

**PROTOTIPO DE RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA LA MEDICIÓN DE
TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL SUELO EN HUERTOS Y COMPOST
DEL PARQUE BIOTEMÁTICO MEGUA.**

JESÚS ALBERTO HERNÁNDEZ FUENTES



UNIVERSIDAD DE LA COSTA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y ELECTRÓNICA

BARRANQUILLA, COLOMBIA

2022

**PROTOTIPO DE RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA LA MEDICIÓN DE
TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL SUELO EN HUERTOS Y COMPOST
PARQUE BIOTEMÁTICO MEGUA.**

JESÚS ALBERTO HERNÁNDEZ FUENTES

**PROYECTO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

TUTOR

MsC. GABRIEL DARIO PIÑERES ESPITIA

MsC. LUIS FERNANDO MURILLO FERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD DE LA COSTA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y ELECTRÓNICA

BARRANQUILLA, COLOMBIA

2022

Dedicatoria

Dedico este logro a mi amada madre Ailer Fuentes, mi padre Jesús Hernández y mi hermana Sally Hernández por creer en mis capacidades y brindarme el apoyo incondicional durante toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi desarrollo como persona, por estar presentes en mis proyectos y ser las personas que me motivan cada día a seguir alcanzando mis metas, gracias por sus preciosas palabras en los momentos que más lo necesite. Ofrendo a ustedes este trabajo como muestra de agradecimiento a su paciencia y amor, gracias por formar parte de mi vida.

Mis amigos Juan De Dios, Kelly Villa, Braulio Villalba y Diego Cañon, lleno de nostalgia no puedo evitar recordar tantas experiencias vividas a lo largo de nuestra etapa de estudios, gracias por tan memorables momentos.

A los profesores Osiris Frías y Norman Jiménez por su valioso conocimiento el cual estuvieron siempre dispuestos a compartir, su calidez humana y la forma de expresar su conocimiento motiva y propicia el amor por la ciencia, los llevaré conmigo durante mi desarrollo profesional.

Katheryne Oñate, Edgar Díaz y Martín Hernández gracias por sus sabios consejos y apoyo emocional, les deseo muchos éxitos en su vida y que las circunstancias siempre confabulen a su favor y logren alcanzar todos sus sueños.

Me siento afortunado de haber coincidido en este mundo con tan maravillosas personas.

“La normalidad es un camino pavimentado:

Es cómodo para caminar, pero no crecen flores en él”

(Vincent Van Gogh)

Agradecimientos

Gabriel Piñeres, agradezco enormemente su dedicación, paciencia y apoyo permanente en este proceso. Sus conocimientos y aportes siempre fueron útiles para nutrir el contenido de este trabajo. Usted formó parte importante para la consecución de este logro, gracias por sus sabias palabras de aliento en los momentos más arduos de este proyecto.

David Lamilla y Iader Lamilla me siento plenamente agradecido por su colaboración en el desarrollo de las pruebas en el Parque biotemático Megua, gracias por su apoyo durante la instalación de los dispositivos y durante las fases de pruebas del prototipo. Igualmente, por la información brindada referente a datos técnicos que sirvieron para robustecer el contenido de este trabajo, ustedes hacen un magnífico trabajo muy beneficioso para la preservación de la naturaleza.

Nota de aceptación

4,65



Ing. José Caicedo Ortiz



Ing. Braulio Villalba Nisperuza

Barranquilla, Septiembre del 2022

Resumen

Las redes de telecomunicaciones son transversales y sumamente importantes para múltiples soluciones tecnológicas de la actualidad. Algunas de estas se enfocan en aplicaciones de agricultura en donde las condiciones y extensión de los cultivos crean la necesidad de obtener en tiempo real información de ciertas variables. Estos datos son necesarios para el monitoreo, toma de decisiones y control adecuado de procesos referentes a la salud de las plantas con el objetivo de mejorar la productividad y calidad de las mismas. Es por esto, que este documento plantea una red inalámbrica de bajo costo para el monitoreo de plantaciones en ambiente tropical enfocada especialmente en los huertos de hierbabuena y orégano, del parque biotemático Megua y los contenedores de compost. Para implementar la red inalámbrica se tomó como base los módulos de comunicación XBee Pro S2 de la compañía Digi y placas programables Arduino UNO, que brindan confiabilidad y bajo costo. Además, se desarrolló una librería para facilitar la programación e inserción de nuevos dispositivos en modo API para aprovechar las características funcionales de este protocolo. La red se desplegó en huertos y contenedor de compost del parque biotemático Megua, ubicado en el departamento del Atlántico en el municipio de Galapa, para garantizar condiciones ideales en el suelo de los huertos y el compost. Para ello se implementó un servidor, haciendo uso de una plataforma Raspberry Pi como computadora principal. Finalmente se realizaron pruebas de funcionamiento del dispositivo en donde se midieron paquetes perdidos, niveles de RSSI y consumo energético de los dispositivos. Los resultados mostraron que el dispositivo opera correctamente en el tiempo, mostrando valores promedios de temperatura entre 24 °C y 31,5 °C y humedad relativa entre 37% y 72%; adicionalmente, el consumo energético aproximado del prototipo fue de 80 mA en periodo de transmisión de datos y de 50 mA en periodo de sueño del módulo XBee.

Palabras clave: Arduino, modo API, monitoreo de humedad, monitoreo de temperatura, XBee, ZigBee, Raspberry, red de sensores inalámbricos, WSN, RSSI, phpMyAdmin.

Abstract

Telecommunications networks are transversal and extremely important for multiple technological solutions today. Some of these focus on agricultural applications where the conditions and extension of the crops create the need to obtain real-time information on certain variables. These data are necessary for monitoring, decision-making and adequate control of processes related to plant health with the aim of improving their productivity and quality. For this reason, this document proposes a low-cost wireless network for monitoring plantations in tropical environments, focused especially on mint and oregano orchards, in the Megua biotematic park, and compost bins. To implement the wireless network, the XBee Pro S2 communication modules from the Digi company and Arduino UNO programmable boards were taken as a basis, which provided reliability and low cost. In addition, a library was developed to facilitate the programming and insertion of new devices in API mode to take advantage of the functional characteristics of this protocol. The net was deployed in the orchards and compost bins of the Megua biotematic park, located in the department of Atlántico in the municipality of Galapa, to guarantee ideal conditions in the soil of the orchards and the compost. For this, a server was implemented, using a Raspberry Pi platform as the main computer. Finally, device performance tests were carried out where lost packets, RSSI levels and energy consumption of the devices were measured. The results showed that the device operates correctly over time, showing average temperature values between 24 °C and 31.5 °C and relative humidity between 37% and 72%; furthermore, the approximate power consumption of the prototype was 80 mA in the data transmission period and 50 mA in the sleep period of the XBee module.

Keywords: Arduino, API Mode, Humidity Monitoring, Temperature Monitoring, XBee, ZigBee, Raspberry, Wireless Sensor Network, WSN, RSSI, phpMyAdmin.

Contenido

Lista de tablas y figuras 11

 Tablas..... 11

 Figuras..... 12

Glosario..... 15

Introducción 16

1 Descripción del problema 20

2 Objetivos de la Investigación..... 22

 2.1 Objetivo General..... 22

 2.2 Objetivos Específicos..... 22

3 Justificación 23

4 Marco teórico 24

 4.1 Marco conceptual..... 24

5 Metodología 47

 5.1 Escenario de aplicación y diseño del prototipo..... 51

 5.2 Implementación del prototipo red de sensores inalámbrica..... 67

 5.3 Pruebas de funcionamiento del prototipo de red inalámbrica de sensores desplegado
102

6 Resultados y análisis 108

 6.1 Resultados de pruebas de distancia máxima de conectividad inalámbrica del
sistema de monitoreo agrícola 109

6.2	Resultados de pruebas de funcionamiento del sistema de monitoreo agrícola implementado en el parque biotemático de Megua	112
7	Conclusiones	122
8	Referencias.....	125

Lista de tablas y figuras

Tablas

Tabla 4.1 Artículos de WSN aplicados en agricultura.....	40
Tabla 5.2 Metodología EDS para una red de sensores inalámbricas basada en ZigBee aplicada al monitoreo agrícola	47
Tabla 5.3 Modo de trabajo de modulos XBee’s usados en la red inalámbrica de sensores.....	81
Tabla 5.4 Parámetros generales en X-CTU para configuración de la red inalámbrica de sensores	81
Tabla 5.5 Parámetros relevantes de módulo XBee pro S2.....	82
Tabla 5.6 Recursos, herramientas y dispositivos	100
Tabla 5.7 Parámetros prueba de comunicación malecón del rio Barranquilla, Atlántico.....	104
Tabla 6.8 Resultados prueba de comunicación máxima distancia malecón del rio Barranquilla, Atlántico.....	109
Tabla 6.9 Resumen de pruebas de funcionamiento del sistema de monitoreo desplegado en el parque Biotemático Megua	112
Tabla 6.10 Análisis de pérdida de paquetes, niveles de RSSI y tiempo de inactividad.....	113
Tabla 6.11 Medidas estadísticas de datos de temperatura y humedad.....	119

Lista de figuras

Figuras

Figura 1. Topología punto a punto.....	24
Figura 2. Topología Estrella	25
Figura 3. Topología de anillo.....	26
Figura 4. Topología malla completa	27
Figura 5. Topología de árbol.....	27
Figura 6. Topología mixta.....	29
Figura 7. Comparación modelo ZigBee y modelo OSI.	33
Figura 8. Consumo promedio de energía.....	36
Figura 9. Vista satelital parque biotemático Megua	52
Figura 10. Despliegue de red en parque biogenético Megua.....	53
Figura 11. Diagrama de bloques del sistema	58
Figura 12. Módulo XBee Pro Serie 2 y antena Rp-sma.....	61
Figura 13. Shield para acople Arduino y XBee	61
Figura 14. Arduino Uno.....	62
Figura 15. Sensor humedad FC-28.	62
Figura 16. Sensor temperatura DS18820.	63
Figura 17. Bee adapter V1.4.	64
Figura 18. Power Bank 10.000 mAh.	65
Figura 19. Raspberry Pi 3	66
Figura 20. Diagrama de red desplegado.	67
Figura 21. Flujoograma de funcionamiento general del prototipo red de sensores inalámbrica.	68
Figura 22. Estructura trama API de módulos XBee.	70

Figura 23. Flujograma de código para la generación de tramas API.....	71
Figura 24. Flujograma para captura y transmisión de datos de temperatura y humedad.....	72
Figura 25. Código Arduino para captura de datos de temperatura y humedad.....	73
Figura 26. Tramas API enviadas desde Arduino con sensores en funcionamiento	74
Figura 27. Trama API enviadas desde Arduino sin sensores en funcionamiento.....	74
Figura 28. Interface principal de la herramienta X-CTU.....	75
Figura 29. Ventana de opciones previo al escaneo de puertos.	76
Figura 30. Opciones de configuración del puerto de conexión del módulo XBee.	77
Figura 31. Resultado de módulos encontrados en la herramienta X-CTU.	78
Figura 32. Layout de X-CTU para la configuración de los parámetros de los módulos XBee.	78
Figura 33. Herramientas de interfaz de configuración de módulo XBee.....	79
Figura 34. Interface Update Firmware X-CTU.....	80
Figura 35. Creación o cargue de perfiles con configuración para XBee.	80
Figura 36. Configuración SP y SN en nodo coordinador	84
Figura 37. Configuración SP y SN en nodos finales.	84
Figura 38. Código Python para decodificación de Tramas API.	86
Figura 39. Interfaz phpMyadmin.	87
Figura 40. Código página de consulta de datos.	88
Figura 41. Página de consulta de datos.....	89
Figura 42. Código página de presentación de datos	89
Figura 43. Flujograma consulta y presentación de registros en página Web.....	91
Figura 44. Consulta de dispositivo en página presentación de datos.....	92
Figura 45. Conexión de sensores, power bank y antena.	92
Figura 46. Acople Arduino, Shield XBee y XBee de End Device.	93

Figura 47. Mota del prototipo de red inalámbrica de sensores.	94
Figura 48. Mota 1 contenedor de compost.....	95
Figura 49. Mota 2 huerto de hierbabuena.	95
Figura 50. Mota 3 huerto de Orégano.	96
Figura 51. Nodo central del prototipo de red inalámbrica de sensores.....	97
Figura 52. Antena del nodo central (0013A200409E2F93).....	98
Figura 53. Visualización de datos en tiempo real a través de Raspberry Pi.	99
Figura 54. Consulta de datos a través de móvil.	99
Figura 55. Escenario de prueba para establecer la máxima distancia de conectividad de los nodos finales.	102
Figura 56. Puntos de toma de datos para pruebas en Malecón del río Magdalena.	103
Figura 57. Acceso a base de datos a través del explorador de la Raspberry Pi.	107
Figura 58. Grafica nivel RSSI vs Distancia.	111
Figura 59. Pérdida de paquetes por mota vs horas del día.....	114
Figura 60. Niveles de RSSI range test X-CTU.	115
Figura 61. Grafica de datos de temperatura por Mota.	117
Figura 62. Grafica de datos de humedad por Mota.....	117
Figura 63. Configuración usada para obtener los valores de consumo de energía en los nodos finales.....	120
Figura 64. Consumo de energía medido del prototipo.....	120
Figura 65. Ciclo de consumo energético de prototipo de sensores inalámbricos.	121

Glosario

Comunicación: Transmisión de un mensaje o señal desde un receptor hasta un emisor por un medio de comunicación.

Librería: Archivo o grupo de archivos de programación que ejecutan una funcionalidad específica que facilita la programación.

Nodo sensor: Dispositivo que se encarga de recoger información de variables ambientales, de agricultura o de otro tipo, a través de sensores conectados a una plataforma de adquisición de datos, para transmitirlos inalámbricamente a un sumidero o coordinador.

Red: Interconexión de diferentes dispositivos para la transmisión de señales.

Rol: Función que desempeña un dispositivo en la red.

Tipología: Tipo o modelo que determina la clasificación de las redes.

Sensor: Dispositivo sensible que detecta las variaciones de una determinada variable del medio en el que se encuentra.

Topología: Referente a las características de la geometría que forman una red.

WSN: Red de sensores inalámbricos (Wireless sensor networks).

ZigBee: Conjunto de protocolos de red inalámbrica basados en el estándar IEEE 802.15.4

Introducción

Si bien la agricultura es una de las actividades más antiguas de la humanidad, esta no siempre se ha ejercido desde el origen de la especie humana. El dominio y conocimiento de este arte permitió al hombre reducir su estilo de vida nómada a sedentario produciendo también otro factor; el asentamiento de personas, lo que hoy en día se denominan ciudades. Se puede decir entonces, que la agricultura es un eje muy significativo y por qué no el más importante para el desarrollo de las sociedades de todos los tiempos (Morante, 2000).

Resulta interesante observar cómo las actividades de agricultura se han visto influenciada a lo largo del tiempo por creencias populares y a su vez por múltiples áreas del conocimiento científico, pasando de técnicas arcaicas y rituales ancestrales a tecnologías de punta que involucran diversas áreas de ingeniería, genética y meteorología (Mariaca, 2003).

Al hablar de la historia de la agricultura es inevitable mencionar el pueblo Inca debido a la cantidad de aportes realizados para el desarrollo de esta actividad. Esta civilización logró optimizar de forma eficiente la distribución de cultivos para el riego y cosecha de los alimentos, por ejemplo, la agricultura de terrazas; la cual prepara un suelo montañoso para darle forma de escalones y permitir la agricultura en terreno plano, esto propicia que el suelo tenga más disponibilidad de agua dado a que esta se ve obligada a reducir su velocidad al bajar por la pendiente causando que haya más infiltración, este tipo de construcciones sumado a los fertilizantes naturales como el guano y heces de animales potenciaron la producción de alimentos de esta civilización (Salaverry, 2018).

La necesidad de alimentación es perpetua en cualquier sociedad es por ello que la agricultura se ha convertido en la base económica de muchas ciudades y países, esta actividad genera el 10.46 % del PIB mundial y el 6.74% en Colombia. Ambos datos para el cierre del año 2019 (The Global Economy, 2020).

Las frutas y verduras son componentes importantes de una dieta saludable. Un bajo consumo de frutas y verduras está asociado a una mala salud y a un mayor riesgo de enfermedades no transmisibles. Se estima que en 2017 unos 3,9 millones de muertes se debieron a un consumo inadecuado de frutas y verduras. (Organización mundial de la salud, 2019). Las frutas y las verduras son una fuente rica de vitaminas y minerales, además contienen sustancias muy beneficiosas para la salud e incluso pueden servir como alternativas para tratar enfermedades leves, ejemplo de esto son la hierbabuena y el orégano (Lozano et al., 2004).

Este trabajo se basa en el estudio de condiciones de temperatura y humedad relativa en un cultivo de orégano y hierbabuena ubicados en el parque biotemático de Pital de Megua, ubicado en el municipio de Galapa. Este estudio es importante ya que el orégano se convierte muchas veces en una alternativa para tratar algunas enfermedades; también puede ser usado como componente de productos que se usan en el tratamiento de enfermedades, según sea la especie. Puede ser usado como analgésico, antimicrobiano, antiparasítico, antigenotóxica, además es ampliamente usado como especia en comidas debido a su sabor. Sus propiedades antioxidantes lo vuelven un aliado ideal para dietas y la prevención de enfermedades debido a que los antioxidantes pueden proteger a las células contra el daño oxidativo los cuales están relacionados con el envejecimiento y enfermedades como el cáncer, problemas cardiovasculares y diabetes (Lozano et al., 2004). Algunas especies de orégano presentan sustancias como el timol y carvacrol las cuales pueden reducir los niveles de concentración de bacterias tales como la *Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, entre otras (Lozano et al., 2004). El orégano es usado en culinaria como especia, por ejemplo, es muy común encontrarlo en América latina y la cocina mediterránea. En la industria de las carnes se ha usado durante el procesamiento, la preparación y el almacenamiento para hacer frente a la peroxidación lipídica que padecen los cárnicos (Lozano et al., 2004).

Por su parte, la hierbabuena es comúnmente usada en la medicina tradicional debido a que se le atribuyen propiedades antisépticas y antiinflamatorias, en ocasiones es usada por vía oral, tópica e inhalatoria para el alivio de problemas digestivos, catarros y constipado (Alicia Lagarto et al., 1997). Estudios han revelado que posee propiedades antifúngicas, algunas especies pueden contrarrestar el crecimiento de los hongos en los alimentos esto expande sus usos hacia el campo de los preservantes naturales, por ejemplo, los aceites esenciales de las variedades de *Mentha piperita*, *Mentha spicata* y *Mentha suaveolens* demuestran eficiencia contrarrestando el crecimiento de hongos como *Botryotinia fuckeliana* y *Fusarium* (Isabel Alonso, 2020).

Lo anteriormente descrito destaca que la importancia del monitoreo de los cultivos en el parque biotemático de Pital de Megua se ha visto evidente. Aportar tecnológicamente para el correcto cuidado de las plantaciones en el departamento del Atlántico es necesario y permite brindarles a los agricultores medios para el control de los cultivos de manera rápida, fácil y remota; esto les permite llevar una agricultura inteligente que reduzca costos, tiempo invertido y mejore la calidad de vida de cada uno de los agricultores.

Conforme a lo anterior, este trabajo propone la implementación de una red de sensores inalámbricos para monitorear las plantaciones de orégano y hierbabuena y la producción de compost. Para esto se hace uso de plataformas de bajo costo y de código abierto, como es el caso de Arduino; esta plataforma se usa en combinación con módulos de comunicaciones XBee Pro S2 para formar un nodo sensor, los cuales operan con la tecnología ZigBee, acoplados a la placa Arduino a través de una shield. Esta red monitorea variables de temperatura y humedad del suelo, a través de los sensores DS18B20 y FC-28, respectivamente. Esta red funciona con 3 nodos finales y un nodo sumidero; este último está compuesto por una Raspberry Pi en conjunto con un módulo XBee Pro S2 acoplado para la recepción de la información de los nodos, para posteriormente llevarla a una base de datos

SQL de un servidor web. Este servidor está basado en phpmyadmin, el cual está implementado en la Raspberry Pi con el fin de visualizar la información obtenida a través de tablas o formato tipo JSON. Los nodos sensores en conjunto con el servidor local conforman una red de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Networks - WSN) para monitorear las variables de estudio en el escenario propuesto. Para probar el funcionamiento de los nodos sensores se realizaron pruebas de alcance máximo usando una red de topología punto a punto manteniéndose la línea de vista y recopilándose información de calidad de recepción de tramas, mostrando la efectividad del sistema implementado al alcanzar una distancia máxima de transmisión de aproximadamente 400 metros; distancia para la cual no se obtuvieron niveles óptimos de calidad de señal. Este trabajo también muestra la implementación a detalle de los nodos sensores y el servidor remoto local. También detalla pruebas de funcionamiento de la red a través de métricas de desempeño en cuanto a pérdida de paquetes, niveles de RSSI, consumo energético y mediciones de temperatura y humedad con sensores que abarcan un punto específico del área donde se desea realizar el monitoreo de estas variables.

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera: este capítulo continúa con la descripción de la problemática que busca resolver ese proyecto, los objetivos y justificación del mismo; posteriormente el siguiente capítulo expone una revisión de la actualidad literaria, basada en los ejes temáticos de cultivos y redes de sensores inalámbricos (WSN), mostrando trabajos similares a los presentados en este proyecto; el siguiente capítulo muestra la metodología aplicada para desarrollar este proyecto, mostrando el diseño, implementación y descripción de las pruebas para la evaluación de la WSN propuesta; seguidamente se presentan los resultados y se analizan los aspectos más relevantes de los mismos; finalmente se muestran las conclusiones más importantes encontradas en este trabajo.

1 Descripción del problema

La demanda de alimentos debido al incremento poblacional en las ciudades, la necesidad de recolectar datos de forma confiable y el requerimiento de tener un mejor control sobre la producción, representan una oportunidad de desarrollo de pymes y de proyectos tecnológicos en el departamento del Atlántico que permitirán obtener una mejor eficiencia en la producción de alimentos agrícolas u otras plantaciones (Ramos et al., 2013).

Estas demandas alimenticias se evidencian en estadísticas globales que prevén un crecimiento poblacional para el 2050 de aproximadamente nueve mil millones de habitantes lo cual significa una mayor demanda de productos alimenticios, en donde Colombia no está exenta de estas proyecciones, por tal razón para responder a la demanda de productos alimenticios, es necesario que el sector agrícola tradicional reciba aportes que vayan en pro de optimizar las actividades relacionadas al cuidado de los cultivos (Villanueva, 2018).

Dentro del sector agrícola existe un porcentaje de agricultores que no cuentan con los recursos necesarios para la adquisición e implementación de tecnologías, esto puede deberse a: factor económico, ubicación geográfica, baja alfabetización tecnológica, o bien a la inaccesibilidad a infraestructura tecnológica eficiente y/o la limitación de servicios. Esta situación ofrece una ventaja en cuanto a productividad a los sectores agrícolas digitalizados que afecta la competitividad de los sectores que presentan las problemáticas mencionadas (Trendov et al., 2019).

Cabe resaltar que en Colombia el sector agropecuario es uno de los sectores que más genera ingresos económicos al país, además de que realiza grandes aportes al PIB. Si bien el departamento del Atlántico no se encuentra entre los mayores exportadores del país, la economía del departamento se ve influenciada por el sector agrícola (Lechuga et al., 2018).

Esto muestra lo importante de contribuir desde la ingeniería electrónica al desarrollo de plataformas y proyectos que incentiven el crecimiento del sector agroindustrial en Colombia y más enfáticamente en el departamento del Atlántico, para el aprovechamiento de los tratados de libre comercio y a futuro generar economía de aglomeración, impactando de forma significativa a la economía del departamento (Gobernación del Atlántico, 2013).

Una de las poblaciones del Atlántico en donde se puede contribuir a la tecnificación de cultivos es en el municipio de Galapa, en donde en el parque biotemático de Pital de Megua se cuenta con cultivos de orégano y hierbabuena, los cuales son comercializados. Su cultivo es artesanal y su siembra y producción es realizada de esta forma. Una manera de optimizar su producción es con la tecnificación de cultivos pequeños, la cual en el momento carece.

Con base en esta problemática se genera el siguiente cuestionamiento:

¿Cómo desde la ingeniería electrónica se puede optimizar la productividad y mejorar la calidad y condiciones para el crecimiento de los cultivos de pequeños agricultores a través del conocimiento del estado de variables que son de interés para su cosecha?

Este cuestionamiento va encaminado a la búsqueda de soluciones que no solo benefician la economía del sector agrícola, sino que también impactan de forma positiva a la sociedad, puesto que aumentan la productividad y calidad de los productos alimenticios, potenciando la economía de la región y reduciendo la huella de carbono (Ambientum, 2021).

2 Objetivos de la Investigación

2.1 Objetivo General

Desarrollar una red de sensores inalámbricos fiable y de bajo costo que permita el monitoreo de la temperatura y humedad del suelo en cultivos de orégano, hierbabuena y compostaje del parque biotemático Pital de Megua en el departamento del Atlántico.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar los requerimientos de la red de sensores inalámbricos a implementar para monitoreo de cultivos de clima cálido en el escenario propuesto.
- Diseñar una red de sensores inalámbricos que permita el monitoreo de temperatura y humedad del suelo en huertos y compost del parque biotemático de Pital de Megua.
- Implementar una red de sensores inalámbricos que permita el monitoreo de temperatura y humedad del suelo en huertos y compost del parque biotemático de Pital de Megua.
- Realizar pruebas de rendimiento de la red de sensores inalámbricos para el monitoreo de temperatura y humedad del suelo en huertos y compost en el escenario propuesto.

3 Justificación

El desarrollo de investigaciones acerca del bienestar de cultivos, ha brindado la información suficiente para ser eficientes en la obtención de productos alimenticios. Todo ello ha provocado la implementación de tecnologías que ayuden a controlar y monitorear las variables más influyentes en la salud de los cultivos. Una necesidad común es el adecuado riego de los cultivos, la cual debe hacerse de forma moderada y de acuerdo con las necesidades del suelo y plantación. Por ejemplo, esta necesidad fue identificada y solucionada en un cultivo de fresas por parte de un grupo de investigación de la universidad de Nariño. En este trabajo se implementa una red WSN para captar información de la humedad del suelo, determinando la necesidad de riego del cultivo. Esto permite establecer opciones de riego por zona específica o de manera general. Para realizar esto último desplegaron un grupo de sondas de humedad que detectan la zona con necesidad de agua, una motobomba y electroválvulas para ejercer el control; durante el proyecto notaron que algunas zonas requerían más agua que otras, evidenciando la variabilidad de humedad del suelo cultivable. Finalmente, con la implementación del control logran obtener una humedad promedio entre las zonas del cultivo de fresa (Nasly et al., 2016).

Muchos cultivos en Colombia, en especial en la costa Atlántica, no poseen monitoreo del entorno o condiciones del suelo. Algunos otros implementan sistemas de riego programados por tiempo sin considerar de forma precisa la cantidad de agua que se dispone en el suelo del cultivo en ese momento; esto puede ocasionar un deficiente crecimiento o la pérdida del cultivo, puesto que puede darse una insuficiencia o exceso de agua. Pero bien, estos sistemas son una solución rápida para los agricultores que no pueden adquirir sistemas de control más avanzados debido al costo que representan. Por tal motivo se diseña una red inalámbrica de sensores de agricultura con potencial aplicable en múltiples cultivos y que brinde posibilidad de implementar sistemas de control de proceso (Zuñiga, 2021).

4 Marco teórico

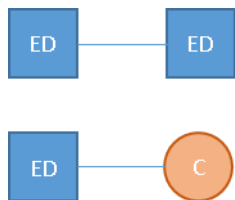
4.1 Marco conceptual

4.1.1 Topologías de redes.

Es la forma de conexión física o lógica que utilizan los equipos de una red para el intercambio de datos. Se le conoce como topología de red a la forma de distribuir los enlaces en una red formando distintos patrones característicos. Se distinguen dos conceptos de topología; uno es la topología física, la cual se refiere a la configuración de cables, antenas y otros dispositivos de red; el otro concepto es el de topología lógica, el cual obedece al funcionamiento real de una red, es decir, la red puede estar estructurada físicamente con un tipo determinado de topología, pero emular el funcionamiento de otra (Stalling, 2000).

Topología Punto a Punto.

Figura 1. Topología punto a punto



Fuente: Adaptado *Comunicaciones Y Redes De Computadores (6a. ed.)* por W. Stalling, 2000.

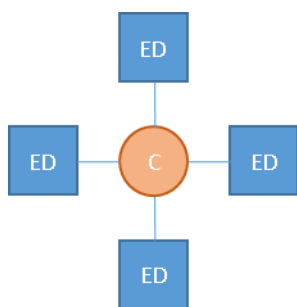
En esta topología todos los dispositivos pertenecientes a la red se encuentran conectados en relación uno a uno, es decir, la comunicación acontece únicamente entre dos puntos. Al solo depender de un solo enlace lo hace una red fácil de implementar; menos complejidad y ahorro en equipos y materiales para su puesta en marcha, su mayor desventaja es la nula redundancia entre los dispositivos que la componen.

Características.

- Existe un solo enlace que conecta a los dispositivos entre sí.
- Cuando un nodo recibe un mensaje este se encarga de verificar si los datos están dirigidos hacia este nodo identificando el código asignado (cada nodo tiene una dirección específica que lo representa), en caso de que la información no esté dirigida hacia el nodo, se ignorará el mensaje (Stalling, 2000).

Topología de Estrella.

Figura 2. Topología Estrella



Fuente: Adaptado Comunicaciones Y Redes De Computadores (6a. ed.) por W. Stalling, 2000.

Los dispositivos están vinculados a un elemento central que capta las señales de todos los dispositivos pertenecientes a la red, esta topología permite agregar dispositivos fácilmente, si existe un daño en una estación no afectará la comunicación de la red. Su desventaja radica en la cobertura de área debido a que la conexión debe ser directa con la estación central (Stalling, 2000).

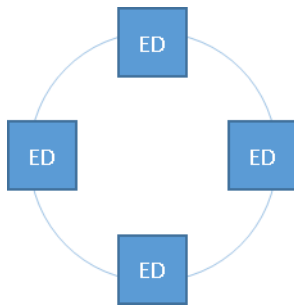
Características.

