

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**DISEÑO, FABRICACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE UN SISTEMA
WMSN PROTOTIPO DE CÁMARAS TRAMPA COMO
HERRAMIENTA PARA REALIZAR INVENTARIOS DE MAMIFEROS
MAYORES EN EL MARCO DEL PROYECTO TAPIRCHIP**

**Tesis para optar el título profesional de Ingeniero de las
Telecomunicaciones**

AUTOR:

Eudomar Grover Catacora Contreras

ASESOR:

Mg. Pastor David Chavez Muñoz

Lima, noviembre de 2020

RESUMEN

La presente tesis plantea el diseño, fabricación y programación de un sistema WMSN prototipo de cámaras trampa de bajo consumo energético y de alta resolución basado en hardware de código abierto e integrado con un sistema de comunicación inalámbrica que sirve como herramienta para realizar inventarios de mamíferos mayores. En el capítulo 1, se expone el contexto actual de la biodiversidad peruana, se profundiza en el concepto de inventario de fauna silvestre enfatizando su importancia como instrumento generador de información actualizada y confiable sobre la diversidad de especies. Finalmente, se explica la importancia y los objetivos de la presente tesis. En el capítulo 2, se describe a las cámaras trampa; en cuanto a su evolución, sus características técnicas, su funcionamiento, sus ventajas, desventajas y su desempeño como dispositivos de recolección de datos. Por otro lado, se profundiza en el concepto de redes de sensores inalámbricos (WSN) y cómo estas proveen comunicación inalámbrica a las cámaras trampa, también llamados nodos sensores. En el capítulo 3, se definen los tipos de nodos sensores (nodo sensor sumidero y nodo sensor trampa) que conforman la WMSN prototipo de cámaras trampa. Finalmente, se detalla la programación del código de cada uno de los nodos sensores que conforman la WMSN mediante su flujo de funcionamiento. En el capítulo 4, se muestran los resultados de las pruebas de consumo de energía de los nodos sensores. Por otro lado, se exponen los resultados de pruebas de rendimiento de red en función a los indicadores RSSI, packet data rate y throughput. Finalmente, se detalla el tiempo de captura de imagen desde que se activa el sensor PIR hasta que la imagen es almacenada en la memoria.

DEDICATORIA



A mis padres

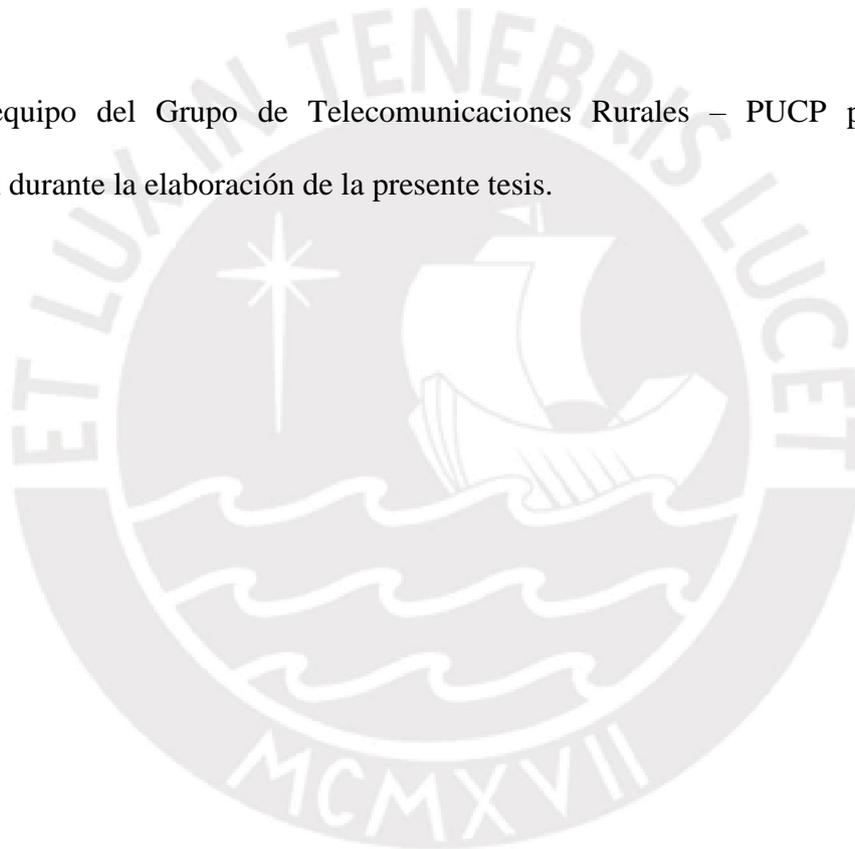
AGRADECIMIENTOS

A todos los profesores y compañeros de estudios de la especialidad de Ingeniería de las Telecomunicaciones que han contribuido en mi formación personal, académica y profesional.

A mi asesor, Mg. Pastor David Chavez Muñoz, por la orientación y supervisión constante en el proyecto.

A mi mentor, Mg. Joel Fernando Palomino Masco, por su guía constante durante el desarrollo del proyecto.

A todo el equipo del Grupo de Telecomunicaciones Rurales – PUCP por su apoyo incondicional durante la elaboración de la presente tesis.



ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	x
INTRODUCCIÓN	11
Capítulo 1: Biodiversidad Peruana: Contexto, Preservación e Inventario de Fauna Silvestre	12
1.1 Contexto	12
1.2 Organismos nacionales de biopreservación	13
1.2.1 MINAM	13
1.2.2 MINAGRI	18
1.3 Organismos internacionales de biopreservación	19
1.3.1 UICN	19
1.3.2 WWF	20
1.4 Inventario de fauna silvestre	20
1.4.1 Métodos de inventario de mamíferos	21
1.5 Importancia de la tesis	22
1.6 Objetivo general	24
1.7 Objetivos específicos	24
Capítulo 2: Cámaras Trampa y Redes de Sensores Inalámbricos	25
2.1 Cámaras trampa	25
2.1.1 Evolución	25
2.1.2 Definición	28
2.1.3 Ventajas	34
2.1.4 Desventajas	35
2.1.5 Ejemplos de inventario de mamíferos en el Perú	36
2.2 Redes de sensores inalámbricos (WSN)	42
2.2.1 Red de sensores inalámbricos multimedia (WMSN)	42

2.2.2	Topología en malla	43
2.2.3	Estándar IEEE 802.15.4	43
2.2.4	Protocolo DigiMesh	44
Capítulo 3: Diseño, Fabricación y Programación		45
3.1	TapirChip	45
3.2	Sistema prototipo WMSN de cámaras trampa	46
3.2.1	Nodo sensor sumidero.....	46
3.2.2	Nodo sensor trampa	46
3.3	Selección de componentes de la WMSN prototipo de cámaras trampa.....	46
3.3.1	Placa de referencia y procesador.....	47
3.3.2	Cámara digital.....	48
3.3.3	Flash.....	49
3.3.4	Sensor PIR	51
3.3.5	Radio.....	51
3.3.6	RTC (Real-time clock).....	52
3.3.7	Memoria no volátil.....	53
3.3.8	Batería.....	53
3.4	Diseño de las placas PCB.....	54
3.5	Fabricación de la placa PCB y soldado de componentes	57
3.6	Implementación del código	61
3.6.1	Nodo sensor sumidero.....	62
3.6.2	Nodo sensor trampa	63
Capítulo 4: Pruebas y Resultados		64
4.1	Pruebas de consumo de energía	64
4.1.1	Secuencia lógica.....	65
4.1.2	Resultados obtenidos	66

4.2	Pruebas de rendimiento de red y tiempo de captura de imagen	69
4.2.1	Secuencia lógica.....	69
4.2.2	Resultados obtenidos	71
CONCLUSIONES		77
RECOMENDACIONES.....		79
BIBLIOGRAFÍA		80



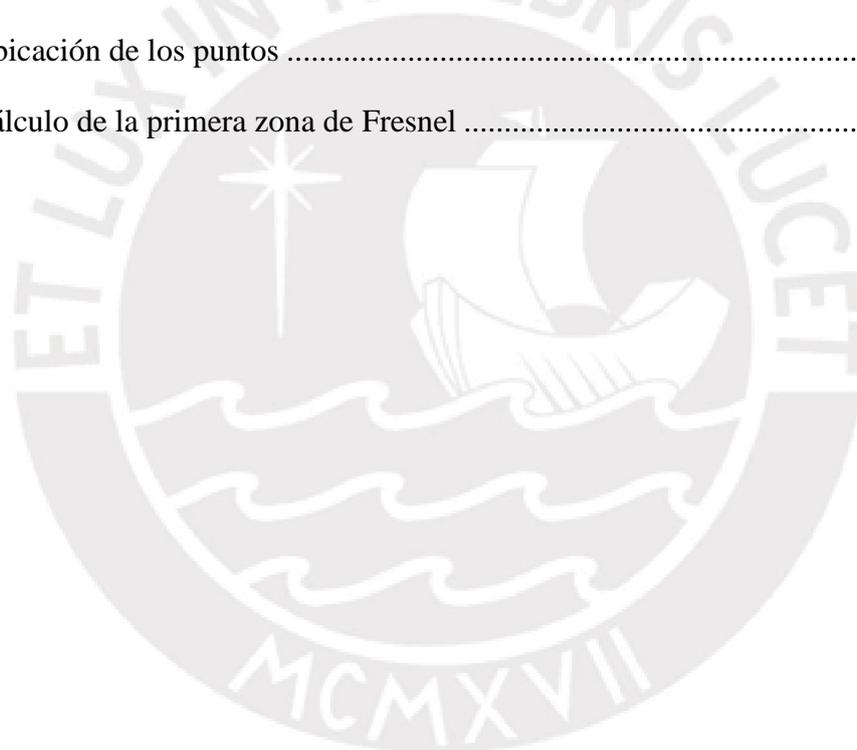
LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Organigrama del MINAM	14
Figura 1-2: Mapa de Áreas Naturales Protegidas por el Estado	17
Figura 1-3: Organigrama del MINAGRI	19
Figura 1-4: Pérdida de bosques húmedos amazónicos desde el 2000 al 2013.....	23
Figura 2-1: Mapache fotografiado con cámara trampa en la costa noreste del lago Whitefish, región del Lago Superior de Michigan en 1903.....	26
Figura 2-2: Número de publicaciones anuales de artículos científicos que mencionan “cámaras trampa” (u otros sinónimos como cámaras automáticas y cámaras remotas) publicadas en webs de ciencia.	28
Figura 2-3: Partes de cámara trampa	29
Figura 2-4: Comparación de fotografías utilizando diferentes flashes. En (A) se utilizó flash blanco y en (B) flash infrarrojo.....	32
Figura 2-5: Diagrama del campo de visión y la zona de detección para 2 tipos de cámara trampa. En (A) la zona de detección es más amplia que el campo de visión y en (B) la zona de detección es más estrecha que el campo de visión.....	34
Figura 2-6: Ubicación del Santuario Nacional Tabaconas Namballe.....	37
Figura 2-7: Tapir de Montaña captada por medio de cámara Bushnell en Páramo dentro del Santuario Nacional Tabaconas Namballe	38
Figura 2-8: Oso Andino captado por medio de cámaras trampa en Bosque montano dentro del SNTN	39
Figura 2-9: Área de implantación de las 3 primeras cámaras trampa en el norte del Parque ..	40
Figura 2-10: Nodos DigiMesh	44
Figura 3-1: Arduino Mega 2560	48
Figura 3-2: ATMEGA 2560 del fabricante Microchip Technology	48
Figura 3-3: Arducam OV5642 5 MP	49
Figura 3-4: Vista posterior del flash	50

Figura 3-5: Vista posterior del flash con cámara	50
Figura 3-6: Sensor PIR modelo AMN41121 del fabricante Panasonic	51
Figura 3-7: Radio XBee-PRO 900HP del fabricante Digi.....	52
Figura 3-8: RTC DS3231	53
Figura 3-9: Diagrama esquemático del nodo	55
Figura 3-10: Diseño de placa electrónica del nodo sensor sumidero y trampa	56
Figura 3-11: Anverso de la placa PCB fabricada.....	57
Figura 3-12: Reverso de la placa PCB fabricada	57
Figura 3-13: Anverso de la placa PCB con componentes.....	58
Figura 3-14: Reverso de la placa PCB con componentes	58
Figura 3-15: PCB con montaje de radio XBee-PRO 900HP	59
Figura 3-16: PCB con montaje de todos sus componentes.....	59
Figura 3-17: Nodo sensor con case - vista exterior.....	60
Figura 3-18: Nodo sensor con case – vista interna	61
Figura 3-19: Diagrama de flujo del funcionamiento del nodo sumidero.....	62
Figura 3-20: Diagrama de flujo del funcionamiento del nodo trampa.....	63
Figura 4-1: Puntos de prueba	70
Figura 4-2: Prueba a 50 m del punto inicial.....	73
Figura 4-3: Prueba a 100 m del punto inicial.....	73
Figura 4-4: Prueba a 150 m del punto inicial.....	74
Figura 4-5: Prueba a 200 m del punto inicial.....	74
Figura 4-6: Throughput a una distancia de 50m	75
Figura 4-7: Tiempo de captura de imagen	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1: Sistema de Áreas Naturales Protegidas por el Estado	16
Tabla 2-1: Tiempo de registro por cada cámara trampa	41
Tabla 2-2: Frecuencia de captura de las especies registradas	41
Tabla 4-1: Consumo de corriente por componente del nodo sensor trampa por día	67
Tabla 4-2: Duración del nodo trampa usando diferentes baterías.....	67
Tabla 4-3: Consumo energético – nodo sumidero	68
Tabla 4-4: Consumo energético de un nodo sumidero cuando soporta a varios nodos trampa	69
Tabla 4-5: Ubicación de los puntos	70
Tabla 4-6: Cálculo de la primera zona de Fresnel	71



INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la dimensión ambiental ha cobrado gran importancia como factor clave en el desarrollo social y económico de cualquier país, sobre todo en aquellos que poseen gran diversidad de ecosistemas y fauna silvestre; como el Perú, que ocupa el décimo puesto en el ranking mundial de áreas con mayor densidad forestal con más de la mitad de su superficie cubierta por bosques. Debido a ello, los organismos nacionales en cooperación con los organismos internacionales de biopreservación promueven la incorporación de la variable ambiental en las políticas y programas sectoriales a diferentes niveles de gobierno. [1, 2]

Sin embargo, existen muchos problemas relacionados a la preservación forestal y de fauna silvestre, por ejemplo, la WWF estima que en el año 2030 la Amazonia Peruana será una de las 11 regiones con mayor expectativa de presentar mayor deforestación y degradación de los bosques a nivel mundial. [2]

Estos problemas forestales están estrechamente ligados a la pérdida de especies de la fauna silvestre. Además, en la última década, el incremento de proyectos de inversión en minería e hidrocarburos ha generado gran demanda del uso de inventarios de especies como herramienta fundamental para la elaboración de evaluaciones de impacto ambiental, de esta manera se garantiza la preservación de la biodiversidad.

Ante la necesidad de inventarios más confiables y en concordancia con el avance tecnológico, las cámaras trampa se han convertido en un método frecuente para el registro de mamíferos medianos y grandes.

El objetivo general de la tesis es diseñar, fabricar y programar un sistema WMSN prototipo de cámaras trampa de bajo consumo energético y de alta resolución basado en hardware de código abierto e integrado con un sistema de comunicación inalámbrica.

Capítulo 1: Biodiversidad Peruana: Contexto, Preservación e Inventario de Fauna Silvestre

En este capítulo se expone el contexto actual de la biodiversidad peruana, haciendo un análisis de la situación nacional. También se describe el alcance y las funciones de los organismos nacionales e internacionales de biopreservación. Por otro lado, se profundiza en el concepto de inventario de fauna silvestre enfatizando su importancia como instrumento generador de información actualizada y confiable sobre la diversidad de especies, para la toma de decisiones, la promoción de cambios, la evaluación de logros en el manejo forestal sostenible, elaboración de estudios de impacto ambiental y la valoración de los bosques mediante su aporte al PBI. Finalmente, se explica la importancia y los objetivos de la presente tesis.

