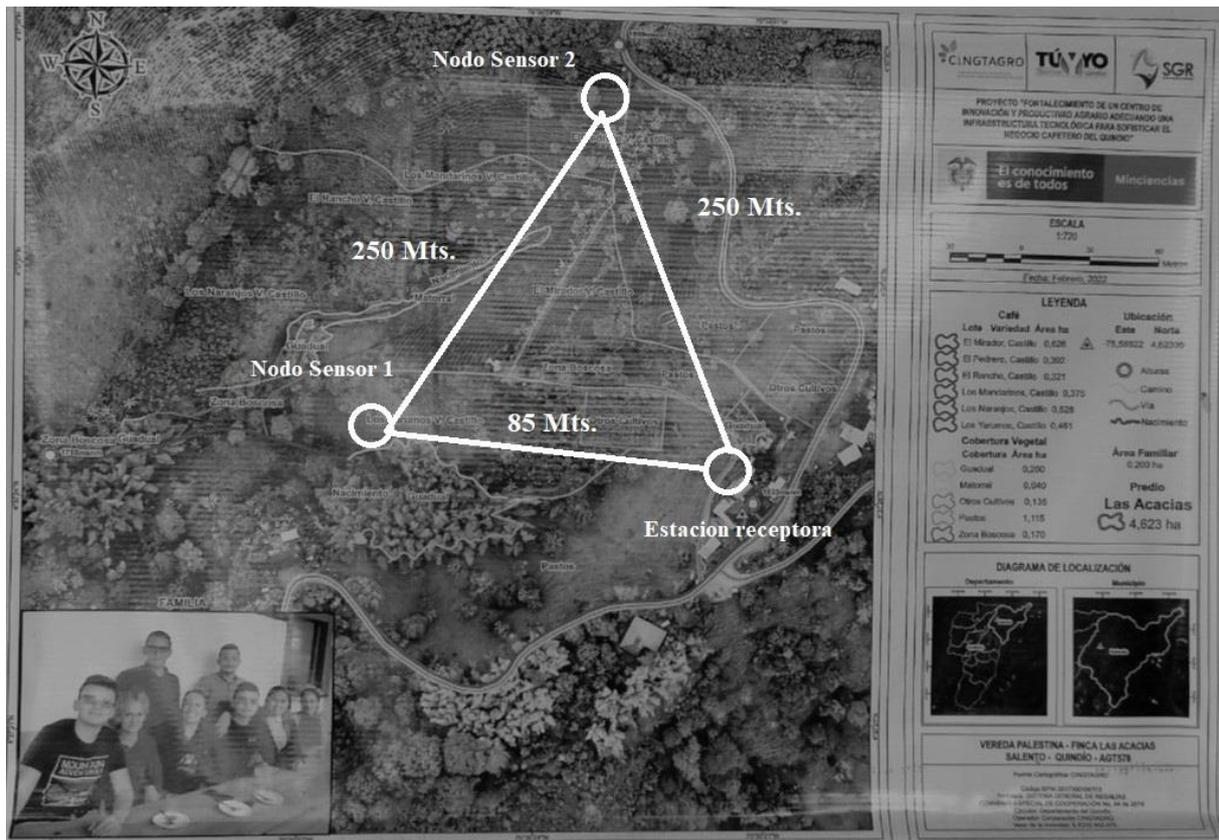


Figura 22 -Ubicación de los nodos sensores en la red WSN propuesta (Fuente: propia)

2.11. Características del cultivo a monitorear

A continuación, en la tabla 9, presentamos la ubicación y otros datos de interés sobre la finca cafetera donde se realizará el estudio.

Tabla IX-Ubicación y otros datos de interés de la finca objeto de estudio

Características	Descripción
Nombre de la finca:	Las Acacias
Ubicación:	Vereda Palestina- Salento (Quindío) Kmt 3.
Extensión total en Has	4.623

Tipos de café:	Variedad Castilla y variedad Cenicafe.
Temperatura:	Entre 14° y 23°
Altura	1.800 m.s.n.
Ubicación Este:	-75.58922
Ubicación Norte:	4.62335

El sistema productivo de la finca se enfoca en la producción de café, turismo, ganadería, especie menores (conejos y gallinas) y elaboración de compostaje. La finca cuenta con 20.000 árboles productivos, distribuidos en 4,5 hectáreas, con una distancia de siembra de 1,20 mts. entre árboles y 2,0 mts. entre calles. El 90% de la finca tiene una topografía montañosa. Las variedades sembradas son: Castilla y Cenicafé. Los árboles de café en la finca empiezan a producir a los tres años de sembrado, a diferencia del café sembrado a menos altura que empieza a producir a los dos años. El caficultor en esta finca no lleva un registro manual en relación con las condiciones climáticas, aunque conoce muy bien los efectos que presentan los cambios de temperatura, al pasar de temperaturas altas por el día a temperaturas muy bajas por las noches, generando quemaduras en las hojas, como se observa en la Figura 23, cuando el árbol sufre estas quemaduras y que retrasa el rebrote dos meses, afectando directamente la producción del cultivo.