- Todos los dispositivos están conectados a un solo equipo central.
- La información se conmuta por el equipo central.

- La configuración de la red, se realiza en el equipo central (Stalling, 2000).

Topología de Anillo.

Figura 3. Topología de anillo



Fuente: Adaptado Comunicaciones Y Redes De Computadores (6a. ed.) por W. Stalling, 2000.

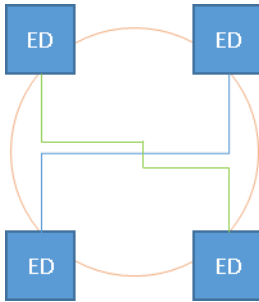
Cada dispositivo está conectado entre dos dispositivos y se cierra la conexión con un enlace entre el primero y el último, formando así un círculo o anillo. Cada dispositivo tiene un turno para comunicarse con otro; se crea un bucle o anillo en el que cada dispositivo tiene su turno para establecer comunicación con otro; es una red simple y de baja complejidad de implementación la cual puede resultar económica debido a su diseño simple y nulidad de redundancias. Debido a que solo existe un único enlace de comunicación entre los dispositivos la hace una red muy susceptible a fallas; si uno de los dispositivos falla puede afectar toda la red (Stalling, 2000).

Características.

- La transmisión de datos se da en un solo sentido (Horario / anti horario).
- Existe una sola ruta de comunicación entre dispositivos (Stalling, 2000).

Topología de Malla.

Figura 4. Topología malla completa

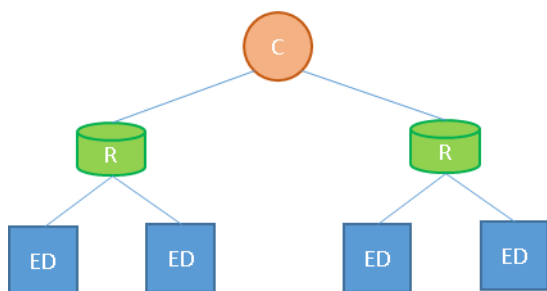


Fuente: Adaptado Comunicaciones Y Redes De Computadores (6a. ed.) por W. Stalling, 2000.

En una red tipo malla completa existe un enlace directo entre cada nodo que compone la red cumpliendo la ecuación $n(n-1)/2$ donde “n” es el número de nodos y el resultante de la ecuación la cantidad de enlaces que dispone esta red, mientras que en una red tipo malla parcial, los dispositivos pueden estar dispuestos como una red de malla completa mientras que otros pueden compartir un enlace con uno o varios nodos en la red. Esta red estar compuesta de múltiples redundancias entre dispositivos lo cual puede encarecer su costo, estas redundancias las hacen menos susceptibles a fallas de comunicación entre dispositivos debido a la diversidad de rutas de comunicación (Stalling, 2000).

Topología de árbol.

Figura 5. Topología de árbol



Fuente: Adaptado Comunicaciones Y Redes De Computadores (6a. ed.) por W. Stalling, 2000.

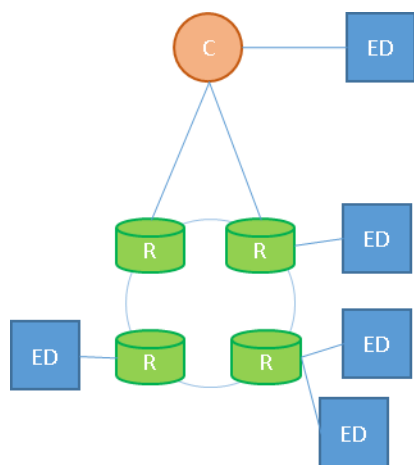
Esta tipología es una variante de la tipología estrella, posee un concentrador central que regula todo el tráfico de la red al igual que la topología estrella. No todos los dispositivos se conectan directamente al concentrador central, sino que dependen de un concentrador secundario que gestiona la comunicación con el concentrador central. La dependencia de un dispositivo secundario que concentra las señales para luego comunicarlas al dispositivo central es una ventaja puesto que economizan múltiples enlaces entre la estación central y los dispositivos, si un dispositivo concentrador falla afecta parcialmente a la red. La desventaja radica en su compleja configuración, adicionalmente se requieren más dispositivos y material para su implementación, en cuanto a su funcionamiento se deben realizar más saltos de señal que pueden afectar la velocidad de comunicación entre dispositivos (Stalling, 2000).

Características

- Capacidad para añadir una gran cantidad de dispositivos.
- Posee nodos que reciben y transmiten información (Stalling, 2000).

Topología Mixta.

Figura 6. Topología mixta



Fuente: Adaptado Comunicaciones Y Redes De Computadores (6a. ed.) por W. Stalling, 2000.

También llamada topología híbrida, son las redes que en su arquitectura forman más de una topología de red. Entre las topologías mixtas más utilizadas se encuentran la combinación de topología estrella-anillo y estrella-bus. Esta red requiere una mayor complejidad de implementación debido a las redundancias y dispositivos adicionales que se requieren para su diseño reflejándose esto en costos, de igual forma este número de dispositivos puede significar retardos entre la comunicación de dispositivos. Su ventaja radica en el alto número de rutas que se disponen para la comunicación de dispositivos. Si un dispositivo falla el funcionamiento de la red no sufre un gran impacto (Stalling, 2000).

4.1.2 Arduino.

Arduino es una placa que incorpora un microprocesador y un conjunto de puertos (entradas y salidas) que permiten la implementación de lógica programable para las soluciones de ingeniería; es ampliamente usado para soluciones en telecomunicaciones,

automatización y domótica. Cuenta con una interfaz que permite la programación de las placas creadas por esta misma compañía (Arduino, 2014).

Sigue la filosofía de software libre por lo que es fácil encontrar cualquier tipo de información relacionada a su uso y aplicaciones. La mayoría de sus placas permiten la manipulación de señales digitales y análogas, esto brinda perfectamente la facilidad para la implementación de una alta gama de sensores y dispositivos de control del mercado actual (Arduino, 2014).

4.1.3 X-CTU.

X-CTU es un entorno para la configuración de los módulos de comunicación desarrollado por la compañía XBee para sus propios hardware, actualmente es un software multiplataforma; puede ejecutarse en los sistemas Windows, Linux y MacOS.

Desde este software se pueden fijar los roles de los módulos de comunicaciones (End device, Router o Coordinador) y también el modo de funcionamiento (API o AT) (Digi International, 2020).

4.1.4 XBee.

Los XBee's son dispositivos de tamaño significativamente reducido capaces de establecer entre sí una comunicación inalámbrica dependiendo de las configuraciones que se le hayan programado. Para su funcionamiento pueden usar el protocolo ZigBee o el protocolo propietario del fabricante. Actualmente cuentan con varias versiones y pueden trabajar en dos modos de comunicación: Modo Api y Modo AT (Digi international, 2019).

4.1.5 *Modo API y Modo AT.*

Los XBee pueden ser configurados de dos formas posibles; *Modo API* o *Modo AT*, las cuales brindan en su medida ventajas y desventajas dependiendo de la aplicación que se pretenda desarrollar.

El modo AT (Modo transparente) predispone al dispositivo para que este se comunique de forma autónoma con otros equipos en la red sin necesidad que el programador se vea en la obligación de crear las tramas. Esto es, en este modo cada dispositivo emisor es capaz de formar a partir de la información que se desea enviar las tramas, de igual forma los dispositivos receptores pueden decodificar las tramas de forma autónoma (Digi International, 2022a).

Si bien el modo AT posee una valiosa ventaja debido a que se evita la creación de tramas manualmente, su desventaja radica en que la dirección destino es fija y no configurable en operación a diferencia del modo API que sí permite cambiar la dirección destino sin necesidad de sacar al dispositivo de su funcionamiento. Si bien esto es muy funcional la mayoría de las veces, se requiere de una programación adicional y tener conocimientos de cómo son creadas, enviadas y recibidas las tramas (Digi International, 2022a).

Cabe resaltar que en una red se puede encontrar una mixtura de estos dos modos, por ejemplo; puede tenerse configurado un dispositivo emisor en modo AT y el receptor configurado en modo API sin que esto afecte la comunicación entre ambos dispositivos; todo dependerá explícitamente de las condiciones que impongan el proyecto a realizar (Digi International, 2017).

4.1.6 Protocolo ZigBee.

ZigBee es un protocolo de comunicación inalámbrica de alto nivel el cual basa su capa física en el estándar IEEE 802.15.4 . Entre las áreas más comunes de aplicación se encuentran la domótica, reconocimiento remoto y automatización. Tiene la característica de ser una red de bajo consumo de energía con una tasa de transmisión de datos limitada en velocidad, opera en las bandas de 2,4Ghz, 858 MHz para Europa y 915 MHz para Estados Unidos (Martin y Ruiz, 2007).

Elementos de una red ZigBee.

En una red basada en la plataforma ZigBee se pueden distinguir tres elementos o dispositivos básicos;

Dispositivos finales (End device): se encargan de la creación y emisión de las tramas de información.

Enrutadores (Routers): los cuales intervienen en la red encaminando las tramas hacia el dispositivo final en caso de que el dispositivo emisor y receptor no posean un enlace directo o este se encuentre indisponible.

Coordinador: Dispositivo central el cual recibe toda la información que suministran los dispositivos finales de la red. En este se lleva la monitorización de los datos, también es capaz de enviar comandos para ejecutar una acción dependiendo del control que se desee implementar. Solamente debe existir un solo coordinador por red (Martin y Ruiz, 2007).

Capas modelo ZigBee.

El modelo ZigBee está definido por cuatro capas que permiten la gestión de los paquetes de información transmitidos dentro de la red. Puede observarse que compila las

cuatro primeras capas modelo OSI (Aplicación, presentación, sesión y transporte) en una sola capa llamada comúnmente capa de aplicación (Papacetzi, 2003).

Control de Acceso al Medio (MAC): Contiene los servicios que permiten la fiabilidad y la comunicación directa entre dispositivos, es de especial ayuda para la capa de red ya que permite detectar conflictos o interferencias en la red, debido al sondeo del canal por el cual se realizará la comunicación (Papacetzi, 2003).

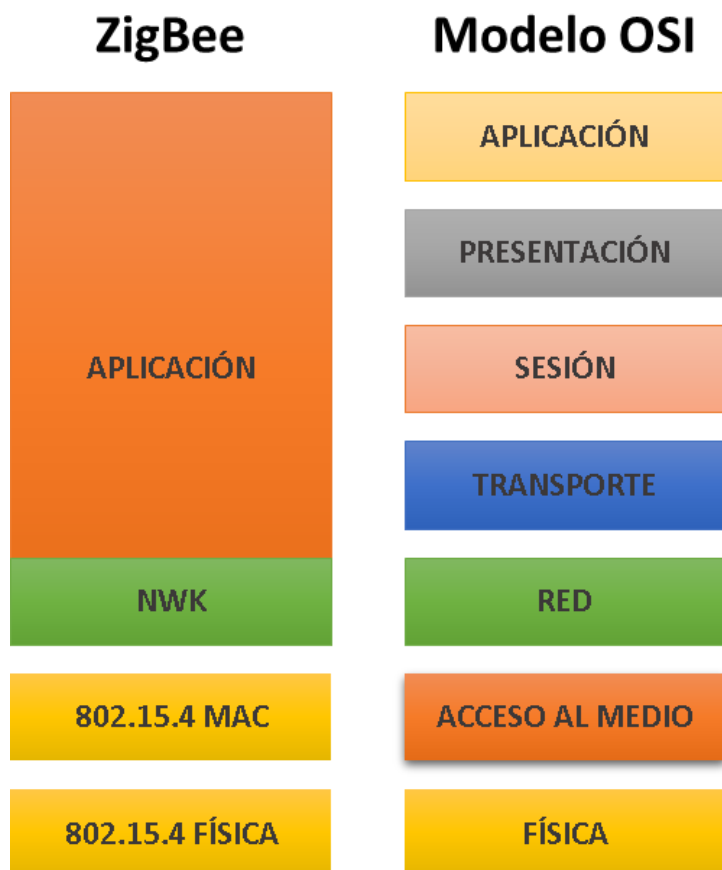
Capa física (PHY): Se encuentra basada en el protocolo IEEE 802.15.4 y se encarga de todo lo relacionado a la manera de transmitir y recibir las ondas de radiofrecuencia. En esta capa se definen los anchos de banda de frecuencia a emplear y la evaluación del canal de comunicación a emplear (Papacetzi, 2003).

Capa de red ZigBee (NWK): Es la encargada de enlazar la capa de aplicación con la capa MAC. Está dispone de servicios de control los cuales permiten a cualquier aplicación comunicarse con las mismas unidades de datos, con dos o más dispositivos; especificar la topología de encaminamiento y servicio de datos; inicialización de una nueva red; integración y salida de una red; direccionamiento; recepción de control, entre otros (Martín & Ruiz, 2007).

Capa de aplicación: Está subdividida en la subcapa APS la cual brinda los medios para la integración de la capa de red con la capa de aplicación. Se ocupa de las primitivas de petición, confirmación, respuesta e indicación, la subcapa ZDO, la cual se encarga del control y gestión de los objetos de aplicación definidos por los fabricantes de los dispositivos (Martín & Ruiz, 2007).

Figura 7. Comparación modelo ZigBee y modelo OSI.

Figura 7. Comparación modelo ZigBee y modelo OSI.



Fuente: Adaptado de Control de dispositivos de seguridad a través de Internet, utilizando el protocolo IEEE 802.15.4. por F. Pineda, 2013.

4.1.7 Visual C++.

Visual C++ es un entorno de programación desarrollado por Microsoft bajo el paquete de Visual Studio. Abarca el desarrollo de aplicaciones creadas bajo C y C++/CLI. Su última versión fue lanzada en el 2013 y puede ser ejecutado en plataformas IA-32, X86-x64 y arquitectura ARM. (LM Soluciones S.A.S., 2016).

4.1.8 phpMyAdmin.

Es una herramienta de software que permite la gestión de MySQL a través de la web. Está basado en PHP y posee una interfaz de usuario sencilla y muy funcional para la administración de las bases de datos y funcionalidades de MySQL, de igual forma brinda

múltiples opciones de formato de exportación tales como CSV, SQL, XML, PDF, ISO/IEC 26300 (Phpmyadmin, 2021).

4.1.9 *Calidad de radioenlace.*

Si bien los enlaces de radiofrecuencia pueden ser muy confiables, no están exentos de sufrir perturbaciones e interferencias las cuales dependen del entorno donde se implementan y que terminan por desfavorecer parcial o completamente la calidad y disponibilidad de las comunicaciones.

Dentro de las razones más comunes de pérdida de radioenlace se pueden encontrar la obstaculización o pérdida de la línea de vista, descargas atmosféricas y selección de los equipos de comunicación, por ejemplo, si se emplea una antena con poca capacidad de ganancia (Osorio, 2019).

Una forma de determinar si existen problemas con el radioenlace puede ser el concepto de tasa de recepción de paquetes (PRR) este hace referencia a la diferencia entre el número de datos enviados y el número de datos recibidos de un dispositivo a otro (Osorio, 2019).

$$Ne = Nr \rightarrow \text{eficiencia} = Nr/Ne * 100\%$$

Ne = Número paquetes enviados (Tx). Nr = Número paquetes recibidos (Rx).

Otro indicador no menos importante para la garantía de un enlace estable de comunicación es el indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI). Este permite estimar el nivel de potencia de las señales recibidas por un dispositivo en redes de comunicación inalámbrica. Esto es, describe la relación entre la potencia de la señal inalámbrica transmitida y la recibida brindando la noción de que tan separado pueden estar los nodos de transmisión y recepción (Daboín et al., 2012).

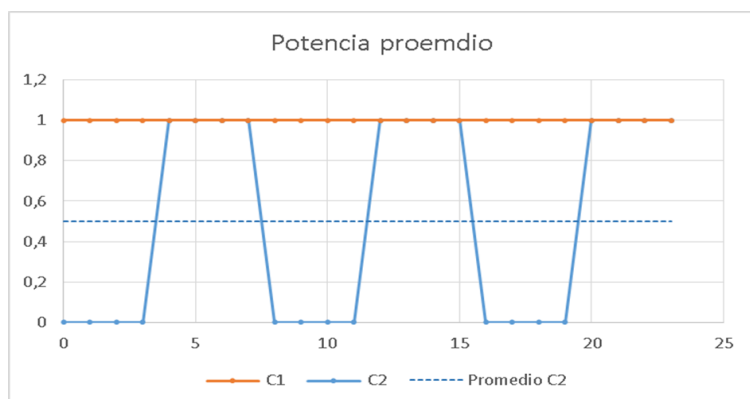
4.1.10 Consumo de energía y almacenamiento de energía.

El consumo de energía en redes de comunicación es una característica que no se puede ignorar, más cuando las redes se encuentran en zonas rurales donde la disponibilidad de la energía eléctrica muchas veces es limitada, inexistente o impone retos para su implementación. Muchas veces se opta por la implementación de energías limpias como la solar y/o el uso de baterías para mantener el funcionamiento de los equipos (Kombo et al., 2021).

En una red donde las baterías sirven como suministro principal de energía, es buena práctica considerar el ahorro en el consumo de energía con el fin de prolongar la vida útil de las baterías y disponibilidad de funcionamiento. Adicionalmente se debe considerar la capacidad de carga de las mismas, la implementación de métodos para encendido y apagado de los dispositivos puede significar un ahorro en el consumo de energía (Shallahuddin et al, 2022).

Nótese en las figura 8 que la potencia promedio se reduce si el dispositivo es desactivado de forma cíclica y solo activado un tiempo determinado para su funcionamiento.

Figura 8. Consumo promedio de energía.



Nota: Adaptado de Pulse-width Modulation (PWM) Timers in Microcontrollers, Colley, 7 de febrero de 2020.

Nota: C1 representación de consumo sin periodo cíclico de desactivación, C2 representación de consumo con periodo cíclico de desactivación (Elaboración propia). Fuente: Elaboración propia.

El promedio de consumo de corriente en un determinado periodo puede obtenerse a través del concepto de valor promedio:

$$\hat{C} = \frac{C_s \sum_{i=1}^{ts} i}{n}$$

Donde;

\hat{C} = Consumo promedio = numero de muestras

Revisión de la actualidad literaria

4.1.11 Tendencias en agricultura en el departamento del Atlántico.

Esta tendencia es importante de resaltar para mostrar la importancia de la investigación en este eje temático de este trabajo. En esta temática se ha realizado una revisión sistemática de la literatura usando cadenas de búsquedas relacionadas a la agricultura en el departamento del Atlántico, se pudo observar que la gobernación del atlántico ha brindado incentivos para el desarrollo de la agricultura en algunos municipios del departamento del Atlántico.

En la actualidad el impulso a la agricultura ha venido en aumento en el departamento del Atlántico. Esto se evidencia en diferentes proyectos y planes que han surgido desde los ejes gubernamentales, como es el caso del proyecto campo a toda marcha. Este ha sido impulsado por la gobernación del Atlántico y pretende hacer viable el suministro de agua y otros recursos para aproximadamente 10.000 hectáreas distribuidas entre los municipios del departamento del Atlántico. Este proyecto pretende dar incentivos económicos a los agricultores de la región para motivarlos a hacer sus tierras más productivas, la gobernación sirve como ente mediador entre las centrales financieras y agricultores cubriendo un 20% de

los créditos con el fin de hacer frente al riesgo de inversión (Gobernación del Atlántico, 2021).

Repelón es uno de los municipios beneficiados por esta iniciativa, a la fecha del 2021 se tenía censo de aproximadamente 60 agricultores con intereses en participar de estos incentivos los cuales son propietarios de tierras que comprenden más de 8 hectáreas cuyo interés serían las siembras de limón tahití y palma de aceite (Revista Semana, 2021) (Gobernación del Atlántico, 2021).

Otro aspecto que muestra la revisión de la literatura para el fortalecimiento de la agricultura se evidencia con las labores de la Gobernación del Atlántico, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural en alianza con la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA) para la restauración de la infraestructura que suministra agua desde el río Magdalena y/o represas hacia los municipios del sur del Atlántico; esto con el objetivo de aumentar la productividad de los agricultores de los municipios de Repelón, Suan y Santa Lucía. El objetivo de la gobernación es garantizar el suministro permanente de agua a aproximadamente 10.000 hectáreas cultivables (Zuñiga, 2021) (Martínez et al., 2018).

Un aspecto que también ha contribuido a robustecer la agricultura en el departamento es el Plan Nacional Semilla de AGROSAVIA. Este es un proyecto que nace de la necesidad de conservar y mejorar genéticamente las semillas nativas de la región colombiana. El departamento del Atlántico ha manifestado su interés de participar en el desarrollo de una semilla mejorada de frijol guandul, la cual es una leguminosa arbustiva rica en proteínas y fibra, haciéndola más resistente al calor pensando en las condiciones de temperatura de la región Caribe; este proyecto busca beneficiar alrededor de 44 familias de agricultores (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2016) (Galvis, 2020) (AGROSAVIA, 2021).

Un aspecto que también ha contribuido a impulsar la agricultura en el departamento en los últimos años es la iniciativa de “huertos caseros en el Departamento del Atlántico”; esta temática ha venido tomando fuerza en la ciudad de Barranquilla a través del programa Huertos Caseros, de Barranquilla Verde y en los municipios de Galapa, Sabanagrande, Palmar de Varela, Sabanalarga y Santo Tomás por medio de la firma de convenios con Fenalco.

El programa huertos caseros brinda a familias de escasos recursos la dotación de insumos, herramientas y capacitaciones para llevar a cabo actividades de siembra en patios, terrazas, solares y azoteas con el objetivo de solventar una parte de sus necesidades alimentarias; se pueden encontrar variedades de tomate, ají pimentón, habichuela, berenjena, hierbabuena, cilantro, col, lechuga crespa además de frutas como la guayaba, maracuyá y el níspero, entre otros productos. Esta iniciativa se describe como una estrategia de responsabilidad ambiental y social que aporta al fortalecimiento de la seguridad alimentaria a través de la educación (Alcaldía de Barranquilla, 2021).

Un caso especial de la importancia de la agricultura se puede observar en el asentamiento de Villa Caracas donde habitan alrededor de 500 familias de escasos recursos. Aquí las familias cultivan productos como el plátano, guineo cuatro filos, cítricos y hierbas medicinales. Cabe resaltar que este asentamiento se encuentra sobre terrenos contaminados de antiguos rellenos de basura por lo cual han tenido que optar por el reciclaje para la siembra en contenedores, cajas de madera, cajas de icopor, recipientes, botellas plásticas. Adicionalmente aprovechan las condiciones del medio para generar abono a través del compostaje tomando como materia prima la cepa del guineo, del banano y del plátano que tienen bastante presencia en sus patios (Delgans, 2021).

Por otra parte, desde la ingeniería electrónica se han propuesto soluciones que buscan tecnificar los cultivos para mejoras de la siembra. Un trabajo en este aspecto es el sistema de monitorización de variables agrícolas basado en la tecnología WSN (Wireless Sensor Networks) para el cultivo de la yuca. En este trabajo de grado se expone un prototipo de monitorización de variables agrícolas para el cultivo de yuca en el Departamento del Atlántico haciendo uso de la plataforma electrónica ZI, para formar una WSN y empleando el protocolo de comunicación RPL. En este trabajo se evalúa la eficiencia de la red por medio de los indicadores de RSSI y LQIs; adicionalmente se plantea un modelo de despliegue fundamentado en los polígonos regulares los cuales se basan en las ecuaciones de Schläfli. Esta red poligonal puede ser desplegada en un área máxima de aproximadamente 50 m x 50 m, mayor a estas dimensiones se recomienda el uso de enlaces multi-saltos (Caicedo, 2017).

4.1.12 Actualidad tecnológica de sistemas de monitoreo aplicados a la agricultura

Se realizó una búsqueda en base de datos Scopus y web of science con el objetivo de analizar que conceptos, tecnologías y métodos podrían ser considerados para el funcionamiento del prototipo desarrollado. Los resultados se listan en la tabla 1.

Tabla 1.
Artículos de WSN aplicados en agricultura

#	Título del artículo	Filtros de búsqueda
1	A LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture	Heterogeneous networks; LoRaWAN; WSN; Smart Agriculture; Smart Farms; Web-based visualization; Data visualization; Network architecture; Temperature and humidities
2	Development of a Sensor Node for Remote Monitoring of Plants	Remote Sensing Technology; sensor node; remote monitoring of plants; Plant healths
3	The Implementation of a Low Power Environmental Monitoring and Soil Moisture Measurement System Based on UHF RFID	moisture sensor; low power microcontroller; sensors; data acquisition; precision agriculture; relative humidity; environmental monitoring

4	A Solar-Powered Fertigation System Based on Low-Cost Wireless Sensor Network Remotely Controlled by Farmer for Irrigation Cycles and Crops Growth Optimization	Data handling; Precise farming; WSN
5	Integration of Autonomous Wireless Sensor Networks in Academic School Gardens	WSN; orchard; monitoring; Smart agriculture
6	A Wireless Sensor Network-Based Ubiquitous Paprika Growth Management System	Greenhouse; Agriculture; WSN; Algorithms; crop; Productivity
7	Power Reduction with Sleep/Wake on Redundant Data (SWORD) in a Wireless Sensor Network for Energy-Efficient Precision Agriculture	Farm field; power consumption; sleep wake; algorithm; WSN; ZigBee
8	Wireless Sensor Network Synchronization for Precision Agriculture Applications	smart agriculture; precision agriculture; wireless sensor network; crop monitoring; network synchronization
9	Simulation of the Core Technology of a Greenhouse-Monitoring System Based on a Wireless Sensor Network	Greenhouse monitoring; Heterogeneous network; WSN; ZigBee; Temperature and humidity sensor
10	Soil salinity and moisture measurement system for grapes field by wireless sensor network	XBEE; Wireless sensor network; humidity; monitoring; Micro-controller

Nota: Resumen de revisión de artículos en base de datos Scopus y Sciencedirect. Fuente: Elaboración propia.

Para abordar esta temática se ha realizado una revisión sistemática de la literatura usando cadenas de búsquedas relacionadas a la agricultura y sistemas de monitoreo. Con base en esta revisión se han encontrado artículos de interés los cuales detallan el uso de sensores y plataformas, tecnologías de comunicación inalámbrica y aplicación específica del sistema de monitoreo.

Un trabajo importante es mostrado en el artículo “A LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture”. En este se hace uso de una plataforma IoT basada en una red “LoRaWAN”, con el fin de recopilar, supervisar y emplear de manera eficaz los datos obtenidos en los procesos agrícolas y de esa forma lograr una agricultura optimizada y sostenible. La solución emplea la plataforma middleware (software que permite el intercambio de información entre aplicaciones) como núcleo para obtener información de

temperatura del aire, suelo y humedad utilizando sensores DS12B20 O SHT-10 (sensores de suelo) desplegados en los cultivos de la granja (Codeluppi et al., 20220).

En el artículo “Development of a Sensor Node for Remote Monitoring of Plants” se describe el diseño de un WSN (Wireless Sensor Networks) dedicado a la monitorización del estrés vegetal producido por la cantidad de CO₂ y los cambios ambientales en la salud de las plantas. Para llevar a cabo este trabajo se hace uso del sensor de luminosidad TSL2561, el sensor de temperatura y humedad SHT31, el sensor de calidad de aire BME680, y los sensores de medición de VOC SGP30/CCS811. También se emplea el microcontrolador STM32L0, el chip Acsip S76G, un transceptor LoRa SX1276 y un receptor GNSS CXD5603GF que aumenta la precisión de la comunicación (Catini et al. , 2019).

En el trabajo “The Implementation of a Low Power Environmental Monitoring and Soil Moisture Measurement System Based on UHF RFID”, se presenta una etiqueta de sensor inteligente basada en la integración de la tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID) de ultra alta frecuencia (UHF). La etiqueta se compone de un sistema semiactivo que mide variables como la temperatura, la luz, la humedad relativa y el contenido de agua gravimétrica (GWC) en el suelo. El sistema desplegado proporciona una solución simple y rentable para monitorear y controlar el crecimiento de plantas en la agricultura moderna y está destinado a ser parte de una red de sensores inalámbricos inteligentes para la supervisión agrícola. Utiliza un sensor de temperatura y humedad modelo BPS230, un sensor de luz, un microcontrolador SMT32L432KC, un sensor capacitivo y la etiqueta RFID SL900A para el envío de información (Korošak et al., 2019).

Otro trabajo destacado denominado “A Solar-Powered Fertigation System Based on Low-Cost Wireless Sensor Network Remotely Controlled by Farmer for Irrigation Cycles and Crops Growth Optimization” presenta un innovador sistema de fertirrigación de bajo costo para ayudar en la agricultura mediante el uso de placas electrónicas de procesamiento

de datos y el despliegue de una red de sensores inalámbricos (WSN) conectada a una plataforma de software remota. El sistema cuenta con una red inalámbrica, una unidad de control ayudado con una plataforma en la nube para el tratamiento de los datos con el fin de optimizar la aplicación de fertilizantes, la frecuencia de riego y la monitorear la actividad meteorológica a través de un servicio en línea. Entre los elementos utilizados encontramos un panel solar, el sensor SHT11, el módulo NodeMcu ESP8266, el sensor de presión SEN0293 y el convertidor de corriente LTC3105 (Visconti et al., 2020).

Del mismo modo, el artículo “Integration of Autonomous Wireless Sensor Networks in Academic School Gardens” muestra que se emplea la combinación de capacidades proporcionadas por una Wireless Sensor Networks (WSN) con la observación de parámetros en un jardín escolar; esto, con el fin de proporcionar un entorno para la integración de huertos escolares como una actividad educativa complementaria en las escuelas primarias. Para ello se hace uso de la aplicación MySchoolGardenApp y un sistema de sensores inalámbricos para analizar datos y llevarlos a una plataforma en la nube. Entre los sensores de la red se emplean los módulos STM 330 de EnOcean’s que cuenta con sensor de temperatura y humedad y un módulo de celda solar que permite alimentarlo. Los STM se comunican a un módulo central (Gateway) de protocolo USB (Lopez et al., 2018).