1.1 Contexto

A nivel mundial, el Perú es uno de los países con mayor diversidad de ecosistemas y de especies. Cuenta con 84 zonas de vida de Holdrige de las 117 que son reconocidas en el planeta, comprendidas en una gran diversidad de geformas, tipos de vegetación y climas [3]. En cuanto

a la fauna silvestre, se tiene 1849 especies de aves [4], 580 especies de anfibios [5], 452 especies de reptiles [6] y 508 especies de mamíferos [7].

Las aves son consideradas como indicadores de la calidad del ambiente y proveen funciones ecosistémicas vitales, porque tienen diferentes grados de sensibilidad a alteraciones como la fragmentación del hábitat, los cambios estructurales del sotobosque y la degradación o recuperación de hábitats [8], entre otros.

Los anfibios y reptiles son organismos que se encuentran posiblemente en todos los ambientes naturales de zonas tropicales y subtropicales del mundo. Algunas de sus especies son reconocidas como indicadores y a través de su presencia y abundancia muestran señales de condiciones ecológicas “saludables” o sensibles a potenciales cambios ambientales ocasionados por actividades humanas. [9]

Los mamíferos conforman el grupo de vertebrados con la mayor distribución geográfica a escala global, debido a su gran adaptabilidad a variados ámbitos geográficos. Mundialmente, los mamíferos también incluyen una gran cantidad de especies amenazadas de forma directa por las actividades humanas, como la cacería y la destrucción de hábitats. [9]

Esta biodiversidad ecológica representa una riqueza natural que implica importantes ventajas competitivas, responsabilidades sobre el uso sostenible y conservación de los recursos naturales y biológicos como patrimonio del Perú y del mundo. [9]

1.2 Organismos nacionales de biopreservación

1.2.1 MINAM

El Ministerio del Ambiente (MINAM) promueve el uso y la conservación de los recursos naturales de manera sostenible, la puesta en valor de la biodiversidad y la calidad del medio ambiente en beneficio de la población y su propio entorno. Impulsa, en el marco del

crecimiento verde, iniciativas que contribuyan a la mitigación y adaptación al cambio climático, enfocándose en las que agregan un valor al capital natural, a través de bionegocios y econegocios y trabajo con la población local. [1]

A continuación, se muestra el organigrama correspondiente a la organización del MINAM:

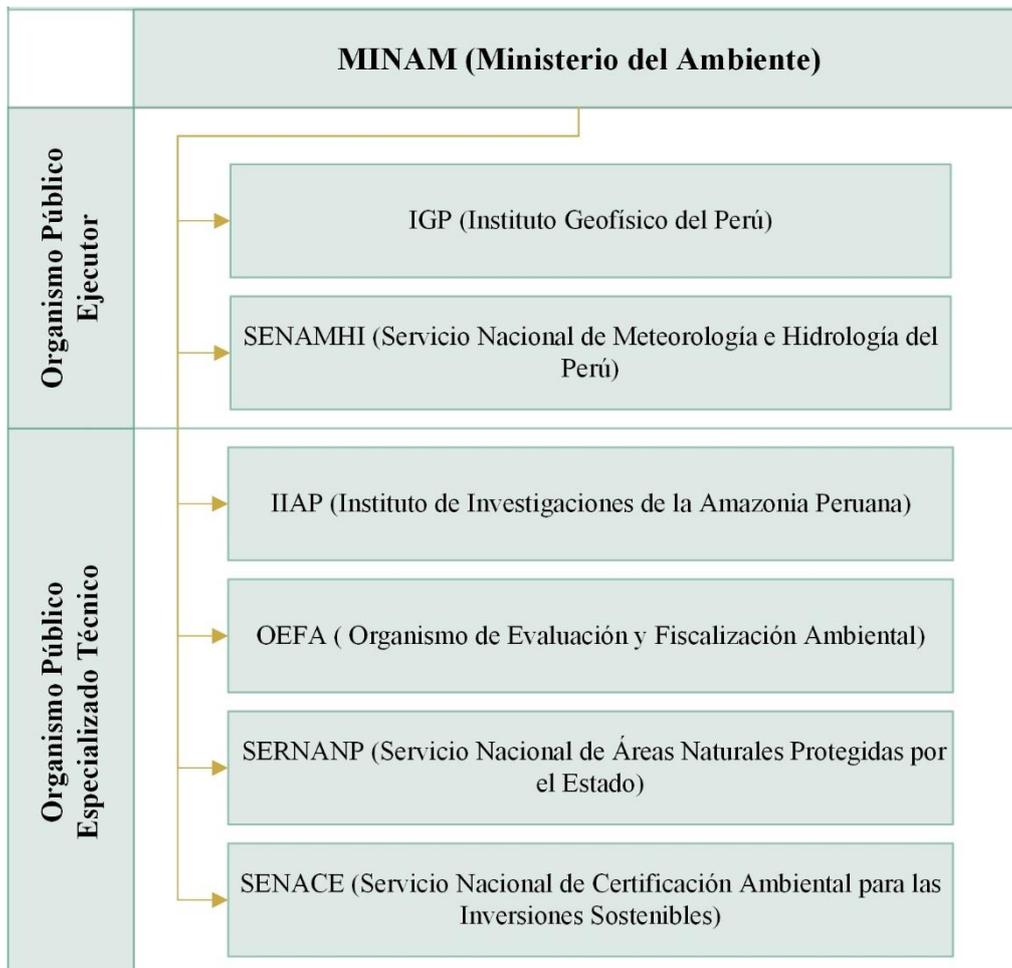


Figura 1-1: Organigrama del MINAM

Fuente: [10]

Si bien este sector tiene a su cargo organismos públicos tanto ejecutores como especializados técnicos, este proyecto se enfoca en los que se detalla a continuación:

1.2.1.1 IIAP

El Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana (IIAP) es una institución que se especializa en la evaluación, control y uso racional de los recursos naturales, mediante la elaboración de investigaciones científicas y tecnológicas en combinación con actividades económicas que permitan alcanzar el desarrollo sostenible de la población asentada en la región amazónica. Dentro de las funciones /actividades más relevantes que realiza el IIAP se encuentran las siguientes [11]:

- Identificación y evaluación de impactos sobre los ecosistemas y la biodiversidad amazónica.
- Desarrollo rural sostenible y calidad de vida de las poblaciones amazónicas.
- Valoración de los conocimientos tradicionales y la identidad cultural amazónica.

1.2.1.2 SERNANP

El Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP) es un Organismo Público Técnico Especializado adscrito al Ministerio del Ambiente que se encarga de la dirección y el establecimiento de los criterios técnicos y administrativos necesarios para conservar las Áreas Naturales Protegidas (ANP) y de asegurar que la diversidad biológica sea protegida. Asimismo, se encarga de regir el Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SINANPE) y realizar sus funciones coordinando con gobiernos regionales, locales y dueños de predios reconocidos como áreas de conservación privada. [12]

- **SINANPE**

El objetivo principal del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SINANPE) es contribuir al desarrollo sostenible del Perú mediante la conservación de Áreas Naturales Protegidas (ANP) cuya gestión y administración está a cargo del SERNANP. [12]

- **ANP**

Un Área Natural Protegida (ANP) es el espacio continental y/o marino del territorio nacional reconocido, establecido y protegido legalmente por el Estado Peruano, ya que tiene gran importancia para la preservación de la biodiversidad colaborando con el desarrollo sostenible del país por sus valores asociados al interés cultural, paisajístico y científico. [12]

En la Tabla 1-1 se muestra el listado de Áreas Naturales Protegidas, Áreas de Conservación Regional y Áreas de Conservación Privada:

Categoría	N°	Extensión
PARQUE NACIONAL	15	10 394 366.70
SANTUARIO NACIONAL	9	317 366.47
SANTUARIO HISTÓRICO	4	41 279.38
RESERVA NACIONAL	15	4 652 851.63
REFUGIO DE VIDA SILVESTRE	3	20 775.11
BOSQUE DE PROTECCIÓN	6	389 986.99
RESERVA PAISAJÍSTICA	2	711 818.48
RESERVA COMUNAL	10	2 166 588.44
COTO DE CAZA	2	124 735.00
ZONA RESERVADA	9	625 755.25
TOTAL DE ANP	75	
ÁREAS DE CONSERVACIÓN REGIONAL	25	3'245,188.63
ÁREAS DE CONSERVACIÓN PRIVADA	147	384,918.98
TOTAL		22'645,810.51

Tabla 1-1: Sistema de Áreas Naturales Protegidas por el Estado

Fuente: [12]

Cabe resaltar que el porcentaje de la superficie terrestre y marina protegida como Área Natural representa un 17.31% del total del territorio nacional.

A continuación, se detalla gráficamente la ubicación de cada Área Natural Protegida:



Figura 1-2: Mapa de Áreas Naturales Protegidas por el Estado

Fuente: [13]

1.2.1.3 OEFA

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) impulsa y promueve la implementación de las mejoras del Sistema Nacional de Gestión Ambiental, además se encarga del cumplimiento de las obligaciones ambientales en los agentes económicos, garantizando un proceso articulado, efectivo y transparente con el objetivo de velar por el equilibrio entre la inversión en actividades económicas y la protección ambiental del país. [14]

1.2.1.4 SENACE

El Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles (SENACE) es un organismo público técnico especializado que tiene por principal función revisar y aprobar los Estudios de Impacto Ambiental detallados (EIA-d) de mayor envergadura de los proyectos de inversión pública, privada o de capital mixto de alcance nacional que incluyan construcciones, obras, actividades comerciales y servicios que puedan causar impactos ambientales. [15]

1.2.2 MINAGRI

El Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) es un organismo público rector en materia agraria que desarrolla estrategias orientadas al uso sostenible de los recursos forestales y de fauna silvestre, también apoya el emprendimiento productivo y las inversiones bajo criterios de desarrollo económico y social ambientalmente responsable. [16]

A continuación, se muestra un diagrama correspondiente a la organización del MINAGRI:

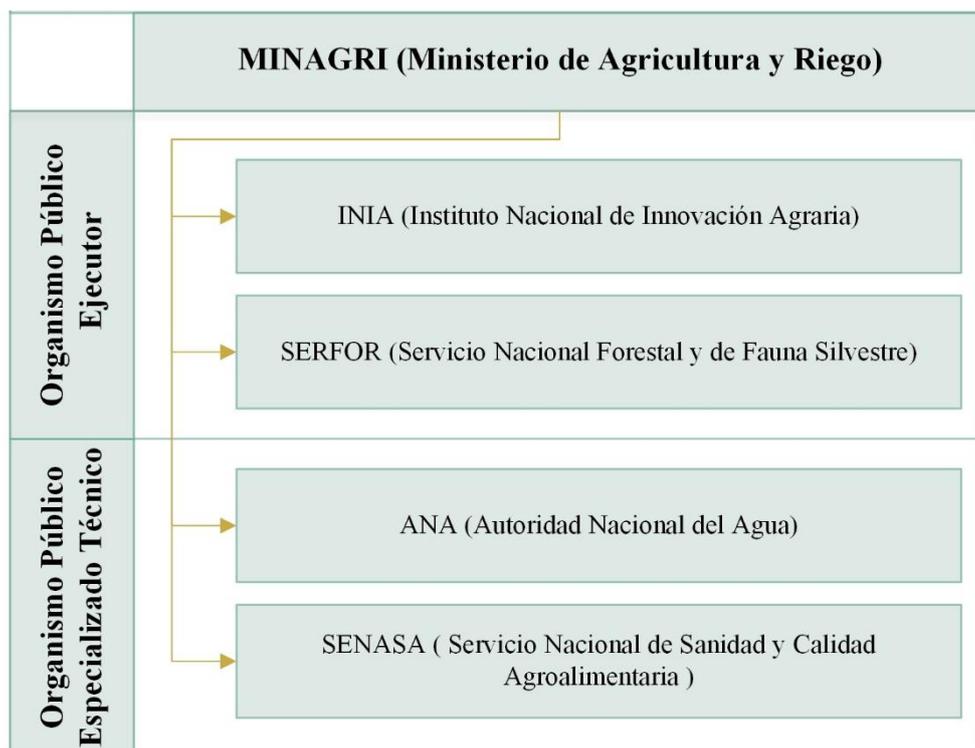


Figura 1-3: Organigrama del MINAGRI

Fuente: [10]

1.2.2.1 SERFOR

El Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) es una entidad que ejerce la rectoría técnica y normativa para gestionar y promover la sostenibilidad y competitividad del patrimonio forestal y la fauna silvestre a través del inventario nacional, en armonía con el interés social, cultural, económico y ambiental del Estado Peruano. [17]

1.3 Organismos internacionales de biopreservación

1.3.1 UICN

La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) es una unión de Estados soberanos, agencias gubernamentales y organizaciones de la sociedad civil. Considerada como la red ambiental más grande del mundo, tiene autoridad mundial en cuanto a la protección de la naturaleza y los recursos naturales, ofreciendo conocimientos y herramientas que hagan

posible el progreso humano, el desarrollo económico y la preservación de los ecosistemas a las entidades públicas, privadas y no gubernamentales. Cuenta con la experiencia, los recursos y el alcance de sus más de 1400 organizaciones adscritas y los aportes de 15000 expertos organizados en varias comisiones dedicadas a la supervivencia de las especies, el derecho ambiental, las áreas protegidas, las políticas ambientales, sociales y económicas, la gestión de los ecosistemas, y la educación y la comunicación. [18]

1.3.2 WWF

World Wildlife Fund (WWF) es la organización de conservación global que cuenta con presencia en más de 100 países y el apoyo de más de 5 millones de socios. Esta fundación desarrolla acciones enfocadas en ámbitos diversos: especies, bosques, océanos, agua dulce, alimentación, clima y energía. En el Perú, WWF viene operando a través de su oficina WWF Perú desde 1994, realiza esfuerzos para garantizar la preservación de la biodiversidad en ecosistemas importantes de la costa, los Andes y la Amazonía, en colaboración con el gobierno central, gobiernos locales y comunidades indígenas, de esta manera fortalece sus capacidades de gestión y administración de los recursos naturales. [19]

1.4 Inventario de fauna silvestre

Es parte del Inventario Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (INFFS) que es un instrumento de alcance nacional que se caracteriza por ser continuo y multipropósito, que permite al país contar con información actualizada y confiable sobre la diversidad de especies, que brinda insumos para la elaboración de herramientas de valoración económica de los bosques al conocer el aporte real del sector forestal al PBI y que asegura el cumplimiento de compromisos internacionales tales como la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático. De esta manera, se garantiza una mejor toma de decisiones en cuanto al manejo de recursos naturales. [20]

1.4.1 Métodos de inventario de mamíferos

Son métodos estandarizados en base al conocimiento y la experiencia de especialistas vinculados al área de la biología, ingeniería forestal y medicina veterinaria que estudian los mamíferos. Para realizar un correcto inventario de mamíferos se consideran 3 subgrupos de trabajo [9]:

- a) Mamíferos pequeños terrestres
- b) Murciélagos
- c) Mamíferos medianos y grandes

Para los fines de esta investigación solo se detallará al último subgrupo:

1.4.1.1 Mamíferos medianos y grandes

Dentro de este subgrupo se encuentran diferentes tipos de mamíferos no voladores que poseen un peso aproximado mayor a 1 kg en su etapa adulta [21]. Los métodos para hacer un inventario de este subgrupo se subdividen en 2 categorías: directos e indirectos.

a) Métodos Directos

Dentro de los métodos directos se consideran la visualización directa de los mamíferos para determinar correctamente la especie a la cual pertenece y la grabación de vocalización, generalmente utilizado como complemento a otros métodos, aunque no exista contacto visual con la especie.

b) Métodos Indirectos

- Rastros y fotografías

Estos registros se realizan generalmente mediante la ubicación de huellas, heces, refugios, huesos, pelos, rasguños, madrigueras y otros [22, 23], debido a que gran parte de este subgrupo son animales terrestres que manifiestan timidez, por lo que usualmente se desplazan de manera

solitaria o en grupos reducidos [24]. Los métodos más utilizados de registro indirecto son las trampas de pelo y/o trampas de huellas y las trampas cámara.

- Entrevistas

Para la realización de estas entrevistas es necesaria la participación de los pobladores locales mediante una conversación informal ya que no tiene una estructura específica y no involucra el uso de cuestionarios, cartillas o libretas que puedan causar confusión al entrevistado. Luego de obtener una descripción detallada, se contrasta con láminas para obtener detalles morfológicos y ecológicos que favorezcan la determinación taxonómica de la especie. Finalmente, debe estar respaldada por el hábitat y la altitud adecuada, es decir debería ser la esperada en la zona.

