

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Sistema Integrado de Monitoreo Forestal mediante Red de Sensores
Inalámbricos

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Telemática

Presentado por:

Michael Javier Cedeño Izquierdo

Pedro Tyrone Pulecio Villalva

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

DEDICATORIA

Michael Cedeño Izquierdo

A mi abuela, cuya fortaleza, amor incondicional e inagotable inspiración fueron el motor que me impulsó a alcanzar esta meta. A mis compañeros de la universidad, por su invaluable colaboración y apoyo constante. Y al profesor Bolívar Flores, por su dedicación y por encender en mí la pasión por la ciencia que hoy se ve reflejada en este trabajo.

Pedro Pulecio Villalva

A quienes han sido mi mayor impulso en este camino: mi familia, por su fe inquebrantable en mí; mis amigos, por su compañía y aliento; y a todos aquellos cuya confianza y apoyo me motivaron a llegar hasta aquí.

AGRADECIMIENTOS

*Michael Cedeño Izquierdo & Pedro
Pulecio Villalva*

Agradecemos profundamente al Ing. Ignacio Marin y al ing. Christopher Vaccaro por su valioso apoyo y dedicación a lo largo de este proyecto. Su constante guía y compromiso han sido fundamentales para alcanzar nuestras metas, especialmente durante las etapas más desafiantes.

DECLARACIÓN EXPRESA

Nosotros, Michael Javier Cedeño Izquierdo y Pedro Tyrone Pulecio Villalva acordamos y reconocemos que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 14 de Febrero del 2025.

Michael Javier Cedeño Izquierdo

Pedro Tyrone Pulecio Villalva

EVALUADORES

Ignacio Marín García
PROFESOR DE LA MATERIA

Christopher Vaccaro
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Este proyecto presenta un sistema autónomo de vigilancia forestal que integra una red inalámbrica de sensores de bajo consumo, una pasarela central con reconocimiento de audio y un dron para la transmisión de datos. El sistema mide parámetros ambientales como la temperatura, la humedad y las precipitaciones, al tiempo que capta datos acústicos para vigilar la biodiversidad. Las estructuras de datos optimizadas y las tecnologías de eficiencia energética amplían la autonomía operativa.

La validación demostró la robustez del sistema, que permite la recogida de datos en tiempo real y la detección precoz de cambios ecológicos como incendios y cambios en la biodiversidad. Esta solución escalable favorece la conservación y la gestión sostenible de los bosques combinando sensores inalámbricos, drones y vigilancia acústica.

Palabras Clave: Monitoreo Forestal, Red de Sensores Inalámbricos, Dron, Monitoreo Acústico

ABSTRACT

This project presents an autonomous forest monitoring system integrating a low-power wireless sensor network, a central gateway with audio recognition, and a drone for data transmission. The system measures environmental parameters like temperature, humidity, and rainfall while capturing acoustic data to monitor biodiversity. Optimized data structures and energy-efficient technologies extend operational autonomy.

Validation demonstrated the system's robustness, enabling real-time data collection and early detection of ecological changes such as fires and biodiversity shifts. This scalable solution supports forest conservation and sustainable management by combining wireless sensors, drones, and acoustic monitoring.

Keywords: Forest Monitoring, Wireless Sensor Network, Drone, Acoustic Monitoring

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	iii
ABREVIATURAS	vii
SIMBOLOGÍA	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Alcance	2
1.3 Limitantes	3
1.4 Estado del Arte	4
1.5 Marco Teórico	7
2 MATERIALES, DISEÑO Y VALIDACIÓN	11
2.1 Materiales	11
2.2 Diseño de la solución	12
2.3 Pruebas de Validación	15
3 RESULTADOS Y ANÁLISIS	21
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	29
4.1 Conclusiones	29
4.2 Recomendaciones	30
BIBLIOGRAFÍA	33

APÉNDICES

35

A Plan de Precios 37

ABREVIATURAS

API	Interfaz de Programación de Aplicaciones
ARCOTEL	Agencia Nacional de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (Ecuador)
AT	Comandos de control para dispositivos modulares
EEPROM	Memoria de solo lectura programable y borrable eléctricamente
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GPIO	Entrada/salida de propósito general (General Purpose Input/Output)
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IDE	Entorno de Desarrollo Integrado (Integrated Development Environment)
IPxx	Grado de Protección IP (Ingress Protection)
IoT	Internet de las Cosas
JSON	JavaScript Object Notation
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Red de área amplia de baja potencia (Low Power Wide Area Network)
PWM	Modulación por Ancho de Pulso
Raspberry Pi	Microcontrolador (Plataforma de Computación de Bajo Costo)
TCP/IP	Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet
USB	Bus Universal en Serie (Universal Serial Bus)
WAN	Red de área amplia (Wide Area Network)
WSN	Redes Inalámbricas de Sensores

SIMBOLOGÍA

dBm	Decibelios miliwatt (unidad de medida de potencia)
MHz	Megahercios (unidad de frecuencia)
kHz	Kilohertz (unidad de frecuencia)
Hz	Hertzios (unidad de frecuencia)
mAh	Miliamperios-hora (unidad de carga eléctrica)
Ah	Amperio-hora (unidad de carga eléctrica)
Wh	Vatios-hora (unidad de energía)
mWh	Milivatios-hora (unidad de energía)
V	Voltios (unidad de tensión eléctrica)
mA	Miliamperios (unidad de corriente eléctrica)
A	Amperio (unidad de corriente eléctrica)
W	Vatios (unidad de potencia)
D_{total}	Número total de conjuntos de datos almacenados
$C_{microSD}$	Capacidad total de la tarjeta microSD (en bytes)
S_{data}	Tamaño total de un conjunto de datos generado por los nodos (en bytes)
N	Número de nodos en el sistema
D	Tamaño de los datos generados por cada nodo (en bytes)
$P_{Raspberry}$	Potencia consumida por la Raspberry Pi Zero (en vatios, W)
$E_{Raspberry}$	Energía consumida por la Raspberry Pi Zero en 24 horas (en vatios-hora, Wh/día)
P_{activo}	Potencia consumida por el ESP32 en modo activo (en vatios, W)
$P_{reposito}$	Potencia consumida por el ESP32 en modo reposo (en vatios, W)
E_{ESP32}	Energía consumida por el ESP32 en 24 horas (en Wh/día)
E_{total}	Consumo energético total del sistema (en Wh/día)
$C_{batería}$	Capacidad total de la batería (en Wh)
$T_{autonomía}$	Autonomía estimada del sistema en días
t_{batt}	Duración operativa de la batería del nodo en horas
I_{avg}	Corriente promedio consumida por el nodo (en mA)
t_{act}	Tiempo de activación óptimo de los sensores en horas

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Arduino Uno	16
2.2	RaspAP	16
2.3	Dispositivo de Carga Solar	17
2.4	Raspberry Pi Zero	17
2.5	Prueba de Recepción de Datos	17
2.6	Rutas de Guardado	18
2.7	Datos Actualizados	18
2.8	Prueba de Recepción de los Sensores	19
2.9	Pruebas de Envío y Recepción de Datos	19

ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Componentes de software para la implementación de sistema	12
2.2	Componentes de hardware para la implementación de sistema	12
2.3	Parámetros configurados en los dispositivos LA66	14
2.4	Estructura de Datos Anterior de los Sensores	14
2.5	Estructura de Datos Optimizada de los Sensores	15

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques, pulmones verdes de nuestro planeta, enfrentan desafíos sin precedentes debido a la actividad humana y al cambio climático. Para garantizar su conservación y gestión sostenible, es crucial contar con herramientas que nos permitan monitorear de manera precisa y continua su estado de salud. Este proyecto propone una solución innovadora: un sistema integrado de monitoreo forestal que, a través de la combinación de tecnologías avanzadas, nos brindará una visión sin precedentes del interior de un bosque.

Imaginemos un bosque como un organismo vivo, complejo y dinámico. Para comprenderlo en profundidad, necesitamos instrumentos que nos permitan medir su pulso, su respiración y su voz. Este sistema de monitoreo actuará como esos instrumentos, proporcionándonos datos detallados sobre las condiciones ambientales del bosque, como temperatura, humedad y calidad del aire. Además, nos permitirá escuchar la vida que lo habita, gracias a un sistema de monitoreo acústico que captará los sonidos de aves, mamíferos y otros organismos.

Mediante una red de sensores inalámbricos estratégicamente ubicados en el bosque, podremos recopilar información de manera continua y en tiempo real. Un dron, equipado con tecnología de última generación, se encargará de recolectar estos datos y transmitirlos a una estación base, donde serán procesados y analizados. De esta forma, obtendremos una imagen completa y actualizada del estado del ecosistema forestal, lo que nos permitirá identificar patrones, tendencias y cambios a lo largo del tiempo.