Algunos trabajos en particular han estado basados en protocolos con tecnologías de comunicación ZigBee, similares a la desplegada en la solución propuesta en este proyecto. Una de estas se aprecia en el trabajo “A Wireless Sensor Network-Based Ubiquitous Paprika Growth Management System” El sistema propuesto puede recopilar y monitorear información relacionada con el entorno de crecimiento de los cultivos fuera y dentro de los invernaderos de pimentón mediante la instalación de sensores WSN y el monitoreo de imágenes capturadas por cámaras CCTV. El sistema implementado hace uso de un chip

CC2420 como Gateway, el controlador MSP430 y el sensor de temperatura y humedad SHT71. Toda la comunicación está basada en el protocolo ZigBee (Hwang, 2010).

En el artículo “Power Reduction with Sleep/Wake on Redundant Data (SWORD) in a Wireless Sensor Network for Energy-Efficient Precision Agriculture” se busca extender la vida útil de los nodos del sensor de una red de sensores inalámbricos. Este incluye el monitoreo de la temperatura del aire, la humedad del aire y la humedad del suelo. Se plantean dos esquemas de reducción de potencia para disminuir el consumo de energía de los nodos del sensor y del Router. En primer lugar, se presenta un esquema de “sueño/vigilia” basado en el ciclismo de servicio. En segundo lugar, el esquema de “sueño/vigilia” se combina con datos redundantes sobre la humedad del suelo, lo que resulta en un nuevo algoritmo llamado “sueño/despertar” en datos redundantes (SWORD). Este trabajo hace uso de sensor de temperatura y humedad FC-28, sensor de humedad del suelo YL-100, el microcontrolador Atmega 328, módulos XBee pro S2, Sistema de baterías, celda solar (12V) y un convertidor DC-DC, todo esto basado en el envío de información a través de una red ZigBee (Jawad H. et al., 2018).

Así mismo, en el artículo “Wireless Sensor Network Synchronization for Precision Agriculture Applications”. Se diseña e implementa una WSN (Red de sensores inalámbricos). El sistema propuesto se instaló en un olivar para evaluar su eficacia en el suministro de un sistema de bajo coste, capaz de adquirir mediciones sincronizadas. Para este sistema se utilizó una placa de Arduino, módulos XBee y un juego de sensores. El sensor RHT-03 para medir temperatura y humedad, el sensor VEML-6070 UV Light para medir la radiación en base a la luz capturada, el sensor YL-69 encargado de la humedad del suelo y un acelerómetro MPU para identificar movimientos repentinos. (Zervopoulos et al., 2020).

También, en el artículo “Simulation of the Core Technology of a Greenhouse-Monitoring System Based on a Wireless Sensor Network” se presenta un sistema de

monitoreo de invernadero basado en la red de sensores inalámbricos ZigBee (WSN). Dicho sistema cuenta con una red basada en ZigBee, un microcontrolador PIC18F4620CC2420 para el envío y recepción de datos. Los datos de los sensores de temperatura y humedad se recopilan mediante un bus de circuito integrado a través de la transmisión de red ZigBee a la plataforma de monitoreo (Zhou et al., 2016).

El trabajo titulado “Soil salinity and moisture measurement system for grapes field by wireless sensor network” emplea un sistema de sensores inalámbricos para medir y controlar la humedad y la salinidad del suelo en una plantación de uvas. El sistema cuenta con los sensores de microcontrolador ATmega328, XBee y Soil LM393 de manera integrada en todo el sistema (Bhanarkar & Korake, 2016).

Los anteriores trabajos evidencian el uso de plataformas, tecnologías de comunicación, sensores y aplicabilidad del trabajo propuesto. Estos muestran que existe diversidad de tecnologías que pueden ser usadas para el monitoreo de variables que afectan sustancialmente la salud de los cultivos. Dentro de las tecnologías que se destacan se tienen LoRaWAN y ZigBee, las cuales brindan eficiencia y practicidad de implementación. Estas están basadas en unidades de procesamiento de información como lo es ATmega328, microcontrolador que presenta un buen rendimiento, bajo consumo y que permite su reprogramación. La literatura muestra el uso de protocolos de comunicación basados en los estándares IEEE 802.15.4 y IEEE 802.11, los cuales son ampliamente usados en la actualidad por su bajo consumo y porque permiten la creación inalámbrica de redes de área local.

Conforme a lo anterior, la propuesta planteada en este documento muestra similitud en el uso de tecnologías como ZigBee y plataformas de adquisición de datos como Arduino; este en conjunto con módulos XBee implementa el protocolo ZigBee/IEEE 802.15.4 para conformar un nodo sensor. Sin embargo, este trabajo se diferencia de otros al desarrollar un servidor local de una red ZigBee, el cual está compuesto por una Raspberry Pi y un módulo

XBee. Este realiza funciones de procesamiento y gestión de la información a través de un aplicativo Web, representando ventajas como bajo consumo de energía, disponibilidad de información e interface intuitiva de visualización de datos las cuales son mejoras significativas frente a los desarrollos analizados anteriormente.

5 Metodología

Este proyecto busca el desarrollo de una red de sensores inalámbricos que sea aplicable a cultivos en el Atlántico con el fin de poder monitorear la temperatura y humedad del suelo; además para su implementación hace uso de elementos de bajo costo, lo cual permite ser escalable y replicable fácilmente, enfocándose en pequeños agricultores, que, en muchas ocasiones, no pueden acceder a tecnologías más costosas.

Para su desarrollo se propone el uso de la metodología de EDS (Estructura de descomposición de trabajo), la cual propone que establezcan fases para desarrollar el proyecto; estas fases se dividen en actividades puntuales para desarrollarlas y son conducentes a resultados. Conforme a esto, la aplicación de esta metodología se muestra en la tabla 2.

Tabla 2.
Metodología EDS para una red de sensores inalámbricas basada en ZigBee aplicada al monitoreo agrícola

FASES	ACTIVIDADES	HITO	METAS	RESULTADOS
Diseño de una WSN para monitoreo de temperatura y humedad del suelo en cultivos de orégano, hierba buena y contenedor de compost en el parque biotemático de Megua.	Describir características del escenario de aplicación de la WSN	Características determinadas del escenario de aplicación	Documento que describa el escenario de aplicación	Diagrama que muestre el escenario de aplicación de la WSN a implementar
	Determinar los requerimientos de la WSN para monitoreo de cultivos	Requerimientos de la WSN	Documento que describa los requerimientos de la WSN	
	Realizar un diagrama de bloques que describa el funcionamiento de la WSN a desplegar	Bloques funcionales descritos	Documento que describa los bloques funcionales de la WSN	Diagrama de bloques de la WSN a desplegar
	Describir los bloques funcionales que			

FASES	ACTIVIDADES	HITO	METAS	RESULTADOS
Implementación de una WSN para monitoreo de temperatura y humedad del suelo en un cultivo	harán parte de la WSN			
	Realizar un listado de los elementos que conformarán los bloques funcionales de la WSN	Elementos de la WSN		
	Seleccionar herramienta de diseño para realizar el despliegue de una WSN para monitoreo de cultivos	Herramientas de diseño revisadas	Documento que describa el funcionamiento de la WSN para monitoreo de cultivos	Diagrama de despliegue de la WSN para monitoreo de cultivos
	Realizar un diagrama de despliegue que describa la WSN para monitoreo de cultivos	Elementos descritos en el diagrama de despliegue		
	Obtener los elementos necesarios para el despliegue de la WSN	Número de elementos obtenidos	Listado de elementos para la WSN a desplegar	Documento con cantidades de elementos, hardware y software a utilizar para la implementación de la WSN
	Determinar los elementos de hardware y software a utilizar para la implementación de la WSN	Hardware y software a utilizar para la implementación		
	Realizar la conexión de los sensores a la placa de desarrollo	Sensores conectados	Sensores conectados correctamente a la placa de desarrollo	Diagrama e imágenes que describan las conexiones de los sensores
	Configurar placa de desarrollo para obtener medidas del sensor de temperatura del	Códigos desarrollados	Código que permita obtener la lectura de datos de un sensor de	Nodo que realice el monitoreo de temperatura del suelo localmente

FASES	ACTIVIDADES	HITO	METAS	RESULTADOS
	suelo para la WSN		temperatura del suelo	
	Configurar placa de desarrollo para obtener medidas del sensor de humedad del suelo para la WSN	Códigos desarrollados	Código que permita obtener la lectura de datos de un sensor de humedad del suelo	Nodo que realice el monitoreo de humedad del suelo localmente
	Integrar códigos de temperatura y humedad del suelo en la placa de desarrollo	Código integrado	Documento con descripción del código desarrollado	Diagrama de flujo con descripción del código desarrollado
	Capturar mediciones de temperatura y humedad del suelo de manera local a través de la placa de desarrollo	Datos de temperatura y humedad del suelo obtenidos	Nodo mostrando información local de captura de datos de temperatura y humedad del suelo	Imágenes con captura de pantalla de datos de humedad y temperatura del suelo capturados
	Definir los modos de uso de los módulos ZigBee a utilizar en la WSN	Modos de uso de módulos ZigBee	Módulos ZigBee configurados para su uso en la red	Documento con descripción de configuración de todos los módulos ZigBee
	Configurar modo de uso de los módulos ZigBee a implementar en la WSN	Configuraciones realizadas		
	Acoplar módulos ZigBee a placa de desarrollo para formar un nodo sensor	Módulos ZigBee acoplados	Nodos sensores con módulo ZigBee conectado	Diagrama de conexión de los módulos
	Desarrollar un código para generar trama de envío de datos	Código desarrollado	Nodo sensor enviando datos	Describir mediante un diagrama de flujo el funcionamiento del código
	Verificar recepción de	Datos recibidos	Datos enviados a	Capturas de pantalla de datos

FASES	ACTIVIDADES	HITO	METAS	RESULTADOS
	datos de los nodos sensores		nodo destino	enviados a nodo destino
	Configurar nodo coordinador de red ZigBee	Configuraciones realizadas	Nodo coordinador funcionando	Imágenes de nodo coordinador
	Desarrollar un código que permita la interpretación de la trama de los nodos sensores	Código desarrollado	Código que permita interpretar la trama enviada por los nodos sensores	Diagrama de flujo con descripción del código desarrollado
	Implementar un sistema que permita el almacenamiento de la información obtenida por los nodos	Código desarrollado	Sistema de almacenamiento de datos enviados por los nodos sensores	Documento con la descripción del sistema de almacenamiento de información de los nodos sensores
	Desarrollar una interfaz de visualización de los datos	Código desarrollado	Sistema de visualización de datos enviados por los nodos sensores	Documento con la descripción del sistema de visualización de información de los nodos sensores
	Realizar pruebas de envío de datos en laboratorio de la WSN funcionando	Datos obtenidos	WSN funcionando en laboratorio	Captura de datos obtenidos en pruebas
Pruebas de funcionamiento de la WSN para monitoreo de temperatura y humedad del suelo en un cultivo	Determinar las métricas a usar para verificar el funcionamiento de la WSN	Métricas	Métricas seleccionadas para medir el rendimiento de la WSN	Documento con métricas seleccionadas
	Determinar las pruebas a realizar para verificar el funcionamiento de la WSN	Pruebas a realizar	Pruebas que se ejecutarán para validar el funcionamiento del proyecto	Documento con listado de pruebas a realizar

FASES	ACTIVIDADES	HITO	METAS	RESULTADOS
	Desarrollar la metodología de pruebas a realizar para probar la WSN en un ambiente real	Metodología desarrollada	Detalle de las pruebas a ejecutar para verificar el funcionamiento de la WSN	Documento con metodología de pruebas a realizar
	Aplicar la metodología desarrollada para las pruebas de funcionamiento			
	Analizar los resultados obtenidos en las pruebas	Resultados obtenidos	Analizar los datos obtenidos	Gráficas y análisis de los datos obtenidos
	Realizar ajustes necesarios sobre la WSN	Ajustes realizados	Realizar ajustes sobre la WSN de ser necesarios	Documento con ajustes realizados
	Documentar el desarrollo de la WSN	Capítulos escritos	Documento que describa el desarrollo del proyecto	Documento de monografía de grado

Metodología EDS para una red de sensores inalámbricas basada en ZigBee aplicada al monitoreo agrícola en el parque biotemático Megua Fuente: Elaboración propia.

5.1 Escenario de aplicación y diseño del prototipo

5.1.1 Escenario de aplicación del sistema de monitoreo.

Para el desarrollo de este proyecto se tiene como escenario de aplicación el parque biotemático de Pital de Megua ubicado en el municipio de Galapa; de acuerdo con la información de los cuidadores del parque, este actualmente cuenta con aproximadamente 32 hectáreas de bosque seco tropical dentro de las cuales se puede apreciar la diversidad de fauna y flora de la región. El parque ha venido trabajando en la construcción de huertos, adaptación de terrenos y sistemas de compostaje en zonas específicas con el objetivo de reducir el impacto del carbono.

Es en estas zonas en donde se ha desplegado la red de sensores inalámbricos para monitoreo de humedad y temperatura. El escenario de aplicación es una de las zonas de huertos del parque donde se encuentra un contenedor de compost y dos plantaciones de hierba buena y el orégano. La ubicación de este terreno se muestra en la figura 9:

Figura 9. Vista satelital parque biotemático Megua



Nota: Este escenario tiene como ubicación las siguientes Coordenadas geográficas: latitud: 10.849061175664733, longitud: -74.89793493913221. Fuente: Parque biotemático Megua, Galapa-Baranoa, Atlántico. Google maps, 2022.

5.1.2 Diseño del sistema de monitoreo de humedad y temperatura.

Una vez descrito el escenario de aplicación, se realizó el diseño de la solución propuesta. La distribución de los puntos se realizó basado en el requerimiento del administrador del parque, siendo para este caso un huerto de orégano, un huerto de hierbabuena y una zona de compostaje. Para el cultivo de orégano se instaló en la zona donde más plantas se disponía (los otros contenedores estaban en preparación para nuevas siembras). Otro criterio de elección de ubicación de los nodos fue que desde los huertos y del

contenedor de compost se tenga línea de vista con la casa central del parque Megua. Esto permite que se implemente una topología de red tipo estrella, siendo la casa central la ubicación el nodo coordinador y los demás puntos actuarían como nodos finales; la topología estrella es posible dado que las distancias en donde se encuentran los huertos y la zona de compostaje, tiene conectividad directa entre los nodos finales y el nodo coordinador. Al ser una red ZigBee, solo se requiere un salto entre nodo final, y nodo coordinador, además, este hecho omite el uso de repetidores por la cercanía de los puntos con la casa central, haciendo más económica esta solución.

Los puntos de ubicación no tienen cerca un suministro constante de energía desde el cual se puedan alimentar los nodos finales, por lo tanto, se propone el uso de baterías recargables y por ende el desarrollo de métodos que generen un bajo consumo de energía (modos de sueño) para así aumentar la vida útil de las baterías.

Estos huertos actualmente se encuentran a la intemperie a cielo abierto; esto impone que los dispositivos se encuentren protegidos de condiciones climáticas y lo más idóneamente protegidos de los insectos y fauna en general propia del parque, por lo tanto, se hace uso de cajas eléctricas con sellos para resguardar los equipos. La ubicación de los puntos de monitoreo se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Despliegue de red en parque biogenético Megua.



Fuente: Parque Biotemático Megua, Galapa-Baranoa, Atlántico. Google maps, 2022.

El despliegue mostrado en la figura 10, indica que se tiene una red en estrella, debido a las distancias entre los nodos finales y nodo coordinador (sumidero) y en donde dos nodos desplegados toman datos de un punto específico de los huertos y zona de compostaje monitoreados; no se cubre un área específica de los huertos, dado que este despliegue cuenta con un nodo por huerto y zona de compostaje monitoreada. Además, las distancias en la figura 10 fueron obtenidas una vez indicados los puntos en donde la administración del parque sugirió ubicar los nodos, complementado con la existencia de la línea de vista entre el nodo coordinador y el nodo final. Por las razones mencionadas se ha optado por la implementación de redes inalámbricas que permitan la obtención precisa y en tiempo real de información referente al entorno con el que interactúa el cultivo. Una de las tecnologías del mercado actual que brinda una buena relación entre calidad, consumo y precio para la creación de estas redes son las placas de la plataforma XBee y los microcontroladores de la

compañía Arduino. Estos operan en su arquitectura de despliegue con un nodo Coordinador y nodos finales que se encargan de enviar información al primero. Este despliegue es escalable y permite que más nodos puedan ser añadidos para monitorear otros puntos de los huertos o más zonas dentro del parque biotemático de Megua,

Inicialmente, se definieron las variables que intervienen de forma significativa en el óptimo crecimiento de los cultivos, centrándose especialmente en las variables de humedad y temperatura para cultivos de orégano y hierbabuena cuyos valores ideales para su óptimo crecimiento se encuentran entre 20 °C y 25 °C, incluso pueden soportar temperaturas no superiores a 30 °C sin presentar daños, mientras que la humedad óptima debe rondar entre el 70% y 80% (AGEXPORT, 2021) (Gobernación del Valle del Cauca, 2006).

El compost cumple varios ciclos en los que la temperatura y humedad presentaran variaciones, la variable con más variación es la temperatura que puede estar entre los rangos de 10 °C a 65 °C y dependerá de la etapa en la que se encuentre; mesofilia 20 °C a 50 °C, termofílica 50 °C a 65 °C, fase de enfriamiento 40 °C a 20 °C y por último la fase de maduración que corresponde a temperaturas más estables que rondan los 20 °C.

La humedad ideal en un sistema de compostaje puede variar entre los rangos de 45% a 65%, si la humedad desciende por debajo de 45% impactará la actividad microbiana afectando todas las fases de degradación, caso contrario si la humedad asciende por encima del 60% el agua saturará los poros e interferirá la oxigenación del material (Román P. & et al, 2013).

Posteriormente, se procedió a investigar diferentes tecnologías que permitieran la obtención y gestión de información de forma inalámbrica. Una vez seleccionadas las plataformas, se consultó y recopiló información sobre su funcionamiento, analizando de forma simultánea las ventajas que representan para el sector agrícola de la región y la

demanda que tiene actualmente en el mercado. Una vez definidos los parámetros y características principales del sistema de monitoreo, se describirán los bloques funcionales de esta solución, con el fin de seleccionar tecnología y sensores.

5.1.3 Bloques funcionales del sistema de monitoreo.

El sistema de monitoreo, objetivo de este proyecto, contará con las siguientes funcionalidades:

- Captación localizada de información sobre variables de temperatura y humedad del suelo en el entorno de los cultivos.
- Permitir a través de una librería la fácil programación e inserción de un nuevo nodo o dispositivo final a una red inalámbrica existente.
- Inserción de nuevos dispositivos sin necesidad de suspender la funcionalidad de la red.
- Visualización en tiempo real de las variables de humedad y temperatura en los cultivos y contenedores de compost a través de una interfaz de usuario.
- Permitir a futuro la implementación de dispositivos de control de proceso.
- Garantizar la fiabilidad de comunicación de todos los dispositivos con el nodo central.

Con el fin de cumplir con los requerimientos mencionados, la funcionalidad del sistema de monitoreo dependerá de los siguientes componentes y herramientas:

- Librería para la gestión de la comunicación: El sistema de monitoreo tendrá un código desarrollado en el ambiente de Visual C++ con el fin de facilitar la programación en Arduino de las tramas que se enviarán en el modo API.

- **Sensores:** El sistema de monitoreo contará con sensores, los cuáles se encargarán de obtener valores de las variables de humedad y temperatura que interactúan en el suelo del cultivo y en el contenedor de compost.
- **Nodo final (End Device):** Estos elementos del sistema de monitoreo son los módulos que permitirán recopilar, gestionar y transmitir la información captada por los sensores.
- **Nodo coordinador (Sumidero):** Dentro del sistema de monitoreo se contará con un dispositivo al cual llegará toda la información captada por los nodos finales. Sobre este dispositivo se almacenará toda la información que se obtenga del sistema de monitoreo.
- **Interfaz gráfica de usuario:** Esta parte del sistema de monitoreo permitirá que el usuario pueda visualizar la información captada por los sensores.

Para el diseño de la red inalámbrica aplicada al campo de la agricultura se determinó la medición de las siguientes variables:

- **Temperatura ambiente:** Temperatura a la cual el cultivo estará sometido, dependerá especialmente del lugar geográfico o condiciones físicas del medio.
- **Humedad del suelo:** Cantidad de agua disponible en el terreno de las siembras.

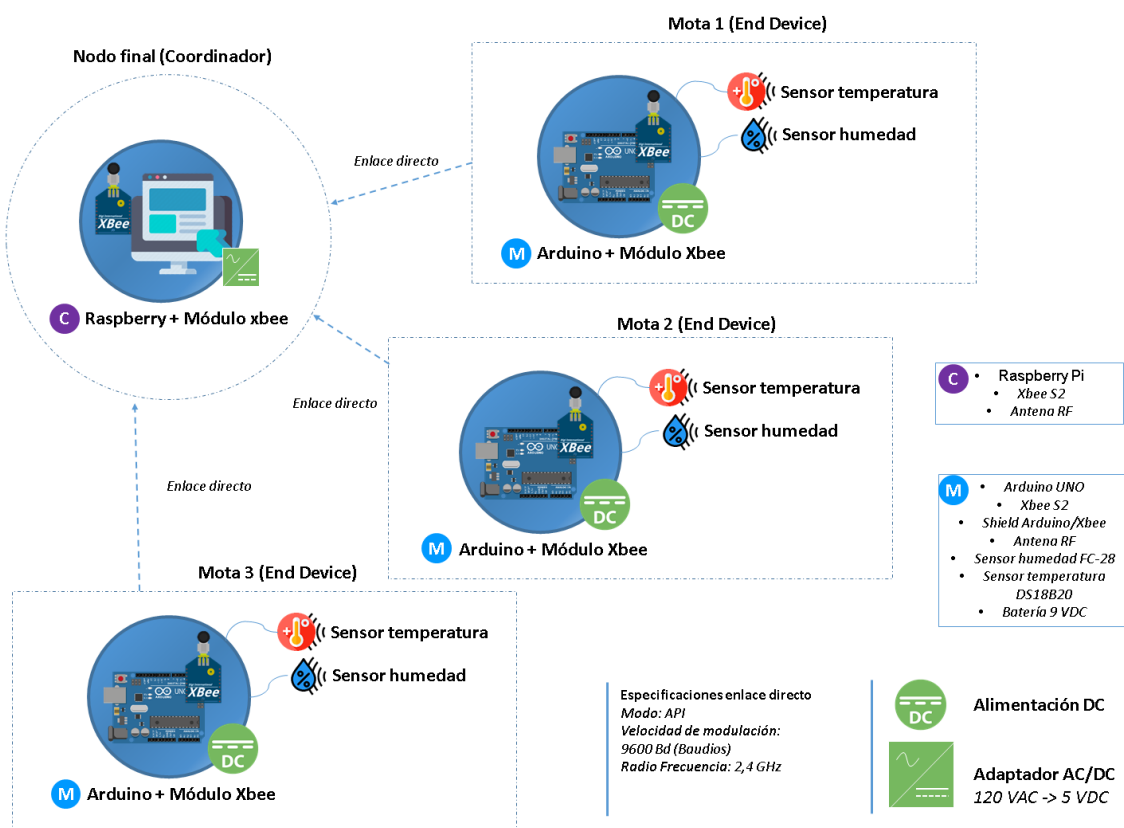
Es necesario para el funcionamiento y estabilidad del sistema de monitoreo realizar la medición de los siguientes parámetros:

- **Distancia entre dispositivos:** Entendiendo que cada nodo final está a cierta distancia del nodo coordinador, este parámetro se asocia a la calidad del enlace inalámbrico de comunicación.
- **Humedad y temperatura:** Este parámetro en el diseño del sistema de monitoreo se asocia a la calibración de los sensores para garantizar la correcta medición.

- Días/horas: Dependiendo del volumen de información registrada se detectarán errores de desviación de las mediciones.
- Altura: Se determina la altura mínima a la que deben estar los nodos finales para tener una óptima comunicación con el nodo coordinador; cada dispositivo varía su ubicación dependiendo las condiciones y obstáculos del terreno.
- Cálculo de enlaces: Se determinó los enlaces necesarios para garantizar la correcta comunicación de los dispositivos finales con el nodo central.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente se determinan los siguientes bloques funcionales: Alimentación energía, medición de variables y transmisión de información, recepción y visualización de información. Los cuales se representan en el flujograma de la figura 11.

Figura 11. Diagrama de bloques del sistema



Fuente: Elaboración propia.

La red consta de cuatro bloques funcionales, donde el más básico es el de alimentación, el cual describe el suministro de energía eléctrica a todos los dispositivos de la red para su correcta operación.

Dentro de los bloques de tratamiento de la información se encuentran el bloque final cuyo objetivo es el envío de las variables de temperatura y humedad hacia el nodo coordinador a través del aire por medio de ondas de radiofrecuencia; esta información es transmitida por medio de tramas que son recepcionadas e interpretadas por el bloque coordinador; luego, son organizadas por el bloque de visualización el cual se encargará de gestionar la interacción con el usuario. Estos bloques se describen a continuación:

Bloque de alimentación: Se encarga de describir el suministro de energía eléctrica de los dispositivos que hacen parte del sistema de monitoreo. Los nodos finales se alimentan directamente de energía continua a través de un banco de batería portable (power bank) el cual está conectado al puerto USB del Arduino UNO. Mientras que la alimentación del nodo coordinador es suministrada por un adaptador de corriente alterna/continua.

Bloque coordinador: Recepciona las tramas API, las decodifica separando las variables de temperatura y humedad, identificando el dispositivo emisor (nodo final desde el cual se envía la información) y registrando la hora de llegada de la trama; esta información es enviada a la base de datos para su posterior visualización por parte del usuario. Para este proyecto el nodo coordinador está conformado por una plataforma Raspberry Pi en conjunto con un módulo XBee.

Bloque de visualización: La visualización de los datos de humedad y temperatura se da a través de una página web a la cual solo se puede acceder desde dispositivos conectados a la misma red de área local (se debe consultar por ID del dispositivo). Los datos entrantes desde el puerto serial de las Raspberry Pi, son procesados, tabulados y mostrados en una tabla

html la cual considera solo los últimos 20 registros. Cabe resaltar que para ver históricos se debe acceder a la base de datos y exportarla según el tipo de formato que se desee.

Bloque de sensado: Este Bloque se encarga de recolectar por medio de los sensores los datos de las variables de temperatura y humedad del suelo. Procesa a través de plataformas Arduino UNO la información que obtiene de los sensores, para generar con ayuda de la librería XBeeApi.h las tramas API. Una misma trama transporta la información de la humedad y temperatura para optimizar el envío de la información. Este bloque, además, se encarga del envío de datos de forma inalámbrica al bloque coordinador. Para esto utiliza módulos XBee.

5.1.4 Descripción de elementos de la red ZigBee desplegada.

La red desplegada está conformada por dos entidades principales, nodo coordinador (Servidor) y nodos finales:

Nodo coordinador: Se encargará de concentrar toda la información de la red; este reunirá la información captada por todos los sensores procesando y organizando los datos recibidos para ser representados de forma visual en una interfaz de usuario.

Nodos finales: Son los encargados de recolectar la información relacionada con la humedad y temperatura de los cultivos, formando con ésta las tramas de datos para posteriormente transmitir las hacia el nodo coordinador. La integración tecnológica de la plataforma de adquisición de datos (Arduino UNO), sensores, sistema de alimentación y módulo de comunicación inalámbrica (XBee Pro S2) conforma lo que se denomina una “mota”, que opera en una WSN.

Los nodos finales y coordinador están conformados principalmente por los siguientes dispositivos electrónicos:

Módulo XBee: Este dispositivo se alimenta de la energía proporcionada por la placa Arduino, es de suma importancia en la red puesto que es la encargada de transmitir o interpretar las tramas que conllevan la información capturada por los sensores.

De las series de XBee, se hace uso del módulo XBee Pro Serie 2C el cual tiene disponible un conector para antena Rp sma que permite aumentar el alcance de la señal. Forman parte del nodo coordinador y nodos finales.

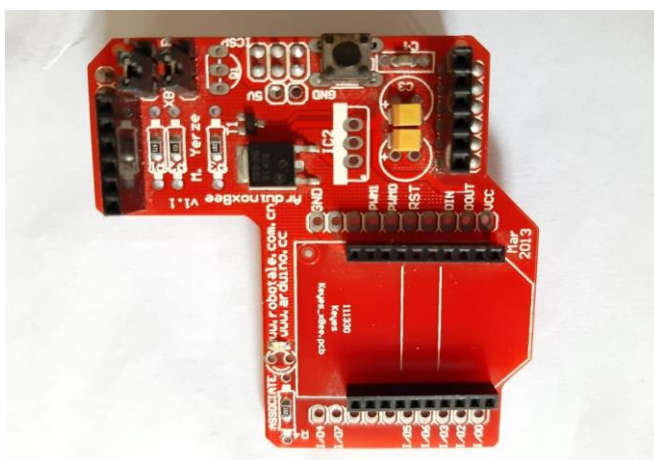
Figura 12. Módulo XBee Pro Serie 2 y antena Rp-sma



Fuente: Elaboración propia.

Placa Arduino: Su función es recibir y gestionar los datos capturados por los sensores de humedad y temperatura; las tramas son generadas por medio de un algoritmo y posteriormente presentadas al módulo XBee; la conexión con el módulo XBee se realizará a través de una “shield” (adaptador para ajuste de módulo) diseñada para el acople de estos dos dispositivos, como se aprecia en la figura 13. Se implementan en los nodos finales.

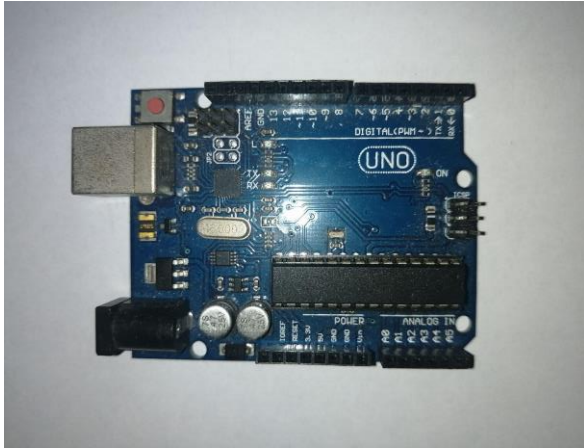
Figura 13. Shield para acople Arduino y XBee



Fuente: Elaboración propia

Se elige la placa “Arduino UNO” que representa un bajo costo en el mercado, facilidad de programación y características técnicas necesarias para cumplir con la gestión de información y compatibilidad con los demás dispositivos de la red. Hacen parte de los nodos finales. Esta plataforma se muestra en la figura 14.