1.5 Importancia de la tesis

Durante los últimos años, la dimensión ambiental ha cobrado gran importancia como factor clave en el desarrollo social y económico de cualquier país, sobre todo en aquellos que poseen gran diversidad de ecosistemas y fauna silvestre; como el Perú, que ocupa el décimo puesto en el ranking mundial de áreas con mayor densidad forestal con más de la mitad de su superficie cubierta por bosques. Debido a ello, los organismos nacionales en cooperación con los organismos internacionales de biopreservación promueven la incorporación de la variable ambiental en las políticas y programas sectoriales a diferentes niveles de gobierno. [1, 2]

Sin embargo, existen muchos problemas relacionados a la preservación forestal y de fauna silvestre, por ejemplo, la WWF estima que en el año 2030 la Amazonia Peruana será una de las 11 regiones con mayor expectativa de presentar mayor deforestación y degradación de los bosques a nivel mundial. [2]

En el “Reporte de la pérdida de los bosques húmedos amazónicos al 2011- 2013” realizado por el MINAM, se determinó que el promedio anual de la deforestación en los bosques húmedos

amazónicos del país, desde el 2000 al 2013, es de 113 000 ha (1 130 km²), lo que equivale aproximadamente a la mitad de la superficie que ocupa la provincia de Lima. [25]

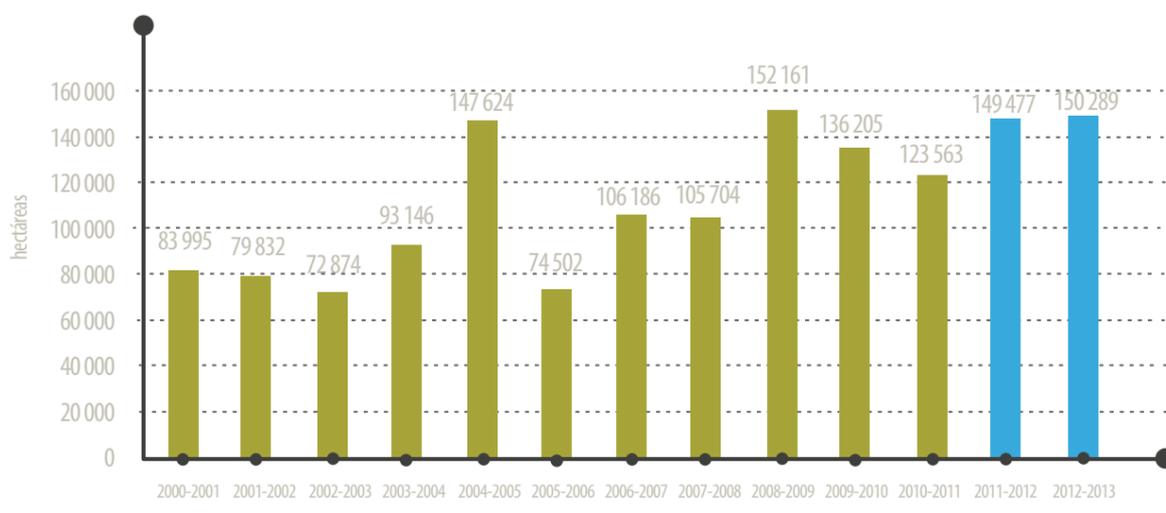


Figura 1-4: Pérdida de bosques húmedos amazónicos desde el 2000 al 2013

Fuente: [25]

Estos problemas forestales están estrechamente ligados a la pérdida de especies de la fauna silvestre. Además, en la última década, el incremento de proyectos de inversión en minería e hidrocarburos ha generado gran demanda del uso de inventarios de especies como herramienta fundamental para la elaboración de evaluaciones de impacto ambiental, de esta manera se garantiza la preservación de la biodiversidad.

Ante la necesidad de inventarios más confiables y en concordancia con el avance tecnológico, las cámaras trampa se han convertido en un método frecuente para el registro de mamíferos medianos y grandes.

Esta tesis presenta una alternativa a las cámaras trampa actualmente utilizadas mediante la implementación de un sistema WMSN prototipo de cámaras trampa, con el fin de contribuir al campo de la zoología y por consiguiente a la preservación de la biodiversidad del país.

1.6 Objetivo general

El objetivo general de la tesis es diseñar, fabricar y programar un sistema WMSN prototipo de cámaras trampa de bajo consumo energético y de alta resolución basado en hardware de código abierto e integrado con un sistema de comunicación inalámbrica.

1.7 Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar los componentes de código abierto para el nodo sensor sumidero y nodo sensor trampa que conforman el sistema WMSN prototipo de cámaras trampa.
- Definir un diseño óptimo, asegurando un bajo consumo energético de las placas de circuito impreso de ambos nodos sensores, en un programa de diseño de diagramas electrónicos para su posterior fabricación.
- Adaptar una cámara de alta resolución e integrar una radio en los nodos sensores sumidero y trampa que permita la transmisión inalámbrica de fotos.
- Fabricar las placas de circuito impreso de ambos nodos sensores y fijar los respectivos componentes de cada nodo sensor.
- Programar las líneas de código para un correcto funcionamiento tanto del nodo sensor sumidero como del nodo sensor trampa que conforman el sistema WMSN prototipo.
- Realizar las pruebas de consumo energético para determinar la autonomía de los nodos sensores sumidero y trampa.
- Determinar el rendimiento de red mediante pruebas en la conexión inalámbrica punto a punto.
- Determinar el tiempo de captura de imagen de la cámara de los nodos sensores.

Capítulo 2: Cámaras Trampa y Redes de Sensores Inalámbricos

En este capítulo se describe a las cámaras trampa; en cuanto a su evolución, sus características técnicas, su funcionamiento, sus ventajas, desventajas y su desempeño como dispositivos de recolección de datos altamente efectivos ya que son utilizados como herramienta de apoyo por los investigadores ligados a la biología en la elaboración de inventario de mamíferos. Por otro lado, se profundiza en el concepto de redes de sensores inalámbricos y cómo estas proveen comunicación inalámbrica a las cámaras trampa, también llamados nodos sensores, que presentan diferentes limitaciones entre las que se pueden mencionar: la memoria limitada, el despliegue en entornos extremos, como alta precipitación o humedad, y la ubicación alejada del acceso a corriente eléctrica.

2.1 Cámaras trampa

2.1.1 Evolución

El uso de cámaras trampa se remonta hace más de 100 años cuando el pionero en el uso de disparos remotos y fotografía nocturna de fauna silvestre, George Shiras, utilizó un sistema

mecánico de cables junto a una cámara y un flash de magnesio altamente explosivo. Entonces, cada vez que un animal movía los cables bruscamente, la cámara captaba la fotografía con la ayuda del flash. Las primeras fotografías de vida nocturna fueron realizadas en Estados Unidos y Canadá. [26]



Figura 2-1: Mapache fotografiado con cámara trampa en la costa noreste del lago Whitefish, región del Lago Superior de Michigan en 1903

Fuente: [27]

Hasta la década de 1920, el inventario tradicional se realizaba con pistolas y trampas letales que acababan con la vida del animal y no permitían un correcto censo. A raíz de ello, surgieron

adaptaciones de los métodos de Shiras que fueron aplicados por dos investigadores; Frederick Walter Champion, un ingeniero forestal del Servicio Forestal Imperial Británico en India, que usó cables de disparo y placas de presión para capturar con cámara la vida silvestre de los alrededores del Himalaya [28] y en simultáneo, Frank Chapman, el primer conservador de aves del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York, que realizó el primer inventario de especies tales como tapires salvajes, coatíes, ocelotes y puma con cámaras trampa en Panamá [29]. A pesar de ello, no fue hasta la década de 1950 que las cámaras trampa realmente comenzaron a explorarse como herramientas científicas para recopilar datos sistemáticos y cuantitativos.

Durante las décadas de 1950 y 1990, el uso de las cámaras trampa tenían dos objetivos: observar los comportamientos de los animales sin causar perturbaciones y registrar eventos "hiper-raros" que requerían miles de horas en el campo. De esta manera, las cámaras trampa se activaban mecánicamente usando pedales, cables de tracción o cables trampa, con haces de luz, y por lo general necesitaban baterías grandes y pesadas para dar energía al flash y a cualquier dispositivo electrónico. Un claro ejemplo de ello fue la implementación de la cámara de Abbott & Coombs (1964) quienes anunciaron triunfantes que su cámara sólo pesaba 21 kg.

A partir de la década de 1990 surgió un periodo de investigación ferviente que trajo consigo la mayor innovación en este campo: la adopción de dispositivos activados por sensores de infrarrojo. Carthew y Slater (1991) instalaron un sensor infrarrojo que emitía un haz de luz infrarroja y que, cuando un animal la interfiere, se activa inmediatamente la cámara. Esto significó una gran ventaja en términos de confiabilidad y precisión en comparación a los sensores mecánicos de la época.

Desde la década del 2000, con los avances de la tecnología de cámara digital, las cámaras trampa se han convertido en dispositivos de recolección de datos altamente efectivos, lo cual ha permitido que los investigadores puedan recopilar datos relevantes sobre la distribución y

abundancia de una gama mucho más amplia de especies. En consecuencia, el número de publicaciones científicas en este campo se ha incrementado drásticamente, como se detalla a continuación:

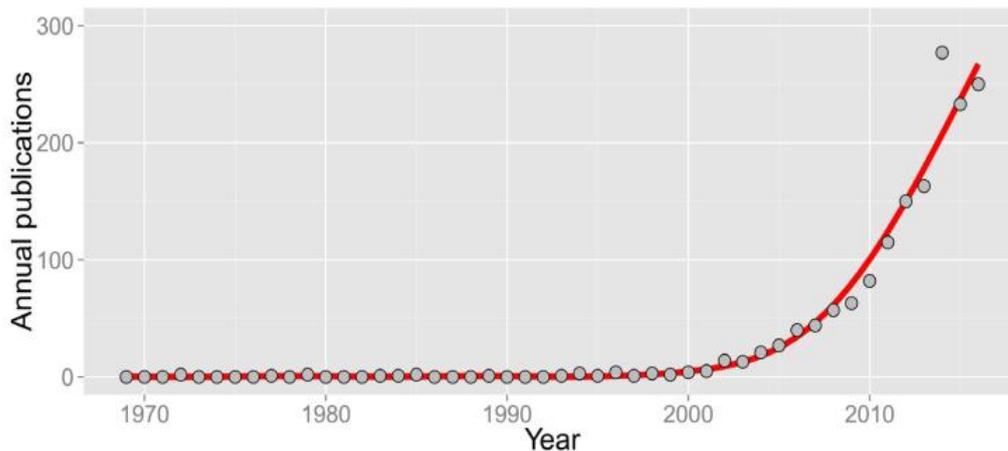


Figura 2-2: Número de publicaciones anuales de artículos científicos que mencionan “cámaras trampa” (u otros sinónimos como cámaras automáticas y cámaras remotas) publicadas en webs de ciencia.

Fuente: [28]

En la actualidad, las cámaras trampa son una parte firmemente arraigada de la ecología y conservación de la vida silvestre moderna. Son participes en más de 1400 publicaciones, y han sido adoptadas por iniciativas globales de monitoreo de la biodiversidad. [30]

2.1.2 Definición

La cámara trampa moderna está compuesta por una cámara digital conectada a un sensor infrarrojo que detecta objetos cálidos que se mueven, como los animales. Cuando un animal pasa en frente, el sensor lo detecta, envía una señal al procesador haciendo que la cámara capture una imagen o un video para almacenarlo en la tarjeta de memoria. Las cámaras trampa se suelen dejar a la intemperie para observar continuamente un área de hábitat durante semanas o incluso meses. [31]

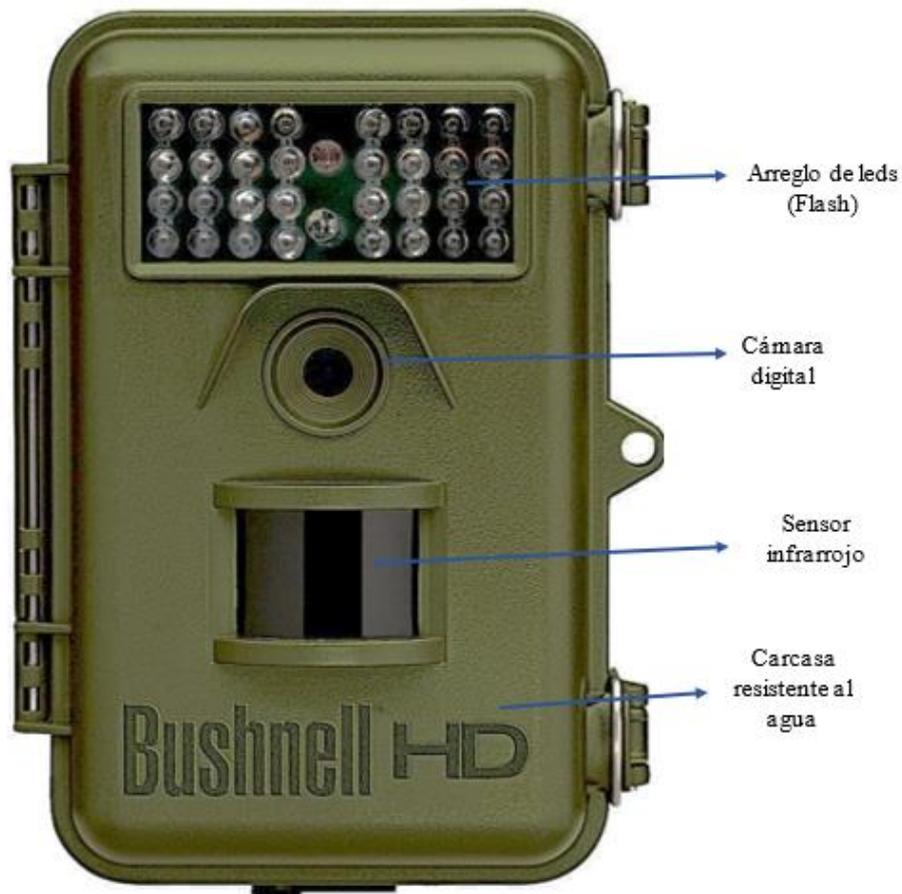


Figura 2-3: Partes de cámara trampa

Fuente: [32]

Las cámaras trampa se consideran “no invasivas”, ya que causan poca o ninguna perturbación en la vida silvestre. Al mismo tiempo, producen registros de carácter permanente y verificable de animales. Dichos registros se utilizan para realizar inventarios de comunidades enteras de especies, incluida la forma en que están estructuradas y cómo las especies interactúan en el espacio y el tiempo. Esto mejora nuestra comprensión de los impactos humanos en la vida silvestre y ayuda a los administradores de la tierra a tomar mejores decisiones a pequeña y gran escala.

A continuación, se detallan las características principales de una cámara trampa:

2.1.2.1 Sensor PIR (Passive Infrared Sensor)

Los sensores infrarrojos pasivos, también llamados sensores de movimiento de calor, registran la radiación infrarroja del fondo de la zona de detección. Cuando un animal ingresa a la zona de detección, causa un cambio rápido en la radiación infrarroja porque es más cálido o más frío que su entorno. Este cambio es registrado por el sensor el cual envía una señal a la cámara para tomar la foto.

Las cámaras trampa que utilizan un sensor PIR tienen la cámara y el sensor integrados en una sola unidad de tal manera que son más compactas y fáciles de configurar que aquellas que utilizan sensores infrarrojos activos (los que consisten en al menos dos unidades), debido a estas características son los sensores de mayor demanda en el área de la investigación científica.