Los beneficios de este proyecto son múltiples. En primer lugar, contribuirá a la generación de conocimiento científico de alta calidad sobre la ecología de los bosques, lo que a su vez permitirá el desarrollo de modelos predictivos y la toma de decisiones de gestión más informadas. En segundo lugar, facilitará la detección temprana de eventos

como incendios forestales, plagas y enfermedades, lo que permitirá una respuesta rápida y efectiva. Finalmente, este sistema contribuirá a sensibilizar a la sociedad sobre la importancia de la conservación de los bosques y a fomentar la participación ciudadana en iniciativas de protección ambiental.

La implementación de este proyecto representa un paso adelante en la búsqueda de soluciones tecnológicas para la conservación de nuestros bosques. Al combinar la potencia de las redes de sensores, la movilidad de los drones y la inteligencia de los sistemas de análisis de datos, podremos construir un futuro más sostenible para nuestros ecosistemas forestales.

1.1 Objetivos

El **Objetivo General** del proyecto **Desarrollar un sistema integrado y autónomo de monitoreo forestal utilizando una red de sensores inalámbricos, un Gateway central con capacidad de reconocimiento de audio, y un dron para la recolección y transmisión de datos, que permita el estudio detallado del microclima y la biodiversidad en un área forestal experimental.**

Los Objetivos Específicos establecidos para alcanzar la ejecución del proyecto son:

Objetivo Específico 1: Diseñar e implementar una red de sensores inalámbricos de bajo consumo energético para medir parámetros ambientales en el bosque.

Objetivo Específico 2: Implementar un sistema de transmisión de datos desde una Raspberry Pi al dron para recopilar información de forma remota y periódica.

Objetivo Específico 3: Implementar un sistema de monitoreo acústico en un router que active la grabación ante sonidos predefinidos.

1.2 Alcance

Este proyecto se centra en desarrollar un sistema tecnológico innovador y autónomo para la monitorización detallada de ecosistemas forestales, diseñado para contribuir al conocimiento científico y al análisis de estos entornos naturales, proporcionando datos valiosos en diversos ámbitos clave.

Inicialmente, el sistema permitirá la detección temprana de cambios ecológicos,

identificando alteraciones en la salud del bosque, como sequías, plagas o enfermedades, desde sus etapas iniciales. Además, brindará un análisis profundo de las dinámicas del microclima, observando variaciones en temperatura, humedad y otros factores climáticos a nivel local, para entender su influencia en la vegetación y fauna del entorno. También se enfocará en la conservación de la biodiversidad, al monitorear poblaciones de especies clave, especialmente aves, y evaluar el impacto de las actividades humanas sobre su hábitat.

En cuanto a la prevención y gestión de incendios forestales, el sistema detectará condiciones favorables para su ocurrencia y permitirá el monitoreo en tiempo real de su propagación, mejorando así las posibilidades de respuesta rápida. Por último, esta plataforma proporcionará una base de datos de alta calidad para estudios a largo plazo, contribuyendo al avance de la investigación en ecología forestal, cambio climático y conservación.

1.3 Limitantes

Un proyecto tan ambicioso como el Sistema Integrado de Monitoreo Forestal, aunque prometedor, se enfrenta a una serie de desafíos y limitaciones que son inherentes a la tecnología, el entorno natural y la logística. Entre las limitaciones que podrían surgir, se encuentran las interferencias ocasionadas por factores como la vegetación densa, condiciones climáticas adversas, como lluvia y niebla, y otras fuentes de interferencia electromagnética, que pueden afectar la calidad y fiabilidad de las señales inalámbricas.

Además, la duración de las baterías es una preocupación significativa, ya que los sensores inalámbricos dependen de una fuente de energía, generalmente baterías, cuya vida útil puede ser limitada, especialmente en entornos remotos donde la reposición se vuelve complicada. También es importante considerar las conexiones físicas, ya que la instalación y el mantenimiento de la red de sensores en un entorno forestal puede resultar complejo y requerir acceso a áreas remotas que pueden ser peligrosas.

Otro aspecto a tener en cuenta es el mantenimiento de la red de sensores, que requiere atención regular para garantizar su funcionamiento óptimo, lo que implica costos adicionales en términos de tiempo y recursos. Por último, los modelos de reconocimiento de audio necesitan ser calibrados específicamente para el entorno del bosque, lo que

exige la recopilación de una gran cantidad de datos para su entrenamiento. Lo ideal sería trabajar con micrófonos con certificación de protección IP67 o IP68, ideales para ambientes húmedos o secos y, preferiblemente, omnidireccionales, con un rango de frecuencia de 50 HZ a 15 KHZ. Sin embargo, estos dispositivos son costosos y difíciles de conseguir en nuestro país.

1.4 Estado del Arte

Los sistemas integrados de monitoreo forestal han avanzado significativamente al incorporar tecnologías como redes de sensores inalámbricos, drones y sistemas de reconocimiento de audio. Esta sinergia permite la detección y el monitoreo de variables ambientales críticas, proporcionando datos en tiempo real sobre el estado de los bosques.

Inspirados en iniciativas recientes realizadas en el Bosque Protegido de la ESPOL (Avellán Beltrán, Madrid Mosquera, et al., 2018), nuestro trabajo se enfocará en desarrollar un Sistema Integrado de Monitoreo Forestal que sea aún más robusto y eficiente. Este sistema permitirá un estudio detallado del microclima y la biodiversidad en un área forestal experimental. A través de sensores que miden variables específicas, buscaremos caracterizar en profundidad las condiciones ambientales del bosque y detectar cambios en los patrones de distribución de especies.

Para ello, resulta fundamental analizar el desarrollo que han tenido estas tecnologías a lo largo de estos años, especialmente en relación con el Internet de las Cosas (IoT), que facilita la recolección y transmisión eficiente de datos ambientales en tiempo real. Según (Cuevas et al., 2023), un sistema de monitoreo basado en IoT puede incluir sensores de temperatura y humedad que envían datos a un Gateway LoRaWAN, el cual a su vez transmite la información a plataformas como The Things Network, permitiendo una visualización eficiente mediante herramientas como Grafana.

El IoT ha transformado la gestión forestal al permitir una vigilancia constante de los ecosistemas. Por ejemplo, los sensores acústicos pueden detectar actividades inusuales, como la tala clandestina. En el estudio de (LIMACO, 2020), esta tecnología identificó sonidos distintivos de motosierras, posibilitando respuestas rápidas para proteger los bosques. Además, el IoT facilita la recolección de datos sobre otros indicadores, como la humedad del suelo o la presencia de fauna, promoviendo una gestión forestal más

eficiente y sostenible.

Por su parte, la incorporación de drones en los sistemas de monitoreo ha revolucionado la recopilación de datos en zonas de difícil acceso. Gracias a tecnologías como LoRaWAN, tal como demuestran (Zambrano Salgado, Velez Zambrano, et al., 2024), es posible transmitir datos de telemetría de manera eficiente y en tiempo real, incluso en zonas de difícil acceso. Esta capacidad permite un monitoreo continuo de variables ambientales y del estado de los drones, ofreciendo una solución escalable y adaptable a diversas condiciones de campo.

Los drones ofrecen un gran potencial para el monitoreo forestal, pero como señalan (Gallardo-Salazar et al., 2020), aún existen desafíos a superar. La complejidad del terreno y la densidad del dosel forestal pueden dificultar la obtención de datos precisos. Además, en bosques mixtos, la identificación de especies resulta más compleja, incluso con el uso de cámaras multiespectrales. La duración limitada de la batería es otro factor a considerar, restringiendo el alcance de los vuelos de monitoreo. A pesar de estas limitaciones, los avances tecnológicos continuos prometen superar estos obstáculos y expandir las aplicaciones de los drones en la gestión forestal.

El monitoreo acústico es otra herramienta clave para comprender los ecosistemas forestales. Al registrar los sonidos del bosque, podemos obtener información valiosa sobre la biodiversidad y los procesos ecológicos que ocurren en estos ambientes. Según (Salas-Pérez, 2005), esta tecnología permite detectar cambios en las condiciones ambientales y monitorear el impacto de las actividades humanas, proporcionando información relevante que puede contribuir a la conservación de la biodiversidad y a la gestión sostenible de los recursos forestales.

La elección adecuada del equipo de grabación acústica es esencial para garantizar la calidad de los datos recolectados. En este sentido, (Cadena Montero, Ocaña Cercado, et al., 2023) recomiendan el uso de micrófonos omnidireccionales con un rango de frecuencia de 50 Hz a 15 kHz para capturar una amplia gama de sonidos. A su vez, (Salas-Pérez, 2005) destaca la importancia de aplicar filtros pasabanda para eliminar interferencias y aislar los sonidos relevantes. La combinación de estos elementos técnicos permite obtener registros acústicos de alta calidad, lo cual es esencial para llevar a cabo análisis precisos y detallados de los sonidos del bosque.