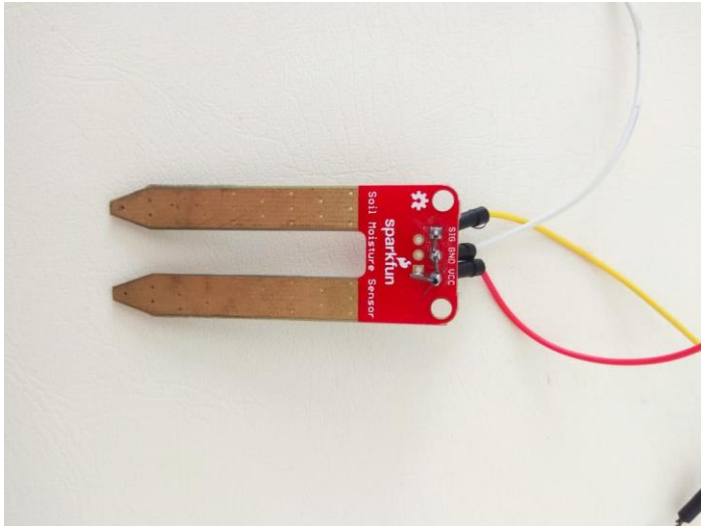
Figura 14. Arduino Uno



Fuente: Elaboración propia.

Sensor de humedad: Este dispositivo hace parte de la primera etapa de la red, tomará la humedad del área del suelo a unos 8 cm de profundidad respecto a la superficie y digitalizará el valor de esta variable para que pueda ser gestionada por la placa Arduino. Son parte fundamental de los nodos finales. La figura 15 muestra el sensor de humedad FC-28, utilizado en los nodos finales.

Figura 15. Sensor humedad FC-28.



Fuente: Elaboración propia.

Sensor temperatura: La temperatura del suelo del cultivo variará acorde a las condiciones ambientales, este sensor será el encargado de capturar estas variaciones a unos 8 cm de profundidad respecto a la superficie y comunicará los datos captados a la placa Arduino. Es parte funcional de los nodos finales. El sensor DS18820 usado en los nodos finales se muestra en la figura 16.

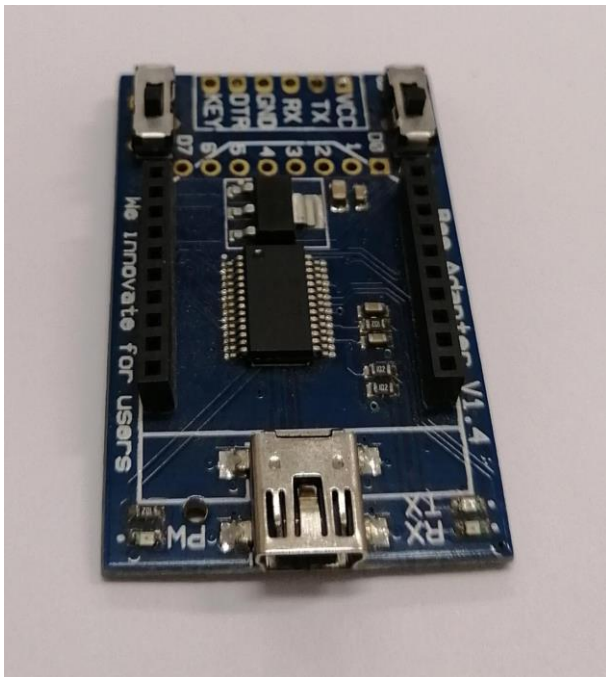
Figura 16. Sensor temperatura DS18820.



Fuente: Elaboración propia

Bee adapter V1.4: Este dispositivo es usado para brindar la interfaz de recepción de las tramas que transmiten los nodos finales. Está conectado al puerto serial de la plataforma Raspberry Pi y tiene acoplado un módulo XBee Pro Serie 2C. Funcionalmente hace parte del nodo coordinador. Este adaptador, permite también configurar los módulos XBee a través del entorno de programación X-CTU. La figura 17 muestra una imagen de este adaptador.

Figura 17. Bee adapter V1.4.



Fuente: Elaboración propia

Power Bank 10.000 mAh: El suministro de energía para las estaciones transmisoras se realiza a través de un Power Bank con capacidad de 10.000 mAh y conector USB - Hembra. Este dispositivo tiene un amperaje nominal de 50 mA. La figura 18, muestra una imagen del dispositivo usado.

Figura 18. Power Bank 10.000 mAh.



Fuente: Elaboración propia.

Adaptador de corriente USB: La alimentación eléctrica del nodo coordinador se da a través de la conexión de un adaptador de corriente AC/DC que suministra 5 Voltios y 2 Amperios por medio de un cable USB/MicroUSB, el cual puede tener un tiempo de carga aproximado de 3 a 4 horas. Este se conecta al puerto MicroUSB de la plataforma Raspberry Pi la cual distribuye una parte de la energía para los periféricos conectados (acople Bee adapter V1.4/XBee Pro Serie 2C).

Placa Raspberry Pi 3: La figura 19 muestra la plataforma Raspberry Pi 3 usada en este proyecto. Esta placa es una plataforma electrónica con capacidades de cómputo más avanzadas que las que posee un módulo Arduino. En conjunto con el Bee adapter V1.4 y el módulo XBee Pro Serie 2 forman el nodo coordinador. Este nodo recibe todas las tramas de datos provenientes de los nodos finales. A través del desarrollo de un código en lenguaje de programación Python seleccionará la información de temperatura y humedad de los nodos finales, la cual podrá ser visualizada a través de una interfaz desarrollada. Este elemento almacenará la información de las variables de estudio del sistema de monitoreo.

Figura 19. Raspberry Pi 3



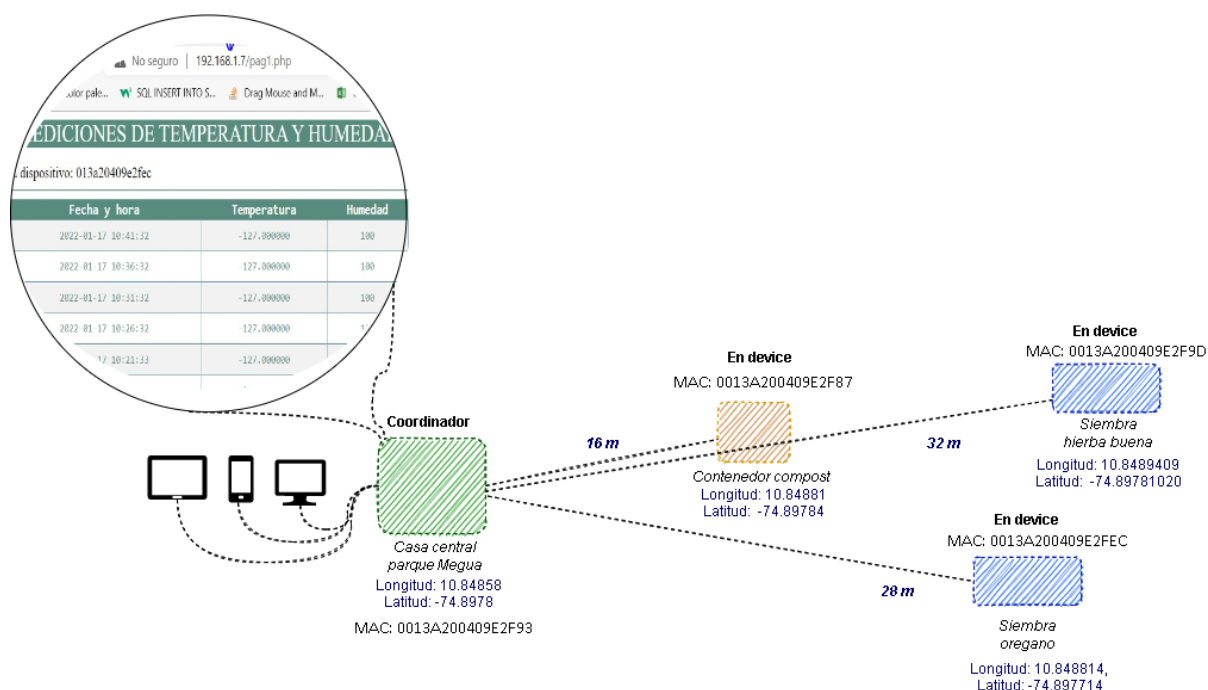
Fuente: Elaboración propia.

5.1.5 Diagrama de despliegue del sistema de monitoreo.

El sistema de monitoreo desplegado está estructurado como una red en topología estrella, la cual está conformada por tres nodos finales ubicados a 16, 28 y 32 metros del nodo coordinador instalado en la casa central, tal cual se describieron en la sección anterior. La tecnología de comunicación inalámbrica seleccionada es ZigBee, como se ha indicado

anteriormente; esta conforma una red inalámbrica de sensores (WSN). Los nodos finales miden las variables de humedad y temperatura de suelo cultivable en la granja de orégano y hierbabuena del parque Megua y la temperatura y humedad de un sistema de compostaje ubicado en esta misma granja. Los nodos finales y coordinador con sus respectivas coordenadas se muestran en el siguiente diagrama de despliegue de la figura 20:

Figura 20. Diagrama de red desplegado.

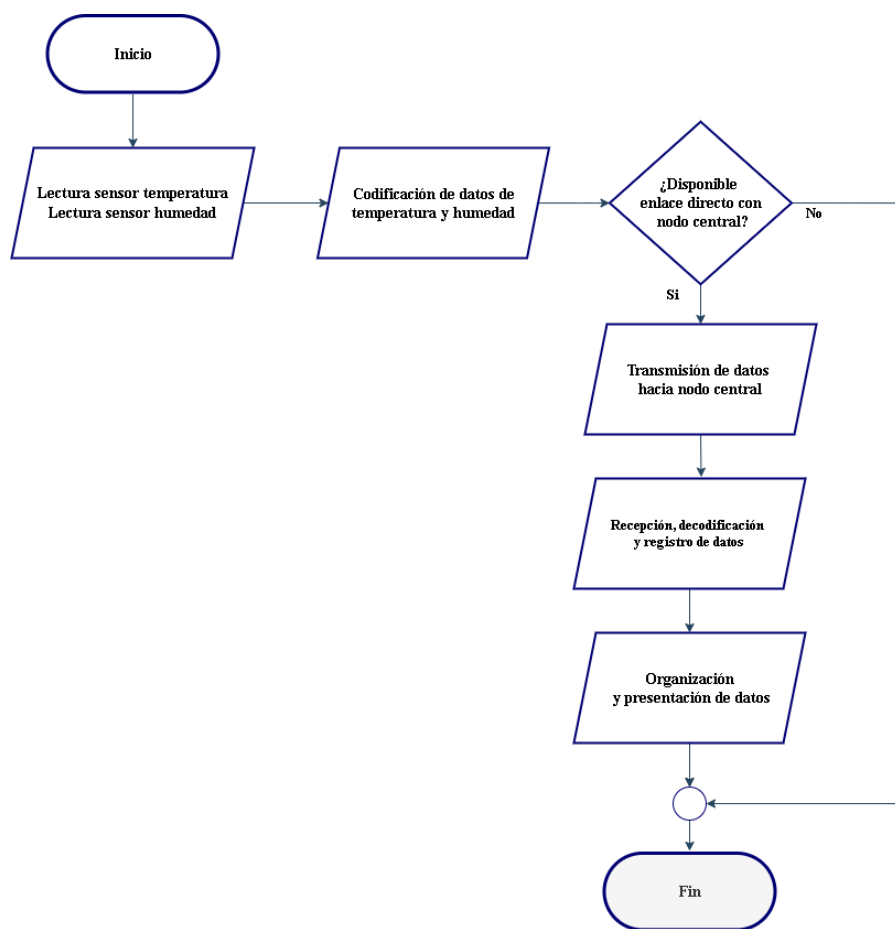


Fuente: Elaboración propia, coordenadas tomadas de Google maps, 2022.

5.2 Implementación del prototipo red de sensores inalámbrica

Para cumplir con el propósito del prototipo de red de sensores inalámbricos se deben integrar varias etapas que involucran desarrollos en software y hardware. A rasgos generales y a manera de introducción se define un flujograma de lo que comprende el prototipo red de sensores inalámbrica, el cual se muestra en la figura 21.

Figura 21. Flujograma de funcionamiento general del prototipo red de sensores inalámbrica.



Fuente: Elaboración propia.

5.2.1 Desarrollo de codificación para tramas API del prototipo WSN

Para lograr la funcionalidad del prototipo de red inalámbrica de sensores para la medición de temperatura y humedad del suelo en los cultivos agrícolas, fue necesario el desarrollo de una librería en Visual C++ para el uso del modo API de los módulos XBee con Arduino. En esta librería se resume la creación de las tramas (capa 2 del modelo OSI) para envío de datos facilitando la programación en Arduino IDE.

La librería define dos funciones primordiales;

```

XBeeApi XBeeApi(broadcast, bro_radius, options);
    
```

La cual estipula los parámetros generales de todas las tramas en modo API que se deseen crear.

Y,

`XBeeApi.senTramaApi(frameid,destino,mensaje);`

En la cual se definen características propias de la trama tales como el id con el que se desee identificar dicha trama, la dirección MAC a la cual se desea destinar la información y el mensaje que se requiera transmitir.

En primera instancia se deberán ingresar los parámetros solicitados para la construcción de la trama API: frame id, dirección destino, broadcast radius, options y mensaje.

La variable mensaje (obtenida desde Arduino) se define como tipo de datos “String”. Esta almacena la información conjunta de las variables de temperatura y humedad proveniente de los sensores. La información se representa en código ASCII, por lo que es necesario para los cálculos y construcción de la trama la conversión bit a bit a números hexadecimales y enteros, según sea necesario.

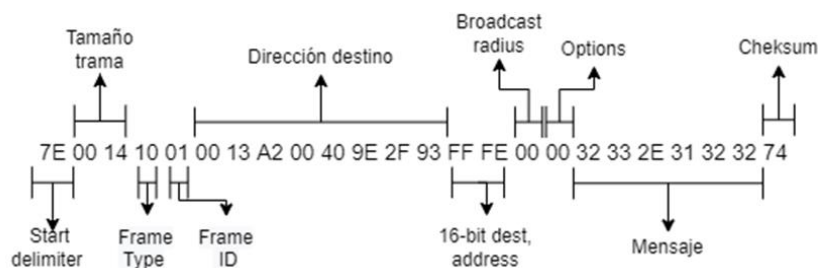
Para el cálculo del Checksum se construye parcialmente la trama con la información de los parámetros frame type, frame id, dirección destino, 16-bit dest, address, broadcast radius, options y mensaje. Es necesario obtener el equivalente en números enteros de cada bit de la trama parcial para poder realizar las operaciones que implica la obtención del Checksum.

Posteriormente se calcula el tamaño de la trama que corresponde a la suma de los bits que ocupan los parámetros frame type, frame id, dirección destino, broadcast radius, options y mensaje.

La trama es construida añadiendo los parámetros fijos Start delimiter, Frame Type y Cheksum y finalmente es escrita en el puerto Serial del Arduino.

Se puede apreciar una trama API resultante en la figura 22:

Figura 22. Estructura trama API de módulos XBee.



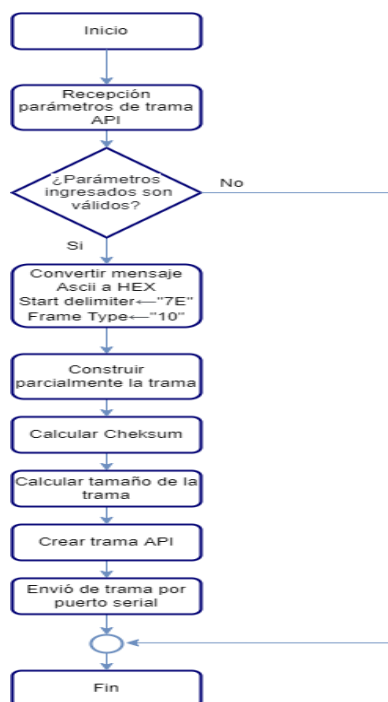
Fuente: Adaptado de X-CTU-Configuration and Test Utility Software, Digi International, 2020.

El primer byte de la trama es denominado “start delimiter” es la cabecera por defecto de la trama API, las siguientes dos posiciones informan el tamaño de la trama API, posteriormente siguen los bytes 4 y 5 los cuales identifican el tipo de trama (como está estructurada) y el identificador de la trama (opcional) respectivamente. Los bytes de la posición 6 hasta la13 indican, según sea el caso, la dirección del dispositivo destino o del dispositivo que envía la información.

Las posiciones 14, 15, 16 y 17 son configuraciones por defecto relacionadas a parámetros de comunicación del dispositivo. El mensaje ocupara las posiciones a partir del byte18 hasta la posición anterior al Cheksum; el cual es la parte final de la trama y actúa como dígito verificador de esta (Digi International, 2022b).

Para una mejor descripción de cómo opera el código que genera el entramado de los datos obtenidos a través de los sensores, se muestra un diagrama de flujo que describe el proceso en la figura 23.

Figura 23. Flujograma de código para la generación de tramas API.



Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Código Arduino y uso de librería API en prototipo WSN

Para poder obtener la lectura de los datos que se obtienen de los sensores de humedad y temperatura en los nodos finales del sistema de monitoreo propuesto, se desarrolló un código que opera en la plataforma Arduino UNO para que realice esta labor. Para esto se hace uso de la librería API, que se compone de dos archivos, los cuales se deben incluir en la carpeta de librerías de la plataforma Arduino. El algoritmo para la captura de los datos obtenidos por los sensores toma el valor de la temperatura y humedad y lo asigna a una variable, la cual junto con otros parámetros de configuración referentes al modo API, son usados por la librería para la generación de las tramas que serán enviadas al nodo coordinador.

Inicialmente debe ser llamada la siguiente librería API desde el código de Arduino

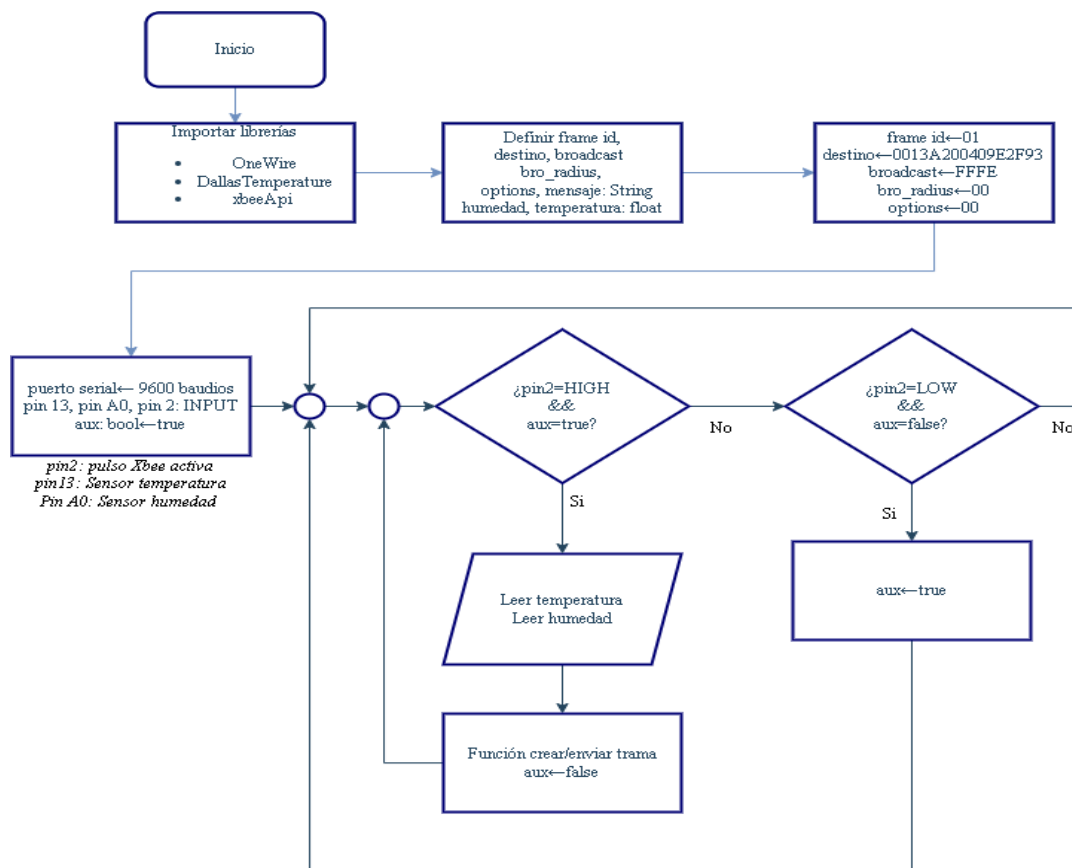
```
#include <XBeeApi.h>
```

Posteriormente deben ser definidos todos los parámetros requeridos para la creación de una trama API y se instancian las funciones de la librería API.

La captura de datos de los sensores de temperatura y humedad se da por medio de las entradas 13 (digital) y A0 (análoga), respectivamente. Los datos son concatenados y guardados en una variable denominada *mensaje* con un máximo de cifras de 6 dígitos cada uno, para posteriormente ser incluida como parámetro “mensaje” de la función `senTramaApi`.

La descripción del código desarrollado para la captura de las variables de humedad y temperatura por la plataforma Arduino UNO, se muestra a través del diagrama de flujo de la figura 24.

Figura 24. Flujograma para captura y transmisión de datos de temperatura y humedad.



Fuente: Elaboración propia.

El código cargado en el entorno de programación de Arduino UNO se muestra en la figura 25.

Figura 25. Código Arduino para captura de datos de temperatura y humedad.

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <xbeeApi.h> //Libreria Xbee-Modo Api

//Parametros generales para la creación de la Trama API
String frameid = "01";
String destino = "0013A200409E2F93" ;
String broadcast = "FFFE";
String bro_radius = "00";
String options = "00";
String mensaje;
// Variables para representación de señales provenientes de los sensores.
int humedad, pin_A0;
float temperatura = 0;
//-----

xbeeApi xbeeApi(broadcast, bro_radius, options);
OneWire ourWire(13); //Se establece el pin 13 como bus OneWire
DallasTemperature sensors(&ourWire); //Se declara una variable u objeto para el sensor

int pin2 = 2;

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    sensors.begin();
    pinMode(A0, INPUT);
    pinMode(pin2, INPUT);
}

bool aux=true;
void loop() {
    if (digitalRead(pin2)==HIGH && aux==true){
        Serial.flush();
        Serial.println("Encendido");
        enviar_datos();
    }
    if (digitalRead(pin2)==LOW && aux==false){
        aux=true;
        Serial.println("apagado");
    }
}

void enviar_datos(){
    sensors.requestTemperatures(); //Lectura de temperatura
    temperatura= sensors.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C
    pin_A0=analogRead(A0); //Sensor humedad
    if(pin_A0<0){pin_A0=0;}else if(pin_A0>1023){pin_A0=1023;}
    humedad = map(pin_A0,0,1023,0,100);
    mensaje="t"+String(temperatura,6)+"h"+humedad;
    xbeeApi.sendTramaApi(frameid,destino,mensaje);
    aux=false;
}
    