Aunque los sensores PIR son sensibles a los cambios rápidos de temperatura debido al movimiento de la luz solar, movimiento de la vegetación o la precipitación; tienen una amplia zona de detección, son baratos y están ampliamente disponibles. [33]

2.1.2.2 Sensor AIR (Active Infrared Sensor)

Los sensores infrarrojos activos emiten un solo haz infrarrojo desde un emisor a un receptor. Cuando un animal interrumpe el haz, el sensor envía una señal para que la cámara capture una fotografía. Los sensores AIR tienen algunas ventajas. En primer lugar, la altura del haz es ajustable. En segundo lugar, debido a que el emisor y el receptor de IR están separados de la cámara, la cámara se puede colocar de forma remota en una posición más óptima para la captura de imágenes. En tercer lugar, el rango de detección del haz puede ser de hasta 50 metros de largo [34]. Por último, los cambios en la temperatura casi no afectan la detección, pero la nieve, la lluvia, la vegetación y la caída de hojas que interrumpen el haz, causan muchas detecciones falsas [34, 35]. Las cámaras trampa equipadas con sensor AIR son caras, no están ampliamente disponibles y lleva mucho tiempo alinear los diferentes componentes. Por lo tanto, se usan con

poca frecuencia en comparación a los sensores PIR, aunque son particularmente útiles para estudiar animales de sangre fría cuya temperatura corporal es similar a su entorno. [33]

2.1.2.3 Flash incandescente

Las cámaras trampa generalmente utilizan una lámpara de xenón para producir un flash incandescente de luz visible, cuya luz es similar a la emitida por el sol al mediodía. A diferencia del flash infrarrojo, que produce fotografías en escala de grises, el flash incandescente permite capturar fotografías en color que son adecuadas para la identificación de marcas individuales y son de mayor calidad.

Sin embargo, existen algunos inconvenientes con el flash incandescente que influyen en su uso. Por un lado, la lámpara de xenón usa más energía que un flash infrarrojo y, a menudo, requiere mayor tiempo de recuperación (varía desde 1 hasta 60 segundos) [34] que puede ser el período en que otro animal pase en frente de la cámara sin ser detectado. Por otro lado, el destello puede asustar a ciertos animales y conducirlos a evitar o atacar a la cámara trampa [36, 37]. Este cambio en el comportamiento natural es indeseable y puede sesgar los resultados.

2.1.2.4 Flash infrarrojo

El flash infrarrojo es producido por varios LEDs IR. En la noche, las cámaras trampa equipadas con flash infrarrojo producen imágenes en escala de grises; en contraste, en horas diurnas, siempre y cuando se tenga suficiente luz ambiental, se producirán imágenes en color. Si bien la luz infrarroja es mucho menos molesta que un destello blanco brillante y es casi invisible para la mayoría de los animales silvestres; aún emite una luz roja muy débil que es perceptible para algunas especies y afecta el comportamiento natural de las estas.

Aunque las cámaras trampa equipadas con LEDs IR son discretas, algunas veces generan fotografías con menor claridad que las obtenidas con LEDs blancos, lo cual no permite una correcta identificación del mamífero, especialmente si este se mueve rápidamente.



Figura 2-4: Comparación de fotografías utilizando diferentes flashes. En (A) se utilizó flash blanco y en (B) flash infrarrojo.

Fuente: [33]

2.1.2.5 Velocidad de disparo

La velocidad de disparo es el lapso de tiempo entre el instante de la detección y el momento en que se toma la imagen y es una variable importante que está sujeta a diferentes aspectos de una investigación. Por un lado, con una velocidad de disparo rápida, es más probable que un animal que ha sido detectado por la cámara también termine en la imagen. Tal es el caso presente en los senderos, ya que generalmente los animales se mueven rápidamente a lo largo de ellos y es poco probable que permanezcan frente a la cámara. Por otro lado, si la velocidad del disparador es demasiado lenta, el animal podría haber cruzado la zona de detección antes de que se pueda tomar una fotografía, lo que da como resultado imágenes vacías o imágenes con solo piezas del animal, como la cola. Sin embargo, existen lugares en los que la velocidad del disparador no es relevante porque es probable que los animales permanezcan frente a la cámara durante algún tiempo, como pozos de agua, áreas salitrosas y estaciones de cebo o señuelo. [33]

En la actualidad, las velocidades de disparo varían según los modelos y marcas de cámara trampa, estas van desde 0.197 segundos hasta 4.206 segundos. [38]

2.1.2.6 Tiempo de recuperación

El tiempo de recuperación se refiere al intervalo de tiempo entre capturas de fotografías sucesivas y depende principalmente del procesamiento de imágenes. La velocidad de recuperación puede variar desde 0.3 hasta 60 segundos. Un tiempo de recuperación rápido proporciona mayor velocidad para grabar múltiples imágenes del mismo animal, y ofrece una mayor probabilidad de grabar múltiples animales que pasan frente a la cámara al mismo tiempo. [33]

2.1.2.7 Zona de detección

La zona de detección es el área en la que el sensor puede detectar el movimiento de calor. Esta área tiene forma de cono cuyo ancho y rango varía de acuerdo a los modelos y tipos de cámaras. Por un lado, una zona de detección amplia es útil cuando no se sabe dónde aparecerá exactamente un animal frente a la cámara; y una zona de detección estrecha es suficiente para las cámaras ubicadas en un sendero, ya que el animal siempre pasará justo en frente de la cámara. Por otro lado, un rango de detección largo, la longitud de la zona de detección, es útil cuando las cámaras se implementan en espacios amplios y relativamente abiertos. Sin embargo, en lugares que tienen visibilidad restringida por árboles u otra vegetación, el rango de detección no es tan importante. [33]

2.1.2.8 Campo de visión

El campo de visión es el área que es visible en una imagen. Por un lado, cuando la zona de detección es más amplia que el campo de visión (Figura 2-4-A), la ventaja es que la cámara es capaz de fotografiar animales que se mueven rápidamente; mientras que, la desventaja es que la cámara tome fotografías vacías cuando los animales ingresan a la zona de detección, pero sin entrar en el campo de visión. Por otro lado, cuando la zona de detección es más estrecha

que el campo de visión (Figura 2-5 B), la ventaja es que se obtienen fotografías centradas, lo cual puede ser muy útil para la identificación de grandes mamíferos. [39]

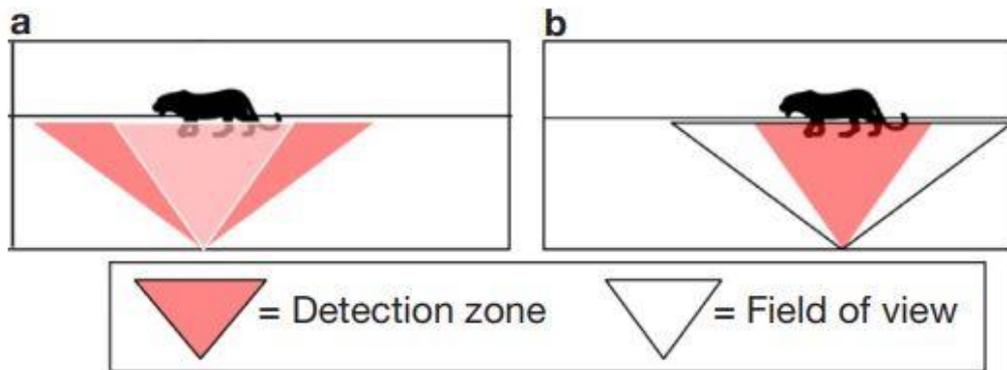


Figura 2-5: Diagrama del campo de visión y la zona de detección para 2 tipos de cámara trampa. En (A) la zona de detección es más amplia que el campo de visión y en (B) la zona de detección es más estrecha que el campo de visión.

Fuente: [39]

2.1.3 Ventajas

- Una sola cámara trampa es capaz de recopilar grandes cantidades de datos durante un período de tiempo muy largo, en comparación con otros métodos de muestreo tales como las trampas vivas, en las que se atrapa a un solo animal; o las placas de seguimiento, en la que se registran decenas de huellas.
- Las cámaras trampa son consideradas un método "no invasivo" porque no capturan físicamente ni dañan a los animales. Es decir, instalados correctamente, permiten el registro digital del comportamiento casi inalterado de los animales.
- Aunque las cámaras trampa se utilizan principalmente con mamíferos de tamaño mediano y grande, siguen siendo un método de muestreo de espectro relativamente amplio por el registro fortuito de aves y reptiles.
- Las cámaras trampa, al funcionar las 24 horas del día, son una forma muy efectiva de tomar muestras de especies nocturnas gracias a los sensores infrarrojos pasivos y los

flashes infrarrojos que permiten "ver en la oscuridad" y descubrir el comportamiento natural de estas especies, a menudo por primera vez.

- Desde la implementación de un sensor electrónico en la cámara trampa, el uso de esta herramienta se ha convertido en un método más repetible y replicable. Por ejemplo, el mismo modelo de cámara trampa puede ser desplegado por diferentes equipos de investigación en lados opuestos del mundo. [26]
- Los registros digitales de las cámaras trampa son de carácter permanente y verificable de una especie o evento, en un momento y lugar en particular. Si bien existen otros métodos verificables como aquellos en los que se atrapa o dispara, los individuos de la especie deben ser sacrificados. Asimismo, el contar con registros digitales permite a los investigadores descubrir nuevas especies, redescubrir especies extintas y tener una mayor extensión de rango de las mismas. De esta manera, los animales pueden ser reevaluados por una comunidad científica más amplia si es necesario, esto es especialmente útil para aquellas especies que son difíciles de identificar; por ejemplo, porque se parecen a otras especies o porque son muy raramente vistas. [40]
- Las imágenes capturadas por la cámara trampa son tan cautivadoras que a menudo son utilizadas como un método efectivo para involucrar a las comunidades locales en cuestiones de vida silvestre, comunicar ciencia, crear conciencia, educar y generar apoyo para una especie o hábitat. [41, 42]

2.1.4 Desventajas

- Aunque los costos laborales recurrentes asociados con las cámaras trampa son bajos, ya que pueden operar sin asistencia en el campo durante largos períodos; el principal inconveniente es el alto costo inicial de los equipos, ya que un estudio requiere una gran cantidad de cámaras trampa que varía de acuerdo a diferentes factores. Por ejemplo, las

cámaras trampa de rango medio cuestan entre 300 y 500 dólares, y un estudio sólido usando cámaras trampa (por ejemplo, involucrando 50 equipos) podría costar alrededor de 15 000 y 40 000 dólares, en función a sus objetivos específicos. Por otro lado, las cámaras trampa producen grandes cantidades de datos, y los costos de mano de obra para almacenarlos y luego procesarlos, a menudo manualmente, pueden ser considerables.

- Las cámaras trampa, como la mayoría de los dispositivos electrónicos, funcionan mal en entornos extremos, como alta precipitación o humedad. Por lo tanto, pueden funcionar mal o quedar irremediablemente dañadas cuando se exponen a la intemperie durante largos períodos.
- El robo y el vandalismo, perpetrados por humanos o la vida silvestre, son limitaciones importantes en los estudios con cámaras trampa en todo el mundo que causan pérdidas significativas de datos y equipos. [33]
- A pesar de que las cámaras trampa tienen un espectro de muestreo relativamente amplio, el registro de animales ectotérmicos y de cuerpo pequeño es complicado, especialmente cuando se utilizan cámaras trampa comerciales con sensores infrarrojos pasivos. Para este tipo de muestreo se necesitan configuraciones a medida, que pueden ser costosas [43]. Por otro lado, las especies acuáticas también están fuera del ámbito de las cámaras trampa, ya que los sensores infrarrojos pasivos no funcionan bajo el agua.

2.1.5 Ejemplos de inventario de mamíferos en el Perú

A nivel nacional, se han realizado varios estudios biológicos basados en los inventarios de animales. A continuación, se detallarán algunos de los monitoreos realizados en diferentes ANPs:

2.1.5.1 Monitoreo de Oso Andino y Tapir de Montaña en el Santuario Nacional Tabaconas Namballe

El Santuario Nacional Tabaconas Namballe (SNTN) se encuentra en el departamento de Cajamarca, provincia de Ignacio, entre los distritos de Tabaconas y Namballe. Tiene una extensión de 32 124.87 hectáreas (321.24 km²).

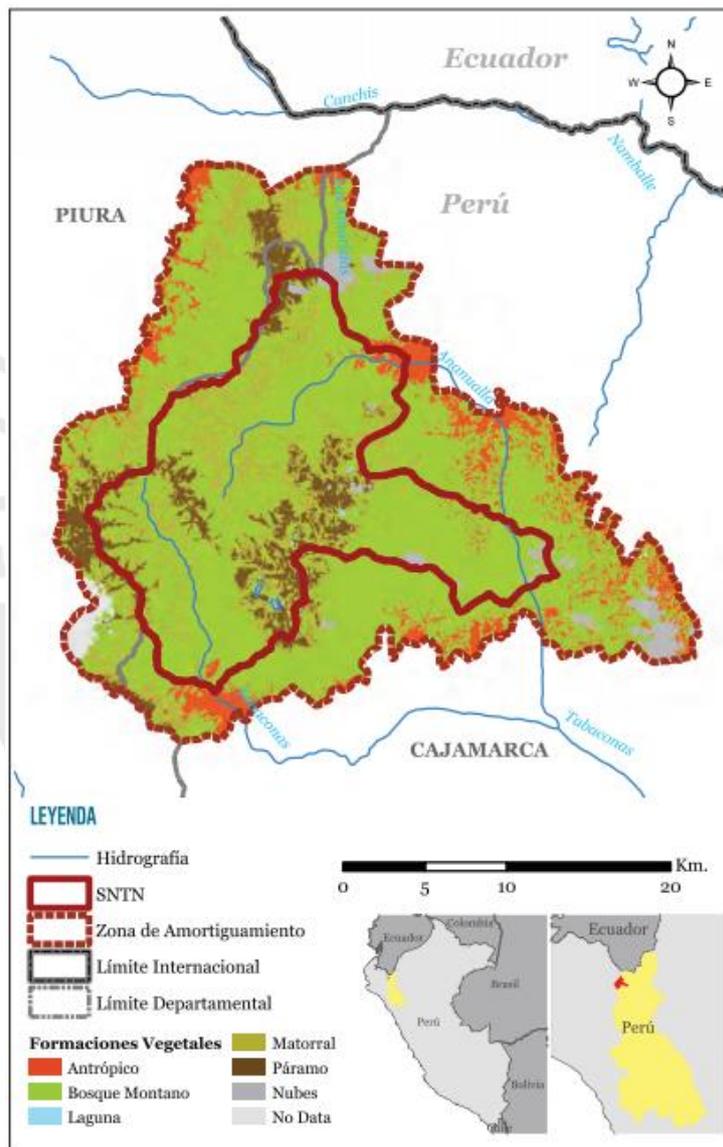


Figura 2-6: Ubicación del Santuario Nacional Tabaconas Namballe

Fuente: [44]

A consecuencia de la caza y la pérdida, degradación y fragmentación de su hábitat; el oso andino y el tapir de montaña son especies consideradas como “vulnerable” y “amenazada”,

respectivamente, según la lista roja de la International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ambas especies son de gran importancia para los ecosistemas en los que habitan, ya que mantienen las funciones ecológicas de los Andes del Norte como la función de regulación hídrica tan importante para las poblaciones de las cuencas que abarca. [44]



Figura 2-7: Tapir de Montaña captada por medio de cámara Bushnell en Páramo dentro del Santuario Nacional Tabaconas Namballe

Fuente: [44]



Figura 2-8: Oso Andino captado por medio de cámaras trampa en Bosque montano dentro del SNTN

Fuente: [44]

El monitoreo se llevó a cabo en dos épocas: seca y húmeda. La primera época se desarrolló entre el 30 de agosto y 26 de noviembre de 2014. Se establecieron 36 cámaras trampa de marca Bushnell, modelo 119537C, distribuidas a razón de 1 cámara por cada km^2 ; se configuró 3 fotos por cada activación del sensor de presencia con un intervalo de 30 segundos y se dejó funcionando las 24 horas. Cada cámara trampa fue ubicada en un árbol, a una altura aproximada de 40 cm desde el suelo. A pesar del esfuerzo puesto en la instalación de dichas cámaras trampa, de las 36 cámaras sólo funcionaron 27 correctamente.

El estudio en la época húmeda se llevó a cabo entre el 1 de diciembre de 2014 y el 24 de abril de 2015. Se establecieron 71 cámaras trampa de la misma marca y densidad que el estudio previo. Se configuró 3 fotos por cada activación del sensor, con un intervalo de 10 segundos entre cada foto y se dejó funcionando las 24 horas. Si bien las características de la instalación

de estas cámaras trampa fueron similares a las del estudio anterior, de las 71 cámaras solo 60 funcionaron correctamente.