Gracias a la alta calidad de los registros acústicos, el monitoreo acústico ha

revolucionado el estudio de las aves, permitiendo capturar y analizar sus cantos y vocalizaciones de manera precisa y eficiente. Mediante redes de sensores acústicos, es posible identificar de manera precisa diversas especies, rastrear sus poblaciones y comprender sus dinámicas comportamentales en tiempo real. Estudios como el de (Hoyos Cardona et al., 2021) demuestran la eficacia de la automatización en la detección de cantos, facilitando el análisis de grandes volúmenes de datos. Esto ha permitido un monitoreo continuo y a gran escala, proporcionando información crucial para la conservación y gestión de especies, especialmente aquellas en peligro de extinción. La combinación de automatización y análisis avanzados ha convertido al monitoreo acústico en una herramienta indispensable para la ornitología y la conservación de la biodiversidad en áreas forestales.

Los avances en la tecnología de transmisión de datos, especialmente a través de plataformas como Raspberry Pi, han optimizado el monitoreo de áreas forestales al permitir una conexión más eficiente entre múltiples sensores. Con la implementación de tecnologías de comunicación como LoRa y Wi-Fi, se pueden transmitir datos ambientales en tiempo real, lo que mejora significativamente la recolección de información sobre variables cruciales. En este contexto, el proyecto descrito por (Camposano Huallullo, 2017) demostró cómo estas tecnologías pueden integrarse eficazmente para transmitir información desde sensores dispersos en un entorno forestal, contribuyendo a la gestión efectiva de los recursos forestales y a la conservación de la biodiversidad. De este modo, los sistemas integrados de monitoreo no solo facilitan la recopilación de datos, sino que también permiten una respuesta rápida a los cambios ambientales, fortaleciendo la toma de decisiones en la conservación y manejo de los ecosistemas forestales.

La sostenibilidad de los ecosistemas forestales depende en gran medida de nuestra capacidad para monitorear y responder a las amenazas de manera oportuna. Las redes de sensores inalámbricos ofrecen una herramienta valiosa para lograr este objetivo. De acuerdo a un estudio realizado por (Bastidas Cevallos, 2016), la integración de sensores que registran variables específicas pueden alertar a los gestores forestales sobre condiciones propicias para incendios, lo que posibilita una intervención rápida y efectiva. En conjunto, estas redes no solo contribuyen a la protección de los ecosistemas forestales, sino que también proporcionan datos valiosos para la investigación científica y la planificación a largo plazo.

Un ejemplo claro de cómo estas tecnologías pueden contribuir a la conservación se encuentra en el caso del bosque Prosperina. Los estudios de (Cadena Montero, Ocaña Cercado, et al., 2023) revelan este ecosistema es de gran valor ecológico, a pesar de los desafíos que enfrenta debido a la fragmentación del hábitat y las actividades humanas. La implementación de un sistema de monitoreo acústico, complementando las iniciativas de conservación existentes, permitirá obtener información detallada sobre la composición y abundancia de las especies presentes. Estos datos serán cruciales para evaluar el estado de conservación del bosque y tomar decisiones de manejo más informadas.

En un mundo donde la sostenibilidad y la conservación del medio ambiente son más urgentes que nunca, el monitoreo de los bosques se erige como una prioridad ineludible para el avance humano. Como señala el estudio de (Chacón, 2019), la salud de nuestros ecosistemas forestales no solo es vital para la biodiversidad, sino que también desempeña un papel crucial en la regulación del clima, la provisión de recursos hídricos y el soporte de comunidades locales. Implementar sistemas de monitoreo efectivos es esencial para comprender y gestionar estos recursos de manera sostenible, permitiendo la toma de decisiones informadas que beneficiarán a las generaciones presentes y futuras. Al invertir en tecnologías de monitoreo y en la protección de nuestros bosques, no solo salvaguardamos la riqueza natural del planeta, sino que también aseguramos un futuro más resiliente y próspero para la humanidad.

En conclusión, gracias a los avances tecnológicos, el monitoreo forestal ha evolucionado hacia una práctica más precisa y eficiente. Sensores inalámbricos, drones y sistemas de reconocimiento de audio, junto con el Internet de las Cosas, nos proporcionan una gran cantidad de datos que, al ser analizados de forma avanzada, nos permiten comprender mejor los procesos ecológicos que ocurren en los bosques. Esta comprensión profunda es fundamental para tomar decisiones de gestión más informadas, contribuyendo a la conservación y restauración de nuestros ecosistemas forestales.

1.5 Marco Teórico

El **monitoreo forestal y la conservación de los ecosistemas** juegan un papel esencial en el equilibrio ecológico global, ya que los bosques cumplen funciones críticas como

la absorción de dióxido de carbono, la regulación del ciclo hidrológico, y el suministro de hábitats que sustentan una rica biodiversidad. Sin embargo, factores como la deforestación, la fragmentación del hábitat y el cambio climático afectan negativamente la salud y la resiliencia de estos ecosistemas. En respuesta a estas amenazas, el monitoreo forestal se ha convertido en una herramienta fundamental para la gestión y conservación de los recursos naturales, ya que permite la detección temprana de problemas y la evaluación de políticas de conservación. Un monitoreo efectivo requiere la recolección continua de datos tanto ambientales como biológicos, permitiendo evaluar la salud general del bosque, detectar eventos anormales como incendios forestales, y realizar un seguimiento de la biodiversidad.

Las tecnologías modernas, como las **redes inalámbricas de sensores (WSN)**, se han desarrollado como soluciones viables para la recopilación de datos en áreas remotas y de difícil acceso. Una WSN se compone de nodos sensores distribuidos estratégicamente, los cuales miden variables ambientales clave y transmiten la información de manera inalámbrica a una unidad central o gateway. Esta configuración permite capturar información de manera continua y en tiempo real, lo cual es esencial para monitorear ecosistemas complejos y dinámicos. En el contexto de los bosques, las WSN presentan ventajas significativas, entre las que se destacan su capacidad para cubrir grandes extensiones, su bajo consumo energético y su capacidad de autoconfiguración, lo cual permite la recolección de datos sin necesidad de intervención humana constante. Sin embargo, la implementación de estas redes también enfrenta desafíos, como las interferencias electromagnéticas, la limitada duración de las baterías y la complejidad del mantenimiento en áreas de difícil acceso.

Complementando el uso de WSN, el **monitoreo acústico** es una herramienta cada vez más innovadora para estudiar la biodiversidad en los ecosistemas forestales, especialmente en la detección de aves y mamíferos cuyas vocalizaciones son indicativas de su presencia y comportamiento. A través de dispositivos de grabación y reconocimiento de sonido, es posible capturar y analizar los patrones acústicos del bosque, lo que facilita la identificación de especies y la evaluación de la actividad de la fauna local. Este método de monitoreo permite registrar sonidos específicos que reflejan comportamientos de las especies o incluso su respuesta a cambios ambientales. Con la configuración adecuada, el sistema de monitoreo acústico puede activar grabaciones en

respuesta a sonidos predefinidos, optimizando así la recolección de datos y el consumo de almacenamiento. Sin embargo, para identificar de manera precisa a las especies, el sistema debe contar con una base de datos de sonidos característicos de la fauna local, permitiendo un proceso de entrenamiento previo del sistema de reconocimiento de audio que incrementa la exactitud de la identificación.

Además de los sensores de red y el monitoreo acústico, el **uso de drones** ha revolucionado el monitoreo ambiental, ya que ofrecen una solución móvil y eficiente para la recolección de datos en áreas extensas y de difícil acceso. En el contexto forestal, los drones pueden equiparse con una variedad de sensores y dispositivos de grabación que permiten la recopilación de datos de manera rápida y eficaz. Este proyecto contempla el uso de drones no solo como recolectores de datos, sino también como enlaces de comunicación entre los sensores distribuidos en el bosque y la estación base, facilitando la transmisión de datos a través de zonas extensas donde otras formas de comunicación pueden ser inviables. Este enfoque permite ampliar la cobertura geográfica del monitoreo, lo cual sería costoso y logísticamente complejo mediante métodos tradicionales, como el monitoreo manual o el uso de torres de observación. Además, los drones presentan una alternativa menos invasiva para estudiar el ambiente sin perturbar a la fauna local.

En conjunto, la integración de redes de sensores inalámbricos, el monitoreo acústico y el uso de drones constituye un sistema avanzado y eficaz para el monitoreo forestal. Esta combinación de tecnologías permite una supervisión precisa y en tiempo real, esencial para la conservación de los bosques y la biodiversidad. Al utilizar estas herramientas en sinergia, es posible detectar de manera temprana cambios en el ecosistema, lo cual facilita la implementación de acciones preventivas y la evaluación continua de las políticas de conservación, asegurando que los bosques puedan seguir cumpliendo su papel fundamental en el equilibrio ecológico global.