```

Nota: Código para captura de datos de temperatura y humedad mediante Arduino de prototipo de red inalámbrica de sensores. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 26 se observa la trama API saliente de la mota (XBee/Arduino), en donde los datos de temperatura y humedad van unificados en una misma trama y separados por una

letra de referencia. Se emplea la letra “t” para diferenciar que a partir de esa posición los datos corresponden a la variable de temperatura y “h” para diferenciar los datos relacionados a la variable de humedad.

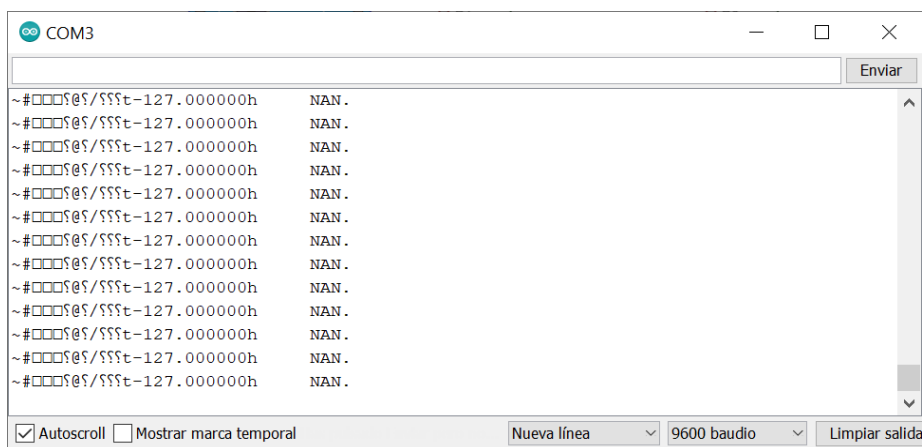
Figura 26. Tramas API enviadas desde Arduino con sensores en funcionamiento



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 27, se muestra el comportamiento de los valores de temperatura y humedad (-127.000000 y NAN.) cuando los sensores no están conectados a la plataforma Arduino; esto permite detectar cuando los sensores se encuentren en modo falla.

Figura 27. Trama API enviadas desde Arduino sin sensores en funcionamiento.



Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Configuración de módulos XBee usados en prototipo de red inalámbrica de sensores.

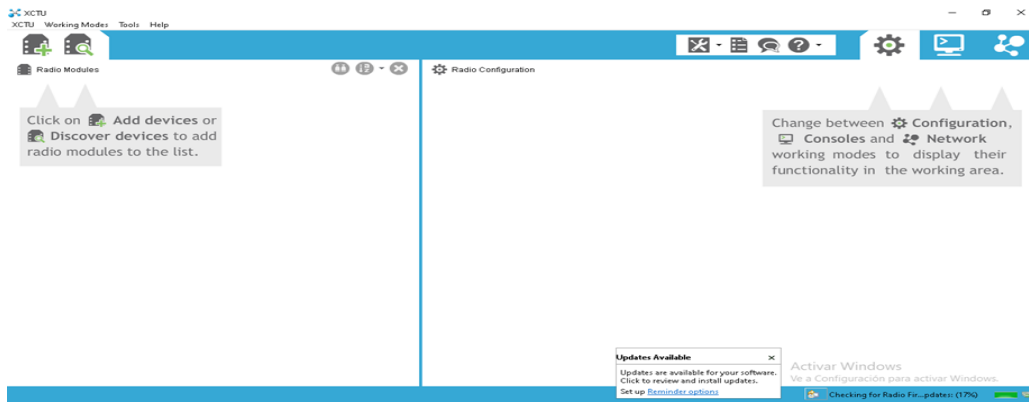
Para que los módulos XBee puedan realizar correctamente su función es necesario hacer una configuración previa de estos dispositivos haciendo uso de la herramienta de software X-CTU, disponible de forma gratuita en la página del fabricante Digi.

Procedimiento para la configuración de los módulos XBee con la herramienta X-CTU.

Para que la operación de la red inalámbrica ZigBee a desplegar, opere de manera correcta se deben configurar los módulos XBee, de modo tal que se asigne un esquema de direccionamiento y la función de cada módulo en la red (nodo final/nodo coordinador). Para realizar esto el módulo XBee a configurar se debe conectar al Bee adapter V1.4, y este último se conecta a uno de los puertos USB del equipo de cómputo que posee la herramienta X-CTU; una vez hecho lo descrito anteriormente, se llevan a cabo los siguientes pasos:

Búsqueda de dispositivos conectados: Al ejecutar la herramienta X-CTU se mostrará en la parte superior izquierda de la pantalla dos opciones para encontrar los dispositivos conectados a través de puertos seriales; la opción “1” permite encontrar los dispositivos especificando el puerto donde se encuentra conectado y la opción “2” realiza un escaneo de todos los puertos e identifica los dispositivos conectados. La pantalla inicial de la herramienta X-CTU se muestra en la figura 28, en donde se aprecian las dos opciones mencionadas anteriormente.

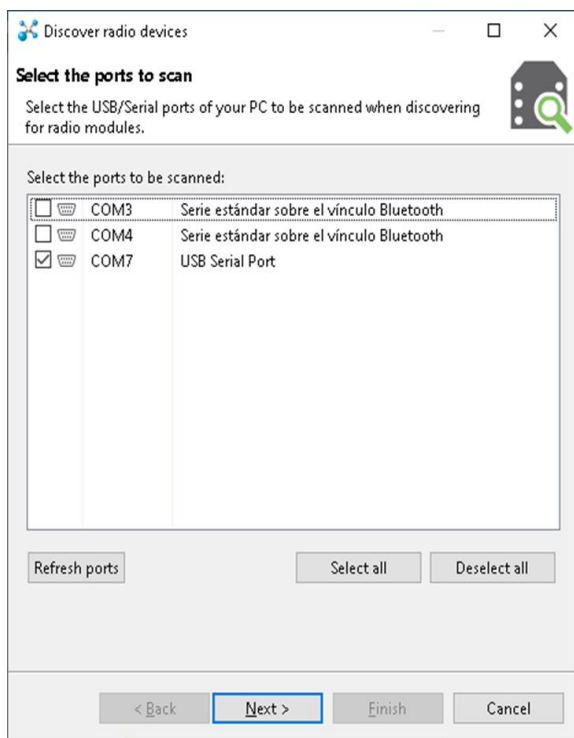
Figura 28. Interface principal de la herramienta X-CTU.



Fuente: Elaboración propia.

Selección de módulos conectados: Una vez finalizado el escaneo en la herramienta X-CTU, se mostrará un recuadro con los puertos activos de la computadora, como se observa en la figura 29.

Figura 29. Ventana de opciones previo al escaneo de puertos.

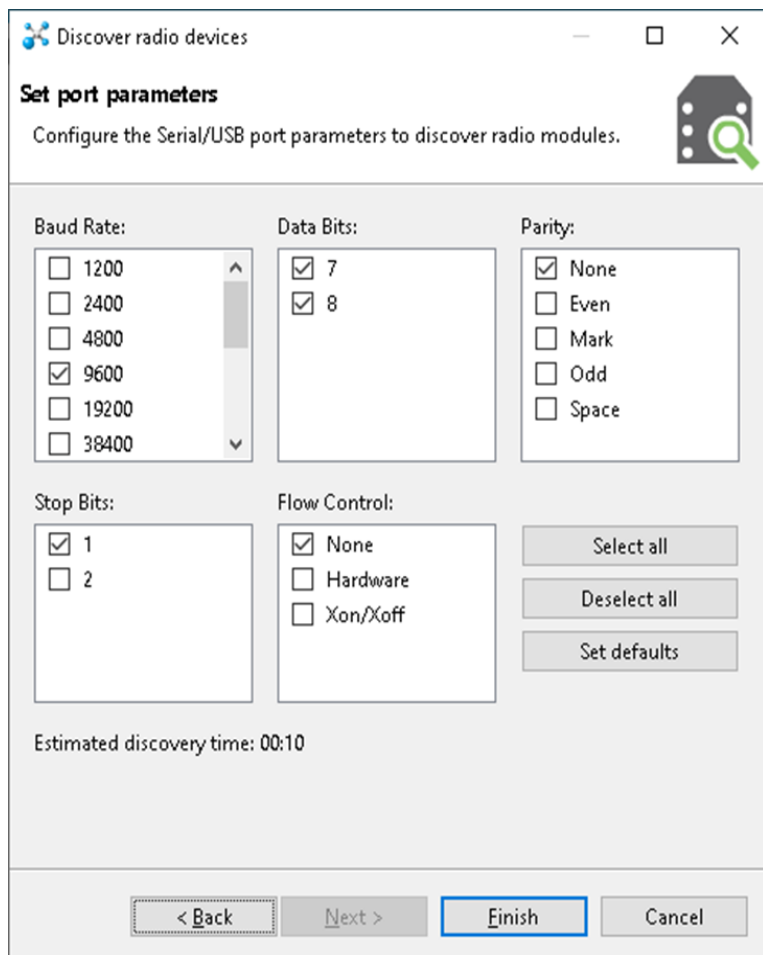


Fuente: Elaboración propia.

Al seleccionar el puerto, posteriormente se mostrará una ventana donde se podrá especificar información referente a la configuración del puerto en donde se encuentra

conectado el módulo XBee que se desea configurar; es recomendable mantener la configuración predeterminada. Esta información se aprecia en la figura 30.

Figura 30. Opciones de configuración del puerto de conexión del módulo XBee.

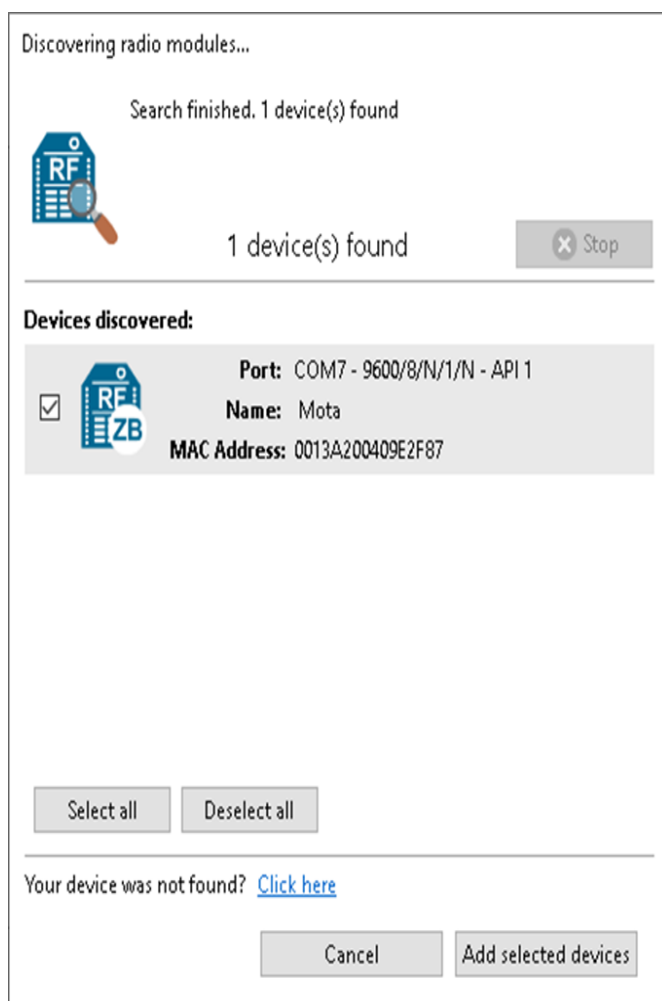


Fuente: Elaboración propia.

En caso de que el dispositivo no sea detectado se debe intentar seleccionando las otras opciones disponibles en la ventana de “set port parameters” de los campos “Stop Bit” y “Baud Rate”. Si el problema persiste, se debe proceder a desconectar el módulo XBee y cambiar la posición de los switch High-Low y/o “5v-3v” del Bee adapter V1.4.

Una vez terminada la búsqueda, se mostrarán los módulos encontrados y se seleccionan los dispositivos a configurar, como se aprecia en la figura 30.

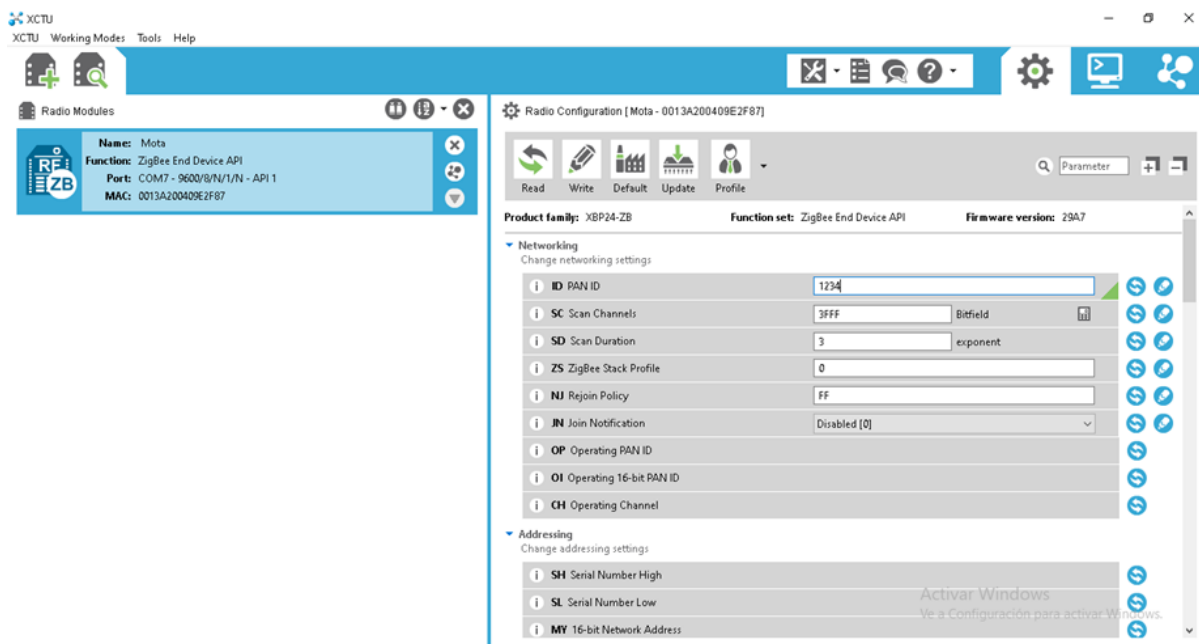
Figura 31. Resultado de módulos encontrados en la herramienta X-CTU.



Fuente: Elaboración propia.

Configuración de parámetros: Una vez seleccionado el módulo XBee se accede a la configuración, como se muestra en la figura 32.

Figura 32. Layout de X-CTU para la configuración de los parámetros de los módulos XBee.



Fuente: Elaboración propia.

La interfaz muestra opciones que permiten realizar diversas tareas sobre el módulo XBee seleccionado, las cuales se detallan en la figura 33 y se describen a continuación.

Figura 33. Herramientas de interfaz de configuración de módulo XBee.



Fuente: Elaboración propia.

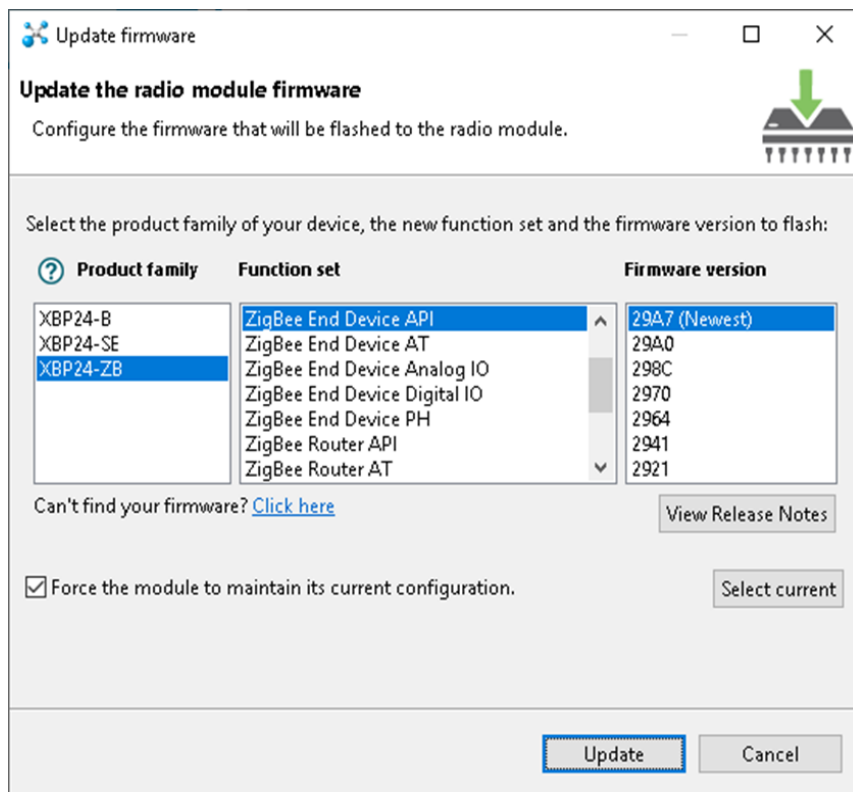
Read (Opción 1): Permite leer la configuración existente del módulo añadido, es útil cuando se requiere obtener la información de un dispositivo y replicarla en otro.

Write (Opción 2): Permite escribir la configuración realizada en la interfaz de configuración.

Default (Opción 3): Carga el Firmware predeterminado del dispositivo.

Update (Opción 4): Desplegará las opciones asociadas con el modo de funcionamiento del dispositivo. Esto se muestra en la figura 34.

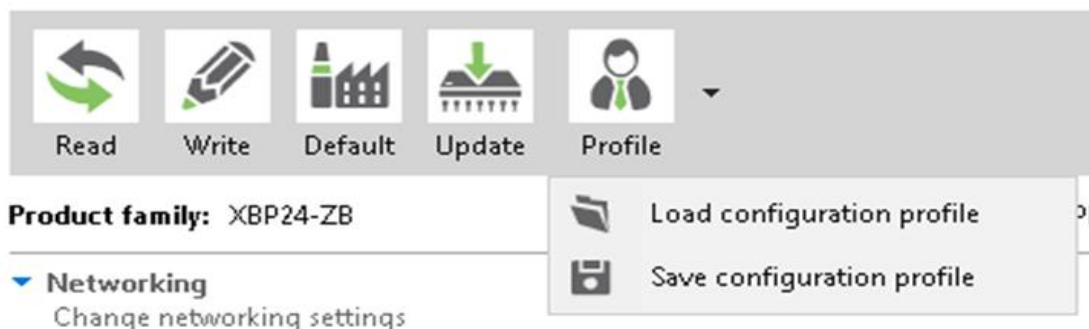
Figura 34. Interface Update Firmware X-CTU.



Fuente: Elaboración propia.

Profile (Opción 5): Permite cargar o guardar configuraciones de parámetros y modos de trabajo de los módulos, como se aprecia en la figura 35.

Figura 35. Creación o cargue de perfiles con configuración para XBee.



Fuente: Elaboración propia.

Principales parámetros configurables y relevantes de los módulos XBee del prototipo de red inalámbrica de sensores.

Un aspecto importante que se debe considerar al momento de configurar los módulos XBee es el modo de operación dentro de la red ZigBee diseñada. Para este proyecto se expresó en el despliegue de la arquitectura, que se contará con tres nodos finales y un nodo coordinador; es por esto por lo que al configurar los módulos XBee debe definirse su modo de operación. La configuración de los modos de operación de los dispositivos empleados se lista en la Tabla 3.

Tabla 3
Modo de trabajo de modulos XBee's usados en la red inalámbrica de sensores

XBee	Mac	Modo de trabajo
COORDINADOR	0013A200409E2F93	ZigBee Coordinator API
MOTA 3	0013A200409E2FEC	ZigBee End Device API
MOTA 2	0013A200409E2F9D	ZigBee End Device API
MOTA 1	0013A200409E2F87	ZigBee End Device API

Nota: Nombre, direcciones Mac y modo de trabajo de dispositivos de la red implementada

La tabla 4 muestra las configuraciones para los nodos finales y el nodo coordinador.

Tabla 4.
Parámetros generales en X-CTU para configuración de la red inalámbrica de sensores

Parámetro	Nodo final	Coordinador
CH	B	B
ID	1234	1234

DH	0	0
DL	FFFF	FFFF
SH	Default	Default
SL	Default	Default
SC	3FFF (default)	3FFF (default)
SD	3 (default)	3 (default)
PL	4 (default)	4 (default)
BD	9600	9600

Nota: Opciones de configuración para velocidad, enrolamiento en la red y forma de operación.

Los modos de operación, configuración de la red, y demás opciones de funcionamiento de los módulos se configuraron en el software X-TCU, los más relevantes se listan en la tabla 5.

Tabla 5
Parámetros relevantes de módulo XBee pro S2

Parámetro	Descripción
CH	Permite asignar el canal que será utilizado para transmitir o recibir datos entre los módulos
ID	Permite identificar a una Red de Área Personal en particular, solo los dispositivos configurados con este ID podrán establecer comunicación con el nodo central.

	Corresponde a los últimos 32 bits más significativos de los 64 bits
DH	correspondientes a la dirección de destino, Default 0 para direcciones de 16 bits
DL	Corresponde a los primeros 32 bits (menos significativos) de los 64 bits que forman la dirección de destino
SH	Admite leer los 32 bits más significativos de los 64 bits que forman la dirección de origen
SL	Admite leer los 32 bits menos significativos de los 64 bits que forman la dirección de origen
SC	Este parámetro define la lista de los canales que son examinados para determinar si están activos y el nivel de energía detectada.
SD	tiempo = (número de canales)*(2SD)*(15,36 ms)
PL	Nivel de potencia
BD	Velocidad de transmisión
SO	Sleep Option: Opciones de ciclos de sueño
SP	Cyclic Sleep Period: Periodo del ciclo de sueño
SN	Number of Cyclic Sleep Periods: Multiplicador de SP, determina la cantidad de ciclos de sueños.

Nota: Parámetros básicos a considerar para la configuración y funcionamiento de los módulos XBee del prototipo desarrollado. Los parámetros DH y DL son inmodificables y corresponden a una dirección única. Los parámetros configurables inicialmente tienen un estado por defecto.

El campo SO (Sleep options) se establece en 4 con el fin de habilitar los periodos de sueño del XBee de acuerdo con los valores SP y SN. Este se muestra en la figura 65 y figura 37 Basado en la ecuación (1):

$$\text{tiempo de sueño} = SP * SN \tag{1}$$

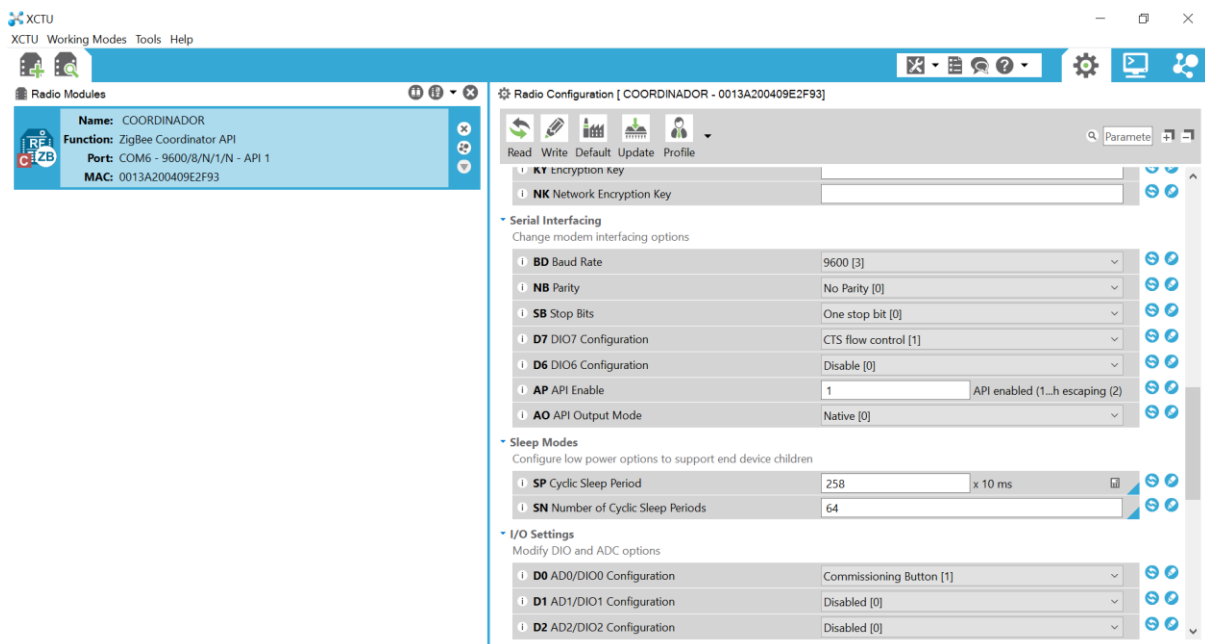
$$SP = 258 \rightarrow 6000 \text{ ms}$$

$$SN = 64 \text{ (Hex)} = 100 \text{ (Dec)}$$

$$\text{tiempo de sueño} = 6000 \text{ ms} * 100$$

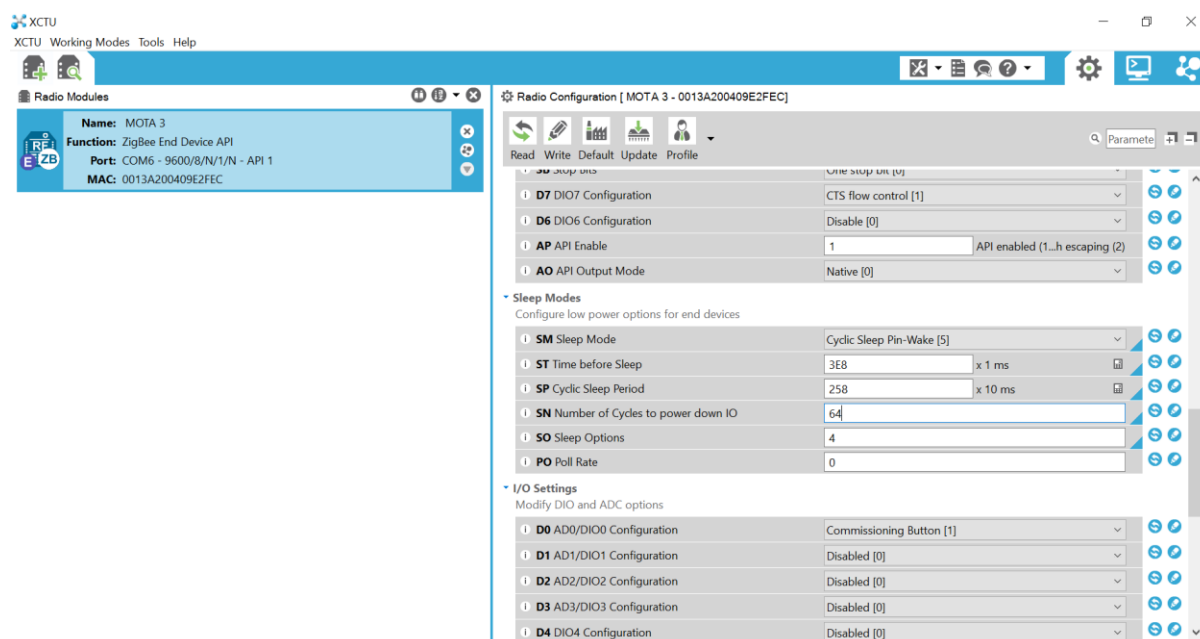
$$\text{tiempo de sueño} = 600000 \text{ ms} = 10 \text{ min}$$

Figura 36. Configuración SP y SN en nodo coordinador



Fuente: Elaboración propia.

Figura 37. Configuración SP y SN en nodos finales.



Fuente: Elaboración propia.

5.2.4 Desarrollo de nodo coordinador y servidor de tramas API en Raspberry Pi.

Uno de los aspectos más relevantes de este trabajo es el desarrollo de un servidor local de recepción de tramas que tenga conectividad inalámbrica en una red ZigBee, es decir, que funcione como nodo coordinador dentro del sistema de monitoreo basado en una WSN. Así mismo que tenga la posibilidad de obtener la información de temperatura y humedad proveniente de los nodos finales, para su almacenamiento y posterior visualización en una interfaz gráfica. Para esto se realizaron las tareas que se exponen a continuación.

Desarrollo de funcionalidades para la recepción de tramas API en plataforma Raspberry Pi.

En la ruta “/var/www/html” se alojan 3 archivos que permiten la recepción de la trama API y, la inserción y consulta de información de la base de datos “BD_mediciones” tabla “Valores” alojada en phpMyAdmin. Estos 3 archivos corresponden a FormPortSerial.py, consulta.php y pag1.php los cuales serán explicados a continuación:

Desarrollado en Python para la gestión de tramas API.

Esta sección se desarrolla a través del archivo “FormPortSerial.py” el cual gestiona la lectura del puerto serie de la Raspberry Pi; si hay información entrante válida se realizará la decodificación de la trama y luego obtiene 3 variables:

- ID: Correspondiente a la dirección del dispositivo (nodo final) que transmite la información de las variables de temperatura y humedad.
- Temperatura: Dato de temperatura correspondiente a la mota desde donde se transmite la información.
- Humedad: Dato de humedad correspondiente a la mota desde donde se transmite la información.

Una captura del código desarrollado se observa en la figura 38 a continuación.

Figura 38. Código Python para decodificación de Tramas API.

```

#!/usr/bin/perl
use strict;
use warnings;
use IO::Serial;
use DBI;

my $serialPort = "/dev/ttyUSB0";
my $baudrate = 9600;
my $bytesize = 8;
my $parity = 'N';
my $stopbits = 1;

my $serialPort = IO::Serial->new($serialPort, $baudrate, $bytesize, $parity, $stopbits);
my $serialPort->open;

my $temp;
my $hum;
my $med;

sub convert($){
    my $str = $_;
    for my $i (0..length($str)-1){
        $str =~ s/\\x[0-9a-f]{2}/chr($i)/;
    }
    return $str;
}

sub convert_2($){
    my $str = $_;
    for my $i (0..length($str)-1){
        $str =~ s/\\x[0-9a-f]{2}/chr($i)/;
    }
    return $str;
}

while (1){
    if ($serialPort->bytes_waiting > 0){
        my $frame = $serialPort->read_line;
        my $frame = $serialPort->read($frame);

        if ($frame =~ /^7E/){ #7E es el inicio de trama (todas las tramas comienzan por 7E)
            my $index = $frame->index($frame);
            my $mediciones = convert($frame[$index]);
            my $temp = convert_2($frame[$index]);
            my $hum = convert_2($frame[$index]);
            my $mediciones = $frame[$index];
            my $temp = $frame[$index];
            my $hum = $frame[$index];

            print "ID: " . $ID . "\n";
            print "Temperatura: " . $temp . "\n";
            print "Humedad: " . $hum . "\n";
            print "Trama: " . $frame . "\n";
            my $dbh = DBI->connect("dbi:mysql:host=localhost;user=usertestis;password=146296;database=BD_mediciones");
            my $cursor = $dbh->cursor();
            my $sql = "INSERT INTO 'Valores' ('ID', 'Tiempo', 'Temperatura', 'Humedad') VALUES (%s, %s, %s, %s)";
            my $val = ($ID, time.localtime(), $temp, $hum);
            $cursor->execute($sql, $val);
            $dbh->commit();

            #print($mediciones) #se debe separar la temperatura de la humedad
            #print($temp) #se debe separar la temperatura de la humedad
            #print($hum) #se debe separar la humedad de la temperatura
            #print($frame) #se debe separar la temperatura de la humedad
        }
    }
}
    
```

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenido los datos, producto de la decodificación de la trama, se realiza la inserción de estos y la información de la hora y fecha del sistema en la tabla “Valores” de la base de datos BD_mediciones previamente creada en phpMyAdmin, como es mostrado en la captura de pantalla de la figura 39.

Figura 39. Interfaz phpMyadmin.

The screenshot shows the phpMyAdmin interface for a database named 'BD Mediciones'. The table 'Valores' is selected, displaying a list of sensor readings. The table has the following structure:

ID	Tiempo	Temperatura	Humedad
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:07:59	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:08:04	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:08:12	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:08:19	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:08:26	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:08:33	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:08:40	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:08:47	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:08:55	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:09:02	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:09:09	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:09:16	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:09:23	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:09:30	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:09:37	-127.000000	NAN
013a20409e2f9d	2021-07-09 00:09:45	-127.000000	NAN

Fuente: Elaboración propia.

Página de consulta de dispositivos.

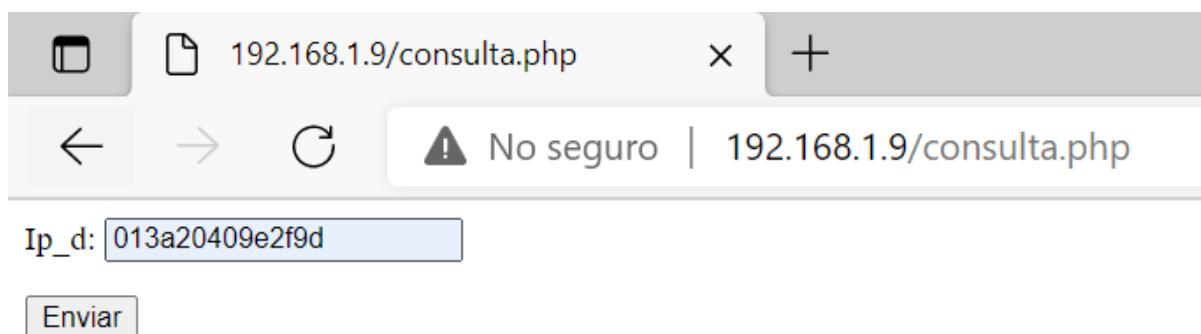
Para consultar los datos que se obtienen de los módulos XBee se desarrolló un código en lenguaje html. El código se encuentra alojado en el archivo “Consulta.php” y permite captar la dirección ID del dispositivo que se desea consultar. Para realizar la consulta se accede a través de la red local en el mismo dominio del nodo coordinador. Se accede a través de un dispositivo local que se encuentre en la red, a través de una consulta web mediante la dirección IP que la red local le asigne al nodo coordinador. Cabe resaltar que el dispositivo desde donde se requiera realizar la consulta de la base de datos debe estar conectado a la misma red de área local en la que se encuentre la Raspberry Pi. En la figura 40 se aprecia una captura de pantalla del código desarrollado para esta finalidad.

Figura 40. Código página de consulta de datos.