2.1.5.2 Inventario y monitoreo de mamíferos medianos y grandes en el Parque Nacional de Cutervo utilizando trampas cámara

El Parque Nacional de Cutervo se encuentra en la provincia de Cutervo delimitado por los distritos de San Andrés de Cutervo, Santo Tomas, Pimpingos, Santa Cruz de Cutervo, Callayuc y Santo Domingo de La Capilla, colinda con los distritos de Cutervo y Socota, en el departamento de Cajamarca. Tiene una extensión de 8 214.23 hectáreas (82.14 km²).



Figura 2-9: Área de implantación de las 3 primeras cámaras trampa en el norte del Parque

Fuente: [45]

El estudio utilizó cuatro cámaras trampa de la marca Bushnell HD Trophy Camera Brown, modelo 119537. Se configuró 3 fotografías por disparo del sensor PIR y el tiempo entre cada foto no se especifica. Dicho monitoreo empezó el 8 de julio del 2015 y la cantidad de días de funcionamiento de cada cámara trampa fue variable, como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 2-1: Tiempo de registro por cada cámara trampa

ID Trampa cámara	Fecha de instalación	Fecha de verificación	Número de días
Trampa cámara_1	08/07/2015	27/08/2015	50
Trampa cámara_2	08/07/2015	27/08/2015	50
Trampa cámara_3	09/07/2015	27/08/2015	49
Trampa cámara_4	13/07/2015	15/09/2015	64
Total (días cámara)			213

Fuente: [45]

La primera cámara registró 905 fotografías, la segunda 444 fotografías, la tercera 513 fotografías y la última registró 216 fotografías. A pesar de haber capturado gran cantidad de fotografías, no se pudieron obtener datos explotables porque estaban vacías o mostraban pequeños roedores no identificables.

A partir de los datos obtenidos en el monitoreo con las cámaras trampa y aplicando la curva teórica de acumulación de especies, se obtuvo la frecuencia de detección especies de interés.

Tabla 2-2: Frecuencia de captura de las especies registradas

Especie	Nombre	Frecuencia ⁽¹⁾
<i>Cuniculus taczanowskii</i>	Majas de Altura	56,3
<i>Pseudalopex culpaeus</i>	Zorro	4,6
<i>Eira barbara</i>	Zotillo	4,6
<i>Didelphis pernigra</i>	Canshul	9,3

⁽¹⁾ Frecuencia calculada con el número de fotografías por 1000 días cámara.

Fuente: [45]

Otro de los atributos de importancia de las cámaras trampa es que, gracias a la hora contenida en cada fotografía, se pudo deducir los patrones de actividad de las especies registradas. Esto la convierte en una herramienta poderosa a la hora de clasificar una especie como diurna o nocturna.

2.2 Redes de sensores inalámbricos (WSN)

Una red de sensores inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés Wireless Sensor Network) está compuesta por múltiples nodos sensores, cuya cantidad puede variar de decenas a miles, desplegados en un entorno de difícil acceso con capacidades de detección, comunicación inalámbrica y procesamiento de datos. [46]

Los nodos sensores son dispositivos de bajo consumo de energía con uno o más sensores, un procesador, memoria limitada, fuente de alimentación, interfaz de radio y algunos componentes adicionales [47]. En la actualidad, con los avances tecnológicos, es posible desarrollar nodos sensores multifuncionales cada vez más pequeños, de bajo consumo energético y de bajo costo. [48]

Entre los principales usos de las WSN se pueden mencionar el seguimiento y vigilancia de objetivos militares [49], la ayuda en desastres naturales [50], el monitoreo de salud biomédica [51], la exploración de entornos peligrosos y la detección sísmica. [52]

De acuerdo a su implementación, las WSN pueden ser clasificadas dentro de cinco tipos funcionales: WSN terrestres, subterráneas, submarinas, móviles y multimedia [49]. Para los fines de esta investigación sólo se detallará al último subgrupo.

2.2.1 Red de sensores inalámbricos multimedia (WMSN)

Las redes de sensores inalámbricos multimedia (WMSN, por sus siglas en inglés Wireless Multimedia Sensor Network) consisten en una serie de nodos de sensores de bajo costo equipados con cámaras y micrófonos. Estos nodos sensores se interconectan entre sí a través de una conexión inalámbrica, permitiendo el monitoreo, el seguimiento, la recuperación, el procesamiento, la correlación y la compresión de datos de video, audio e imágenes. [46]

2.2.2 Topología en malla

Generalmente, las redes WSN utilizan una topología en malla, en la que se tiene varios enlaces y rutas redundantes al nodo de destino, por lo que, si uno de estos nodos falla, se pueden usar otros nodos para redirigir los datos hasta que llegue al nodo receptor de destino. Por lo tanto, esta topología permite que las WSN sean escalables, puedan adaptarse a los cambios de red y recuperarse automáticamente de las fallas al eliminar el riesgo de tener un solo punto de falla. [53]

A continuación, se detallará el estándar IEEE 802.15.4 y el protocolo empleado en esta investigación.

2.2.3 Estándar IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 es un estándar para comunicaciones inalámbricas que ha sido desarrollado para satisfacer las necesidades de las aplicaciones que requieren menor velocidad de datos, conectividad simple y bajo consumo de batería [53]. Este estándar especifica que:

- La comunicación puede ocurrir en las bandas 868 – 868.8 MHz, 902 –928 MHz o 2.400 – 2.4835 GHz.
- La comunicación debe tener lugar en canales de 5 MHz a partir de 2.405 a 2.480 GHz.
- La velocidad de datos por aire es 250 Kbps como máximo, pero debido a la sobrecarga del protocolo, la velocidad de datos real es aproximadamente la mitad de eso.
- Se utiliza el espectro ensanchado de secuencia directa (DSSS) y una modulación por desplazamiento de fase en cuadratura compensada (O-QPSK) con un esquema de modulación de modelado de pulso de medio seno, que proporciona inmunidad y mitigación de interferencias eficientes.

El protocolo IEEE 802.15.4 se usa ampliamente en WSN y constituye la base de muchos protocolos MAC como 6LowPan, Thread, ZigBee y DigiMesh. Siendo este último utilizado en este proyecto.

2.2.4 Protocolo DigiMesh

DigiMesh es un protocolo patentado que fue desarrollado por la compañía IoT (Internet of Things) llamada Digi Internacional. Dicho protocolo consta de un solo tipo de nodo enrutador como se aprecia en la Figura 2-10: Nodos DigiMesh, donde todos los nodos son intercambiables y pueden enrutar datos, por lo que la red es simple y homogénea. Esto hace que la configuración y el establecimiento de la red sean simples, flexibles, extensibles y confiables. Además, utiliza un método de direccionamiento simplificado, que mejora la configuración de la red y la resolución de problemas. [53, 54]

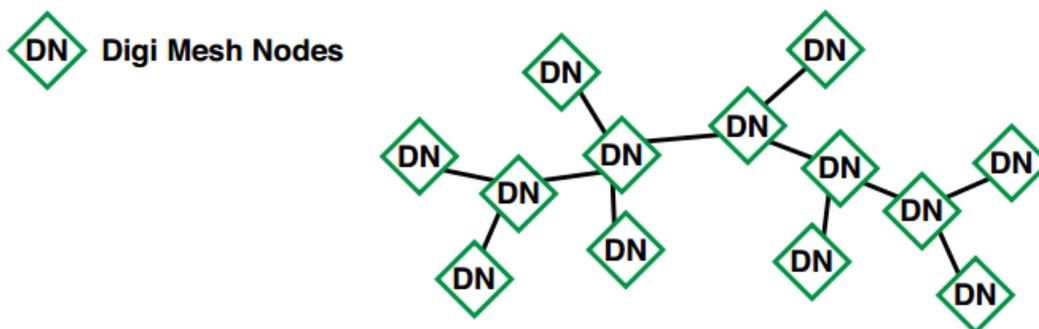


Figura 2-10: Nodos DigiMesh

Fuente: [54]

Capítulo 3: Diseño, Fabricación y Programación

En este capítulo se menciona la línea de investigación de TapirChip como referencia para la elaboración de esta tesis. También se definen los tipos de nodos sensores (nodo sensor sumidero y nodo sensor trampa) que conforman la WMSN prototipo de cámaras trampa, señalando el criterio de selección de los componentes para realizar el proceso de diseño y fabricación de las placas de ambos nodos. Finalmente, se detalla la programación del código de cada uno de los nodos sensores que conforman la WMSN mediante su flujo de funcionamiento.

3.1 TapirChip

La presente tesis tomó como referencia la línea de investigación la red WMSN denominada TapirChip implementada por el Grupo de Telecomunicaciones Rurales GTR – PUCP en coordinación con el Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad (Innovate Perú) del Ministerio de la Producción del Perú bajo los proyectos 152-FINCyT-IA-2013 y 123-PNICP-PIAP-2015. [55]

3.2 Sistema prototipo WMSN de cámaras trampa

Para efectos de esta investigación se planteó la elaboración de un prototipo WMSN conformado por 2 tipos de nodos sensores (nodo sensor sumidero y nodo sensor trampa), cada uno de estos cuenta con una cámara trampa que funciona como sensor para la captura, procesamiento y almacenamiento de las imágenes de mamíferos mayores, y un sistema de radio para la transmisión de dichas imágenes.

A continuación, se detalla el funcionamiento de ambos nodos sensores.

3.2.1 Nodo sensor sumidero

Está conformado por una cámara trampa que se encargará de capturar a partir del disparo del sensor PIR, procesar y almacenar las imágenes obtenidas de manera autónoma, además, a una hora determinada inicia el proceso de recolección inalámbrica de imágenes tomadas por los nodos sensores trampa mediante sus radios.

3.2.2 Nodo sensor trampa

Está conformado por una cámara trampa que se encargará de capturar a partir del disparo del sensor PIR, procesar y almacenar temporalmente las imágenes hasta transmitir las a una hora determinada mediante su radio hacia el nodo sensor sumidero.

3.3 Selección de componentes de la WMSN prototipo de cámaras trampa

La selección de cada uno de los componentes del nodo sumidero y el nodo trampa se realizó en base a las características de cámara trampa y WMSN detalladas en los incisos 2.1.2 y 2.2.1 respectivamente. Ambos tipos de nodos requieren una cámara trampa y un sistema de radio, esto significa que son idénticos a nivel de hardware; sin embargo, la diferencia se ve reflejada en su funcionamiento y programación de software.

3.3.1 Placa de referencia y procesador

Para la elección de la placa de los nodos sensores sumidero y trampa se planteó el uso de los módulos Arduino, que al ser una plataforma de código abierto ofrece una amplia documentación de parte de la comunidad de desarrollares. Debido a las limitaciones energéticas, de procesamiento y ubicación de difícil acceso propias de un sistema WMSN de cámaras trampa, se planteó la selección de uno de los módulos Arduino.

Entre los posibles módulos Arduino a utilizar, se encuentran los denominados; UNO, Leonardo, Mega y DUE. Sin embargo, se descartaron los 2 primeros porque cuentan con pocos puertos digitales (el primero tiene 14 pines digitales de entrada/salida y 6 pines analógicos, y el segundo, 20 pines digitales y 12 analógicos); por otro lado, tanto el Mega como el DUE tienen 54 pines digitales de entrada/salida, siendo su principal diferencia el procesador que cada uno posee (SAM3X8E ARM Cortex-M3 de 32 bits a 84 MHz para DUE y ATmega2560 de 8 bits a 16 MHz para Mega) se descartó el primero por la sobrecapacidad para los propósitos de esta investigación.

Por lo tanto, el módulo de referencia escogido fue el Arduino Mega con 54 pines digitales de entrada/salida, 16 pines analógicos y un procesador ATMEGA 2560 que cuenta con una velocidad de reloj de 16 MHz, memoria flash de 256 kB, SRAM de 8 kB y EEPROM de 4 kB.



Figura 3-1: Arduino Mega 2560

Fuente: [56]

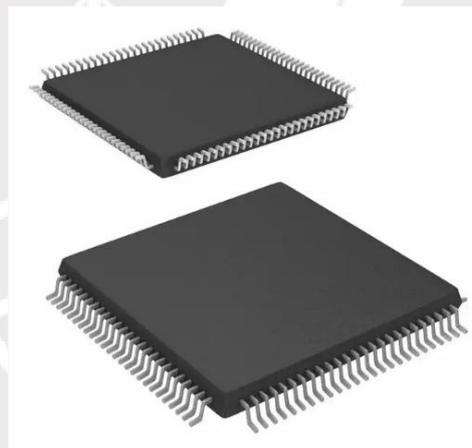


Figura 3-2: ATMEGA 2560 del fabricante Microchip Technology

Fuente: [57]

3.3.2 Cámara digital

La empresa proveedora de cámaras digitales de código abierto, ArduCam tiene cámaras de 0.3 MP, 2 MP y 5 MP para los módulos Arduino. Debido a esta disponibilidad, se escogió la de mayor resolución con la finalidad de obtener la mayor resolución posible.

Las características técnicas de esta cámara son las siguientes:

- Voltaje de entrada 3.3 voltios
- Resoluciones disponibles:
 - 5 MP (2592×1944): 15 fps,
 - 1080p (1920×1080): 30 fps
 - 720p (1280×720): 60 fps
 - VGA (640×480): 60 fps
 - QVGA (320×240): 120 fps
- Formato de salida en JPEG
- Comunicación serial por SPI e I2C.



Figura 3-3: Arducam OV5642 5 MP

Fuente: [58]

3.3.3 Flash

En el inciso 2.1.2.3 y 2.1.2.4 se detalla el uso de LEDs de luz visible (con la que se obtienen imágenes nítidas en escala de colores, pero se perturba el comportamiento animal) y no visible (con la que se obtienen imágenes no tan nítidas en escala de grises y no se perturba el comportamiento animal) para la obtención de imágenes en la oscuridad y que la elección de

éstas varía en función al tipo de investigación que los profesionales ligados a la biología requieren.

En relación a los requerimientos de la cámara escogida, se vio por conveniente el uso de un arreglo 15 de LEDs amarillos de luz visible para las pruebas de fotos nocturnas, con lo que se logró cubrir una distancia de aproximadamente 5 metros.

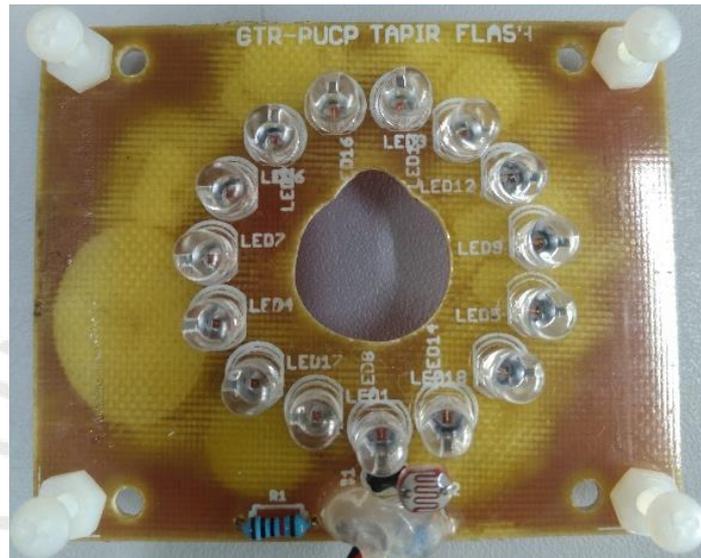


Figura 3-4: Vista posterior del flash

Fuente: Elaboración propia



Figura 3-5: Vista posterior del flash con cámara

Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Sensor PIR

Considerando que el arreglo de 15 LEDs tiene un campo de visión de 5 ml se optó por un sensor cuya zona de detección sea de la misma longitud aproximadamente. El modelo seleccionado fue el AMN41121 del fabricante Panasonic que tiene las siguientes ventajas: es pequeño (1 cm de ancho * 1.5 cm de alto), de bajo costo, se cuenta con información detallada y es usado en aplicaciones especializadas como detección de presencia de animales y humanos.