Figura 23-Quemaduras en las hojas de un árbol de café (Fuente: Finca las Acacias)

3. Capítulo III - Resultados

3.1. Resultados esperados

Se pudo determinar que los módulos de medición de temperatura y humedad ambiental LoRaWAN LSN50v2-S31 y de temperatura, humedad y conductividad del suelo LoRaWAN-LSE01-AU915 no necesitan de suministro de energía eléctrica ya que cuenta internamente con una batería de Li-SOCI2 8500mAh la cual garantiza una medición de datos en largos periodos de tiempo.

Se desarrollaron pruebas de distancia para determinar el alcance máximo de los módulos inalámbricos LoRaWAN LSN50v2-S31 y LoRaWAN-LSE01-AU915 en relación con los datos enviados al Gateway LoRaWAN PicoLG308N, de modo tal que se garantizara la transmisión confiable de datos sin pérdida y atenuación de la señal desde los nodos sensores hacia la estación receptora encontrando que el alcance máximo está dentro del límite establecido que es de 2 kilómetros en campo abierto. En la figura 24. podemos apreciar el cálculo de evaluación de interferencias por difracción entre el nodo sensor 1 el cual se encuentra a 85 metros de la estación receptora (Gateway) en una banda de operación de 915 MHz.

Diseño Enlace Microondas

Archivo

Evaluación de interferencias por difracción aplicando la Recomendación UIT-R P.676-12

Datos en Transmisión

Nombre del sitio en Transmisión:

Distancia del enlace (Km):

Frecuencia de trabajo (Mhz):

Potencia del transmisor (Wat):

Umbral de recepción (dBm):

Nivel de potencia con valor negativo:

Pérdidas línea transmisión (dB):

Pérdidas conectorización (dB):

Pérdidas en el cable (dB/m):

Pérdidas adicionales Tx (dB):

Distancia de la antena Tx (dB):

Todos los valores se digitan con punto decimal (.)

VARIABLES PRELIMINARES A CONSIDERAR

Margen Desvanecimiento (dB): (*)

Latitud de la ciudad: (°)

Solo valor de los grados

Gradiente de refractividad:

Entre 0 y hasta 318

Altura del transmisor (m):

Altura del receptor (m):

Ancho banda B en (Mhz):

Atenuación por aire seco (dB/km): (*)

Atenuación por vapor agua (dB/km): (*)

Altura primer obstáculo (m):

Distancia primer obstáculo (Km):

Datos en Recepción

Nombre del sitio en Recepción:

Pérdidas línea de recepción:

Pérdidas conectorización (dB):

Pérdidas en el cable (dB/m):

Pérdidas adicionales en Rx (dB):

Suplen disten. Involuntario

Gainancia de la antena Rx (dB):

Figura de ruido LNA Rx (dB):

Evatar interferencia

Salir

Dar clic para obtener los resultados

Recuerde digitar todos los datos antes de proceder

Consideración de la norma para el modelo de propagación por difracción

El modelo de interferencia por DIFRACCIÓN se obtiene con la aplicación de las reglamentaciones establecidas por la UIT.

La pérdida de transmisión básica por difracción $L_d(p)$ no exceda durante el porcentaje de tiempo, $\mu\%$, que experimenta la propagación con visibilidad directa viene dada por:

$$A_p = [v_0 + v_w(p)] d$$

$$L_d(p) = 92,5 + 20 \cdot \log(f)_{\text{MHz}} + 20 \cdot \log(d)_{\text{km}} + L_d(p) + E_{\text{atm}}(p) + A_p \text{ (dB)}$$

$L_d(p)$ = Pérdida por difracción en arista filo de cuchillo. Cuando el valor de v es superior a -0,78 puede obtenerse un valor aproximado mediante la expresión, (de lo contrario proceder con otro

Resultados de análisis de potencia por efecto de la Difracción

Pot. Iso. Rec. Efectiva (P _{IRE}) (dBW):	18.9897	Nivel Potencia recibida (RSL) (dBμV):	81.1494	Ruido termico de umbral (T ₁) (dBW)	-136.9897
Pérdida Espacio Libre L _{sf} (dB):	-76.8300	Nivel Potencia recibida (RSL) (μV):	11414.8352	Pérdidas atmosféricas (A _g) (dB)	0.4250
Nivel Potencia recibida (RSL) (dBW):	-55.8403	Campo eléctrico (dBμV/m):	95.1013	Pérdidas por filo de cuchillo (L _d) (dB)	10.1783
Nivel Potencia recibida (RSL) (dBm):	-25.8403	Recepción relativa: Umbral- RSL (dB):	114.1597	Corrección por trayectoria (L _{sp}) (dB)	-24.0911
				Portadora/Ruido (C/N) (dB)	75.1494