```

<div style="background-color: #588c7e; width:200px; text-align: center; text:bold">
<form action="pag1.php" method="post">
<p style="font-weight: 750">Ip_d: <input type="text" name="Ip_dispositivo"></p>
<p><input type="submit" value="Enviar"></p>
<p style="font-weight: 750">*Ingrese la dirección del dispositivo a consultar</p>
</form>
</div>
    
```

Fuente: Elaboración propia.

Figura 41. Página de consulta de datos.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 41 muestra el resultado de realizar la consulta local. Una vez se haga click en el botón enviar, la consulta se enrutará hacia la “pag1.php” de presentación de datos.

Desarrollo PHP para la presentación de datos consultados a través de tabla HTML.

El archivo “pag1.php” contiene el código que permite la visualización de los registros a través del explorador web, los datos son consultados directamente a la base de datos alojada en phpMyAdmin y luego son mostrados en una tabla en la cual solo se pueden observar los últimos 20 datos recibidos en la estación central. La figura 42 muestra una captura de pantalla de este código.

Figura 42. Código página de presentación de datos

```

<?php
$dbhost = "localhost";
$dbuser = "usertesis";
$dbpass = "140290";
$dbname = "BD_mediciones";

$con = mysqli_connect($dbhost, $dbuser, $dbpass, $dbname);

if (!$con)
{
    die('No se logró conexión con Base de datos: ' . mysql_error());
}

$_ip=$_POST['Ip_dispositivo'];

$query = "SELECT * FROM `Valores` WHERE `ID`='$_ip' ORDER BY Tiempo DESC LIMIT 20";
$result = mysqli_query($con, $query);

if ($result->num_rows > 0) {

    echo "<html>
    <header>
    <h1>MEDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD</h1>
    </header>
    <body>
    Id dispositivo: $_ip <br>
    </body>
    <style>
    hr{
        color: #588c7e;
        background-color: #588c7e;
        margin-left: 0%;
        margin-right: 55%;
    }
    !if
    text-align: center;
    width: 45%;
    color: #FFFFFF;
    font-weight: normal;
    font-size: 25px;
    text-transform: uppercase;
    }
    !:nth-child(1) {background-color: #588c7e}

    table {
    border-collapse: collapse;
    border-width: 1px;
    border-color: #729ea5;
    font-family: monospace;
    width: 45%;
    color: #588c7e;
    font-size: 15px;
    text-align: center;
    }
    th{
    background-color: #588c7e;
    color: white;
    border-width: 1px;
    border-color: #729ea5;
    }

    td {font-size:12px;border-width: 1px;padding: 8px;border-style: solid;border-color: #729ea5;
    tr:nth-child(even) {background-color: #f2f2f2}
    tr:hover {background-color:#ffff99;}
    }
    </style>
    <title>Tabla de mediciones</title>
    <body>
    <table>
    <tr>
    <th>Fecha y hora</th>
    <th>Temperatura</th>
    <th>Humedad</th>
    </tr>";