Figura 3-6: Sensor PIR modelo AMN41121 del fabricante Panasonic

Fuente: [59]

3.3.5 Radio

En las redes de sensores inalámbricos (WSN) se usan principalmente 2 bandas de frecuencias libres: 2.4 GHz y 900 MHz que tienen distintas aplicaciones cada una. La primera frecuencia ofrece mayor ancho de banda, tiene mayor tasa de bitrate y requiere antenas de menor tamaño. Sin embargo, es más vulnerable a las interferencias y puede alcanzar conexiones estables de hasta 38 metros en bosques nublados según estudios realizados [60]. Por otro lado, la segunda frecuencia (900 MHz) es menos vulnerable a las interferencias y puede alcanzar mayores distancias. Sin embargo, su ancho de banda es menor y las tasas de transferencia también.

En base a lo mencionado, se optó por usar una radio con una frecuencia de 900 MHz para obtener la mayor distancia de transmisión posible. De todas las radios disponibles en el mercado, se seleccionó la que corresponde al modelo XBee-PRO 900HP del fabricante Digi

por los siguientes motivos: trabaja en la frecuencia de 900 MHz, es programable en Arduino, tanto el fabricante como la comunidad de programadores ofrecen soporte para el producto y utiliza 3.3 voltios.

Cabe resaltar que según el Registro Nacional de Frecuencias, la banda de 899 – 915 MHz y 944 – 960 MHz está asignada a nivel nacional para la empresa Viettel Perú S.A.C.; por ello, la radio se tuvo que configurar desde la banda 916 hasta 928 MHz para no interferir con las bandas licenciadas. [61]



Figura 3-7: Radio XBee-PRO 900HP del fabricante Digi

Fuente: [62]

3.3.6 RTC (Real-time clock)

Cada vez que se toma una fotografía a un mamífero se requiere almacenar la hora en la cual ha sido captada, asimismo, cuando se realiza el envío de fotos es necesario que, tanto el nodo sensor que envía como el nodo señor que recibe la imagen estén sincronizados ya que la transmisión se realiza a una hora configurada. Se escogió el modelo DS3231 del fabricante Maxim Integrated porque este dispositivo es de bajo costo; tiene una precisión de ± 2 ppm (un retraso de ± 0.3 segundos por día); almacena los segundos, minutos, horas, días de la semana, día del mes y el año; y utiliza la interfaz I2C para la comunicación con el procesador.

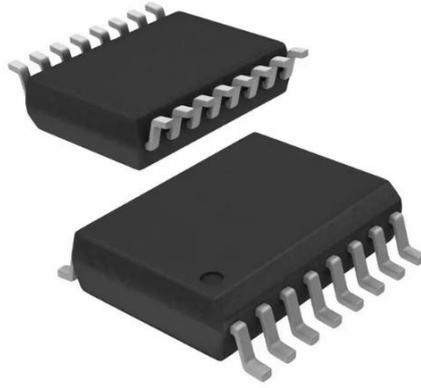


Figura 3-8: RTC DS3231

Fuente: [63]

3.3.7 Memoria no volátil

Se escogió las memorias micro SD debido a que son pequeñas, fáciles de extraer, ampliamente difundidas en el mercado mundial, ofrecen velocidades de escritura de 10 MB/s y tienen capacidad de almacenamiento hasta 256 GB. Asimismo, el IDE de ARDUINO ofrece una librería para controlar las memorias SD, lo cual facilita su integración.

3.3.8 Batería

Los componentes considerados en este prototipo trabajan a 3.3 voltios con un rango de tolerancia de +/- 0.4 voltios; es decir, se podría trabajar con baterías en el rango de 2.9 a 3.7 voltios. Debido a la disponibilidad del mercado se escogió las baterías de Li-Ion en una presentación de 3.7 voltios.

Por otro lado, un factor importante a considerar es la capacidad de la batería ya que esta determina la cantidad de días de funcionamiento autónomo de cada uno de los nodos sensores y para su determinación es necesario conocer el consumo energético de cada uno de ellos, esto se detallará en el capítulo 4.

3.4 Diseño de las placas PCB

Los componentes elegidos para ambos nodos sensores fueron; la cámara OV5642 de 5 MP de resolución, un arreglo de 15 leds de luz amarilla de luz visible, sensor PIR modelo AMN41121 del fabricante Panasonic, radio XBee-PRO 900HP del fabricante Digi, reloj digital (RTC) modelo DS323, memoria micro SD y una batería de Li-Ion de 3.7 voltios con capacidad a definir en las pruebas de los prototipos.

Además, en base a los diagramas matrices del módulo Arduino Mega, el cual fue seleccionado como placa de referencia, se procedió a eliminar los componentes que consumen energía y que no son imprescindibles para los nodos sensores sumidero y trampa como son: el regulador de voltaje, conversor serial a USB, LEDs indicadores, entre otros; asimismo, se planteó que la placa a diseñar sea compatible con los componentes propios del nodo sensor prototipo para que encajen en una sola placa sin la necesidad del uso de “shields” (placas de circuitos modulares que se montan unas encima de otras para dar funcionalidad extra a un módulo de Arduino). Por lo tanto, la placa diseñada es compacta y su consumo de energía eléctrica es optimizado.

Dentro de los componentes retirados de los diagramas matrices de referencia es importante mencionar el conversor serial a USB y el regulador de voltaje. El primero se utiliza con poca frecuencia; por ejemplo, para copiar un programa desde la PC hacia Arduino o leer datos de la terminal; por ello, para suplir esa deficiencia se usó un conversor externo. El segundo, se encarga de regular los voltajes de entrada (3.3 voltios y 5 voltios). Por ello, al retirarlo sólo se usó 3.3 voltios para todos los componentes de los nodos sensores.

Al finalizar el diseño de la placa de circuito impreso en Eagle, luego de retirar los componentes no imprescindibles y adicionar aquellos propios del sistema WMSN prototipo, se obtuvo las dimensiones de 6.00 x 9.50 cm. A continuación, se muestra el diagrama esquemático y el diseño de circuito impreso en 2 capas en Eagle.

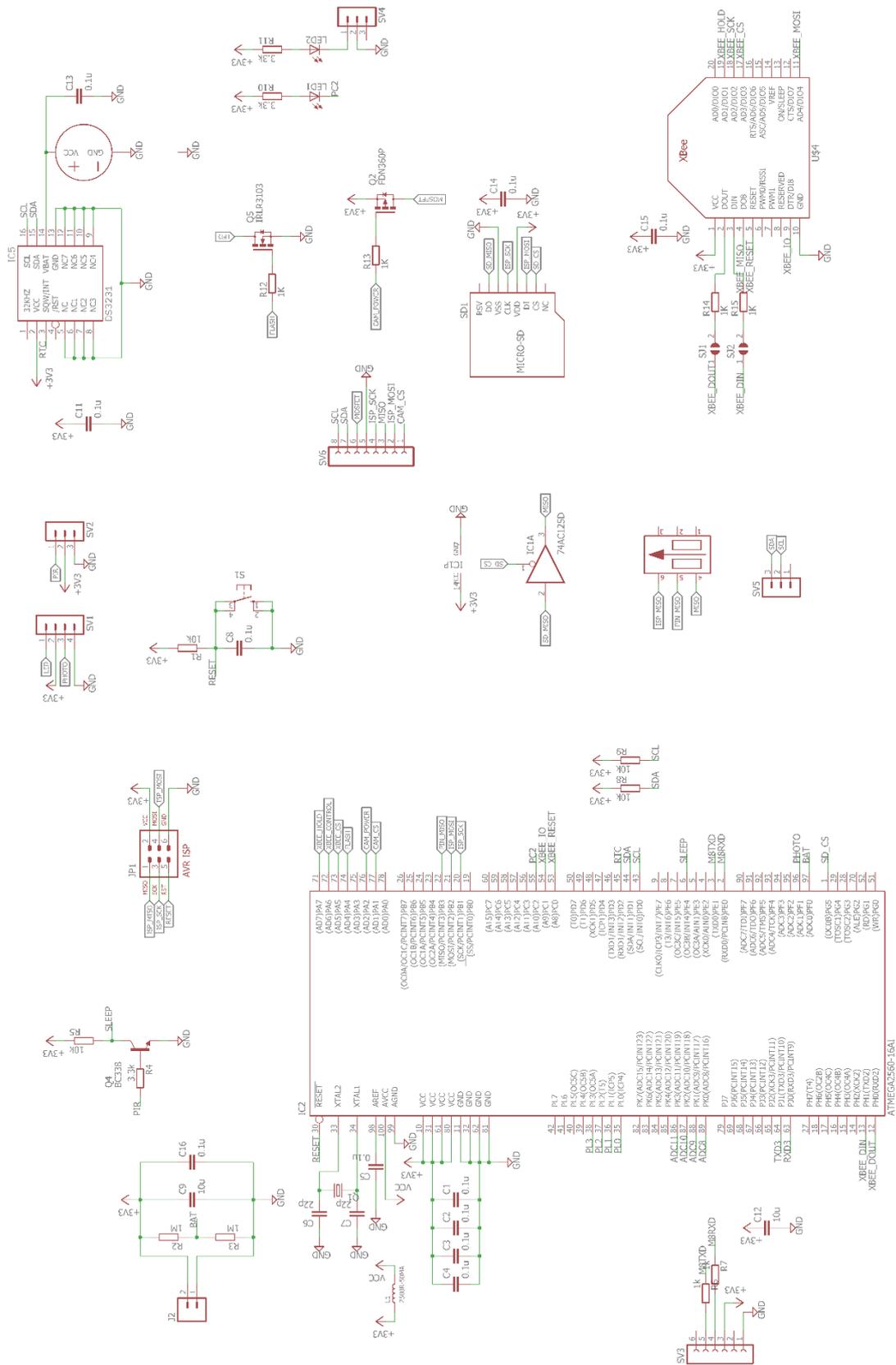


Figura 3-9: Diagrama esquemático del nodo

Fuente: Elaboración propia

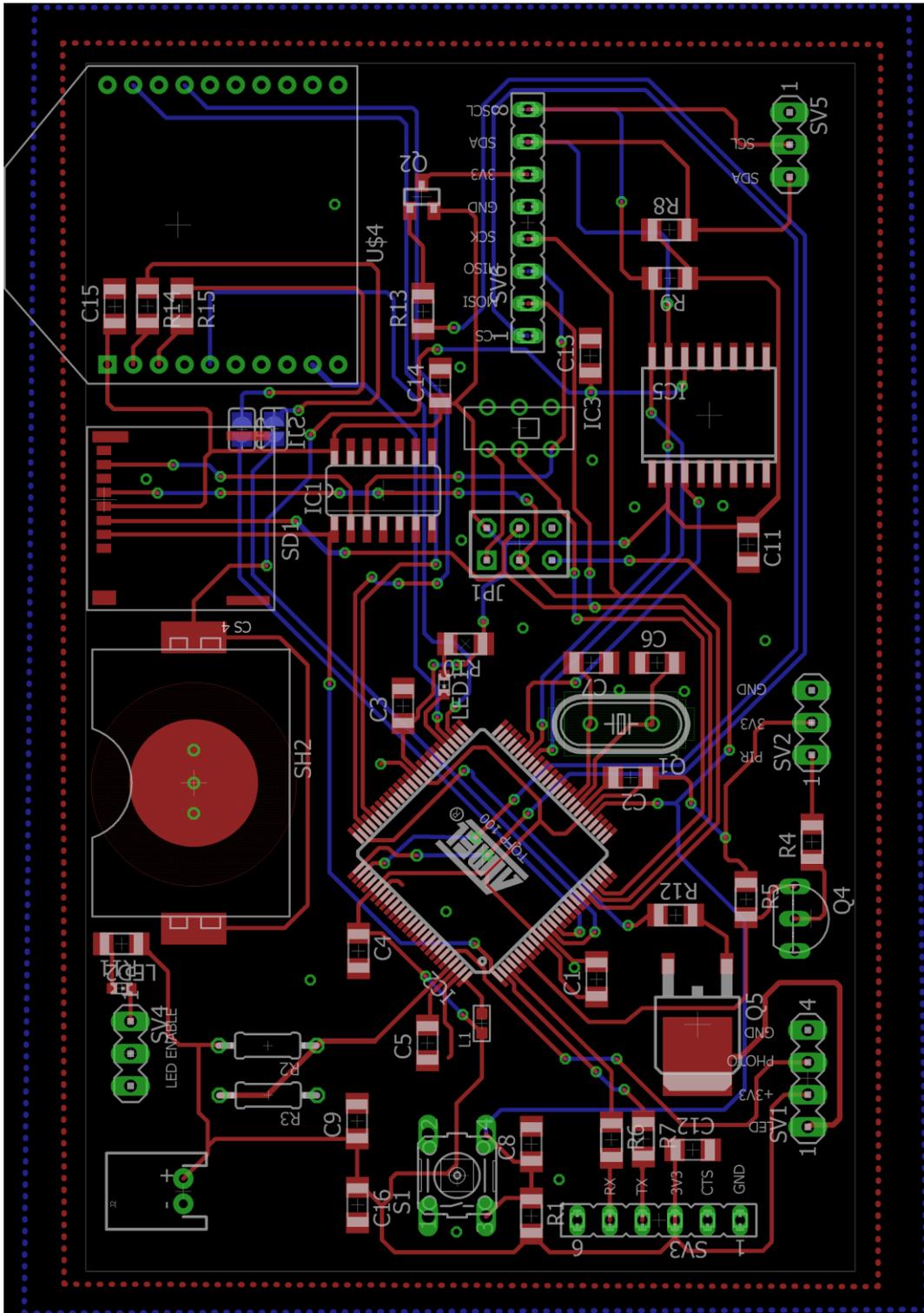


Figura 3-10: Diseño de placa electrónica del nodo sensor sumidero y trampa

Fuente: Elaboración propia

3.5 Fabricación de la placa PCB y soldado de componentes

Luego de realizar el diseño de la placa de circuito impreso (PCB) en Eagle, se enviaron los archivos a un fabricante del mercado local para la fabricación de la misma. A continuación, se exponen las placas PCB's de doble capa.

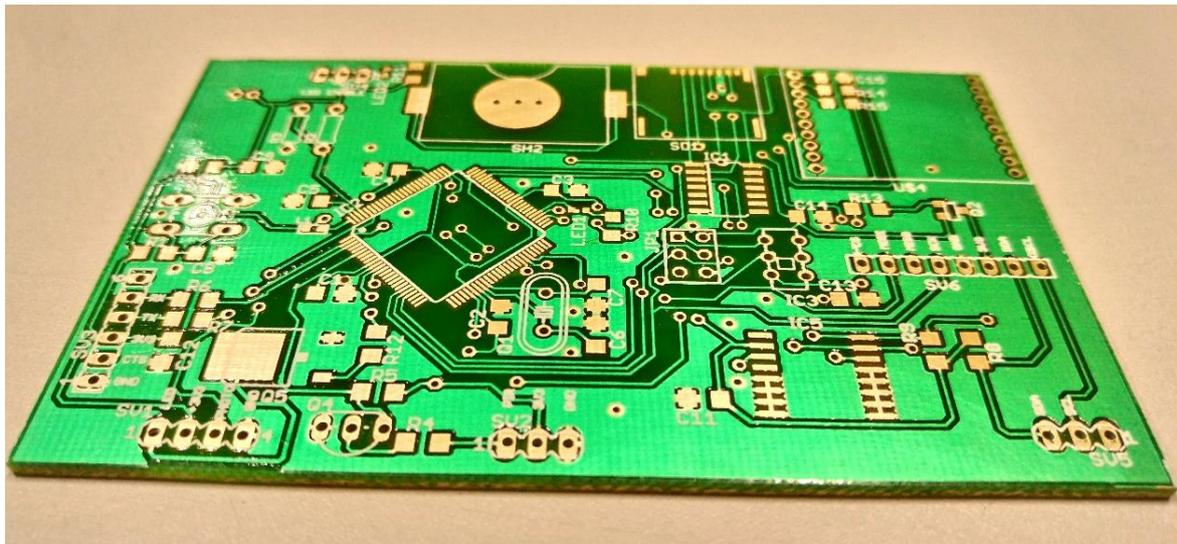


Figura 3-11: Anverso de la placa PCB fabricada

Fuente: Elaboración propia

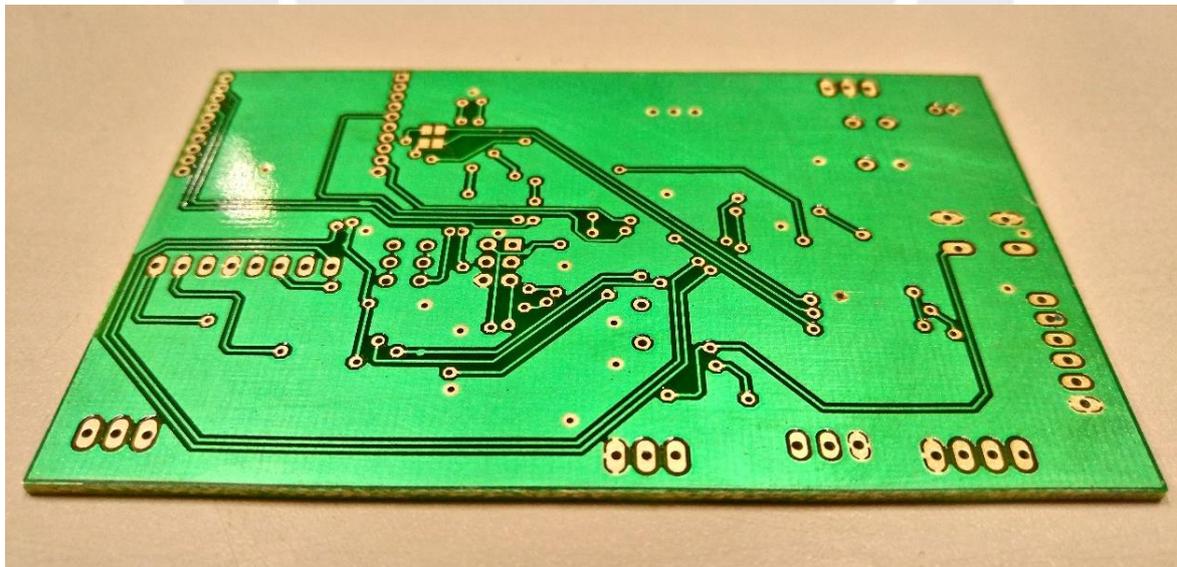


Figura 3-12: Reverso de la placa PCB fabricada

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el soldado de los componentes en las 2 placas PCB fue realizado por el tesista.