Potencia recibida = $\text{pire} - L_{\text{tx}} - L_{\text{cbx}} - L_{\text{adictx}} - L_{\text{rx}} - L_{\text{crlx}} - L_{\text{carx}} - L_{\text{adictx}} + \text{Ganrx} - (92,5 + 20 \log f + 20 \log d + L_d(p) + E_{\text{atm}}(p) + A_p)$

Figura 24-Calculo nodo servidor1 a 85 metros del Gateway con frecuencia de 915 MHz (Fuente: propia)

Con relación al nodo sensor 2, este se encuentra a 250 metros de la estación receptora (Gateway) en la misma frecuencia de operación de 915 MHZ, podemos apreciar el cálculo de evaluación de interferencias por difracción en la figura 25.

Diseño Enlace Microondas

Archivo

Evaluación de interferencias por difracción aplicando la Recomendación UIT-R P.676-12

Datos en Transmisión

Nombre del sitio en Transmisión:

Distancia del enlace (Km):

Frecuencia de trabajo (Mhz):

Potencia del transmisor (Wat):

Umbral de recepción (dbm):

Nivel de potencia con valor negativo:

Pérdidas línea transmisión (dB):

Pérdidas conectorización (dB):

Pérdidas en el cable (dB/m):

Pérdidas adicionales Tx (dB):

Ganancia de la antena Tx (dBi):

Todos los valores se digitan con punto decimal (.)

VARIABLES PRELIMINARES A CONSIDERAR

Margen Desvanecimiento (dB): (?)

Latitud de la ciudad: Solo valor de los grados

Gradiente de refractividad: Entre -314 hasta 314

Altura del transmisor (m):

Altura del receptor (m):

Ancho banda If en (Mhz):

Atenuación por aire seco (dB/km): (?)

Atenuación por vapor agua (dB/km): (?)

Altura primer obstáculo (m):

Distancia primer Obstáculo (Km):

Datos en Recepción

Nombre del sitio en Recepción:

Pérdidas línea de recepción:

Pérdidas conectorización (dB):

Pérdidas en el cable (dB/m):

Pérdidas adicionales en Rx (dB):

Ganancia de la antena Rx (dBi):

Figura de ruido LNA Rx (dB):

Dar click para obtener los resultados

Recuerde digitar todos los datos antes de proceder

Consideración de la norma para el modelo de propagación por difracción

El modelo de interferencia por DIFRACCIÓN se obtiene con la aplicación de las reglamentaciones establecidas por la UIT.

La pérdida de transmisión básica por difracción $L_{bd}(p)$ no excedida durante el porcentaje de tiempo, $p\%$, que experimenta la propagación con visibilidad directa viene dada por:

$$A_0 = [v_0 + v_w(p)] d$$

$$L_{bd}(p) = 92,5 + 20 \cdot \log(f)_{\text{MHz}} + 20 \cdot \log(d)_{\text{Km}} + L_d(p) + E_{\text{atm}}(p) + A_0 \text{ (dB)}$$

$L_d(p)$ = Pérdida por difracción en arista filo de cuchillo. Cuando el valor de v es superior a $-0,78$ puede obtenerse un valor aproximado mediante la expresión, (de lo contrario proceder con otro

Resultados de análisis de potencia por efecto de la Difracción

Pot. Iso. Rec. Efectiva (FIRE) (dBW):	18.9897	Nivel Potencia recibida (RSL) (dBuV):	96.2475	Ruido termico de umbral (Pt) (dBW)	-130.9897
Pérdida Espacio Libre Lbd (dB):	-61.7319	Nivel Potencia recibida (RSL) (uV):	64919.3291	Pérdidas atmosféricas (Ag) (dB)	0.1250
Nivel Potencia recibida (RSL) (dBW):	-40.7422	Campo eléctrico (dBuV/m)	105.7309	Pérdidas por filo de cuchillo (Ld)(dB)	11.2755
Nivel Potencia recibida (RSL) (dBm):	-10.7422	Recepción relativa: Umbral- RSL (dB)	129.2578	Corrección multirrayecto (Esp) (dB)	-29.3558
				Portadora/Ruido (C/N) (dB)	90.2475

Potencia recibida = $p_{\text{ire}} - L_{\text{tx}} - L_{\text{cbx}} - L_{\text{catx}} - L_{\text{Adictx}} - L_{\text{rx}} - L_{\text{crx}} - L_{\text{carx}} - L_{\text{Adicrx}} + G_{\text{anrx}} - (92.5 + 20 \log f + 20 \log d + L_d(p) + E_{\text{sd}}(p) + A_0)$

Figura 25-Calculo nodo servidor 2 a 250 metros del Gateway con frecuencia de 915 MHz (Fuente: propia)

Cabe aclarar que una de las grandes limitantes del entrenamiento de la red ha sido el no poder disponer de un Dataset con la cantidad de datos suficientes, por lo que ha tocado trabajar con información climatología proveniente de sitios Web como Weather Spark, en la figura 26. Podemos apreciar una gráfica del clima en el municipio de Salento (Quindío) en el mes de Julio de 2023.