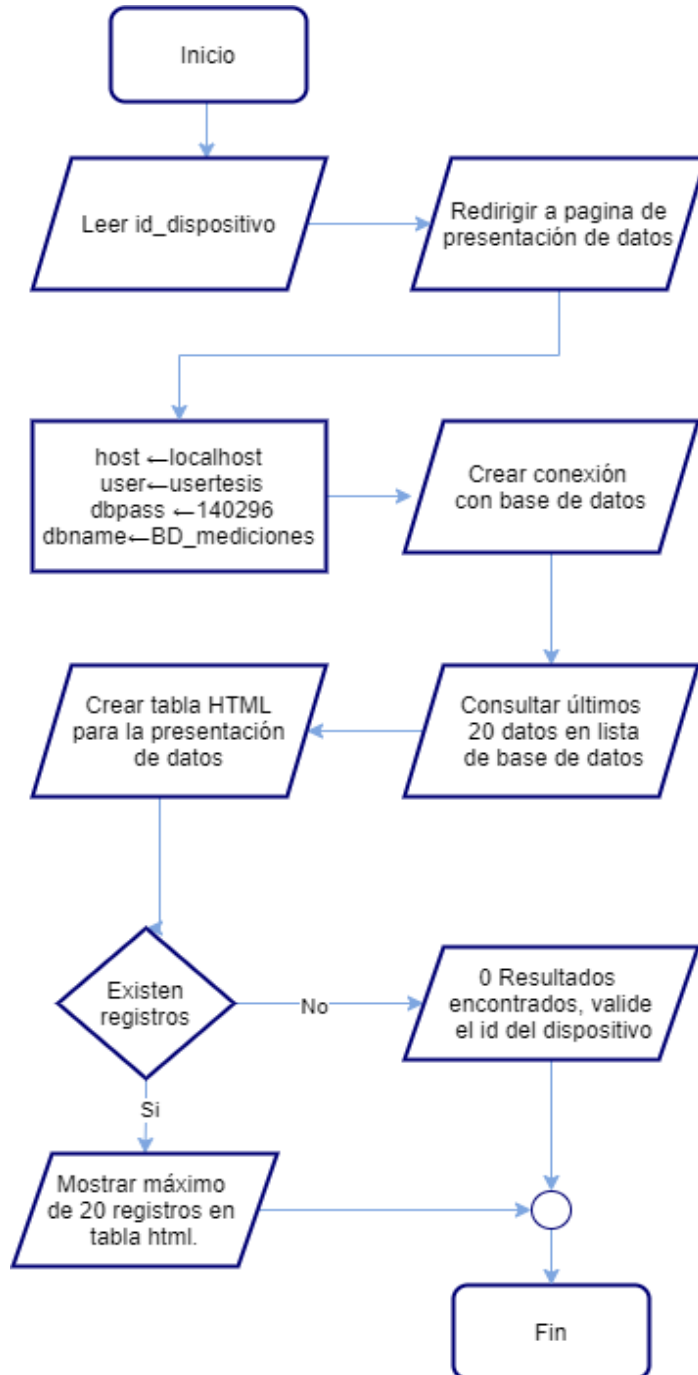
    while($row = $result->fetch_assoc()) {
        echo "<tr><td> . $row["Tiempo"]. "</td><td> . $row["Temperatura"]. "</td><td> . $row["Humedad"]. "</td>";
    }
    echo "</table></body></html>";
    echo "Ultimos 20 registros";
} else {
    echo "0 Resultados encontrados, valide el id del dispositivo";
}
mysqli_close($con);
?>

```

Fuente: Elaboración propia.

Para una mejor comprensión de lo que este código hace, se muestra en la figura 43 un diagrama de flujo que muestra el paso a paso de su operación.

Figura 43. Flujograma consulta y presentación de registros en página Web.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 44 se muestra la tabla con los registros de datos de temperatura y humedad.

Figura 44. Consulta de dispositivo en página presentación de datos.

Id dispositivo: 013a20409e2f9d

Fecha y hora	Temperatura	Humedad
2021-07-09 00:14:24	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:11:53	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:11:46	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:11:39	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:11:32	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:11:25	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:11:18	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:11:10	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:11:03	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:10:56	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:10:49	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:10:42	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:10:35	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:10:28	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:10:20	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:10:13	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:10:06	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:09:59	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:09:52	-127.000000	NAN
2021-07-09 00:09:45	-127.000000	NAN

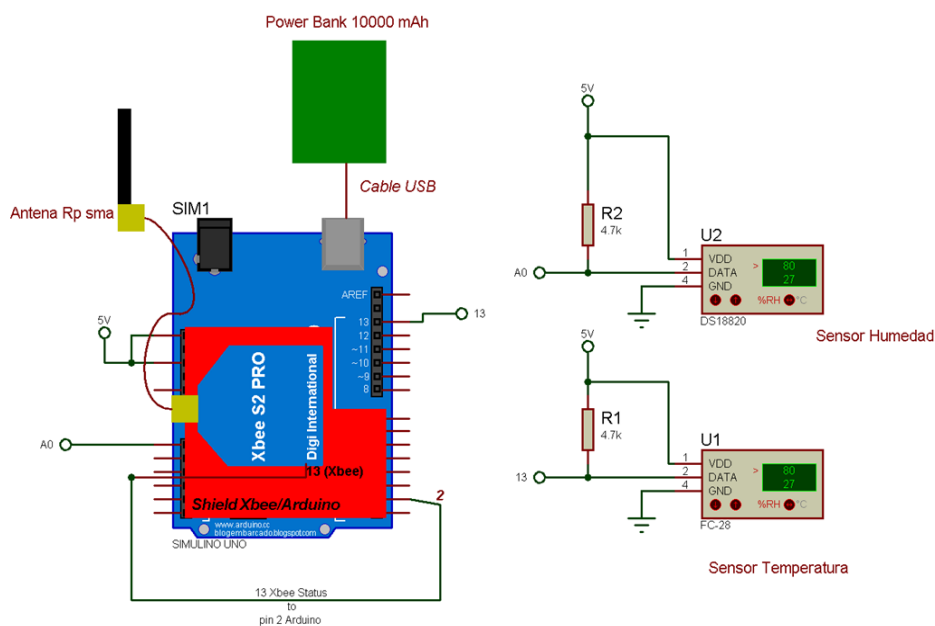
Últimos 20 registros

Fuente: Elaboración propia.

5.2.5 Desarrollo de nodos finales para prototipo de red inalámbrica de sensores.

En esta sección se muestra cómo se realizó la integración de plataformas electrónicas para el desarrollo de un nodo final del sistema de monitoreo desarrollado en este proyecto. Como se mencionó anteriormente un nodo final está conformado por un Arduino UNO, un sensor de temperatura DS18B20, un sensor de humedad del suelo FC-28, una shield para adaptar módulos XBee, un módulo XBee Pro S2 y una power bank que distribuye la alimentación a todos los dispositivos. Estos elementos se integran para formar una mota o nodo final que hará parte de una WSN basada en comunicación ZigBee. La conexión de estos elementos se muestra en la figura 45.

Figura 45. Conexión de sensores, power bank y antena.



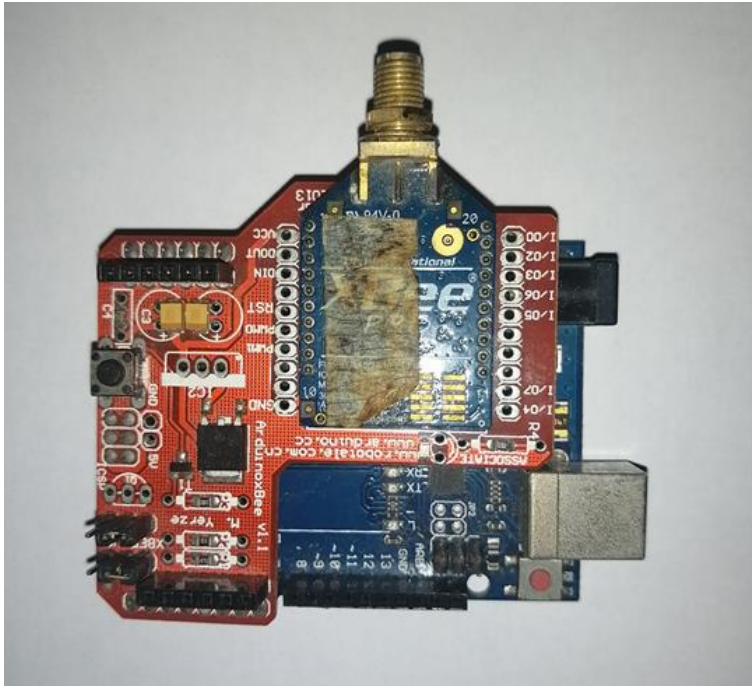
Fuente: Elaboración propia, desarrollado en Proteus 8.0.

De la figura 45 se observa que se emplea el pin 2 del Arduino UNO como entrada digital para la activación del bloque de código que gestiona las tramas API; la entrada digital 13 se utiliza para la captura de la señal asociada al sensor de temperatura haciendo uso de la librería onewire- la entrada analógica A0 es asignada a la recepción de la señal del sensor de humedad.

Es necesario establecer un puente entre el pin reset y la salida de 5V de la plataforma Arduino para estabilizar el comando de reset debido a que al conectar el módulo XBee a través de la Shield XBee-Arduino, la placa presenta múltiples reset con frecuencias de aproximadamente de 5 segundos que no permiten la ejecución normal del código.

La shield XBee Arduino permite facilitar la comunicación entre el módulo XBee Pro S2 y la placa Arduino UNO; se puede hacer uso de las entradas y salidas no visibles del Arduino a través de las borneras de la Shield. Esta integración se puede apreciar en la figura 46.

Figura 46. Acople Arduino, Shield XBee y XBee de End Device.



Fuente: Elaboración propia.

Se diseñó un circuito en PCB para la organización y conexión de los sensores y las entradas del Arduino UNO. Además, este dispositivo se montó sobre una caja protectora contra la intemperie, conformando la mota que hace parte de una WSN. Esto se observa en la figura 47 a continuación.

Figura 47. Mota del prototipo de red inalámbrica de sensores.



Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 48, 49 y 50 se pueden observar los montajes realizados para las estaciones de Compost, huerto de orégano y huerto de cultivos variados con predominancia de hierbabuena. Cabe resaltar que los equipos se protegieron con plástico para evitar filtraciones de agua que pudieran afectar los dispositivos.

Figura 48. Mota 1 contenedor de compost.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 49. Mota 2 huerto de hierbabuena.



Fuente: Elaboración propia.



Figura 50. Mota 3 huerto de Orégano.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.6 Desarrollo de nodo coordinador para prototipo de red inalámbrica de sensores.

Como se mencionó con anterioridad el sistema de monitoreo estará conformado por un nodo coordinador que tendrá la finalidad de recibir las tramas de las estaciones finales a través de una WSN basada en tecnología ZigBee. Este nodo además permite almacenar las tramas recibidas de los nodos finales para posteriormente visualizar a través de un servicio Web la información de temperatura y humedad del suelo. Para esto se realizó la integración de una plataforma Raspberry Pi como núcleo del sistema, un adaptador XBee y un módulo XBee Pro S2. El sistema recibe alimentación a través de un adaptador de corriente conectado a una toma de energía eléctrica de 110V. El sistema integrado se muestra en la figura 51.

Figura 51. Nodo central del prototipo de red inalámbrica de sensores.



Fuente: Elaboración propia.

La ubicación del nodo coordinador permite que no esté expuesto a condiciones de intemperie o climatológicas; se resguarda del polvo dentro de una caja ubicada bajo techo en

una habitación de la casa central cerca de una fuente de alimentación AC y en una zona con conectividad WiFi.

La antena receptora conectada al módulo XBee Pro S2 se extendió a través de un cable con conector RP-SMA hembra-macho con el objetivo de no exponer los equipos esenciales a condiciones de intemperie y tener una mejor línea de vista con los nodos finales. La antena se posicionó a una altura de aproximadamente 2 metros. La ubicación de la antena se evidencia en la figura 52.

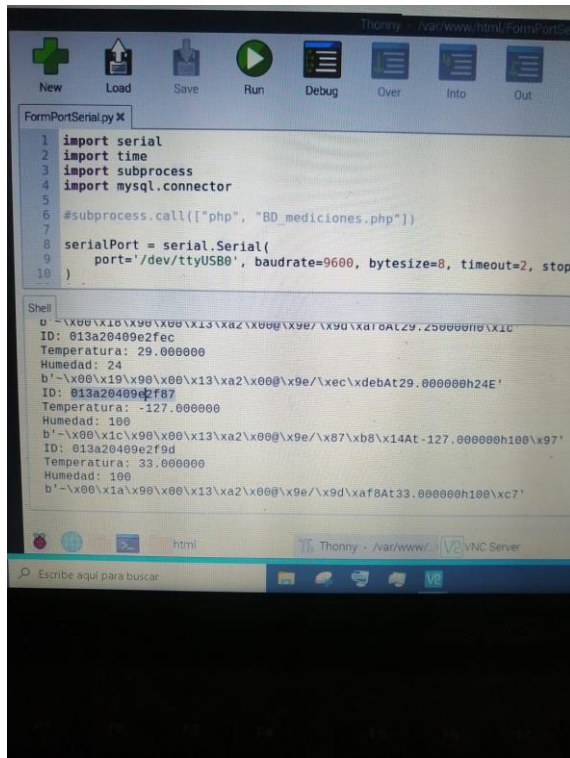
Figura 52. Antena del nodo central (0013A200409E2F93).



Fuente: Elaboración propia.

Se hizo uso del software VNC para la visualización de los datos recibidos en la Raspberry Pi a través de la computadora; cabe resaltar que ambos equipos deben estar conectados en el mismo dominio red para poder interactuar entre sí. Los datos recibidos en tiempo real en la plataforma Raspberry Pi se observan en la figura 53.

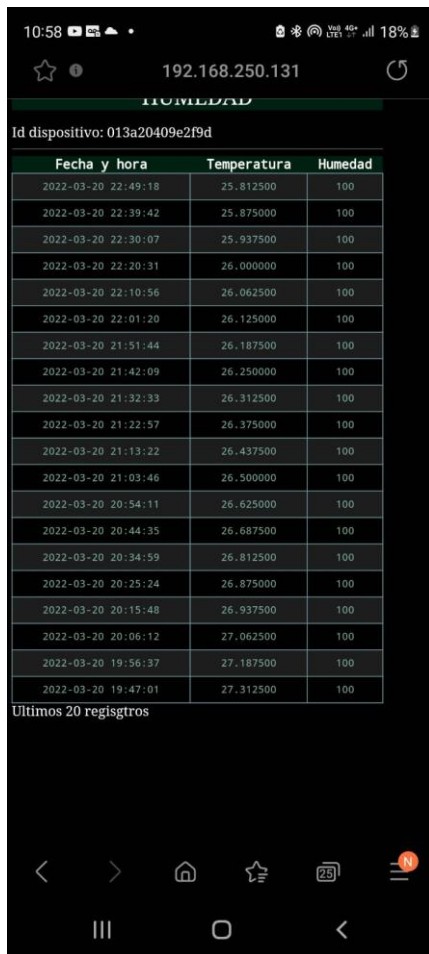
Figura 53. Visualización de datos en tiempo real a través de Raspberry Pi.



Fuente: Elaboración propia.

La consulta de datos se debe realizar accediendo a la dirección IP de la Raspberry Pi; la dirección de la Raspberry Pi puede no ser fija, esto dependerá del protocolo de direccionamiento que tenga el servidor de la red a la que se conecte. También es posible acceder a la Raspberry Pi directamente conectando periféricos (Teclado y mouse) y una pantalla con comunicación por HMI. Una muestra de la visualización de los datos recibidos a través de un dispositivo conectado al mismo dominio de red se aprecia en la figura 54.

Figura 54. Consulta de datos a través de móvil.



Fuente: Elaboración propia.

Recursos, herramientas y dispositivos empleados en la red inalámbrica de sensores

Una relación de los elementos usados para el despliegue del sistema de monitoreo se muestra en la tabla 6.

Tabla 6
Recursos, herramientas y dispositivos

Tipo	Recurso	Funcionalidades generales	Cantidad
Hardware	Raspberry Pi 3	Servidor, nodo central	1
Hardware	Memoria SD 4 GB	Almacenamiento para Raspberry Pi	1
Hardware	Arduino UNO	Gestión de mediciones y emisión de tramas	3

Hardware	XBee pro S2 XBP24-Z7SIT-003	Recepción señal/ emisión señal.	4
Hardware	Shield XBee/Arduino	Acople físico directo XBee-Arduino	
Hardware	Antena	Emisión/ recepción señal	4
Hardware	Cable conector RP-SMA hembra-macho	Extensión para montaje de antena	3
Hardware	Adaptador/conversor corriente AC/DC a 5VDC	Alimentación corriente Raspberry Pi 3.	1
Hardware	Cable USB Micro B	Conexión alimentación corriente Raspberry Pi 3.	1
Hardware	Cable USB Tipo B / USB tipo A	Conexión hacia puerto serial Raspberry Pi 3	3
Hardware	Bee adapter V1.4	Interface para recepción de señal	1
Hardware	Baquelita	Conexiones entre sensores y Arduino	3
Hardware	Resistencia 4,7 kΩ	Circuito conexión sensores	6
Hardware	Power Bank 10000 mAh	Suministro eléctrico a Arduino	3
Software	Arduino IDE	Configuración Arduino	1
Software	Python	Decodificación e inserción de información en Base de datos	1
Software	PHP	Diseño de página Web	1
Software	X-CTU	Configuración XBee	1
Software	phpMyAdmin	Base de datos	1
Software	Visual Studio (C)	Librería creación tramas XBee/API	1

Nota: Recursos para el desarrollo, implementación y despliegue de la red WSN

5.3 Pruebas de funcionamiento del prototipo de red inalámbrica de sensores desplegado

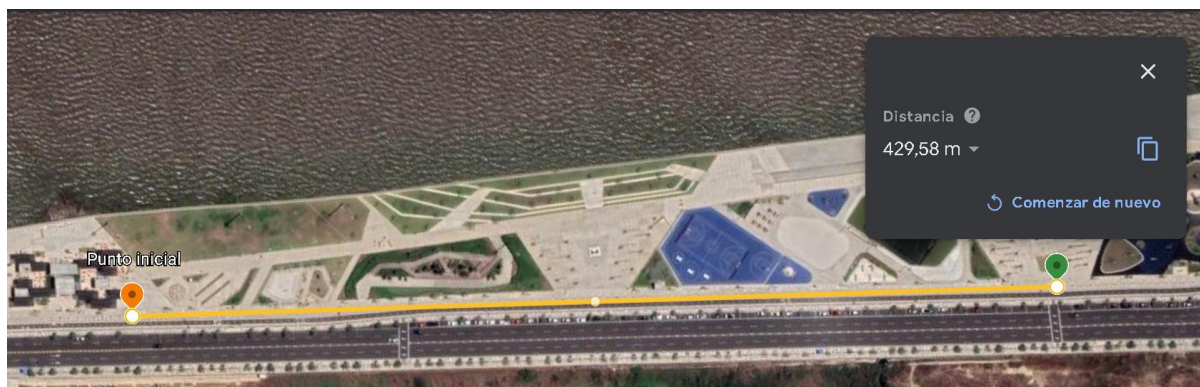
Para validar el funcionamiento del prototipo de red inalámbrica de sensores se realizaron pruebas consistentes en validar el funcionamiento de los nodos en espacios abiertos y dentro del escenario de aplicación. Conforme a lo anterior se realizaron las siguientes pruebas:

- Pruebas de máxima distancia de enlace inalámbrico entre un nodo final y el nodo coordinador
- Pruebas de funcionamiento en el escenario de aplicación, en donde se destacan:
 - Pruebas de pérdidas de paquetes
 - Pruebas de niveles de RSSI
 - Pruebas de medición de valores de temperatura y humedad del suelo
- Prueba de autonomía energética de los nodos finales del sistema de monitoreo

5.3.1 Pruebas de distancia máxima de conectividad inalámbrica.

En primera instancia para validar el funcionamiento de los nodos, se decidió conocer la máxima distancia que podían alcanzar los nodos con línea de vista (según el fabricante bajo condiciones ideales los dispositivos pueden alcanzar una distancia de aproximadamente 1,6 km). Para esto se realizó una prueba en un escenario sobre el cual se pudiera tener posibilidad de poder tener varios puntos de monitoreo y que se pudieran desplegar a varias distancias. Para esto se eligió una sección del Malecón del Río en la ciudad de Barranquilla. La sección se muestra en la figura 55.

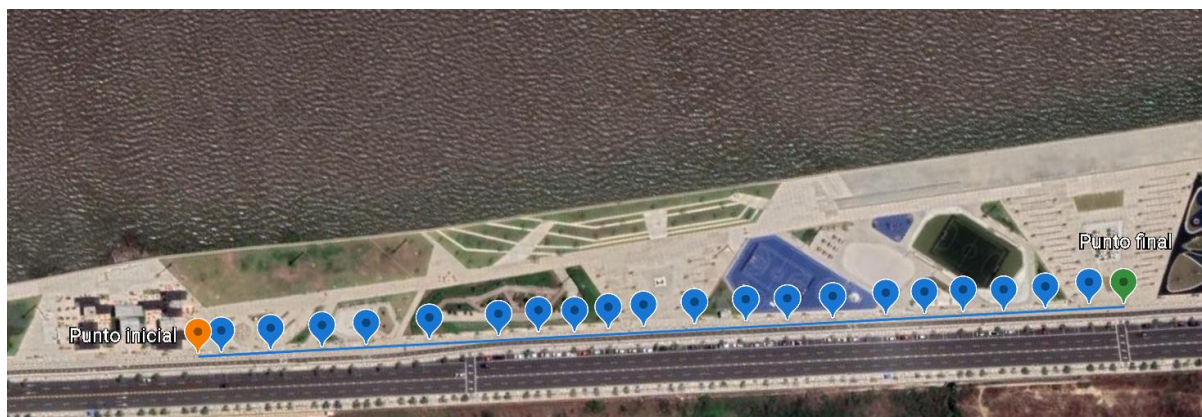
Figura 55. Escenario de prueba para establecer la máxima distancia de conectividad de los nodos finales.



Fuente: Malecón del río, Barranquilla, Atlántico. Google maps, 2022.

Se realizaron pruebas funcionales en el Malecón del Río - Barranquilla debido a las condiciones topográficamente favorables que se presentan en este escenario. Inicialmente se fijó la coordenada de partida (punto inicial) en donde se ubicó el nodo coordinador con la antena receptora a una altura aproximada de 2 metros. Posteriormente se procedió a alejar el nodo final desde el punto de inicio a las distancias señaladas en la tabla 6. Por cada punto se enviaba un total de 10 tramas con intervalos de tiempo de 15 segundos, con el fin de comprobar el nivel de RSSI que se obtenía en el nodo coordinador a través de la herramienta Range test del software X-CTU; además, se corroboró la recepción de tramas en tiempo real a través de un código en Python instalado en la Raspberry Pi. Los puntos de monitoreo se seleccionaron de acuerdo con las condiciones del sitio, considerando la seguridad y confort en el momento de realizar las pruebas; estos se muestran en la figura 56.

Figura 56. Puntos de toma de datos para pruebas en Malecón del río Magdalena.



Fuente: Malecón del río, Barranquilla, Atlántico. Google maps, 2022.

Esta prueba permite caracterizar la máxima distancia de conectividad inalámbrica que alcanzan los nodos finales; con base a estos resultados se conocerá si es viable implementar esta tecnología en el escenario de despliegue del sistema de monitoreo de la WSN.

Se empleó la localización por GPS para la obtención de la distancia entre el nodo final y el nodo coordinador obteniéndose las distancias de la tabla 7. Los resultados de esta prueba se muestran y analizan en el capítulo siguiente.

Tabla 7
 Parámetros prueba de comunicación malecón del río Barranquilla, Atlántico.

Referencia	Latitud	Longitud	Do	Te
P. inicial	-74,7929013	11,01994271	0	10
P1	-74,7928368	11,01986911	10,5	10
P2	-74,7927011	11,01971274	33,23	10
P3	-74,7925587	11,01954985	57,18	10
P4	-74,7924366	11,0194098	77,18	10
P5	-74,7922547	11,0192139	106,43	10

P6	-74,7920626	11,01899396	138,43	10
P7	-74,7919463	11,01887148	156,43	10
P8	-74,791853	11,01875127	173,43	10
P9	-74,7917544	11,01864716	188,43	10
P10	-74,7916551	11,01853723	204,77	10
P11	-74,7915142	11,01837535	228,54	10
P12	-74,7913716	11,01821163	252,54	10
P13	-74,7912609	11,01807716	271,81	10
P14	-74,7911358	11,01793229	292,57	10
P15	-74,7909861	11,0177643	317,57	10
P16	-74,7908822	11,01763879	335,57	10
P17	-74,7907753	11,01751634	353,37	10
P18	-74,7906694	11,01738219	372,34	10
P19	-74,7905509	11,01725181	391,76	10
P20	-74,7904217	11,01711743	412,6	10
Punto final	-74,7903319	11,01700261	429,31	10

Nota: Nombre del punto, Latitud, longitud, Do Distancia desde el origen (m), Te: Tramas enviada. La obtención de las coordenadas se realizó a través del software online Google Earth. Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 *Pruebas funcionales del sistema de monitoreo desplegado en parque biotemático de Megua.*

Esta prueba se realizó con la finalidad de determinar el comportamiento del sistema de monitoreo, una vez desplegado en los puntos que se indicaron en la figura 10. La prueba consistió en desplegar los nodos finales y nodo coordinador y en un lapso de 88 horas realizar la captura de información con el fin de evaluar métricas de desempeño del sistema, como lo son la pérdida de paquetes, el nivel de RSSI y comportamiento de las mediciones de temperatura y humedad.

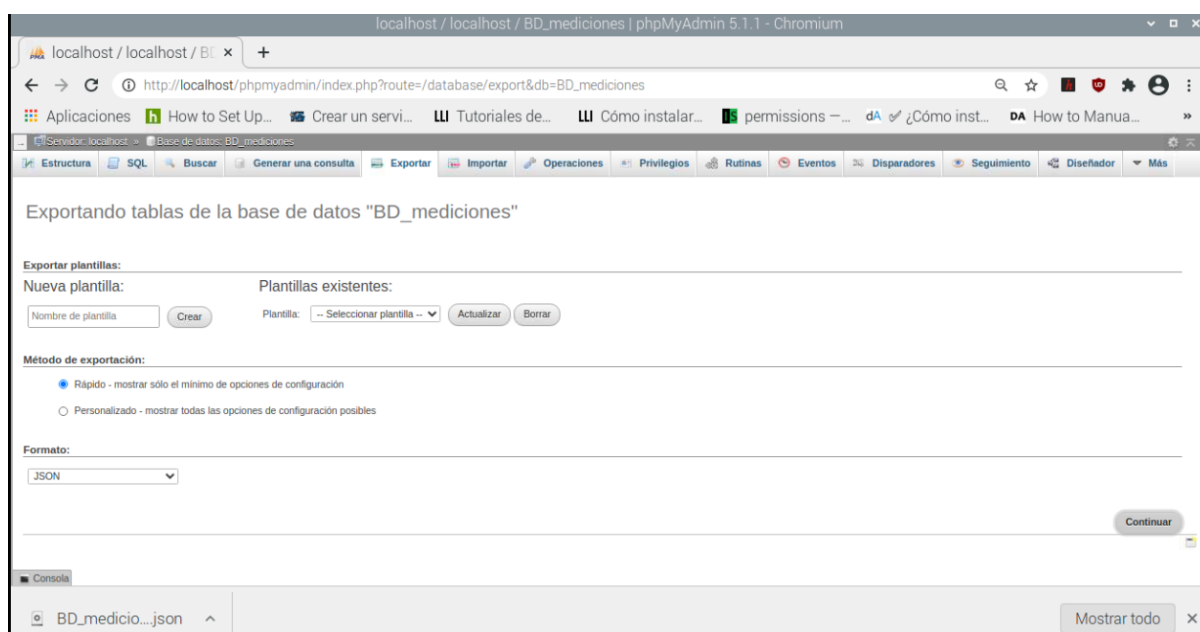
Inicialmente, los nodos finales fueron ubicados con línea de vista apuntando hacia el nodo coordinador, que se encontraba a una altura promedio de 2,5 m; se emplearon cables de extensión de antena para mejorar el montaje de los nodos finales, permitiendo tener los dispositivos a una altura de 1,20 m con el fin de permitir la accesibilidad para posibles intervenciones y reposición de suministro de energía.

Las estaciones transmisoras se instalaron en 2 huertos donde se ha iniciado la siembra de diferentes plantaciones de las cuales predominan el Orégano y la hierbabuena, así mismo se instaló una estación para la toma de temperatura y humedad de uno de los contenedores de compostaje del parque Megua. Si bien este número de sensores no alcanza a cubrir toda el área de los cultivos y del sistema de compostaje, permite forjar las bases para la implementación de una red con más puntos para el monitoreo de variables de temperatura y humedad. La librería desarrollada permite desarrollar tramas para el envío de datos de temperatura y humedad provenientes de múltiples sensores, identificándose con un tag/id (frame id), adicionalmente en el Arduino se podrán conectar más sensores usando técnicas de multiplexación de señal y/o librerías.

Los nodos finales se programaron con el fin de enviar tramas de información de humedad y temperatura cada 10 min durante el tiempo que se demoró la prueba.

Los valores obtenidos de esta prueba se almacenaron en la base de datos creada sobre la plataforma Raspberry Pi del nodo coordinador, para posteriormente ser consultados y analizar las métricas de interés. Para consultar los datos almacenados se procede a ingresar a phpmyadmin y exportar el archivo Json que contiene el histórico de datos captados de la red de sensores inalámbricos, como se aprecia en la figura 57.

Figura 57. Acceso a base de datos a través del explorador de la Raspberry Pi.



Fuente: Elaboración propia.

La información que se obtiene de la base de datos es la relacionada al tiempo de inicio, tiempo de finalización, la cantidad de tramas recibidas, la cantidad de tramas esperadas, el tiempo total de funcionamiento, el tiempo que se da entre el envío de una trama y la siguiente y los paquetes fallidos. Estos valores se muestran por nodos, en donde algunos tiempos descritos son expresados en promedios. Para los datos de niveles de RSSI, se utilizó la herramienta “Range Test”, disponible en el software X-CTU, con el fin de medir el nivel de RSSI que se tienen entre los nodos finales y nodo coordinador. Los resultados de la temperatura y la humedad obtenidos por los nodos finales son también almacenados para su posterior análisis.

Para la alimentación de energía de los nodos finales se consideró como buena opción el uso de un Power Bank de 10.000 mAh; este dispositivo según las especificaciones del fabricante entra en suspensión cuando el amperaje entregado es inferior a 50 mA. Por este motivo, fue necesario sacar de suspensión la placa Arduino y adicionar en las conexiones un diodo Led con el objetivo de superar dicho amperaje nominal.

Los resultados de cada una de las pruebas y el análisis que se genera de los mismos se muestran en el siguiente capítulo.

5.3.3 Pruebas de autonomía energética de los nodos finales del sistema de monitoreo.

Esta prueba se realiza con el fin de evaluar la autonomía energética de los nodos finales del sistema de monitoreo desplegado en el parque biotemático de Megua. Para esta prueba se realizó el despliegue descrito anteriormente en la sección 5.1.5, es decir, los nodos finales y nodo coordinador están ubicados de manera similar.

Durante esta prueba inicialmente el prototipo funcionaba con suspensión del módulo XBee y el modo de suspensión del Arduino, generando un consumo de energía significativamente bajo (alrededor de 35 mA); esto provocaba el apagado de los power banks debido a las especificaciones de corriente nominal (50 mA), por lo tanto, se optó por omitir la funcionalidad de suspensión del Arduino para generar un consumo superior a 50 mA.

La duración de esta prueba estuvo condicionada al tiempo de duración de las power bank utilizadas en cada uno de los nodos finales. Los resultados obtenidos y el análisis de los mismos se muestran en el capítulo siguiente.

6 Resultados y análisis

En esta sección se describen los resultados y análisis más relevantes sobre el sistema de monitoreo implementado en el parque biotemático de Megua. Entre estos resultados se tienen

los asociados a las pruebas de conectividad inalámbrica, las pruebas de campo, las de funcionamiento general del sistema y el consumo de energía. Estos resultados y sus análisis son soportados por medio de gráficas y tablas y se describen a continuación.

6.1 Resultados de pruebas de distancia máxima de conectividad inalámbrica del sistema de monitoreo agrícola

La conectividad inalámbrica de los nodos finales implementados en el sistema de monitoreo se evaluó tal como se describió en la sección anterior. Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla 8.

Tabla 8
Resultados prueba de comunicación máxima distancia malecón del rio Barranquilla, Atlántico.

Referencia	Latitud	Longitud	Do	Te	Tr	Ee	NR (dBm)
P. inicial	-74,7929013	11,01994271	0	10	10	100%	-40
P1	-74,7928368	11,01986911	10,5	10	10	100%	-41
P2	-74,7927011	11,01971274	33,23	10	10	100%	-46
P3	-74,7925587	11,01954985	57,18	10	10	100%	-46
P4	-74,7924366	11,0194098	77,18	10	10	100%	-50
P5	-74,7922547	11,0192139	106,43	10	10	100%	-55
P6	-74,7920626	11,01899396	138,43	10	10	100%	-57
P7	-74,7919463	11,01887148	156,43	10	10	100%	-56
P8	-74,791853	11,01875127	173,43	10	10	100%	-65

P9	-74,7917544	11,01864716	188,43	10	10	100%	-70
P10	-74,7916551	11,01853723	204,77	10	10	100%	-74
P11	-74,7915142	11,01837535	228,54	10	10	100%	-72
P12	-74,7913716	11,01821163	252,54	10	10	100%	-71
P13	-74,7912609	11,01807716	271,81	10	10	100%	-75
P14	-74,7911358	11,01793229	292,57	10	10	100%	-77
P15	-74,7909861	11,0177643	317,57	10	10	100%	-80
P16	-74,7908822	11,01763879	335,57	10	10	100%	-81
P17	-74,7907753	11,01751634	353,37	10	10	100%	-84
P18	-74,7906694	11,01738219	372,34	10	10	100%	-86
P19	-74,7905509	11,01725181	391,76	10	10	100%	-89
P20	-74,7904217	11,01711743	412,6	10	7	70%	-92
Punto final	-74,7903319	11,01700261	429,31	10	4	40%	-96

Nota: Resultados obtenidos en la prueba de máxima distancia de conectividad inalámbrica entre un nodo final y el nodo coordinador. Nombre del punto, Latitud, longitud, Do Distancia desde el origen (m), Te: Tramas enviada, Tr: Tramas recibidas, Ee: Eficiencia de enlace respecto a tramas recibidas y enviadas, NR: Nivel RSSI promedio (dBm). Coordenadas obtenidas mediante Google Earth. Fuente: Elaboración propia.

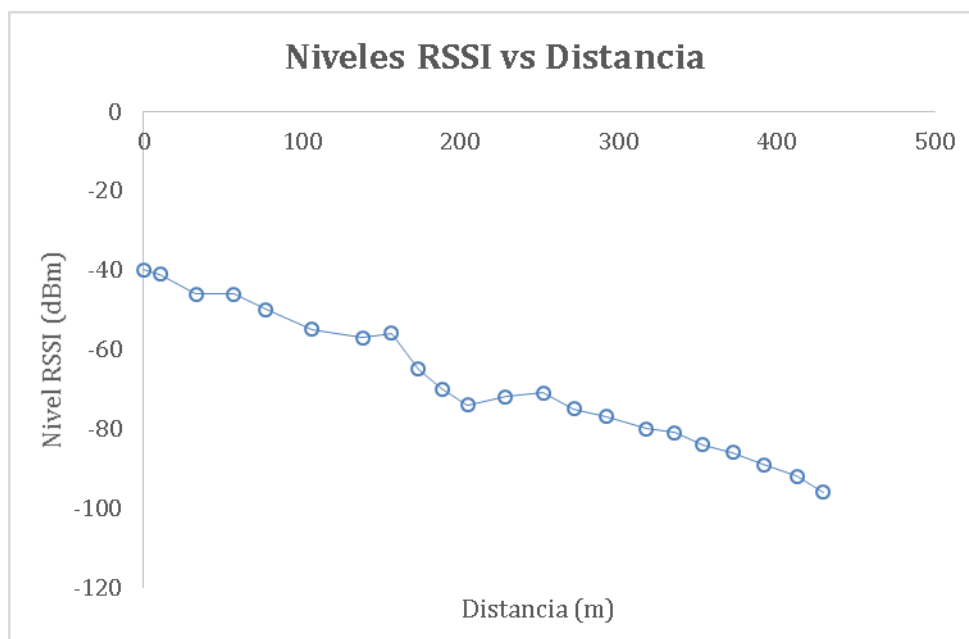
Dentro del análisis de la tabla 7 y las figuras 55 y 56 se tiene que para una distancia de aproximadamente 390 metros las tramas llegaban a su destino de forma exitosa, mientras que en distancias comprendidas entre 410 metros y 420 metros el enlace entre ambas estaciones

se tornaba inestable por lo cual se presentaban pérdidas de paquetes, superados los 430 m el enlace fallaba su totalidad y las tramas no lograban llegar a la estación receptora.

Finalmente, se aprecia que de acuerdo con las distancias obtenidas para los valores máximos de conectividad inalámbrica los módulos XBee cumplen con lo requerido en el escenario de aplicación, dado que de acuerdo al diseño se tienen distancias entre nodos finales y nodo coordinador, entre los 16 m y 32 m, como muestra la figura 10. Este era el resultado que buscaba validar la prueba.

En la figura 58 se aprecia gráficamente los niveles de RSSI de la tabla 7.

Figura 58. Grafica nivel RSSI vs Distancia.



Fuente: Elaboración propia.

Según los datos obtenidos de RSSI se puede deducir que el prototipo puede alcanzar distancias de aproximadamente 400 metros con línea de vista presentando un nivel de RSSI aceptable; -96 dBm. Según la información del fabricante estos dispositivos pueden alcanzar distancia de hasta superiores a 1000 metros bajo condiciones ideales de línea de vista. La inestabilidad del enlace a distancias mayores de 400 metros no permitió medir los niveles de RSSI, se evidenció que el tránsito de personas, la altura de las antenas y los obstáculos tales

como lámparas, decoraciones y demás infraestructura de la zona afecta de forma considerable los niveles de RSSI.

6.2 Resultados de pruebas de funcionamiento del sistema de monitoreo agrícola implementado en el parque biotemático de Megua

La finalidad de esta prueba es determinar si el despliegue del sistema de monitoreo realizado en el parque biotemático de Megua funcionó correctamente y es viable de implementar a nivel tecnológico. Para esto se analizan algunas métricas de desempeño de red, relacionadas a la pérdida de paquetes, niveles de RSSI. Así mismo, se analiza lo concerniente a la información de temperatura y humedad obtenida por cada uno de los nodos finales, con el fin de revisar el comportamiento de estas variables.

6.2.1 Resultados en cuanto a pérdida de paquetes y niveles de RSSI del sistema de monitoreo desplegado.

Una vez que se obtiene la consulta de la base de datos que contiene la información compartida por los nodos finales a través del envío de tramas al nodo coordinador se obtiene la información obtenida en la tabla 9:

Tabla 9
Resumen de pruebas de funcionamiento del sistema de monitoreo desplegado en el parque Biotemático Megua

ID	Tiempo inicio	Tiempo fin	Tr	Te	tf	tr	Pf
013a204 09e2f9d	2022-03-20 11:00:05	2022-03-24 14:06:33	557	619	5942	9,600	62
013a204 09e2fec	2022-03-20 10:47:39	2022-03-23 9:49:53	425	459	4263	9,283	34

013a204	2022-03-20	2022-03-24					
09e2f87	12:21:30	13:01:38	562	604	5801	9,600	42

Nota: Tr: tramas recibidas, Te tramas esperadas, tf tiempo funcionamiento, tr tiempo entre tramas, Pf paquetes fallidos. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la métrica de pérdida de paquetes, se obtuvo una pérdida promedio general de paquetes del 8,7%. Este porcentaje de pérdida debe tender a 0%; según la revisión bibliográfica realizada se encontró que los valores aceptables de pérdida de paquetes tienen un máximo de 5%. Debido a los largos periodos de tiempo de pérdida de enlace que se presentaron en determinadas horas del día, se obtuvieron mayores porcentajes de pérdida de enlace (obsérvese la tabla 9 y la figura 59). Esta condición se puede mejorar elevando la altitud de las antenas.

. En la tabla 10 se puede observar el valor porcentual de pérdidas de paquete por estación transmisora y los niveles medidos con la herramienta range test de X-CTU, adicionalmente se muestra el mayor tiempo de pérdida de enlace entre las motas y el nodo central.

Tabla 10
Análisis de pérdida de paquetes, niveles de RSSI y tiempo de inactividad.

Descripción (ID)	Mayor tiempo de pérdida de enlace (min)	Pérdida de paquetes (%)	RSSI (dBm)
Mota 2 (013a20409e2f9d)	236	10,0%	-79
Mota 3 (013a20409e2fec)	109	7,5%	-68

Mota 1 (013a20409e2f87)	209	7,0%	-59
----------------------------	-----	------	-----

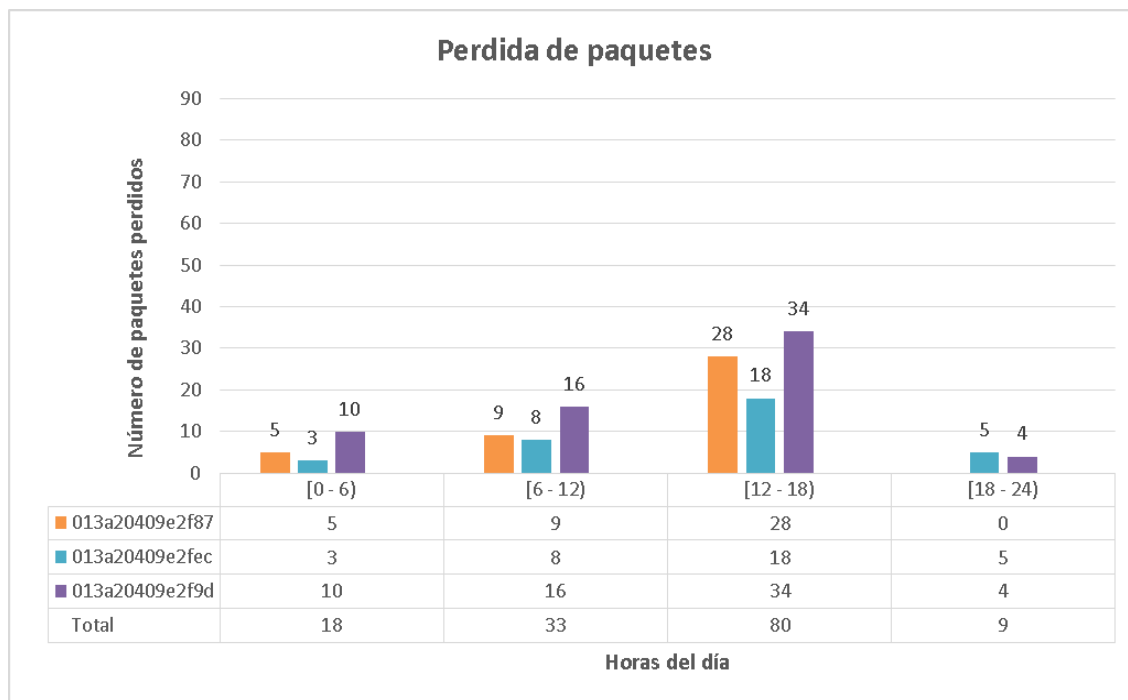
Análisis de pérdida de paquetes, niveles de RSSI y tiempo de inactividad del enlace del sistema de monitoreo desplegado en el parque biotemático de Megua. Fuente: Elaboración propia.

Las posibles causas de la pérdida de paquetes pudieron deberse a obstrucciones del enlace inalámbrico generadas por el tránsito de personas por el lugar, la amplia fauna presente en el lugar, colaboradores del parque en sus recorridos cotidianos, personal de mantenimiento general que adelantaba labores en dicha zona. Esto afectó la propagación de la señal inalámbrica en el escenario de despliegue.

El porcentaje de pérdida de paquetes más alto durante todo el tiempo de funcionamiento estuvo asociado a la mota 2 la cual presentó un 10% de pérdida de paquetes la cual equivale a 62 paquetes perdidos de 619 esperados. El segundo mayor porcentaje de pérdida de paquetes lo obtuvo la mota 3 con 7,5 % seguido de la mota 1 con 7,0%. Para el cálculo de estos valores se tuvo solo en cuenta los datos almacenados en la base de datos que hace parte de la estación receptora por lo que no se descartan errores en inserción de datos en la base de datos.

Un análisis importante de esta métrica es la caracterización de la pérdida de paquetes de acuerdo con las horas de monitoreo. En este caso se pudo determinar que la mayor pérdida de paquetes coincidió con los horarios en los que existe mayor tránsito de personas por el lugar, horarios en los cuales el parque Megua está habilitado para visitas y/o trabajadores. En la figura 58 se muestra una gráfica de paquetes perdidos en intervalos de horas para las tres motas.

Figura 59. Pérdida de paquetes por mota vs horas del día.



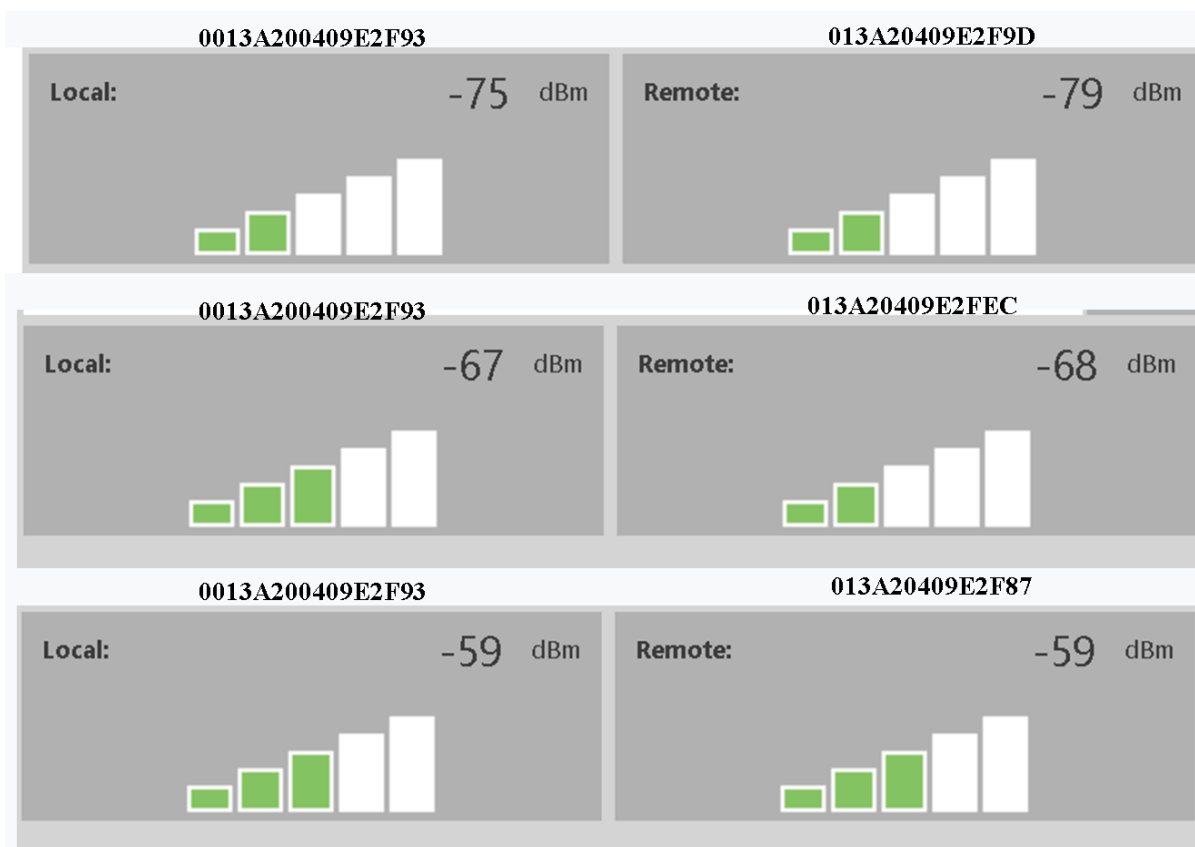
Nota: Formato de 24 horas. Fuente: Elaboración propia.

Acorde a los datos de la figura 59 se puede apreciar que la zona horaria con mayor pérdida de paquetes está comprendida entre las 12 horas y 18 horas, esta franja coincide con los horarios donde los visitantes retornan de los recorridos y se dirigen hacia el comedor del parque por el sendero de la casa central obstaculizando posiblemente la línea de vista, en especial la de la mota del contenedor de compost. En esta mota la antena se encuentra a 1 metro a nivel del suelo; cabe resaltar que este lugar es usado como punto de encuentro.

La franja horaria con menos pérdidas de paquetes (9 paquetes perdidos) corresponde al horario comprendido entre las 18 horas y 24 horas; en este horario la mota instalada en el contenedor de compost no sufrió pérdida de paquetes.

En cuanto a los niveles de RSSI la figura 58 muestra los obtenidos al usar la herramienta X-CTU para cada uno de los nodos finales.

Figura 60. Niveles de RSSI range test X-CTU.



Fuente: Elaboración propia, extraído de X-CTU.

Obsérvese en la figura 58 que los niveles de RSSI para los tres dispositivos finales se encuentran entre en el rango de valores de -59 dBm hasta -79 dBm, la Mota 1 (013A20409E2F87) dispone del valor más óptimo entre los nodos finales; nivel de señal de -59 dBm, esto se debe a que tiene mayor cercanía con el nodo coordinador en comparación con la mota 2 y mota 3.

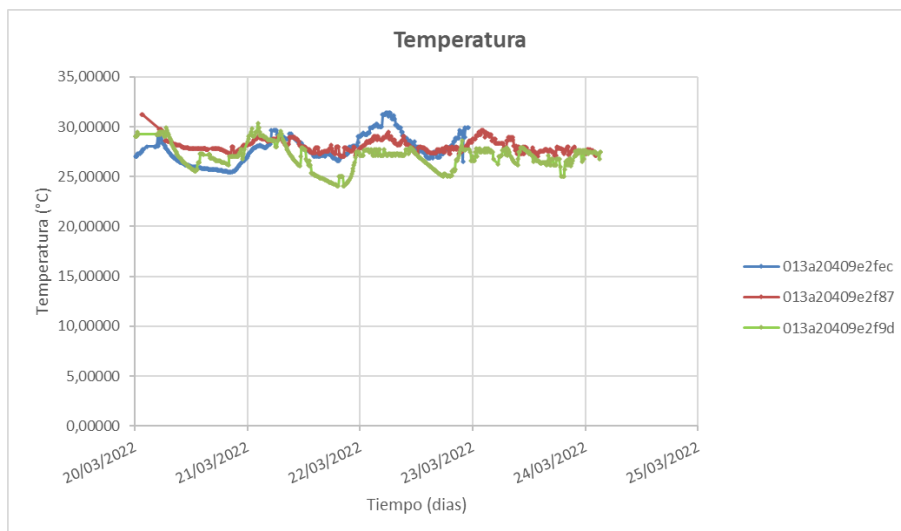
La Mota 2 (013A20409E2F9D) y la Mota 3 (013A20409E2FEC) presentan niveles de señal de -79 dBm y -68 dBm, respectivamente, dichos niveles se encuentran dentro del rango permitido de intensidad de señal. Estos valores pudieron deberse principalmente arborización presente entre la línea de vista de las antenas receptoras y transmisoras, polisombras instalados en los huertos y los troncos secos que sirven de soporte de estos, o bien la alineación de las antenas al momento de la captura de los niveles de RSSI.

Otro aspecto importante por el cual el nivel de RSSI en la mota de compost obtuvo un valor más óptimo se debe a que esta no utiliza cable para extensión de antena como las mota 2 y la mota 3.

6.2.2 Resultado de las mediciones de temperatura y humedad del suelo por parte de los nodos finales del sistema de monitoreo.

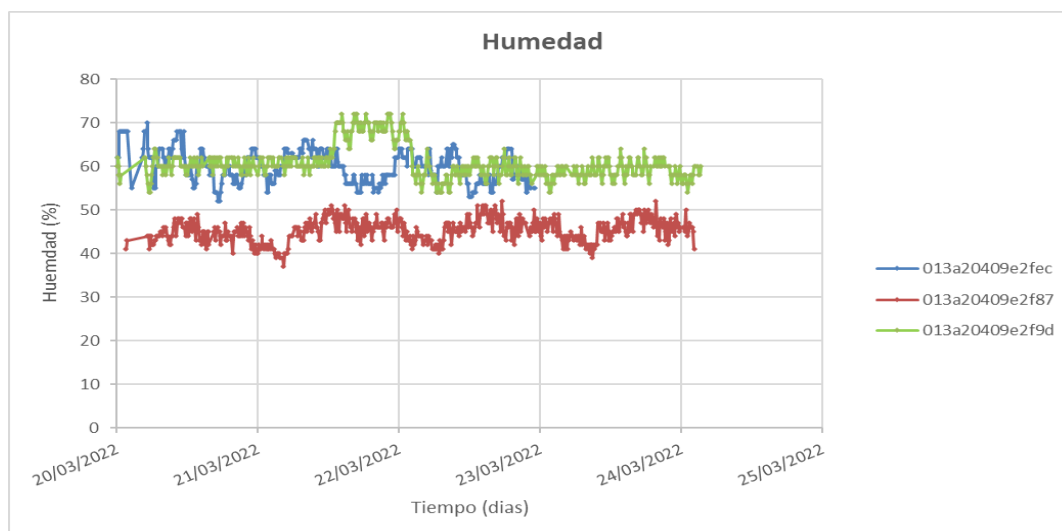
En las figuras 60 y 61 se pueden apreciar los valores de temperatura y humedad por cada una de las motas instaladas. Se debe tener en cuenta que la Mota 2, identificada con el color rojo en las dos figuras indica los valores obtenidos por las variables para el sistema de compost que se tiene en el parque biotemático de Megua.

Figura 61. Grafica de datos de temperatura por Mota.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 62. Grafica de datos de humedad por Mota.



Fuente: Elaboración propia

De la figura 60 se puede observar que la variable temperatura para todos los nodos finales registraron valores comprendidos entre 24 °C y 31,5 °C lo cual es considerado aceptable en los cultivos de hierbabuena y orégano, de igual forma para el sistema de compost esta temperatura es acorde a la fase de misofilia por la cual estaba atravesando el compost al momento de la captura de los datos. Se puede apreciar la mota 1 asociada al contenedor de compost (013a20409e2f87) presenta un comportamiento de temperatura más estable que los nodos finales de hierba buena y orégano.

La variable de humedad registra valores entre 37 % y 72 %, en todos los nodos finales los datos de humedad presentan un comportamiento menos lineal en comparación con los datos de temperatura. Estos valores de humedad pueden comprometer significativamente los cultivos y la actividad microbiana del sistema de compostaje puesto que en ambos limites (superior e inferior) sobrepasan los niveles aceptables.

La tabla 11 muestra un resumen de las medidas estadísticas de las variables de temperatura y humedad obtenidos durante la fase de prueba del prototipo en el escenario del parque biotemático Megua.

Tabla 11
 Medidas estadísticas de datos de temperatura y humedad.

Medida estadística	Mota 3 013a20409e2fec	Mota 1 013a20409e2f87	Mota 2 013a20409e2f9d
Mayor temperatura °C	31,4375	31,1875	30,3125
Menor temperatura °C	25,4375	27,0625	24,0625
Temperatura promedio	27,7635	28,0617	26,9635
Varianza temperatura	2,02684	0,39635	1,51871
Mayor valor humedad %	70	52	72
Menor valor humedad %	52	37	54
Humedad promedio	60	45	61
Varianza humedad	13,8453	6,8815	14,6453

Nota: Resumen de medidas estadísticas de datos de temperatura y humedad realizadas en el parque biotemático

Megua. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los valores de varianza de la tabla 10, la variable de temperatura presentó un comportamiento más lineal en todos los nodos finales en comparación con las varianzas obtenidas para los datos de humedad. Por ejemplo; para el caso de la mota 3 la varianza de los datos de temperatura tiene un valor de 2,02684, mientras que los datos de humedad presentan una varianza de 13,8453 lo que equivale a aproximadamente 7 veces la varianza de los datos de temperatura.

Este comportamiento de dispersión se presentó en las 3 motas; la medida de humedad presenta un valor significativo de dispersión, esto pudo deberse a la calibración y/o sensibilidad del sensor de humedad o a la programación realizada en Arduino, puesto que no se emplearon librerías debido a que se hizo uso del concepto de escalización de señal.

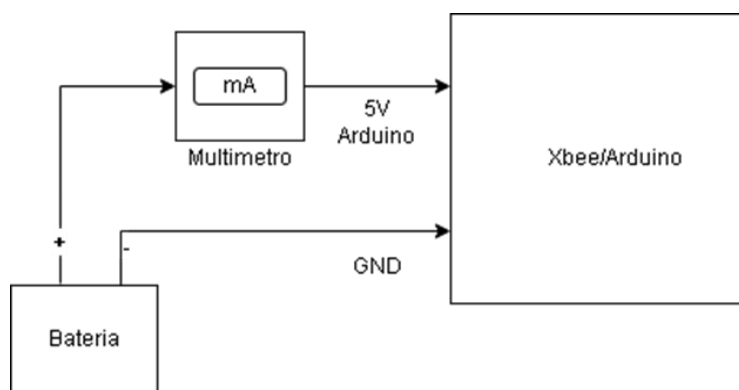
6.2.3 Resultados de las pruebas de autonomía energética de los nodos finales del sistema de monitoreo.

Los resultados de esta prueba se enfocan en determinar la autonomía en cuanto tiempo de funcionamiento de los nodos finales, al ser alimentados por una power bank, descrita en el capítulo anterior.

De acuerdo con las mediciones realizadas para el consumo de energía de los nodos finales, se tuvo en promedio un tiempo de funcionamiento de 88,95 horas lo que equivale a un poco más de 3 días con un consumo aproximado de 80 mA en periodo de transmisión de datos y de 50 mA en periodo de sueño del módulo XBee.

Para realizar la medición de los valores del consumo de energía se emplearon los pines 5V y GND del Arduino con la configuración presentada en la Figura 62.

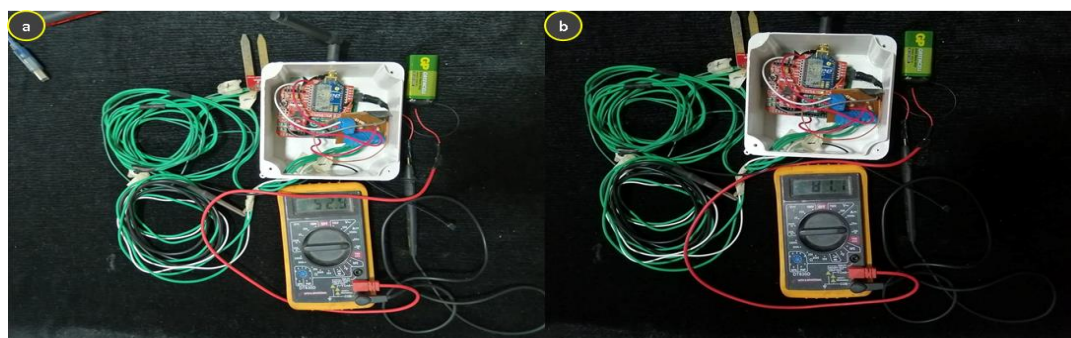
Figura 63. Configuración usada para obtener los valores de consumo de energía en los nodos finales.



Fuente: Elaboración propia.

El montaje real de esta configuración es mostrado en la Figura 63, en donde se aprecia el consumo de energía en estado de reposo y el generado en momentos de transmisión.

Figura 64. Consumo de energía medido del prototipo.



Nota: Consumo de energía medido prototipo en reposo, b) Consumo de energía medido prototipo en periodo de transmisión Fuente: Elaboración propia.

El cálculo teórico de estos valores, se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\hat{C} = \frac{C_s \sum_{i=1}^{t_s} i + C_{tx} \sum_{k=1}^{t_{tx}} k}{n} \quad (2)$$

\hat{C} = Consumo promedio por ciclo

C_{tx} = Consumo en transmisión

C_s = consumo en suspensión

t_s = tiempo de suspensión

t_{tx} = tiempo de transmisión

n = número de muestras

Siendo,

$$C_{tx} = 80 \text{ mAh} \quad C_s = 50 \text{ mAh} \quad t_s = 600 \text{ s} \quad t_{tx} = 3 \text{ s} \quad n = 603$$

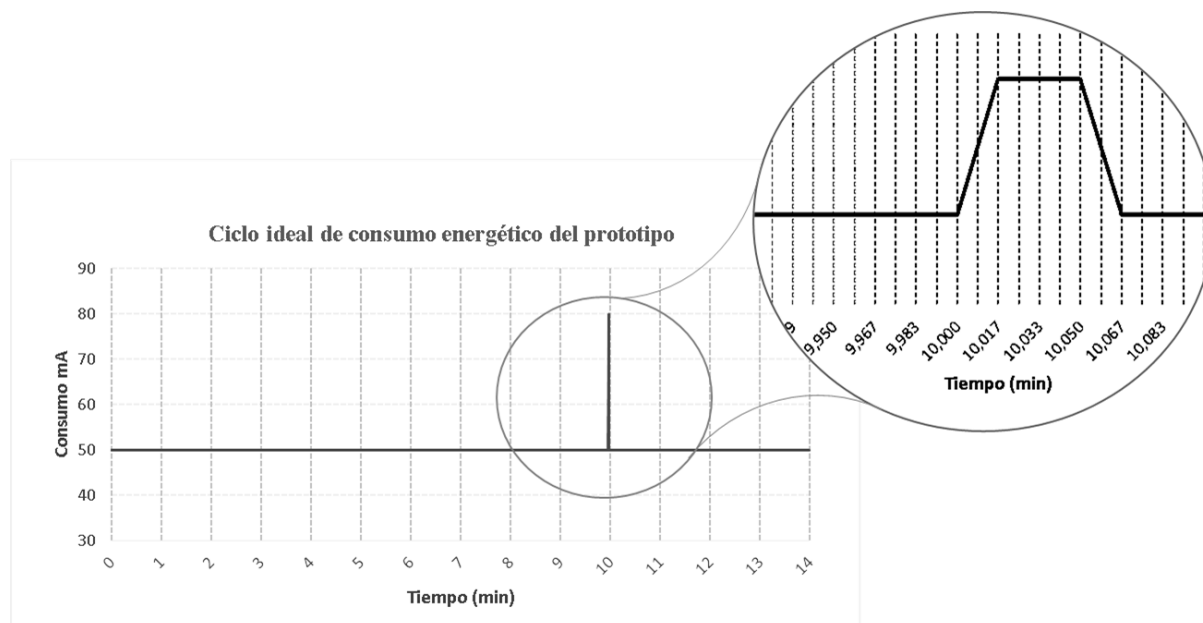
Se obtiene,

$$\hat{C} = \frac{C_s \sum_{i=1}^{600} i + C_f \sum_{k=1}^3 k}{603}$$

$$\hat{C} \approx 50,15 \text{ mAh}$$

La figura 64 muestra el ciclo ideal de funcionamiento de los nodos finales; conformado por el periodo de suspensión y el periodo de transmisión del módulo XBee.

Figura 65. Ciclo de consumo energético de prototipo de sensores inalámbricos.



Fuente: Elaboración propia.

De la figura 64 se puede deducir que el dispositivo en periodo de reposo presenta un consumo de energía de 50 mA el cual se mantiene durante un lazo de 10 minutos, pasado este tiempo, el módulo XBee pasa de estado de suspensión a estado de transmisión lo cual eleva el consumo de energía a 80 mA manteniéndose este valor por un periodo de aproximadamente 5 segundos.

Esta figura evidencia el ahorro de consumo de energía que se obtiene mediante la suspensión del módulo XBee. En el caso hipotético donde el módulo XBee se mantuviera siempre activo, el consumo de energía promedio del prototipo presentaría teóricamente un valor de 80 mAh, una diferencia de 29,85 mAh con respecto al valor del consumo de energía del prototipo calculado en este capítulo.

7 Conclusiones

Basado en los resultados de las pruebas realizadas en el malecón del río Barranquilla y parque biotemático Megua se puede decir que el dispositivo presenta un desempeño eficiente debido a los niveles de RSSI y alcance máximo obtenido. Adicionalmente, el consumo energético por motas es relativamente bajo debido a las funcionalidades de suspensión de la

XBee, se pudo obtener un consumo energético menor pero debido a las especificaciones técnicas del dispositivo seleccionado para el almacenamiento de carga eléctrica se omitió la funcionalidad de suspensión del Arduino.

La distancia máxima obtenida con línea de vista hace óptimo al prototipo para aplicaciones en zonas rurales; fincas e invernaderos. Las ventajas que se obtienen con la red desplegada permiten obtener la información de todas las motas de la red en un solo punto (condición que impone también el protocolo ZigBee) sin tener que desplazarse hasta la ubicación física de las motas; brindando la opción de conectarse directamente a la Raspberry Pi con periféricos o bien accediendo desde un dispositivo conectado a la misma red de área local de la Raspberry Pi.

La base de datos permite llevar un histórico de las variables de temperatura y humedad para la toma de decisiones y análisis estadístico de las variables captadas en los cultivos. Los sensores de temperatura instalados en el sistema de compost brindaron una opción de mejora a la forma tradicional empleada en el parque Biotemático Megua para la validación de temperatura que provocan las bacterias en el proceso de descomposición de la materia orgánica.

El modo de funcionamiento elegido para las XBee's (API) junto a la librería desarrollada para Arduino proporciona la opción de dirigir la información a cualquier otro nodo de la red mediante código Arduino sin necesidad de configurar el parámetro de dirección destino del módulo XBee desde el software X-CTU.

La plataforma Arduino UNO empleada permite diversas funcionalidades adicionales a las consideradas en este proyecto, se pueden añadir más sensores para la medición de otras variables que se consideren necesarias, adicionalmente como mejora se pueden implementar códigos y módulos para ejercer control de variables de proceso y/o sistemas de alerta.

Es aconsejable para un mejor rendimiento del prototipo ubicar a una mayor altura las antenas transmisoras y receptora para así evitar interferencias en la línea de vista ocasionadas por el paso de personas. Cabe resaltar que el conector RPSMA incorporado en los módulos XBee permite la conexión de cables de extensión, esto es ideal para la ubicación y montaje de los equipos.

Como futuras mejoras se proponen:

1. Suministro de energía basado en paneles solares con baterías de litio.
2. Acceso remoto a la base de datos
3. Respaldo en la nube de la base de datos
4. Mejora visual en interface web; Consulta por nombre de cultivo en lugar del ID del dispositivo, aplicación de filtros para búsqueda de datos y generación de históricos.
5. Implementación de alarmas basado en los rangos críticos de valores de temperatura y humedad de los cultivos y sistema de compostaje.
6. Integrar y distribuir más sensores para alcanzar a cubrir un área más amplia de la zona donde se realizan las mediciones, aumentando de esta forma la confiabilidad de los datos de temperatura y humedad.

8 Referencias

- AGEXPORT (Marzo de 2021). Orégano, *Origanum vulgare*. Obtenido de <https://www.export.com.gt/documentos/guia-de-cultivos/guia-de-cultivo-de-oregano.pdf>
- AGROSAVIA. (29 de Abril de 2021). Atlántico y Magdalena producirán semilla de calidad de fríjol guandul. Colombia. Obtenido de <https://www.agrosavia.co/noticias/atlantico-y-magdalena-produciran-semilla-de-calidad-de-frijol-guandul-a-traves-del-plan-nacional-semilla-de-agrosavia>
- Alcaldía de Barranquilla. (6 de agosto de 2021). Huertas caseras, estrategia para la seguridad alimentaria y cuidar el medioambiente. Barranquilla, Atlántico, Colombia. Obtenido de <https://www.barranquilla.gov.co/mi-barranquilla/huertas-caseras-estrategia-seguridad-alimentaria-cuidar-medioambiente>
- Alonso, C. I. (2020). Aceites esenciales de *Mentha piperita*, *Mentha spicata* y *Mentha suaveolens* para el control de hongos patógenos y de postcosecha: composición química y actividad antifúngica.
- Ambientum, A. P. (2021, julio 29). Huertos urbanos: reducir la huella de carbono alimentario. Ambientum Portal Lider Medioambiente; AMBIENTUM. <https://www.ambientum.com/ambientum/medio-natural/huertos-urbanos-reducir-la-huella-de-carbono-alimentario.asp>
- Arduino. (2014). ¿Qué es Arduino? Obtenido de <https://arduino.cl/que-es-arduino/>
- Bhanarkar, M. K., & Korake, P. M. (2016). Soil salinity and moisture measurement system for grapes field by wireless sensor network. *Cogent Engineering*, 3(1) doi:10.1080/23311916.2016.1164021

Caicedo Ortiz, J. (Enero del 2017). Sistema de monitorización de variables agrícolas basado en la tecnología WSN para el cultivo de la yuca. Universidad de la costa - CUC.

Atlántico, Colombia.

Catini, A., Papale, L., Capuano, R., Pasqualetti, V., Di Giuseppe, D., Brizzolara, S., . . . Di Natale, C. (2019). Development of a sensor node for remote monitoring of plants.

Sensors (Switzerland), 19(22) doi:10.3390/s19224865

Codeluppi, G., Cilfone, A., Davoli, L., & Ferrari, G. (2020). LoraFarM: A LoRaWAN-based smart farming modular IoT architecture. Sensors (Switzerland), 20(7)

doi:10.3390/s20072028

Daboín, A., Verde, G., Torrealba, F., Gharbi, T. (2012). MEDICIÓN DE RSSI, LQI Y

PRUEBAS DE COBERTURA PARA DIFERENTES ESCENARIOS DE

PROPAGACIÓN EN UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES. Obtenido de

<http://www.revencyt.ula.ve/storage/repo/ArchivoDocumento/redip/v2n1/art04.pdf>

Delgans, L. H. (15 de diciembre de 2021). La agricultura urbana ya tiene cosechas en

Barranquilla. Barranquilla: El tiempo. Obtenido de

<https://www.eltiempo.com/colombia/barranquilla/asi-se-benefician-120-familias-de-barranquilla-con-las-huertas-caseras-639002>

Digi International. (16 de Marzo de 2022a). ZigBee RF Modules XBEE2, XBEEPRO2, PRO

S2B. *User Guide*. Obtenido de <https://www.digi.com/>

Digi International. (19 de Mayo de 2017). Configuration and Test Utility Software. *User*

Guide. Obtenido de <https://www.digi.com/>

Digi International. (28 de 03 de 2022b). API frame structure. Obtenido de

<https://www.digi.com/>

Digi international. (29 de noviembre de 2019). ¿Qué es XBee? XBee.cl - Comunicación

Inalámbrica para Tus Proyectos. <https://XBee.cl/que-es-XBee/>

El Herald. (2 de noviembre de 2014). 720 familias del Atlántico tendrán huertas caseras. El

Heraldo. <https://www.elheraldo.co/local/720-familias-del-atlantico-tendran-huertas-caseras-172392>

Galvis, D. J. (9 de noviembre de 2020). La tecnología: una aliada del agro colombiano.

Semana Rural. Obtenido de <https://semanarural.com/web/articulo/la-tecnologia-una-aliada-del-agro-colombiano/1662>

Gobernación del Atlántico. (2 de Noviembre de 2021). "Con el Incentivo de Capitalización

Rural Departamental estamos logrando financiación para los proyectos de nuestros agricultores": Elsa Noguera. Obtenido de

<https://www.atlantico.gov.co/index.php/noticias/prensa-desarrollo/18132-con-el-incentivo-de-capitalizacion-rural-departamental-estamos-logrando-financiacion-para-los-proyectos-de-nuestros-agricultores-elsa-noguera>

Gobernación del Atlántico. (6 de agosto de 2021). Huertas caseras, estrategia para la seguridad alimentaria y cuidar el medioambiente. Alcaldía de Barranquilla.

<https://www.barranquilla.gov.co/mi-barranquilla/huertas-caseras-estrategia-seguridad-alimentaria-cuidar-medioambiente>

Gobernación del Valle del Cauca (10 de octubre de 2006). Guía Agronómica Cultivos

Representativos del Departamento del Valle del Cauca .Obtenido de

<https://www.valledelcauca.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=viewpdf&id=1103>

- Hwang, J., Shin, C., & Yoe, H. (2010). A wireless sensor network-based ubiquitous paprika growth management system. *Sensors (Switzerland)*, 10(12), 11566-11589.
doi:10.3390/s101211566
- Jawad, H. M., Nordin, R., Gharghan, S. K., Jawad, A. M., Ismail, M., & Abu-Alshaeer, M. J. (2018). Power reduction with sleep/wake on redundant data (SWORD) in a wireless sensor network for energy-efficient precision agriculture. *Sensors (Switzerland)*, 18(10) doi:10.3390/s18103450
- Kombo, O. H., Kumaran, S., & Bovim, A. (2021). Design and application of a low-cost, low-power, LoRa-GSM, IoT enabled system for monitoring of groundwater resources with energy harvesting integration. *IEEE Access*, 9, 128417-128433.
doi:10.1109/ACCESS.2021.3112519
- Korošak, Ž., Suhadolnik, N., & Pleteršek, A. (2019). The implementation of a low power environmental monitoring and soil moisture measurement system based on UHF RFID. *Sensors (Switzerland)*, 19(24) doi:10.3390/s19245527
- Lagarto Parra, A., Tillán Capó, J., & Cabrera González, Y. (1997). Toxicidad aguda oral del extracto fluido de *Mentha spicata* L. (hierbabuena). *Revista cubana de plantas medicinales*, 2(2), 6–8.
- Lechuga Cardozo, J. I., Antúnez, C., María, A., Meñaca Guerrero, I., Martínez Caraballo, H. R., Olivero Vega, E., & García Guilianny, J. E. (2018). Análisis del comportamiento de las exportaciones del Departamento del Atlántico (Colombia) entre 2012–2016.
- Lopez Iturri, P., Celaya Echarri, M., Azpilicueta, L., Aguirre, E., Astrain, J. J., Villadangos, J., & Falcone, F. (2018). Integration of autonomous wireless sensor networks in academic school gardens. *Sensors (Switzerland)*, 18(11) doi:10.3390/s18113621

- Lozano, C., Loarca-Piña, G., Lecona-Uribe, S., & González de Mejía, E. (2004). El orégano: propiedades, composición y actividad biológica de sus componentes. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 54(1), 100–111.
- Mariaca, R. (2003). *Prácticas, decisiones y creencias agrícolas mágico-religiosas presentes en el sureste de México*. Mexico: El Colegio de la Frontera Sur.
- Martín, J., & Ruiz, D. (2007). Informe Técnico: Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4).
- Martínez Mera, E., Castañeda Valbuena, D., Crissien Borrero, T. J., Torres Bejarano, F., & Torregroza Espinosa, A. (2018). *El distrito de riego Repelón: diagnóstico y evaluación ambiental*. Barranquilla, Atlántico, Colombia: Educosta S.A.S.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (Septiembre de 2016). Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sector Agropecuario Colombiano. Obtenido de <https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/noticias/pectia-2017-actualizado.pdf>
- Morante, R. (2000). *El universo mesoamericano. Conceptos integradores*. Museo de Antropología, Universidad Veracruzana. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/desacatos/n5/n5a3.pdf>
- Osorio, A. (2019). Mitigación de pérdida de paquetes en una red LoRaWAN para aplicaciones sin línea de vista. Universidad del Norte. Obtenido de <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/9518/140295.pdf>
- Papacetzzi, F. (2003). *Wireless Personal Area Network (WPAN) & Home Networking*.
- Phpmyadmin. (2021). Bringing MySQL to the web. <https://www.phpmyadmin.net>
- Ramos Ruiz, J. L., Polo Otero, J. L., Arrieta Barcasnegras, A. A., & Vélez Durán, L. F. (2018). Determinantes del grado de apertura de las pymes agroindustriales: una

aplicación para el departamento del Atlántico. *Revista Desarrollo y Sociedad*, (80), 189-229.

Revista Semana. (4 de Julio de 2021). Atlántico puso el campo a toda marcha para acelerar la recuperación de su economía. Obtenido de <https://www.semana.com/mejor-colombia/articulo/atlantico-puso-el-campo-a-toda-marca-para-acelerar-la-recuperacion-de-su-economia/202100/>

Román P., Martínez M., Pantoja A. (26 de noviembre de 2013). Manual de compostaje del agricultor. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Obtenido de <https://www.fao.org/3/i3388s/I3388S.pdf>

Salaverry, E. (8 de mayo de 2018). El modelo de producción Inca en la agricultura de la Quebrada de Humahuaca: elaboración y propuesta de un material educativo interdisciplinario.

Shallahuddin, A. A., Kadir, M. F. A., Mohamed, M. A., Abidin, A. F. A., & Hamid, N. A. (2022). An enhanced adaptive duty cycle scheme for energy efficiency and QoS awareness in wireless sensor networks. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 9(5), 127-134. doi:10.21833/ijaas.2022.05.016

Stalling, W. (2000). *Comunicaciones Y Redes De Computadores* (6.a ed.). Pearson Educación.

Trendov, N., Varas, S., & Zeng, M. (6 de junio de 2019). *Tecnologías digitales en la agricultura y las zonas rurales*. ONU.

Villanueva Mejía, D. (2018). *Plan Nacional de Desarrollo: Estudio de Bioeconomía: Anexo 1 – Análisis del sector agrícola y pecuario*. Disponible en “<https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes->

tematicos/Bioeconomia/Informe%202/ANEXO%201_An%C3%A1lisis%20sector%20agr%C3%ADcola.pdf”.

Visconti, P., de Fazio, R., Primiceri, P., Cafagna, D., Strazzella, S., & Giannoccaro, N. I. (2020). A solar-powered fertigation system based on low-cost wireless sensor network remotely controlled by farmer for irrigation cycles and crops growth optimization. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 66(1), 59-68. doi:10.24425/ijet.2019.130266

Zervopoulos, A., Tsipis, A., Alvanou, A. G., Bezas, K., Papamichail, A., Vergis, S., Oikonomou, K. (2020). Wireless sensor network synchronization for precision agriculture applications. *Agriculture (Switzerland)*, 10(3) doi:10.3390/agriculture10030089

Zhou, Y., Xie, Y., & Shao, L. (2016). Simulation of the core technology of a greenhouse-monitoring system based on a wireless sensor network. *International Journal of Online Engineering*, 12(5), 43-47. doi:10.3991/ijoe.v12i05.5735

Zuñiga, A. G. (3 de Julio de 2021). Tras cuatro meses de trabajo, Distrito de Riego de Repelón entró a operar. *El Heraldo*. Obtenido de <https://www.elheraldo.co/atlantico/tras-cuatro-meses-de-trabajo-distrito-de-riego-de-repelon-entro-operar-830579>

9 Anexos

Anexo 1

Librería API para Arduino desarrollada en C

Archivo .cpp