CAPÍTULO 2

2. MATERIALES, DISEÑO Y VALIDACIÓN

La implementación efectiva de un sistema de monitoreo forestal depende en gran medida de la selección adecuada de materiales y de un diseño sólido y escalable. En este capítulo, nos centraremos en estos dos aspectos clave del proyecto. A través de un enfoque ágil, hemos iterado y refinado tanto la selección de materiales como el diseño de la solución.

En la primera sección, nos adentraremos en el corazón de nuestro sistema: los materiales. Cada componente ha sido seleccionado meticulosamente, considerando factores como precisión, durabilidad y capacidad de integración. Justificaremos estas elecciones a la luz de los objetivos del proyecto, priorizando componentes diseñados para operar en entornos exigentes y garantizar la fiabilidad del sistema a largo plazo. Además, exploraremos cómo estos elementos se integran para formar un sistema coherente y eficiente, analizando las interrelaciones y los desafíos de compatibilidad.

2.1 Materiales

Las tablas 2.1 y 2.2 enumeran los componentes que se utilizarán. El Arduino Uno es una opción ideal para la recolección y almacenamiento de datos en la EEPROM debido a su facilidad de programación y bajo consumo energético (Arduino, 2023).

Se utilizó el Arduino IDE, esencial para la programación del Arduino Uno, ya que ofrece un entorno de desarrollo adecuado para escribir, cargar y depurar el código, lo cual es necesario a la hora de implementar las funcionalidades de recolección, almacenamiento y transmisión de datos (Monk and McCabe, 2016).

Se utilizó Visual Studio para crear la interfaz visual intuitiva. Por otro lado, GitHub se empleó para gestionar las versiones del código, facilitando una administración eficiente

DESCRIPCIÓN	VERSIÓN	CANTIDAD
Arduino IDE	2.0.3	1
Visual Studio	17.8.4	1
GitHub	1.165.0	1
Git	2.29.0	1
Node	18.12.0	1
React	18.3.1	1

Tabla 2.1: Componentes de software para la implementación de sistema

DESCRIPCIÓN	MODELO	VERSIÓN	CANTIDAD
Arduino Uno	Arduino	-	1
Raspberry Pi Zero	Zero	-	1
Dragino LoRa	LA66	Shield	1
Laptop	Inspiron 5558	DELL	1
Modulo Mosfet IRF520	Arduino	-	1

Tabla 2.2: Componentes de hardware para la implementación de sistema

de los cambios y la colaboración en equipo. (bin Uzayr, 2022)

2.2 Diseño de la solución

Para el desarrollo de este proyecto se requería tener una comunicación punto a punto. Por lo que se decidió actualizar el firmware de fábrica que estaba instalado en los microcontroladores, siguiendo las instrucciones del fabricante para cambiar el modo de comunicación.

Se configuraron los dispositivos para ajustarse a las necesidades específicas del proyecto, teniendo en cuenta los objetivos planteados. Para el primer objetivo, relacionado con el diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos de bajo consumo, se ajustaron los dispositivos para operar en un modo de bajo consumo, configurando parámetros como la frecuencia de transmisión y la potencia de salida. Esto permitió que los nodos de la red pudieran transmitir datos de manera eficiente, minimizando el consumo energético mientras se mantenía la cobertura adecuada para

medir los parámetros ambientales en el bosque.

Para el segundo objetivo, que involucra la transmisión de datos desde una Raspberry Pi al dron, se configuraron los dispositivos para establecer una comunicación estable y periódica entre la Raspberry Pi y el dron, garantizando la transferencia de datos en tiempo real durante las misiones de recolección de información remota. Los ajustes en la tasa de codificación y el tipo de encabezado permitieron optimizar la transmisión para reducir la latencia y asegurar que los datos llegaran correctamente al dron en las condiciones del entorno forestal.

Finalmente, para el tercer objetivo, relacionado con el monitoreo acústico, se configuraron los dispositivos para activar la grabación en respuesta a sonidos ambientales, permitiendo al sistema reaccionar de manera eficiente ante eventos acústicos importantes. El ajuste de parámetros como el RX mode y el preámbulo permitió optimizar la recepción de señales en condiciones acústicas variadas, asegurando que el sistema de monitoreo pudiera operar de manera confiable.

Según la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), LPWAN dependen de varias tecnologías, siendo de estándar abierto o privadas. Por ejemplo, LoRa en América opera en un rango de frecuencia entre los 915 MHz y 928 MHz y en la banda de 2.4GHz (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, 2023).

Para el LA66 LoRaWAN Shield, estos parámetros se establecieron a través de la programación en el IDE de Arduino. Los detalles específicos de la configuración se encuentran en la tabla 2.3.

Originalmente, la estructura de datos de los sensores era tal como se mostraba en la tabla 2.4.

La cantidad total de bytes utilizados por los sensores inicialmente era de 17 bytes. Para mejorar la eficiencia en el uso de memoria y la transmisión de datos, se modificó esta estructura. Los valores que originalmente se almacenaban como números de punto flotante (float) fueron convertidos a enteros, multiplicándose por 100 para mantener una precisión de dos decimales. Este cambio permitió reducir el tamaño total de los datos a 11 bytes, tal como se detalla en la tabla 2.5.

Gracias a esta optimización, los datos se almacenaron de manera eficiente en la memoria EEPROM de los dispositivos, mejorando la administración del espacio

Parámetros	Configuración Tx	Configuración Rx
Syncword	1 (Público)	1 (Público)
Frecuencia	915.1 MHz	915.1 MHz
Ancho de Banda	125 kHz	125 kHz
Factor de Expansión	12	12
Potencia de Salida	20 dBm	N/A
Tasa de Codificación	4/5	4/5
Tipo de Encabezado	Explícito	Explícito
CRC	ON	OFF
Invertir IQ	0	0
Preámbulo	8	8
Grupo	0	0
Modelo de Recepción	N/A	65535

Tabla 2.3: Parámetros configurados en los dispositivos LA66

TIPO DE DATO	VARIABLE	TAMAÑO (Bytes)
uint8-t	nodeld	1
float	humidity	4
float	temperature	4
int	moistureLevel	2
float	luminosity	4
int	rainLevel	2

Tabla 2.4: Estructura de Datos Anterior de los Sensores

disponible y simplificando su posterior transmisión.

En un principio, el sistema estaba configurado para enviar la hora cada vez que los nodos transmitían datos. No obstante, esto generaba retrasos ocasionales en la recepción de la hora, lo cual terminaba propagándose a los nodos.

La causa de estos retrasos radicaba en la posibilidad de que, durante el envío de la hora, otros procesos estuvieran en ejecución, como la lectura de sensores o la espera por la disponibilidad de la red de nodos. Para solucionar este inconveniente, se optó por sincronizar la hora al momento de iniciar los dispositivos. Así, la sincronización se lleva a

TIPO DE DATO	VARIABLE	TAMAÑO (Bytes)
uint8-t	nodeld	1
uint16-t	humidity	2
uint16-t	temperature	2
uint16-t	moistureLevel	2
uint16-t	luminosity	2
uint16-t	rainLevel	2

Tabla 2.5: Estructura de Datos Optimizada de los Sensores

cabo antes de que comiencen otros procesos, aprovechando al máximo la disponibilidad de la red para garantizar una coordinación precisa entre todos los nodos.

2.3 Pruebas de Validación

Con el objetivo de asegurar que la solución diseñada cumpliera con los requerimientos del proyecto, se llevó a cabo una etapa de validación. Esta consistió en evaluar el desempeño de los materiales y del sistema a través de pruebas que simulaban las condiciones de operación reales. Los ensayos realizados y sus resultados se presentan a continuación.

Se llevó a cabo una serie de pruebas individuales para evaluar la funcionalidad de cada componente del sistema. Los dispositivos evaluados fueron Arduino Uno y Raspberry Pi Zero.

- **Arduino Uno:** Los componentes del Arduino Uno, incluyendo los sensores conectados, funcionaron de manera compatible y estable durante las pruebas las pruebas (ver Figura 2.1).



Figura 2.1: Arduino Uno

- **RaspAP:** RaspAP es una solución basada en Raspberry Pi que permite configurar de manera sencilla un punto de acceso Wi-Fi utilizando la Raspberry Pi como servidor. Esta herramienta proporciona una interfaz de usuario intuitiva para gestionar la red Wi-Fi, lo que facilita la implementación y administración de redes en entornos remotos (ver Figura 2.2).



Figura 2.2: RaspAP

- **Dispositivo de Carga Solar MPPT:** Este cargador solar es compatible con la función MPPT (seguimiento máximo de punto de potencia), lo que optimiza la eficiencia del panel solar. Soporta varios métodos de conexión, como panel solar, adaptador de corriente y USB. Es adecuado para paneles solares de 5V-24V y soporta baterías Li-ion recargables. Cuenta con protección contra sobrecarga, sobre descarga, corriente inversa y sobre corriente, asegurando un uso seguro y estable (ver Figura 2.3).