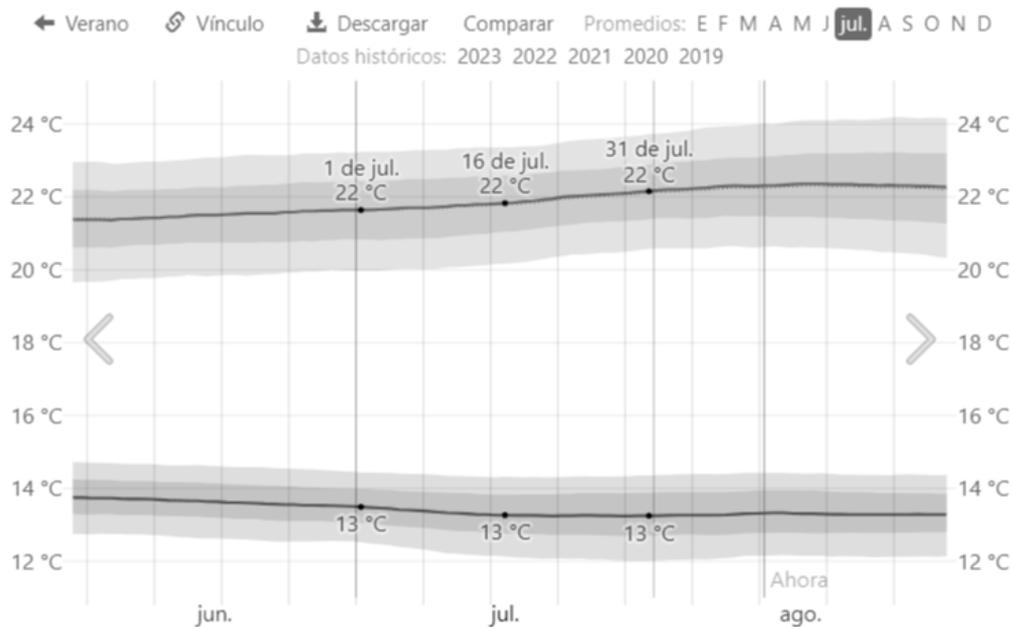


Figura 26-Temperatura promedio en el municipio de Salento (Quindío) en el mes de Julio de 2023(Fuente: (Weather Spark, n.d.)

Para el entrenamiento de la red neuronal se procedió a ajustar cada uno de los pesos de las entradas de todas las neuronas que forman parte de la red neuronal, para que las respuestas de la capa de salida se ajusten lo más posible a los datos que conocemos. De igual forma se aclara que los datos obtenidos provienen de sitios Web de información climatológica, al no contar con un Dataset (Conjunto de datos propio) para la recolección de dichos datos. En la figura 27. Podemos apreciar el entrenamiento de un modelo perceptrón multicapa similar al propuesto para este proyecto.

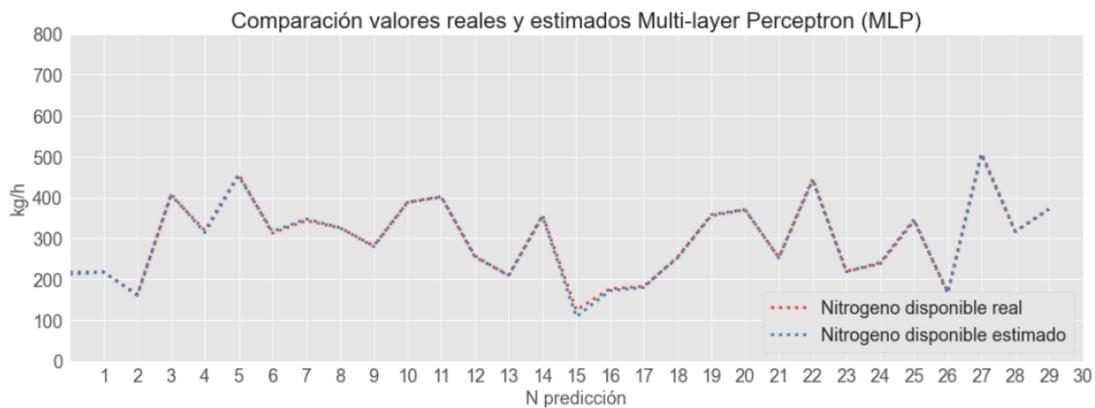


Figura 27-Datos de entrenamiento de un modelo perceptrón multicapa

(Fuente: (Egas Daza & Bravo Portilla, 2022))