```

#include "Arduino.h"
#include "xbeeApi.h"
#include <string.h>

// #include <string.h>
// #include <iostream>
xbeeApi::xbeeApi(String bcast, String bradius, String options)
{
    _bcast = bcast; _bradius = bradius; _options = options;
}
void xbeeApi::senTramaApi(String _fid, String _destino, String _mensaje)
{
    _trama = ""; _Cheksum = ""; _trama = "";
    // CONVERTIR MENSAJE to ASCII CODE
    MensajeAscii = "";

    for (int i = 0; i < _mensaje.length(); i++){

        MensajeAscii += String(_mensaje[i] - 0, HEX);
    }
    // Serial.println(MensajeAscii);

    // FIN DE CONVERSIÓN

    // FORMANDO PARTE INTERNA DE LA TRAMA

    _trama = "10" + _fid + _destino + _bcast + _bradius + _options + MensajeAscii;
    // Serial.print(_trama);
    // FIN DE BLOQUE

    // CALCULO DE CHEKSUM
    int auxint = 0; int k = 16; int j = 0;
    while (j <= _trama.length()){

        auxint += convertHexToInt(_trama.substring(j, j + 1))*k;
        if (k == 16){
            k = 1;
        }
        else if (k == 1){
            k = 16;
        }

        j++;
    }
}

```

```

//Serial.print(auxint);

_Cheksum = String(auxint, HEX); //convertir entero decimal a String Hex
//Serial.println(_Cheksum);
int t = _Cheksum.length(); //tamaño de trama

auxint = 16*convertHexToInt(_Cheksum.substring(t - 2, t-1)) +
convertHexToInt(_Cheksum.substring(t - 1, t));///bits menos significativos
auxint = 255 - auxint;
_Cheksum = String(auxint, HEX); //Cheksum

//Completar Cheksum
if (_Cheksum.length() < 2){
    _Cheksum = "0"+_Cheksum;
}
//

//FIN DE CALCULO DE CHEKSUM

//TAMAÑO DE TRAMA
_Htamano = String((_trama.length()+1)/2,HEX); //Obtiene el tamaño de bytes de trama

//CEROS PARA COMPLETAR BYTES ASIGNADO AL TAMAÑO DE TRAMA

int tm = _Htamano.length();
//Serial.println(tm);
if (tm < 4){

    for (int i = tm; i < 4; i++){
        _Htamano = "0" + _Htamano;
    }
}

//FIN DE BLOQUE

//CREACION DE TRAMA

_trama = "7E" + _Htamano + _trama + _Cheksum;

//FIN DE BLOQUE

//ENVIO DE TRAMA

k = 16; int aux1 = 0; int aux2 = 0; auxint = 0;

for (int i = 2; i <= _trama.length();i=i+2){
    auxint=convertHexToInt((String)_trama[i - 2]) * 16 +
convertHexToInt((String)_trama[i - 1]);
    //prueba = _trama.substring(i - 2) + _trama.substring(i - 1);
    //Serial.print(prueba);

    Serial.write(auxint);
    //delay(20);
}
Serial.print('\n');

```

```

        //FIN
    }

    String xbeeApi::convertLectSensor(int _inputAnlg)
    {
        //outputValue = 0; val = ""; Sensor = 0;

        Sensor = analogRead(_inputAnlg); //Leer pin analogo

        outputValue = map(Sensor, 0, 1023, 0, 255); //Escaliza de 0 a 255 lo leido por el sensor

        val = String(outputValue, 6); //Devuelve valor leido en un String

        return val;
    }

    int xbeeApi::convertHexToInt(String _str2){
        if (_str2 == "A" || _str2 == "a"){ return 10; }
        else if (_str2 == "B" || _str2 == "b"){ return 11; }
        else if (_str2 == "C" || _str2 == "c"){ return 12; }
        else if (_str2 == "D" || _str2 == "d"){ return 13; }
        else if (_str2 == "E" || _str2 == "e"){ return 14; }
        else if (_str2 == "F" || _str2 == "f"){ return 15; }
        else{ return atoi(_str2.c_str()); }
    }
}

```

Archivo .h

```

#ifndef xbeeApi_h
#define xbeeApi_h
#include "Arduino.h"

#include <iostream>
class xbeeApi
{
public:
    xbeeApi(String bcast, String bradius, String options);//, char destino, char broadcast, char
bro_radius, char options, char mensaje);
    //void creartrama();
    void senTramaApi(String _fid, String _destino, String _mensaje);
    int convertHexToInt(String _str2);
    //void envio();
    String convertLectSensor(int _inputAnlg);

private:
    String _mensaje, _fid, _destino, _bcast, _bradius, _options, _Cheksum;
    String _trama, _Htamano, MensajeAscii, val;
    int Sensor, outputValue;
    const char ETX = '\x0A';
};
#endif

```

Anexo 2

Código Arduino

```

#include <avr/sleep.h>
#include <avr/power.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <xbeeApi.h> //Libreria Xbee-Modo Api

//Parametros generales para la creación de la Trama API
String frameid = "01";
String destino = "0013A200409E2F93" ;
String broadcast = "FFFE";
String bro_radius = "00";
String options = "00";
String mensaje;
// Variables para representación de señales provenientes de los sensores.
int humedad, pin_A0;
float temperatura = 0;
//-----

xbeeApi xbeeApi(broadcast, bro_radius, options);
OneWire ourWire(13); //Se establece el pin 13 como bus OneWire
DallasTemperature sensors(&ourWire); //Se declara una variable u objeto para el sensor

int pin2 = 2;

void setup() {

  Serial.begin(9600);
  sensors.begin();
  pinMode(A0, INPUT);
  pinMode(pin2, INPUT);

}

bool aux=true;
void loop() {

if (digitalRead(pin2)==HIGH && aux==true){ //Funcionando, señal proveniente de la XBee
  Serial.flush();
  enviar_datos();

}
if (digitalRead(pin2)==LOW && aux==false){
  aux=true;
}
}

void enviar_datos(){
  sensors.requestTemperatures(); //Lectura de temperatura

```

```

    temperatura= sensors.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C
    pin_A0=analogRead(A0); //Sensor humedad
    if(pin_A0<0){pin_A0=0;}else if(pin_A0>1023){pin_A0=1023;}
    humedad = map(pin_A0,0,1023,0,100);
    mensaje="t"+String(temperatura,6)+"h"+humedad;
    xbeeApi.sendTramaApi(frameid,destino,mensaje);
    aux=false;
}

```

Anexo 3

Código Python interpretación de tramas y cargue en base de datos

```

import serial
import time
import subprocess
import mysql.connector

#subprocess.call(["php", "BD_mediciones.php"])

serialPort = serial.Serial(
    port='/dev/ttyUSB0', baudrate=9600, bytesize=8, timeout=2, stopbits=serial.STOPBITS_ONE
)
i=0
k=0

ID=""
temperatura=""
humedad=""
trama=""
mediciones=""

def convert(s):
    _str=""
    for i in range(len(s)):
        _str=_str+str(hex(s[i]))
        _str=_str.replace("0x", "")
    return (_str)

def convert_2(s):
    _str=""
    _str2=""
    for i in range(len(s)):
        _str=_str+str(chr(s[i]))
        _str=_str.replace("0x", "")
    return (_str)

while 1:

    if serialPort.in_waiting > 0:
        #trama=serialPort.readline()
        trama=serialPort.read(32)

        if 126 in trama: #126 es el inicio de trama (todas las tramas comienzan por 7E)
            indextrama=len(trama)-1
            mediciones=convert_2(trama[15:indextrama])

```



```

ID=convert(trama[4:12])
aux=mediciones.find("h")
temperatura=mediciones[1:aux]
humedad=mediciones[aux+1:indextrama]

try:
    print("ID: "+ID)
    print("Temperatura: "+temperatura)
    print("Humedad: "+humedad)
    print(trama)
    mydb = mysql.connector.connect(
        host="localhost",
        user="usertesis",
        password="140296",
        database="BD_mediciones")

    mycursor = mydb.cursor()

    sql = "INSERT INTO `Valores` (`ID`, `Tiempo`, `Temperatura`, `Humedad`) VALUES (%s, %s,
%s, %s);"
    val = (ID, time.localtime(), temperatura, humedad)
    mycursor.execute(sql, val)

    mydb.commit()

    #print(mediciones) #se debe separar la temperatura de la humedad
    #t-127.000000h  NAN' / t-127.000000 temperatura (comienza con t)
    #sigue una 'h' que indica humedad (Se tiene NAN porque por defector es
    #Mensaje de error

except:
    pass

```

Anexo 4

Código html para solicitud de consulta de datos de dispositivo

```

<div style="background-color: #588c7e; width:200px; text-align: center; text:bold">
<form action="pag1.php" method="post">
<p style="font-weight: 750">Ip_d: <input type="text" name="Ip_dispositivo"></p>
<p><input type="submit" value="Enviar"></p>
<p style="font-weight: 750">*Ingrese la dirección del dispositivo a consultar</p>
</form>
</div>

```

Anexo 5

Código php consulta en base datos y presentación de datos

```

<?php

$dbhost = "localhost";
$dbuser = "usertesis";
$dbpass = "140296";

```

```
$dbname = "BD_mediciones";
```

```
$con = mysqli_connect($dbhost, $dbuser, $dbpass, $dbname);
```

```
if (!$con)
{
    die('No se logró conexión con Base de datos: ' . mysql_error());
}
```

```
$_ip=$_POST['Ip_dispositivo'];
```

```
$query = "SELECT * FROM `Valores` WHERE `ID`='$_ip' ORDER BY Tiempo DESC LIMIT 20";
```

```
$result = mysqli_query($con, $query);
```

```
if ($result->num_rows > 0) {
```

```
    echo "<html>
        <header>
            <h1>MEDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD</h1>
        </header>
        <body>
            Id dispositivo: $_ip <hr>
        </body>
        <style>
            hr{
                color: #588c7e;
                background-color: #588c7e;
                margin-left: 0%;
                margin-right: 55%;
            }
            h1{
                text-align: center;
                width: 45%;
                color: #FFFFFF;
                font-weight: normal;
                font-size: 25px;
                text-transform: uppercase;
            }
            h1:nth-child(1) {background-color: #588c7e}

            table {
                border-collapse: collapse;
                border-width: 1px;
                border-color: #729ea5;
                font-family: monospace;
                width: 45%;
                color: #588c7e;
                font-size: 15px;
```

```

text-align: center;
}
th{
background-color: #588c7e;
color: white;
border-width: 1px;
border-color: #729ea5;
}

td {font-size:12px;border-width: 1px;padding: 8px;border-style: solid;border-color: #729ea5;}

tr:nth-child(even) {background-color: #f2f2f2}
tr:hover {background-color:#fff99;}
}
</style>
<title>Tabla de mediciones</title>
<body>
<table>
<tr>
<th>Fecha y hora</th>
<th>Temperatura</th>
<th>Humedad</th>
</tr>";

while($row = $result->fetch_assoc()) {
echo "<tr><td>" . $row["Tiempo"]. "</td><td>" . $row["Temperatura"]. "</td><td>" .
$row["Humedad"]."</td></tr>";
}
echo "</table></body></html>";
echo "Ultimos 20 registros";
} else {
echo "0 Resultados encontrados, valide el id del dispositivo";
}
mysqli_close($con);

```

Anexo 6

Esquemático circuito para motas