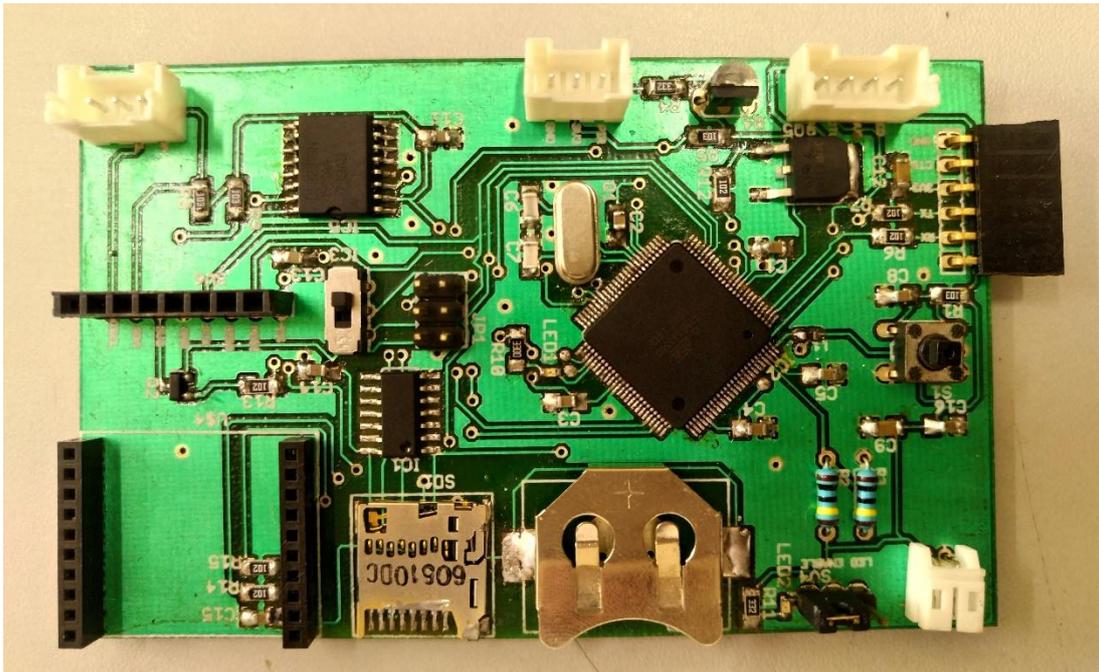


Figura 3-13: Anverso de la placa PCB con componentes

Fuente: Elaboración propia

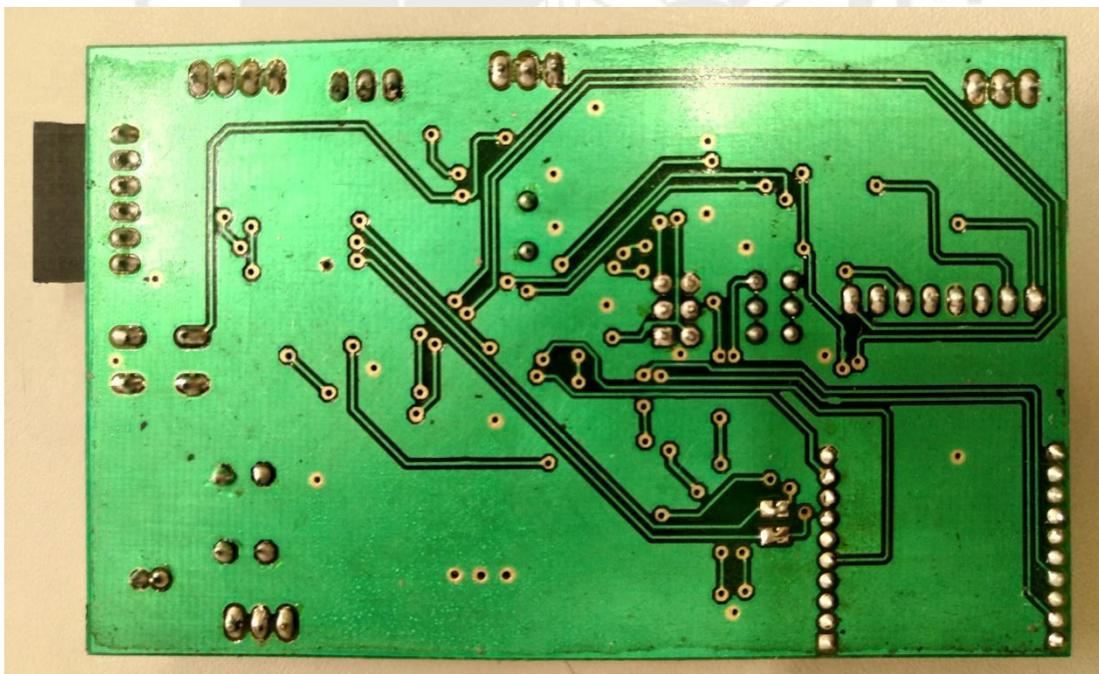


Figura 3-14: Reverso de la placa PCB con componentes

Fuente: Elaboración propia

Luego se procedió a montar la cámara, radio, flash, la memoria micro SD y el sensor PIR a las placas PCB de los nodos sensores sumidero y trampa.

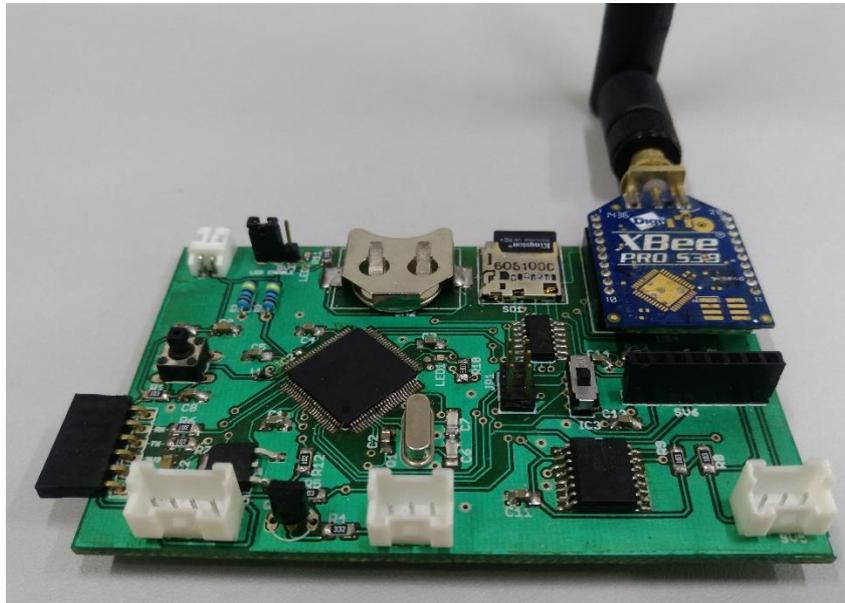


Figura 3-15: PCB con montaje de radio XBee-PRO 900HP

Fuente: Elaboración propia



Figura 3-16: PCB con montaje de todos sus componentes

Fuente: Elaboración propia

Para la realización de las pruebas detalladas en el capítulo 4 del sistema WMSN prototipo, se adaptó un case, el cual se expone a continuación.

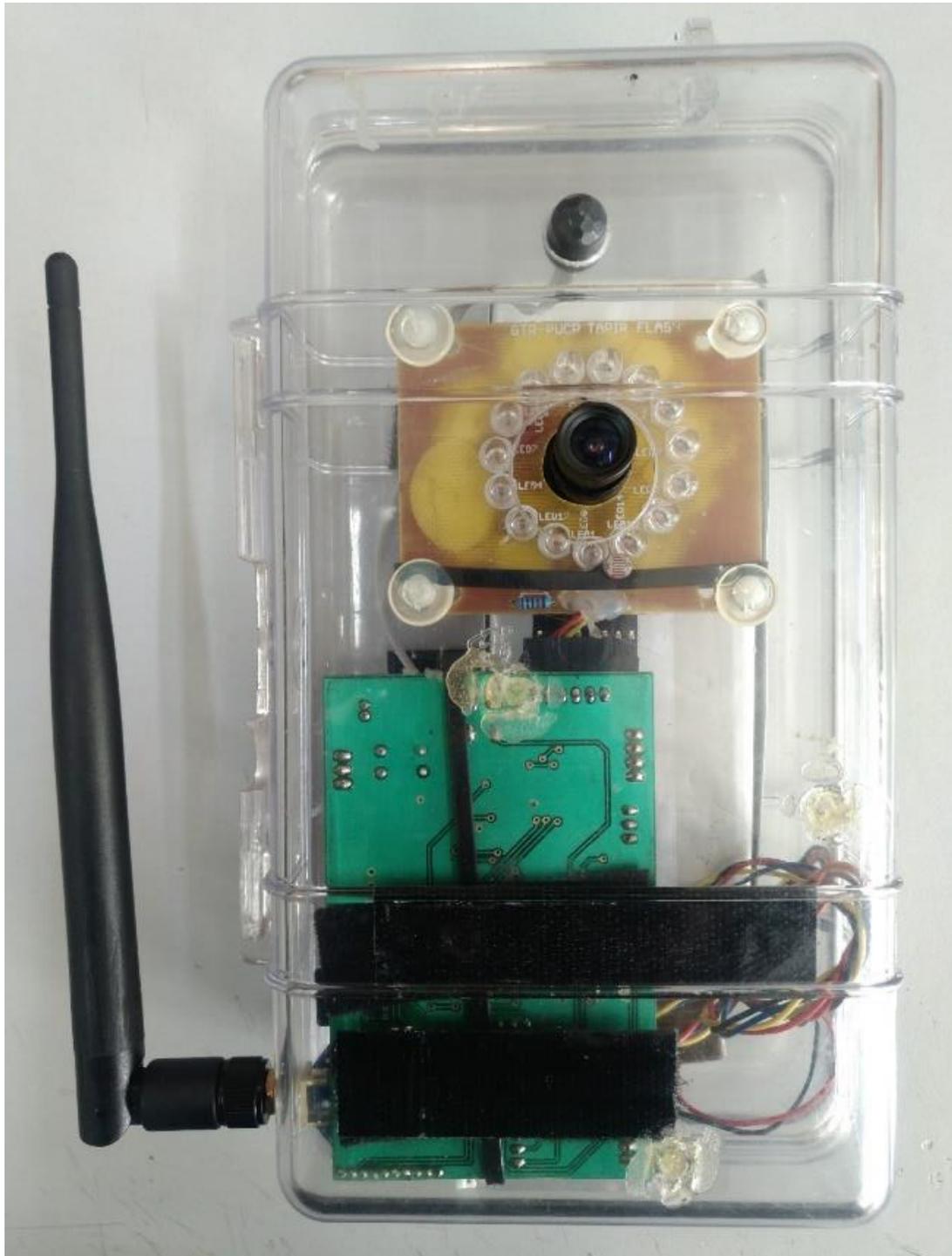


Figura 3-17: Nodo sensor con case - vista exterior

Fuente: Elaboración propia

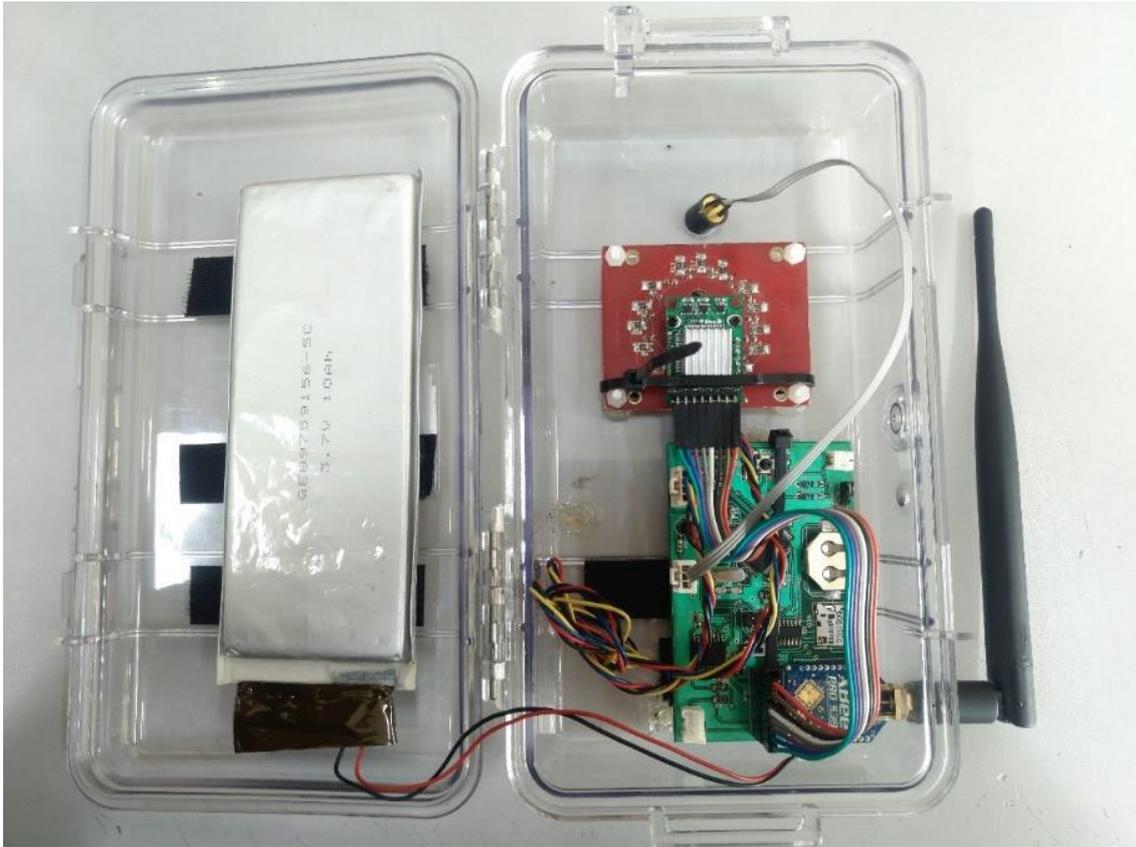


Figura 3-18: Nodo sensor con case – vista interna

Fuente: Elaboración propia

3.6 Implementación del código

La lógica de funcionamiento del código se expone mediante los siguientes diagramas para los nodos sensores sumidero y trampa.