Una cuestión importante de resolver en el método de entrenamiento es el de establecer qué forma se genera la población inicial. La forma más habitual de hacerlo en los algoritmos genéticos es generar la población inicial aleatoriamente, con valores obtenidos a través de una distribución uniforme definida dentro de un rango determinado. Los resultados obtenidos para esta serie de experimentos permiten afirmar que el método propuesto es menos dependiente de los valores iniciales que el algoritmo.

Mediante la adición de valores preseleccionados en la población inicial se logra que el porcentaje de entrenamiento aumente en gran medida, para altos valores de inicialización.

Entre otros resultados que logramos obtener, tenemos:

Diseño del modelo caficultor digital: Se ha avanzado de manera considerable en la definición y diseño del modelo Caficultor Digital. Este enfoque innovador busca emular la inteligencia del caficultor humano, permitiendo la anticipación y prevención de eventos no deseados en el cultivo de café.

Propuesta de red experimental IoT: Se ha propuesto un diseño detallado de una red experimental IoT destinada a la recolección de datos agroambientales en una finca de café específica, en la finca "Las Acacias".

Este diseño incluye la selección de sensores y tecnologías de bajo costo, estableciendo una ruta gradual hacia la adopción tecnológica.

Modelos de Predicción: Se llevaron a cabo pruebas iniciales con modelos de predicción, incluyendo una red neuronal multicapa (MLP) y un árbol de decisión J48. Los resultados actuales no alcanzaron las expectativas debido a la escasez de datos reales, aunque sí se pudieron establecer bases para futuras mejoras.

4. CAPITULO IV-Conclusiones

La culminación de este proyecto ha proporcionado valiosas ideas claves y avances significativos en la aplicación de tecnologías emergentes para mejorar la producción de café. A través de un enfoque innovador, se ha explorado la creación de un "Caficultor Digital", incorporando Machine Learning e IoT para replicar la experiencia del caficultor humano. En esta sección de conclusiones, se evalúa el cumplimiento de los objetivos del proyecto, los aportes a líneas de investigación y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el impacto del proyecto, la producción asociada y se presentan líneas de trabajo futuro.

4.1. Cumplimiento de objetivos del proyecto

Durante el desarrollo del proyecto, se ha alcanzado un sólido progreso hacia la consecución de los objetivos planteados. Se logró un diseño detallado del modelo Caficultor Digital, así como la propuesta de una red experimental IoT. A pesar de ciertas limitaciones, como la escasez de datos reales, se han sentado las bases para avanzar hacia la implementación completa del sistema. La evaluación del cumplimiento de estos objetivos proporciona una visión integral de los logros obtenidos y las áreas que requieren mayor atención en futuras etapas.

4.2. Aportes a líneas de investigación de grupo y a los ODS

El proyecto ha realizado contribuciones a las líneas de investigación del grupo, destacándose en la convergencia de tecnologías como Machine Learning y IoT en el sector agrícola. Además, se identificaron aportes

significativos a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente aquellos relacionados con la producción agrícola sostenible y la innovación tecnológica, relacionados a:

- **ODS 2: Hambre Cero:** Este objetivo se centra en poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria, mejorar la nutrición y promover la agricultura sostenible.
- **ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura:** Este objetivo destaca la importancia de construir infraestructuras resilientes, fomentar la industrialización inclusiva y fomentar la innovación.
- **ODS 12: Producción y Consumo Responsables:** Este objetivo busca garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, lo que incluye prácticas agrícolas respetuosas con el medio ambiente.
- **ODS 13: Acción por el Clima:** La innovación tecnológica y la sostenibilidad en la agricultura son fundamentales para abordar los impactos del cambio climático, lo que se aborda en este objetivo

4.3 Impacto del proyecto

El impacto del proyecto se extiende más allá de la esfera tecnológica, abordando desafíos reales en el cultivo de café. La propuesta del Caficultor Digital busca mejorar la toma de decisiones y la eficiencia en la producción, impactando directamente en la calidad y cantidad de la cosecha. Este enfoque innovador tiene el potencial de transformar las prácticas tradicionales del caficultor, introduciendo nuevas perspectivas y mejoras en la sostenibilidad de la producción.