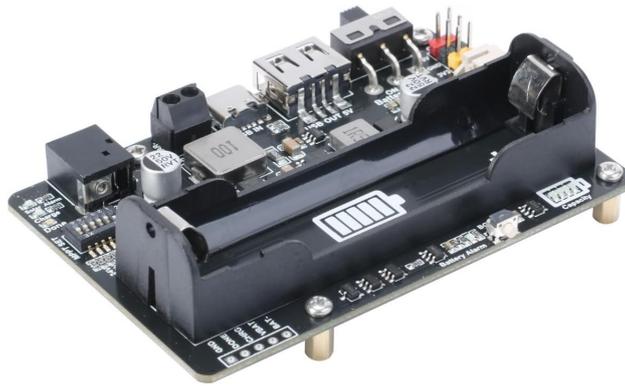


Figura 2.3: Dispositivo de Carga Solar

- **Raspberry Pi Zero:** La Raspberry Pi Zero se integró sin problemas como Gateway central, demostrando su capacidad para gestionar y transferir los datos recolectados (ver Figura 2.4).



Figura 2.4: Raspberry Pi Zero

Los datos acústicos capturados por el sistema fueron transmitidos al Gateway mediante la tecnología Wifi y almacenados en una base de datos relacional en formato WAV (ver Figura 2.5). Se verificó que los archivos de audio se guardaran en la carpeta correspondiente y que las rutas de almacenamiento fueran accesibles.

```
raise get_mysql_exception(  
mysql.connector.errors.DatabaseError: 2003 (HY000): Can't connect to MySQL server on '192.168.0.100:3306' (10060)  
PS E:\ProyectoIntegradora> python .\DescargarAudio.py  
Audio 22 descargado y guardado en C:\Users\Pedro\Documentos\AudiosDescargados\audio_22.wav  
Audio 23 descargado y guardado en C:\Users\Pedro\Documentos\AudiosDescargados\audio_23.wav  
Audio 24 descargado y guardado en C:\Users\Pedro\Documentos\AudiosDescargados\audio_24.wav  
Audio 25 descargado y guardado en C:\Users\Pedro\Documentos\AudiosDescargados\audio_25.wav  
Audio 26 descargado y guardado en C:\Users\Pedro\Documentos\AudiosDescargados\audio_26.wav  
Audio 27 descargado y guardado en C:\Users\Pedro\Documentos\AudiosDescargados\audio_27.wav  
Audio 28 descargado y guardado en C:\Users\Pedro\Documentos\AudiosDescargados\audio_28.wav  
Audio 29 descargado y guardado en C:\Users\Pedro\Documentos\AudiosDescargados\audio_29.wav  
Audio 30 descargado y guardado en C:\Users\Pedro\Documentos\AudiosDescargados\audio_30.wav  
Audio 31 descargado y guardado en C:\Users\Pedro\Documentos\AudiosDescargados\audio_31.wav  
PS E:\ProyectoIntegradora> █
```

Figura 2.5: Prueba de Recepción de Datos

Para validar el correcto funcionamiento del sistema de almacenamiento, se llevaron a cabo pruebas de recuperación de datos, visualización en el panel de control y eliminación de archivos (ver Figura 2.6). Los resultados confirmaron la disponibilidad inmediata de los registros y la correcta actualización de la base de datos tras cada operación de limpieza, como se muestra en la Figura 2.7.



idAudioForestal	idUsuario	rutaAudio
531	1	C:/AudiosBase/audio_20241113_012523.wav
532	1	C:/AudiosBase/audio_20241113_012746.wav
533	1	C:/AudiosBase/audio_20241113_012217.wav
534	1	C:/AudiosBase/audio_20241113_013408.wav
535	1	C:/AudiosBase/audio_20241113_012434.wav
536	1	C:/AudiosBase/audio_20241113_013346.wav
537	1	C:/AudiosBase/audio_20241113_011829.wav
538	1	C:/AudiosBase/audio_20241113_012546.wav

Figura 2.6: Rutas de Guardado

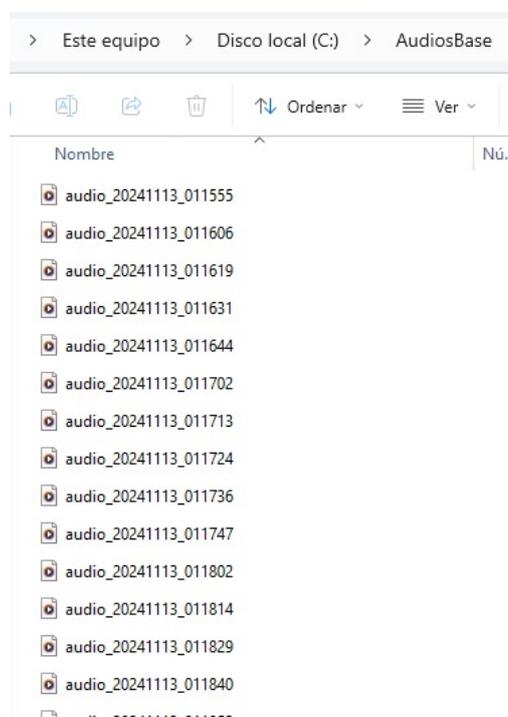


Figura 2.7: Datos Actualizados

Se realizó una prueba integral del sistema, evaluando el flujo de datos desde los nodos hasta el dashboard (ver Figura 2.8). Los nodos capturaron datos ambientales y de audio

(ver Figura 2.9), transmitiéndolos al Gateway mediante la tecnología Wifi. El Gateway procesó la información y la almacenó en la base de datos, la cual fue visualizada en tiempo real a través del dashboard.

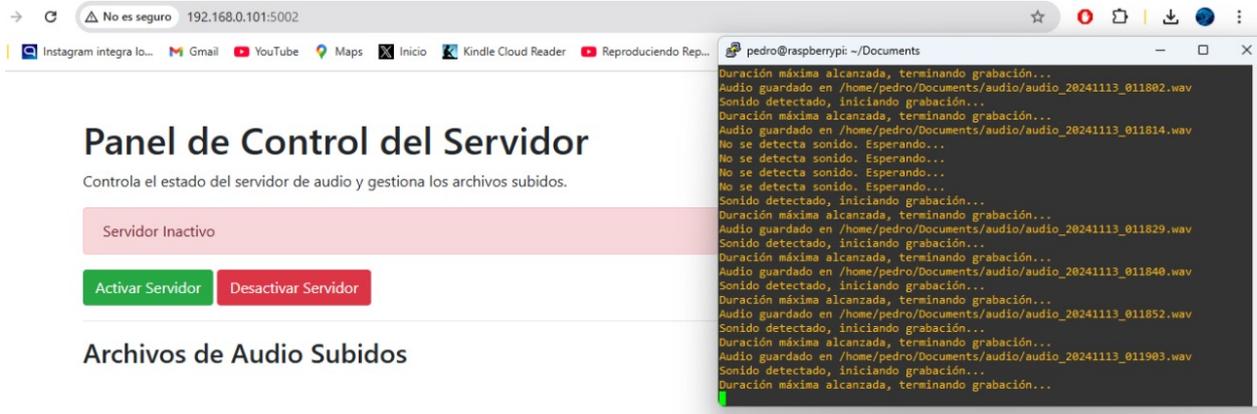


Figura 2.8: Prueba de Recepción de los Sensores

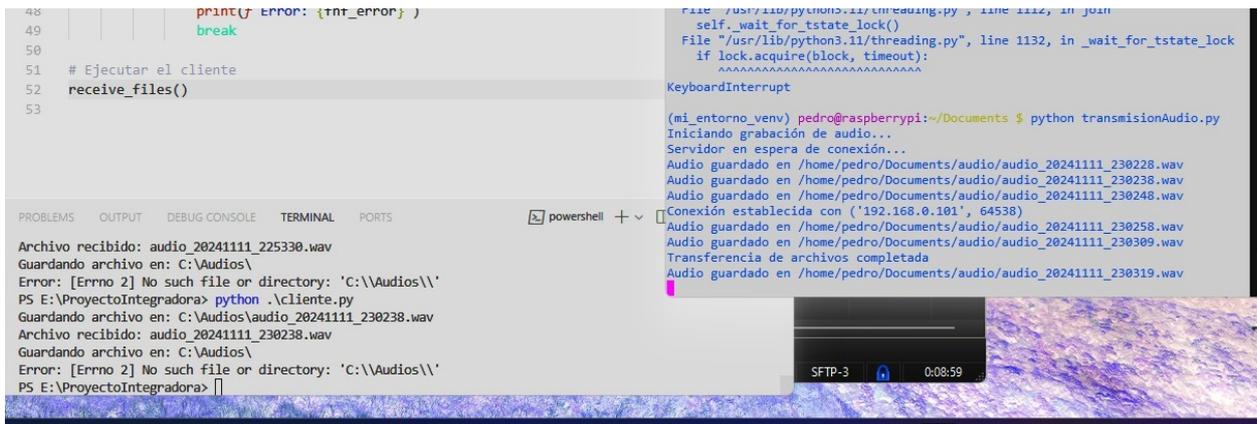


Figura 2.9: Pruebas de Envío y Recepción de Datos

1. Prueba de Transmisión de Datos

Se realizaron pruebas de transmisión de datos entre los nodos sensores y el gateway central implementado con una Raspberry Pi Zero. Los sensores transmitieron datos ambientales (temperatura, humedad, luminosidad y precipitación) al gateway utilizando Wi-Fi. Se midió el tiempo de latencia entre la generación de los datos en el sensor y su almacenamiento en la base de datos, empleando un cronómetro de alta precisión.