4.4 Producción asociada al proyecto

Si bien la producción directa asociada al proyecto aún se encuentra en una fase incipiente debido a la necesidad de implementar completamente la red de sensores, se anticipa que la obtención de datos en tiempo real conducirá a una producción más precisa y eficiente. La relación entre la implementación de tecnologías y la producción se explorará a medida que se despliegan los sensores y se complete la recopilación de datos. Sin embargo, durante el desarrollo del proyecto en este año 2023 se lograron postular y obtener los siguientes productos:

Tipo de producto	Categoría Publindex	Fecha de presentación	Observaciones
Artículo de investigación presentado a la revista Ingeniería de la "Universidad Distrital Francisco José de Caldas" en la ciudad de Bogotá.	B	26 de Septiembre de 2023	El artículo fue cargado en el repositorio OJR de la universidad, pero hasta el momento solo se ha realizado la revisión antiplagio del artículo.
Artículo de investigación presentado a la revista Tecnológicas del "ITM" en la ciudad de Medellín.	B	28 de Noviembre de 2023	El artículo fue cargado en el repositorio OJR de la universidad, pero hasta el momento no han informado sobre ningún tipo de revisión.
Ponencia titulada "El Caficultor Digital: Una apuesta por la inclusión de la tecnología en el agro". La cual se presentó en ponencia oral para el evento denominado "10ª semana internacional de Ciencia, tecnología e innovación" de la Universidad Francisco de paula Santander" el día 21 de Noviembre de 2023.	No aplica	21 de Noviembre de 2023	El evento realizado plasmó todas las ponencias y artículos presentados a través de las memorias del evento con ISSN: 2422-3115 (Online).

4.5 Líneas de trabajo futuras

Las conclusiones del proyecto señalan claramente áreas que requieren atención y desarrollo continuo. Las líneas de trabajo futuro se centran en la

expansión de la red de sensores, la mejora de la calidad del Dataset mediante datos reales, la optimización del modelo Caficultor Digital y la construcción y evaluación de modelos de aprendizaje para la predicción y prescripción de los datos analizados que permitan llevar a cabo acciones específicas y que además permita optimizar el proceso de toma de decisiones. Por otra parte, se explorarán oportunidades para diversificar las aplicaciones de la tecnología en el sector agrícola y la adaptación del modelo a otras regiones cafetaleras.

5. Referencias bibliográficas

- Abad Buri , J. A., & Farez Sigcha, J. P. (2018). *Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de variables climáticas que afectan al cultivo de café, en la plantación ASOPROCCSI ubicado en Santa Isabel*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Egas, C., Viracocha , D., & Rivera, J. (2019). Implementación de una red inalámbrica de sensores para la gestión de luminarias utilizando IPv6. *Enfoque UTE*, 45-56.
- Agricultura 4.0*. (05 de 12 de 2022). Obtenido de <https://bit.ly/3HyFtyn>
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam , Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *IEEE Communications Magazine*, 102-114.
- Alarcón López, Á. H., Quimbayo Castro, J. A., García Perdomo, E., & Marín Zambrano, A. M. (2022). WSN redes de sensores inalámbricos y su aplicación a la agricultura de precisión: un caso de metaanálisis. *Actas del VII Congreso de Investigación, Desarrollo e Innovación de la Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología* (págs. 245-258). Neiva: UniCyt.
- Arcila P. , J., Farfán V, F., Moreno B, A., Salazar G, L. F., & HIncapie, E. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia*. Chinchiná : Cenicafe.
- Badua, K. R. (2015). Internet of Things (lot) and Cloud Computing for Agriculture in India. *International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering*, 27-30.

- Bahadur Sinha, B., & Dhanalakshmi, R. (2021). Recent advancements and challenges of Internet of Things in smart agriculture: A survey. *Future Generation Computer Systems* , 169-184.
- Bejarano, J. A. (1980). Los estudios sobre la historia del café en Colombia. *Cuadernos de economía* , 115-140.
- Biggs, P., Garrity, J., & LaSalle, C. (2017). *Harnessing the Internet of things for global development*. San Francisco: Cisco Editorial.
- Borgia, E. (2014). The internet of things vision: Key features, applications and open issues. *Computer Communications*, 1-31.
- Cadena Chavarro, C. D., & Pulido Feo, L. C. (2021). *WSN para el monitoreo continuo de variables ambientales*. Bogota D.C.: Pontificia Universidad Javeriana.
- Cafe de Colombia*. (24 de 06 de 2010). Obtenido de http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/el_cafe_de_colombia/una_bonita_historia/
- Calvo Garcia, J. (2017). *Smart Agro Visualization Tool*. Barcelona: Universitat de Lleida.
- Castro López, S. I. (2021). *Análisis y diseño de un mecanismo de control de congestión en la tecnología NB-IoT para despliegues de comunicación masiva de internet de las cosas*. Chimborazo: Universidad nacional de Chimborazo.
- Centro ODS. (13 de 05 de 2021). *El Espectador*. Recuperado el 19 de 04 de 2023, de <https://www.elespectador.com/ambiente/por-que-ha-fracasado-la-agricultura-en-colombia/>

Didacticas electronicas. (s.f.). Recuperado el 07 de 10 de 2023, de <https://didacticaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/lora/LG308N-915-detail>

Egas Daza , J., & Bravo Portilla, A. F. (2022). *Calculando la disponibilidad de nitrógeno en suelos establecidos con cultivos de café utilizando técnicas de aprendizaje automático (Tesis de grado)*. Popayán: Universidad del Cauca.

Egas, C., Viracocha, D., & Rivera, J. (2019). Implementación de una red inalámbrica de sensores para la gestión de luminarias utilizando IPv6. *Enfoque UTE*, 10(4), 45-56.

Espinoza García, M., Álvarez Martínez, G., & Chora García, D. (2019). La perfecta combinación de la internet de las cosas y la agricultura de precisión. *Revista Killkana Técnica*, 29-36.

Evans, Dave. (2011). *Internet de las cosas, como la proxima evolucion de Internet lo cambia todo*. San Francisco: Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG).

Falguni , J., Jamar, R., & Churi, P. (2018). Future and challenges of internet of things. *International Journal of Computer Science & Information Technology*, 13-26. doi:10.5121/ijcsit.2018.10202

Fernandez, S. (16 de 08 de 2018). *Xataka Movil*. Obtenido de <https://www.xatakamovil.com/conectividad/11mbps-11gbps-evolucion-estandares-wifi-wifi-802-11ax>

Fremantle, P. (s.f.). WSO2. Recuperado el 21 de 07 de 2023, de

<https://resources.wso2.com/whitepapers/a-reference-architecture-for-the-internet-of-things>

García Díaz, L. G., & Gordillo Rodríguez, S. A. (2022). *Impacto de las prácticas sostenibles en la producción de café colombiano y su participación en el mercado mundial*. Bogota D.C.: Universidad EAN.

Grind, P. D. (13 de julio de 2018). *Colombia: el país cafetero por excelencia*.

Obtenido de <https://perfectdailygrind.com/es/2018/07/13/32894/>

Gutierrez Reina, D. (2010). *Diseño de redes móviles AD HOC en aplicaciones de transporte sobre entornos NS-2*. Sevilla: Universidad de Sevilla.

Gutiérrez-Lopera, J. E., Toloza-Rangel, J. A., Soto-Vergel, Á. J., López-

Bustamante, O. A., & Guevara-Ibarra, D. (2021). Sistema integrado de monitoreo inalámbrico de variables agroambientales en un cultivo de tomate para la generación de mapas de intensidad. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2), 163-180. doi:<https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021014>

IBERO. (s.f.). Recuperado el 20 de 04 de 2023, de

<https://www.iberro.edu.co/historia/>

IBERO. (16 de 04 de 2023). Obtenido de

<https://www.iberro.edu.co/documentos/>

Infobae Colombia. (18 de 02 de 2022). Recuperado el 18 de 04 de 2023, de

<https://www.infobae.com/america/colombia/2022/02/18/agro-en-colombia-en-jaque-por-la-baja-implementacion-de-la-tecnologia/>

- Kumar Verma, N., & Usman, A. (2016). Internet of things (IoT): A relief for indian farmers. *2016 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)* (págs. 831-835). Seattle: IEEE Editorial.
- Machado, A. (2001). El cafe en Colombia a principios del siglo XX. *Desarrollo económico y social en Colombia siglo XX*, 77-97.
- Meneses Vidal, J. A., & Urrutia Quirá, S. A. (2021). *Desarrollo de una red de sensores para monitoreo de macronutrientes primarios para cultivo de café aplicado a un caso de estudio en Tecnicafé (Tesis de pregrado)*. Popayán: Uniautonoma del Cauca.
- Montoya Muñoz, A. I., & Caicedo Rendon , O. M. (2020). An Approach Based on Fog Computing for Providing Reliability in IoT Data Collection: A Case Study in a Colombian Coffee Smart Farm. *applied sciences*. doi:<https://doi.org/10.3390/app10248904>
- Mora Gonzalez, S. (2015). Entendiendo el Internet de las cosas. *Investiga TEC*, 16-23.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). *Mechanisms of salinity tolerance*. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681. Obtenido de <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- National Instruments Notas Tecnicas*. (22 de 04 de 2009). Obtenido de <http://www.ni.com/white-paper/7142/es/>
- NEC, T. P. (23 de 10 de 2014). <https://www.nec.com/>. Obtenido de https://www.nec.com/en/press/201410/global_20141023_03.html

nutricontrol. (17 de 03 de 2020). Recuperado el 19 de 04 de 2023, de <https://nutricontrol.com/es/el-internet-de-las-cosas-y-su-aplicacion-en-la-agricultura/>