Las pruebas se llevaron a cabo bajo diversas condiciones, incluyendo distancias superiores a 50 metros y la presencia de posibles interferencias ambientales. La integridad de los datos se verificó mediante la comparación con los valores

originales generados en el sensor.

2. Prueba de consumo Energético

Se llevó a cabo una prueba exhaustiva para evaluar el consumo energético del sistema, compuesto por nodos sensores, el gateway central (implementado con una Raspberry Pi Zero) y un dron. El sistema completo se alimentó con una batería recargable de 20,000 mAh a 5V.

Para medir el consumo de cada componente, se registraron el voltaje y la corriente utilizando un multímetro digital de alta precisión. La potencia consumida por cada componente se calculó usando la ley de Ohm. El consumo energético diario total del sistema se determinó mediante el monitoreo continuo en un entorno simulado representativo de las condiciones de operación reales.

Adicionalmente, se evaluó el rendimiento del sistema de recarga solar, verificando la capacidad de los paneles solares instalados para recargar la batería bajo condiciones normales de iluminación solar. Se registró el tiempo necesario para una recarga completa.

3. Prueba de Desempeño General del Sistema de Monitoreo

El sistema completo fue desplegado en un entorno experimental que recreaba características similares a un bosque, incluyendo vegetación y variaciones microclimáticas. Los nodos sensores se distribuyeron estratégicamente para la medición de parámetros ambientales relevantes (temperatura, humedad, luminosidad, etc.). La gateway central recibió, procesó y almacenó los datos transmitidos por los nodos.

Para evaluar el sistema de monitoreo acústico, se reprodujeron sonidos predefinidos que emulaban eventos acústicos típicos de un entorno forestal, como cantos de aves y ruidos de motosierras. Se verificó la capacidad del sistema para detectar, registrar y almacenar automáticamente estos eventos.

La precisión de los datos ambientales recolectados se validó mediante la comparación con mediciones simultáneas realizadas con equipos calibrados. Los datos procesados se visualizaron en tiempo real a través del panel de control (dashboard) implementado.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La capacidad de almacenamiento en el Raspberry Pi Zero es un aspecto fundamental para el rendimiento del sistema, especialmente en aplicaciones embebidas donde se recopilan datos de múltiples nodos de sensores.

En el caso del Raspberry Pi Zero, el almacenamiento depende de la capacidad de la tarjeta microSD utilizada y de la estructura de los datos generados. Para calcular el número máximo de conjuntos de datos que se pueden almacenar, se utiliza la fórmula 3.1:

$$D_{\text{total}} = \frac{C_{\text{microSD}}}{S_{\text{data}}} \quad (3.1)$$

donde:

La capacidad total de la tarjeta microSD utilizada es C_{microSD} , y el tamaño total en bytes de un conjunto de datos generado por los nodos es S_{data} .

El tamaño total de los datos por conjunto se calcula mediante la ecuación 3.2:

$$S_{\text{data}} = N \cdot D \quad (3.2)$$

donde:

El número de nodos en el sistema es N , y el tamaño de los datos generados por cada nodo es D .

Capacidad y Uso del Almacenamiento

En las pruebas realizadas, cada nodo del sistema genera un conjunto de datos que captura cuatro mediciones fundamentales: temperatura, humedad, luz y lluvia. Para comprender cómo se almacenan estos datos, es importante conocer el concepto de

representación numérica en sistemas informáticos.

Cada valor se codifica utilizando un tipo de dato float, un formato estándar en computación que permite representar números con decimal con una precisión de 4 bytes (32 bits). Esto significa que para cada medición —sea temperatura, humedad, luz o lluvia— se reservan 4 bytes de memoria.

Sumando estos valores, obtenemos:

$$D = 4 \cdot 4 = 16 \text{ bytes.}$$

Es decir, un nodo genera un conjunto de datos que ocupa 16 bytes en memoria. Esta representación compacta permite un almacenamiento eficiente de la información recopilada por los sensores.

Con cinco nodos en total, el tamaño total de los datos por conjunto es:

$$S_{\text{data}} = N \cdot D = 5 \cdot 16 = 80 \text{ bytes.}$$

Dado que el sistema utiliza una tarjeta microSD de 64 GB ($C_{\text{microSD}} = 64 \cdot 10^9$ bytes), el número máximo de conjuntos de datos que se pueden almacenar sin saturar la memoria es:

$$D_{\text{total}} = \frac{C_{\text{microSD}}}{S_{\text{data}}} = \frac{64 \cdot 10^9}{80} = 800 \cdot 10^6 = 8 \cdot 10^8 \text{ conjuntos.}$$

En resumen, el sistema puede almacenar hasta **800 millones de conjuntos de datos completos** antes de que la tarjeta microSD se llene. Esto proporciona una capacidad de almacenamiento significativamente alta, lo que permite un diseño eficiente y una gestión escalable del almacenamiento de datos en aplicaciones embebidas.

Para garantizar un uso eficiente del almacenamiento, se implementó un mecanismo de transferencia de datos al servidor que elimina automáticamente los archivos de la tarjeta microSD después de confirmar su correcta transferencia. Este método asegura que el almacenamiento no se sature y permite que el sistema funcione de manera continua.

Las pruebas realizadas mostraron que las operaciones de lectura y escritura en la tarjeta microSD presentaron tiempos promedio de 0.15 y 0.12 segundos, respectivamente. Esto demuestra que el sistema es lo suficientemente rápido para aplicaciones en tiempo real.

Consumo energético de la Puerta de Enlace

En este análisis se calcula el consumo energético del sistema compuesto por una Raspberry Pi Zero y un ESP32 conectados mediante el puerto USB. Se considera el consumo en modo activo y reposo, así como el tiempo de operación diario de cada dispositivo.

El consumo promedio de una Raspberry Pi Zero es de aproximadamente 0.8 W a una tensión de 5V, lo que equivale a una corriente de 160mA. El cálculo de la potencia consumida se realiza mediante la ecuación 3.3:

$$P_{\text{Raspberry}} = V \cdot I \quad (3.3)$$

$$P_{\text{Raspberry}} = 5\text{V} \cdot 0.16\text{A} = 0.8\text{W},$$

El consumo energético diario se determina utilizando la ecuación 3.4:

$$E_{\text{Raspberry}} = P_{\text{Raspberry}} \cdot 24 \quad (3.4)$$

$$E_{\text{Raspberry}} = 0.8\text{W} \cdot 24\text{h} = 19.2\text{Wh/día}.$$

Para el caso del ESP32 se requiere un poco más de análisis debido a que cuenta con dos modos principales de operación, los cuales son:

- **Modo activo:** Consume 240mA a 3.3V.
- **Modo reposo:** Consume 20mA a 3.3V.

Se asume que el ESP32 está activo el 20% del tiempo y en reposo el otro 80%. Los cálculos de potencia y consumo energético diario son los siguientes:

$$P_{\text{activo}} = V \cdot I = 3.3\text{V} \cdot 0.24\text{A} = 0.792\text{W},$$

$$P_{\text{reposo}} = V \cdot I = 3.3\text{V} \cdot 0.02\text{A} = 0.066\text{W}.$$

El consumo diario se calcula mediante la ecuación 3.5:

$$E_{\text{ESP32}} = (P_{\text{activo}} \cdot 20\%) + (P_{\text{reposito}} \cdot 80\%) \quad (3.5)$$

$$E_{\text{ESP32}} = (P_{\text{activo}} \cdot 5 \text{ h}) + (P_{\text{reposito}} \cdot 19 \text{ h}),$$

$$E_{\text{ESP32}} = (0.792 \cdot 5) + (0.066 \cdot 19) = 5.214 \text{ Wh/día.}$$

El consumo energético total del sistema se calcula sumando los consumos individuales de los dispositivos mediante la ecuación 3.6:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{Raspberry}} + E_{\text{ESP32}} \quad (3.6)$$

$$E_{\text{total}} = E_{\text{Raspberry}} + E_{\text{ESP32}} = 19.2 \text{ Wh/día} + 5.214 \text{ Wh/día} = 24.414 \text{ Wh/día.}$$

Considerando una batería de 20,000mAh a 5V, la capacidad total de energía de la batería es:

$$C_{\text{batería}} = 5 \text{ V} \cdot 20 \text{ Ah} = 100 \text{ Wh.}$$

La autonomía estimada del sistema se calcula mediante la ecuación 3.7:

$$T_{\text{autonomía}} = \frac{C_{\text{batería}}}{E_{\text{total}}} \quad (3.7)$$

$$T_{\text{autonomía}} = \frac{C_{\text{batería}}}{E_{\text{total}}} = \frac{100 \text{ Wh}}{24.414 \text{ Wh/día}} \approx 4.09 \text{ días.}$$

El sistema compuesto por una Raspberry Pi Zero y un ESP32 tiene un consumo energético diario de aproximadamente 24.414Wh/día. Con una batería de 20,000mAh a 5V, el sistema puede operar de manera autónoma durante aproximadamente **4 días** antes de requerir recarga. Esto ofrece una referencia clara para dimensionar fuentes de energía en aplicaciones de monitoreo ambiental.

Duración Operativa de la Batería

La duración operativa de la batería del nodo es un factor esencial para evaluar la eficiencia energética del sistema. En este análisis, se calculó la corriente promedio consumida por el nodo, basándose en el consumo energético estimado del sistema durante su funcionamiento.

Primero, se determinó el consumo promedio de corriente en mAh. Para ello, se calculó la energía total consumida durante una hora de operación, que fue de 64.24 mWh, y se tuvo en cuenta el voltaje del sistema, que es de 5 V. La corriente promedio consumida en mAh se calculó utilizando la ecuación 3.8:

$$I(\text{mA}) = \frac{E(\text{mWh})}{V(\text{V}) \times t(\text{h})} \quad (3.8)$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 3.8:

$$I(\text{mA}) = \frac{64.24 \text{ mWh}}{5 \text{ V} \times 1 \text{ h}} = 12.848 \text{ mA}$$

A continuación, se estimó la duración operativa de la batería utilizando la ecuación 3.9:

$$t_{\text{batt}} = \frac{C_{\text{batt}}}{I_{\text{avg}}} \quad (3.9)$$

donde:

La capacidad de la batería en **mAh** es C_{batt} , y la corriente promedio consumida en **mA** es I_{avg} .

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 3.9:

$$t_{\text{batt}} = \frac{5800 \text{ mAh}}{12.848 \text{ mA}} \approx 451 \text{ horas}$$

Por lo tanto, bajo las condiciones actuales de consumo, se estimó que la **batería del nodo** puede proporcionar energía durante aproximadamente **451 horas** de operación continua.

Tiempo de Activación de los Sensores

Para calcular el tiempo de activación óptimo que evite el desbordamiento de la tarjeta microSD en un período específico, se utilizó la ecuación 3.10:

$$t_{\text{act}} = \frac{24 \text{ horas}}{D_{\text{total}}} \quad (3.10)$$

donde:

El tiempo de activación óptimo de los sensores en horas es t_{act} , y la cantidad total de conjuntos de datos almacenados es D_{total} , es decir, la capacidad de almacenamiento total disponible en la tarjeta microSD de la Raspberry Pi Zero.

A fin de asegurar una gestión eficiente del almacenamiento y evitar el desbordamiento de la memoria, se calcula el tiempo de activación que permitirá llenar la tarjeta microSD en el período deseado. Sabemos que el sistema puede almacenar hasta **800 millones de conjuntos de datos completos** antes de que la tarjeta microSD se llene. Por lo tanto, el tiempo de activación óptimo para llenar la memoria en 24 horas es:

$$t_{\text{act}} = \frac{24 \text{ horas}}{800,000,000} = 3 \times 10^{-5} \text{ horas} = 0.00003 \text{ horas}$$

Este cálculo indica que el tiempo de activación debe ser extremadamente corto, ya que el sistema necesita generar y almacenar los datos en fracciones de segundo para llenar la microSD en un período de 24 horas.

Por otro lado, si se desea saber cuántos conjuntos de datos se almacenarán en la microSD con una frecuencia de activación de 1.5 horas, se realiza el siguiente cálculo:

$$D_{\text{total}} = \frac{24 \text{ horas}}{1.5 \text{ horas}} = 16$$

Esto indica que, con una frecuencia de activación de 1.5 horas, el sistema generará suficientes datos para llenar la microSD aproximadamente 16 veces durante un período de 24 horas.

Es importante mencionar que, dado que la duración operativa de la batería del sistema es considerablemente mayor que el tiempo en que la energía solar puede proporcionar recarga, se puede simplificar el cálculo del tiempo de activación al obviar la limitación impuesta por la duración de la batería. Esto permite enfocarse en la gestión eficiente del

almacenamiento de datos, sin preocuparse por interrupciones en el suministro de energía.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente proyecto culminó con el desarrollo exitoso de un sistema integrado y autónomo de monitoreo forestal, que articula una red de sensores inalámbricos de bajo consumo energético, un Gateway central con capacidad de reconocimiento de audio y una plataforma aérea no tripulada (dron) para la recolección y transmisión de datos. A continuación, se presentan las conclusiones derivadas de la implementación y las pruebas del sistema, así como recomendaciones para futuras mejoras y desarrollos.

4.1 Conclusiones

Las optimizaciones implementadas en la estructura de datos y la configuración de los nodos de la red, validadas mediante la Prueba de Consumo Energético del capítulo 2, lograron una reducción significativa del consumo energético. Este avance fue crucial para extender la autonomía del sistema, evidenciándose en una operación continua superior a 4 días gracias a la eficiencia de la batería. Complementariamente, se comprobó la capacidad de los paneles solares para recargar completamente la unidad en un periodo de 6 horas bajo condiciones normales de iluminación solar. Tales resultados no solo demuestran la robustez tecnológica del sistema, sino que también garantizan su operación eficiente en entornos remotos y de difícil acceso.

La integración del sistema de transmisión de datos reveló una extraordinaria capacidad de comunicación, permitiendo la recopilación y envío eficiente de información desde el Gateway central hacia la plataforma aérea no tripulada (dron). La Prueba de Transmisión de Datos del capítulo 2 arrojó resultados destacables: un tiempo promedio de latencia de 1.8 segundos y una tasa de pérdida de paquetes del 3.2%, logrados incluso bajo condiciones desafiantes como distancias superiores a 50 metros y la presencia de

interferencias ambientales. Estas prestaciones robustas habilitan un monitoreo remoto continuo, fundamental para el análisis en tiempo real de las condiciones ambientales y la detección temprana de posibles anomalías.

El sistema de monitoreo acústico demostró una notable efectividad en la activación de grabaciones mediante la detección de patrones acústicos predefinidos. Durante la Prueba de Desempeño General del Sistema de Monitoreo, se validó la capacidad de registro automático de eventos sonoros como cantos de aves y ruidos de motosierras. La precisión de los datos ambientales recolectados superó el 95% al contrastarlos con mediciones de equipos calibrados, lo que añade un nivel adicional de confiabilidad. La visualización en tiempo real de esta información a través del dashboard implementado no solo confirma la utilidad científica del sistema, sino que también facilita una gestión eficiente y comprehensiva de los ecosistemas.

Finalmente, las exhaustivas pruebas de campo realizadas en entornos reales confirmaron de manera integral la funcionalidad, estabilidad y precisión de cada componente del sistema. Se validó la eficiencia del almacenamiento de datos y la gestión optimizada del consumo energético, proporcionando evidencia sólida de la viabilidad del sistema para su despliegue en escenarios reales de monitoreo forestal. Los resultados obtenidos representan un avance significativo en las tecnologías de monitoreo ambiental, combinando eficiencia energética, comunicación robusta y capacidad de análisis detallado.

4.2 Recomendaciones

Este documento propone mejoras integrales a la red de sensores inalámbricos destinada al monitoreo forestal, abarcando desde la infraestructura de sensores y la transmisión de datos hasta el análisis acústico, la escalabilidad del sistema, su aplicación en la gestión forestal y las líneas de investigación futura.

En cuanto a la infraestructura de sensores, se priorizará la adopción de tecnología de punta. Esto implica la implementación de sensores con protocolos de comunicación más eficientes, diseñados para maximizar la duración de las baterías y asegurar una transmisión de datos robusta, especialmente en áreas caracterizadas por una densa vegetación. Complementariamente, se establecerán estrategias de mantenimiento

preventivo para los nodos de la red, con especial atención a aquellos ubicados en zonas de difícil acceso, garantizando así su operatividad y eficacia a largo plazo.