Ocampo López, O. L., Castañeda Peláez, K., & Vélez Upegui, J. J. (2017). Caracterización de los ecotopos cafeteros colombianos en el Triángulo del Café. *Boletín de la Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 13(2), 132-141. Obtenido de Boletín de la Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas: <https://revistas.uptc.edu.co/index.php/perspectiva/article/view/6100/5130>

Omega Engineering. (25 de 01 de 2019). Obtenido de <https://es.omega.com/prodinfo/sensores-inalambricos-transmisores.html>

Ordieres Meré, J., Martínez, F. J., de Pisón, A., González Marcos, A., Alba Elías, F., Lostado Lorza, R., & Pernía Espinoza, A. V. (2009). *Redes inalámbricas de sensores: Teoría y aplicación práctica*. La Rioja: Universidad de la Rioja -Servicio de Publicaciones.

Ordoñez Olmedo , A. S., & Murillo Poveda , C. T. (2021). *Desarrollo de un prototipo en IoT para la sistematización de los parámetros que controlan la producción de café versión 1.0*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.

Ossa Duque, S. I. (2017). Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos. *Revista Vector*, 51-60. doi:10.17151/vect.2017.12.6

Oviedo, A., & Sierra, L. (2019). Importancia de los términos de intercambio en la economía colombiana. *Revista de la CEPAL*, 125-154.

Pérez, D., & Risc, R. (2020). Implementación de Lora y Lorawan como escenario futuro de la industrias 4.0 en el sector agroindustrial peruano. *Revista Campus*, 133-147.

Perez, F., & Guerra, J. (2015). Internet de las cosas. *Perspectiv@S*, 45-49.

Pinto Rios, J. D. (2015). *Monitoreo de cultivos con redes de sensores Xbee, arduino y dispositivos de medicion de suelos (Tesis de pregrado)*. Pereira: Universidad Tecnologica de Pereira.

Pusdá Chulde, M. R. (2022). *Algoritmos para agricultura de precisión utilizando computación de alto rendimiento (Tesis de postgrado)*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.

Ramirez C, L. (2012). *Diseño de una arquitectura para redes de sensores con soporte para aplicaciones de deteccion de eventos*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.

Ramirez, Victor Hugo;. (23 de 06 de 2011). Obtenido de Cenicafe Centro nacional de investigaciones de cafe:

https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/sp_al_sol

Revista Semana. (16 de 11 de 2022). Recuperado el 18 de 04 de 2023, de <https://www.semana.com/foros-semana/articulo/tecnificacion-el-impulso-que-necesita-el-campo-colombiano-para-tener-un-mejor-desarrollo/202223/>

Ríos Hernández, R. (2021). La Agricultura de Precisión (Una necesidad actual). *Revista Ingeniería Agrícola*, 25-30.

- Rose, K., Eldrige, S., & Chapin, L. (2015). *La Internet de las cosas - una breve reseña*. Massachusetts : Creative Commons.
- Salazar, H., & Duque, H. (2019). Variables agronómicas determinantes de la productividad del cultivo de café en fincas del departamento de caldas. *Revista Cenicafe*, 70, 81-92.
doi:<https://doi.org/10.38141/10778/70106>
- Sampieri, R., Collado, C., & Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill Education.
- Servicio nacional de aprendizaje (SENA). (2014). *Caficultura y la gente del café*. Armenia: Sena Editorial.
- Tapia Zurita, J. L. (2006). *Tutorial de redes de sensores ad hoc con eficiencia en energía*. Puebla: Universidad de las Americas.
- Urbano, Molano, F. A. (2013). Redes de Sensores Inalambricos Aplicadas a Optimizacion en Agricultura de precision para cultivos de cafe en Colombia. *Journal de ciencia e ingenieria*, 46-52.
- Valderrama Hurtado, L. D. (2022). *Red inalámbrica de sensores para monitoreo de cultivo de café*. Bogota D.C.: Universidad de los Andes.
- Varshitha , D. N., & Choudhary, S. (2022). Soil Fertility and Yield Prediction of Coffee Plantation using Machine Learning Technique. *Research Journal of Agricultural Sciences*, 514-518.
- Villon Valdiviezo , D. (2009). *Diseño de una red de sensores inalambrica para agricultura de precision (Tesis de Grado)*. Lima: Creative Commons.
- Weather Spark*. (s.f.). Recuperado el 08 de 06 de 2023

Zapata Ros, M. (2013). Analítica de aprendizaje y personalización. Revista Científica de Tecnología Educativa, 88-118.