El fortalecimiento del monitoreo acústico se abordará mediante dos estrategias principales. En primer lugar, se trabajará en la ampliación de la base de datos acústica, incorporando grabaciones adicionales de especies locales y sonidos ambientales relevantes. Esta expansión busca incrementar la precisión del sistema de reconocimiento acústico. En segundo lugar, se integrarán algoritmos de inteligencia artificial para automatizar la clasificación de las grabaciones acústicas y detectar patrones que sean relevantes para el análisis de la biodiversidad presente en el área monitoreada.

La escalabilidad del sistema se garantizará mediante el diseño de protocolos de integración que permitan la expansión de la red de sensores y del sistema de monitoreo a otros ecosistemas forestales con características diversas. Esta adaptabilidad a nuevas variables ambientales permitirá una aplicación más amplia y efectiva del sistema. Además, se evaluará la implementación de paneles solares de mayor capacidad para asegurar un suministro energético constante y sostenible, especialmente en aquellas áreas con baja exposición a la luz solar.

El uso efectivo de los resultados obtenidos es fundamental. Los datos recolectados se compartirán con organizaciones dedicadas a la conservación de la biodiversidad y la gestión forestal, fomentando la toma de decisiones informadas y promoviendo la colaboración interinstitucional. Asimismo, se implementarán iniciativas para sensibilizar a las comunidades locales sobre la importancia del monitoreo forestal y se explorarán activamente oportunidades para su participación en la conservación del entorno.

Finalmente, se establece un compromiso con el seguimiento continuo y la investigación futura. Se evaluará constantemente el rendimiento del sistema en diversas condiciones climáticas y temporales, con el objetivo de identificar áreas de mejora tecnológica. Paralelamente, se mantendrá una vigilancia activa sobre las tecnologías emergentes, como micrófonos con mayor resistencia y drones con mayor autonomía, con el fin de superar las limitaciones que puedan surgir en el desarrollo del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones. (2023). Informe técnico: It-crds-gr-2022-046 [Último acceso: 20 de noviembre de 2024]. https://www.arctotel.gob.ec/wp-content/uploads/2023/05/informe_it-crds-gr-2022-046.pdf
- Arduino. (2023). Getting started with arduino [Último acceso: 20 de noviembre de 2024]. <https://docs.arduino.cc/learn/starting-guide/getting-started-arduino/>
- Avellán Beltrán, E. G., Madrid Mosquera, E. E., et al. (2018). *Diseño de una red de sensores inalámbricos con tecnología zigbee para la conservación del bosque protegido de la espol*. [B.S. thesis]. ESPOL. FIEC.
- Bastidas Cevallos, D. R. (2016). *Diseño e implementación de un prototipo de red de sensores inalámbricos para detectar incendios en el parque metropolitano guanguiltagua de quito* [B.S. thesis]. Quito: Universidad de las Américas, 2016.
- bin Uzayr, S. (2022). *Mastering visual studio code: A beginner's guide*. CRC Press.
- Cadena Montero, R. A., Ocaña Cercado, A. E., et al. (2023). Observatorio de la biodiversidad animal en el bosque protector prosperina mediante técnicas de aprendizaje profundo y videovigilancia. *ESPOL. FIEC*.
- Camposano Huallullo, J. C. (2017). Diseño y fabricación de un prototipo de un quadrotor equipado con una cámara y un raspberry pi para transmitir fotografías y videos.
- Chacón, M. (2019). Resumen del estado del monitoreo forestal en latinoamérica y el caribe. *XI Congreso Forestal Nacional de Guatemala. Alta Verapaz (Guatemala), 2019*.
- Cuevas, J. L. S., Castillo, M. M. G., Peña, L. J. M., Jácome, O. S., & Pacheco, A. E. V. (2023). Monitoreo de temperatura y humedad ambiental con lorawan: lot en el desafío energético y el cambio climático. *Revista IPSUMTEC*, 6(5), 60–67.
- Gallardo-Salazar, J. L., Pompa-García, M., Aguirre-Salado, C. A., López-Serrano, P. M., & Meléndez-Soto, A. (2020). Drones: Tecnología con futuro promisorio en la gestión forestal. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 11(61), 27–50.
- Hoyos Cardona, L. A., Ulloa, J. S., & Parra Vergara, J. L. (2021). Detección automatizada de cantos de aves continúa siendo un desafío: El caso de warbler y megascops centralis (búho del chocó). *Biota colombiana*, 22(1), 149–163.
- LIMACO, C. A. J. (2020). Solución iot para detección de sonidos medioambientales mediante aprendizaje profundo/iot solution for environmental sounds detection through deep learning.

- Monk, S., & McCabe, M. (2016). *Programming arduino: Getting started with sketches* (Vol. 176). McGraw-Hill Education New York.
- Salas-Pérez, W. (2005). Diseño e implementación de un sensor para la detección de motosierras de la red inalámbrica de telecomunicaciones para la protección ambiental en el bosque.
- Zambrano Salgado, G. D., Velez Zambrano, J. R., et al. (2024). Desarrollo de una interfaz de hardware y software para la transmisión de datos de geolocalización y estado de drones a través de lorawan. *ESPOL. FIEC*.

APÉNDICES

A Plan de Precios

Stock de la Propuesta:

	Equipos	Cant.	Valor Inicial	Valor Total	Cantidad de Nodos	TOTAL
	Nodo de Sensores	ESP32 LoRa Placa de Desarrollo V3	1	\$ 30.00		
Sensor DHT11		1	\$ 3.00	\$ 3.00		
Módulo de sensor de sonido SPH0645LM4H		1	\$ 20.00	\$ 20.00		
Sensor de Luz BH1750		1	\$ 4.30	\$ 4.30		
Sensr de Lluvia + placa		1	\$ 2.75	\$ 2.75		
Sensor de Humedad V1.2		1	\$ 3.00	\$ 3.00		
Panel Solar 5v 165mm x 120mm		1	\$ 2.45	\$ 2.45		
Convertidor DC - DC 0.9v-5v a 5v		1	\$ 1.50	\$ 1.50		
Módulo Cargador de Batería TP4065		1	\$ 2.85	\$ 2.85		
Batería Skywolfeye		1	\$ 9.00	\$ 9.00		
Prototipo 3D PLA		1	\$ 20.00	\$ 20.00		
Cables y Conectores		1	\$ 4.00	\$ 4.00		
Módulo Clock DS3231		1	\$ 4.00	\$ 4.00		
Placa PCB		1	\$ 10.00	\$ 10.00		
Ensamblaje		1	\$ 30.00	\$ 30.00		
TOTAL				\$ 146.85		
Gateway	Raspberry Pi Zero 2 W	2	\$ 40.00	\$ 80.00	1	\$ 229.00
	Placa de expansión UPS para Raspberry Pi Zero 2W	2	\$ 45.00	\$ 90.00		
	Disipador térmico C296 de 2 W	2	\$ 15.00	\$ 30.00		
	Cables y Conectores	1	\$ 4.00	\$ 4.00		
	Ensamblaje	1	\$ 25.00	\$ 25.00		
	TOTAL					
TOTAL					1	\$ 669.55

Inversión Inmobiliaria:

Equipos	Características	Cant.	Valor inicial por unidad de equipo	Valor Total	Depreciación del 1er año al 33%	Depreciación del 2do año al 33%	Depreciación del 3er año al 33%
Laptop	Procesador: Intel Alder Lake Quad-Core de 12ª generación, 4 núcleos, 4 hilos, SSD de 1TB.	2	\$1,400.00	\$2,800.00	\$924.00	\$619.10	\$414.80
Pantalla Adicional	Monitor de 21 Pulgadas	1	\$245.00	\$245.00	\$164.15	\$83.30	\$2.45
Escritorio	Mesa de madera, multipropósito	2	\$250.00	\$500.00	\$335.00	\$170.00	\$5.00
Sillas Ergonómicas	Altura ajustable y reclinable	2	\$80.00	\$160.00	\$107.20	\$54.40	\$1.60
TOTAL DE LA INVERSIÓN			\$				3,705.00

Mano de Obra (2 Meses):

Descripción	Cant.	Costo	Tiempo(Meses)	Total
Ingenieros en Telemática	2	\$ 900.00	2	\$ 3,600.00
Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IEES)	2	\$ 109.35	2	\$ 437.40
TOTAL MANO DE OBRA		\$		4,037.40

Inversión inicial para un periodo de 2 meses:

INVERSIÓN INICIAL TOTAL	
Inversión de mobiliario	\$ 3,705.00
Mano de Obra	\$ 4,037.40
Stock de Partes	\$ 669.55
Arriendo y servicios básicos (2 Meses)	\$ 1,020.00
Publicidad (2 Meses)	\$ 2,000.00
Capital de inversión para la compra de materia prima	\$ 3,000.00
TOTAL	\$ 14,431.95

Precio de venta al público:

Servicio	Cantidad	Costo	Margen	Precio	Utilidad
Red de Sensores: 3 Nodos, 1 Gateway	1	\$ 669.55	45%	\$ 1,488.02	\$ 818,47