3.6.1 Nodo sensor sumidero

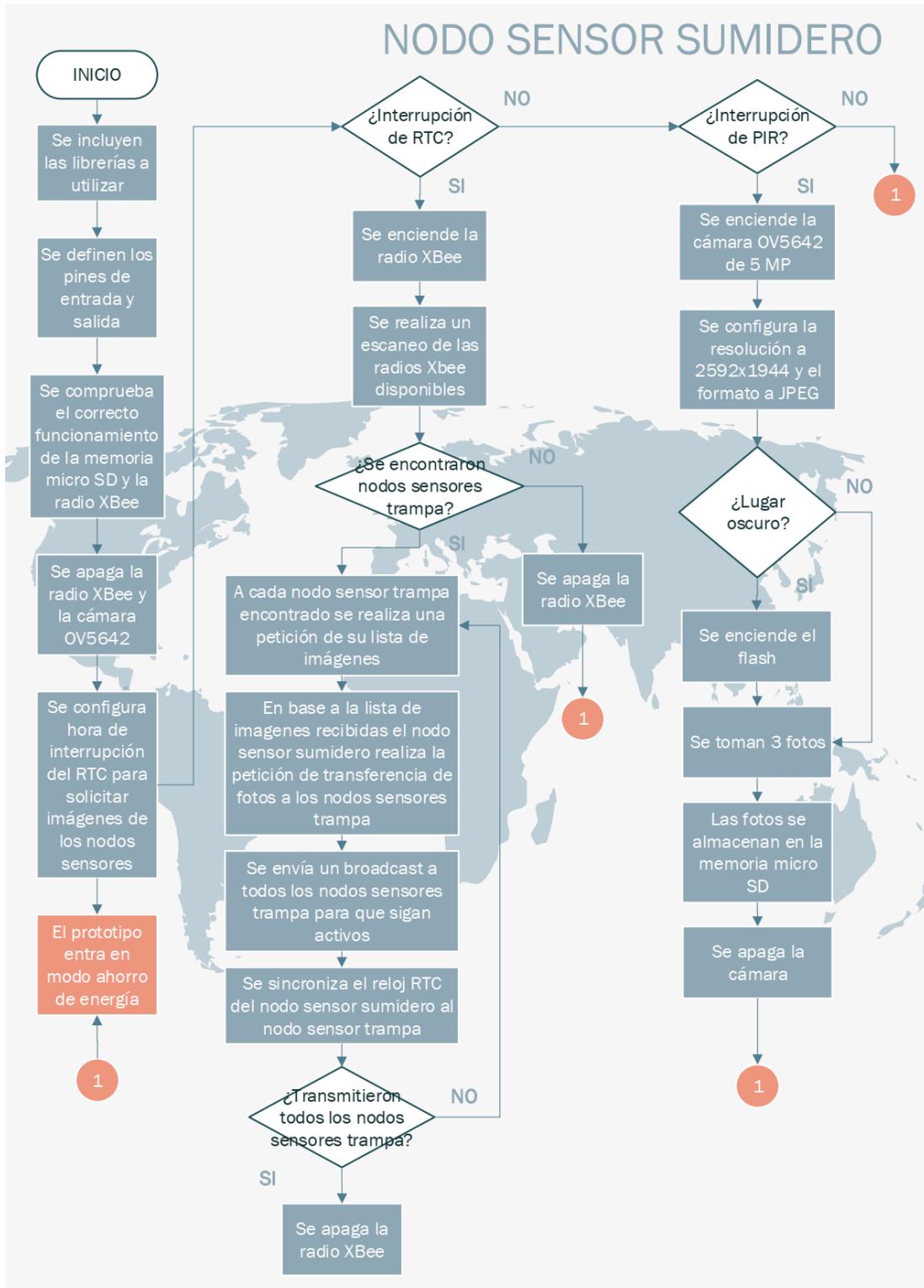


Figura 3-19: Diagrama de flujo del funcionamiento del nodo sumidero

Fuente: Elaboración propia

3.6.2 Nodo sensor trampa

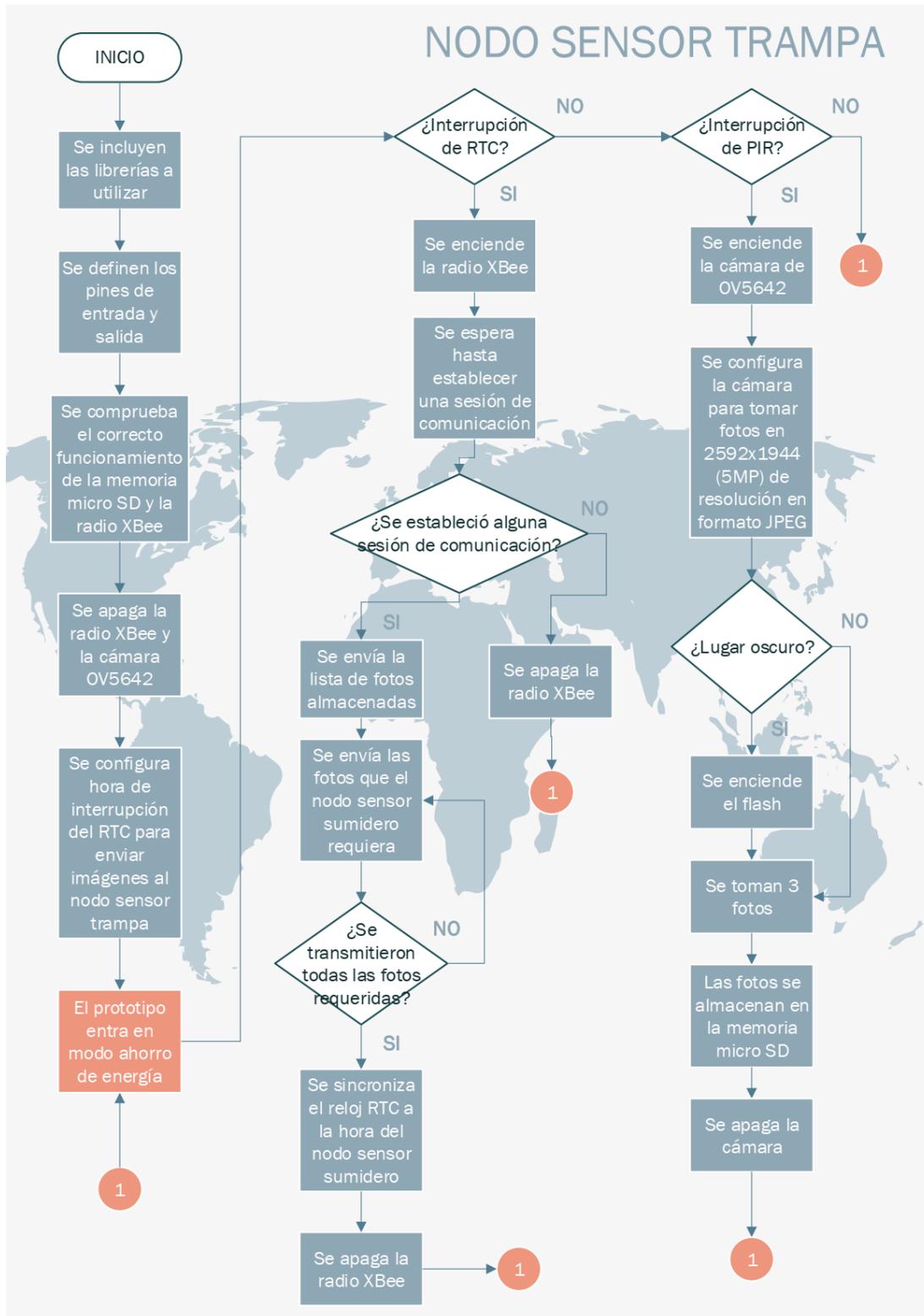


Figura 3-20: Diagrama de flujo del funcionamiento del nodo trampa

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4: Pruebas y Resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados de las pruebas de consumo de energía tanto para el nodo sensor sumidero como para el nodo sensor trampa con la finalidad de determinar su autonomía en base a la capacidad de la batería a utilizar. Por otro lado, se exponen los resultados de pruebas de rendimiento de red en función a los indicadores RSSI, packet data rate y throughput. Finalmente, se detalla el tiempo de captura de imagen desde que se activa el sensor PIR hasta que la imagen es almacenada en la memoria.

4.1 Pruebas de consumo de energía

Para determinar la cantidad de días de trabajo autónomo, tanto para el nodo sensor sumidero como para el nodo sensor trampa, fue necesario calcular el consumo energético en cada uno de los componentes en mAh. A partir de esa medición y realizando las aproximaciones de frecuencia de uso de cada uno de los componentes, se determinó cuánto tiempo puede funcionar cada prototipo en base a la capacidad de la batería.

4.1.1 Secuencia lógica

Para realizar las siguientes pruebas se usó una pinza amperimétrica con una precisión de ± 1 mA con la finalidad de medir la corriente en los estados activo e inactivo para la cámara, flash de 15 LEDs, sensor PIR y la placa PCB sin componentes. Se considera activo cuando el componente está siendo utilizado e inactivo cuando el componente se encuentra en modo ahorro de energía o se encuentra apagado.

Por otro lado, para medir el consumo de la radio XBee en sus diferentes estados (transmisión, recepción e inactivo) también se usó la pinza amperimétrica. Se considera transmisión cuando la radio envía datos, recepción cuando la radio recibe datos e inactivo cuando está en modo ahorro de energía. A continuación, se describe el procedimiento que se llevó a cabo para las pruebas de los componentes.

1. Cámara: Se tomaron fotos consecutivas y se realizó la medición durante ese proceso.
2. Flash de 15 LEDs: Se encendió durante un tiempo determinado y se realizó la medición durante ese periodo.
3. Sensor PIR: Se le forzó a estar activo y se le realizó la medición durante ese periodo.
4. Nodo sensor trampa y sumidero sin componentes: Se desconectaron todos los periféricos y se realizó la medición.
5. Radio XBee - Transmisión: Desde un nodo sensor se envió un archivo de aproximadamente 10 MB, de tal manera que la comunicación no finalice rápidamente. Durante esta transmisión realizó la medición.
6. Radio XBee - Recepción: Desde el otro nodo sensor se recibió el archivo y durante la comunicación se efectuó la medición.
7. Radio XBee - Inactivo: La medición se hizo cuando la radio estaba en modo ahorro de energía.

4.1.2 Resultados obtenidos

4.1.2.1 Consumo energético del nodo sensor trampa

Para obtener el consumo energético fue necesario aproximar la frecuencia de uso de cada uno de los componentes; para ello, se consultó informes de monitoreos que se llevaron a cabo en diferentes ANP's del territorio peruano. Según dichos informes, la cámara trampa es configurada a razón de 3 fotografías por disparo del sensor PIR y en promedio se toman 12 fotos diarias aproximadamente. [45]

Para el análisis del consumo de energía, el tesista tomó como criterio asumir que por día se toman 24 fotos por día (250 kB por foto), 12 diurnas y 12 nocturnas.

Es importante mencionar que para capturar las fotos diurnas solamente se usa la cámara y el sensor PIR; en cambio, para las fotos nocturnas adicionalmente a los componentes mencionados se usa el flash. Por otro lado, la radio XBee se configuró para transmitir una sola vez al día y enviar las 24 fotos almacenadas desde el nodo sensor trampa hacia el nodo sensor sumidero. Finalmente, la placa PCB se considera en estado activo cuando algún componente, incluida la radio, entra en funcionamiento.

A continuación, se expone el cuadro de consumo de corriente por componente del nodo sensor trampa, en sus diferentes estados y frecuencias de uso por día.

Tabla 4-1: Consumo de corriente por componente del nodo sensor trampa por día

Componente	Estado	Fotos	Tiempo / foto (seg)	Tiempo / día (seg)	Corriente (mA)	Corriente (mAh)
Cámara	Activo	24	6	144	250	10.000
	Inactivo					
Flash	Activo	12	1	12	450	1.500
	Inactivo					
Sensor PIR	Activo	24	1	24	0.25	0.002
	Inactivo			86376	0.17	4.079
Radio XBee	Transmisión	24	100	2400	68	45.333
	Inactivo			84000	0.035	0.817
Placa	Activo	48	108.00	2580	32	22.933
	Inactivo			83820	5	116.417
						201.081

Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones expresadas en la tabla anterior se obtuvo un consumo de corriente de 201.081 mAh por día del nodo sensor trampa. Además, si se utiliza una batería de 10 Ah se tendría una duración de 49 días y si se utiliza una batería de 20 Ah se tendría una duración de 99 días, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4-2: Duración del nodo trampa usando diferentes baterías

Capacidad batería(Ah)	Duración (días)	Duración (horas)
10.00	49.73	1193.55
20.00	99.46	2387.10

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.2 Consumo energético del nodo sumidero

En el inciso 3.2.1 se mencionó que el nodo sensor sumidero se encarga de iniciar y coordinar la comunicación con varios nodos sensores trampa, de tal manera que se recolecte las imágenes de cada uno de estos.

Para realizar el análisis del consumo energético se continuó con la aproximación de 24 fotos por día; por ello, cada día se tiene que recolectar dicha cantidad de fotos desde el nodo sensor trampa. En la siguiente tabla se muestra el consumo energético de un nodo sumidero cuando solamente se comunica con un nodo trampa.

Tabla 4-3: Consumo energético – nodo sumidero

Componente	Estado	Fotos	Tiempo / foto (seg)	Tiempo / día (seg)	Corriente (mA)	Corriente (mAh)
Cámara	Activo	24	6	144	250	10.000
	Inactivo					0.000
Flash	Activo	12	1	12	450	1.500
	Inactivo					0.000
Sensor PIR	Activo	24	1	24	0.25	0.002
	Inactivo			86376	0.17	4.079
Radio XBee	Recepción	24	100	2400	38	25.333
	Inactivo			84000	0.035	0.817
Placa	Activo	48	100	2580	32	22.933
	Inactivo			83820	5	116.417
						181.081

Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones expresadas en la tabla anterior se obtuvo un consumo de corriente de 181.081 mAh por día del nodo sensor sumidero. Si bien en este proyecto se fabricó un nodo sensor trampa, el nodo sensor sumidero puede iniciar la recolección de fotografías desde varios nodos sensores trampa. A continuación, se muestra el consumo de energía conforme aumenta la cantidad de nodos sensores trampa asociados a él.

Tabla 4-4: Consumo energético de un nodo sumidero cuando soporta a varios nodos trampa

Nodo sensor sumidero	Nodo sensor trampa	Recolección de fotos	Corriente (mAh)	Duración con batería de 10 Ah (días)	Duración con batería de 20 Ah (días)
1	1	40	181.081	55.22	110.45
	2	80	224.391	44.57	89.13
	3	120	267.701	37.36	74.71
	4	160	311.011	32.15	64.31
	5	200	354.321	28.22	56.45
	6	240	397.631	25.15	50.30

Fuente: Elaboración propia

4.2 Pruebas de rendimiento de red y tiempo de captura de imagen

Para realizar las pruebas de rendimiento de red se obtuvo los indicadores de RSSI, throughput y packet data rate. En adición, se calculó el tiempo de captura de imagen. A continuación, se profundiza en el concepto de cada indicador.

- RSSI (Received Signal Strength Indicator): Intensidad de señal del paquete recibido, medido en dBm.
- Throughput: Número de bits por segundo de transmisión.
- Packet Data Rate: Número de paquetes recibidos con éxito en el nodo sensor sumidero.
- Tiempo de captura de imagen: Tiempo desde que el sensor PIR se activa hasta que la foto se almacena en la memoria micro SD.

4.2.1 Secuencia lógica

Para realizar estas pruebas se ubicó el sistema prototipo WMSN en la vía dentro del campus paralela a la Av. José de la Riva Agüero que empieza en el Instituto de Corrosión y Protección y termina en el polideportivo de la PUCP. A continuación, se expone el procedimiento realizado:

1. Se cálculo la zona de Fresnel.
2. Se situó un nodo sensor en el punto inicial y el otro nodo sensor en el punto 1, luego en el punto 2, punto 3 y finalmente en el punto 4, de tal manera que existía una distancia de 50 m, 100 m, 150 m y 200 m entre ambos nodos respectivamente.
3. Se ejecutó la prueba de indicadores en cado uno de los puntos.

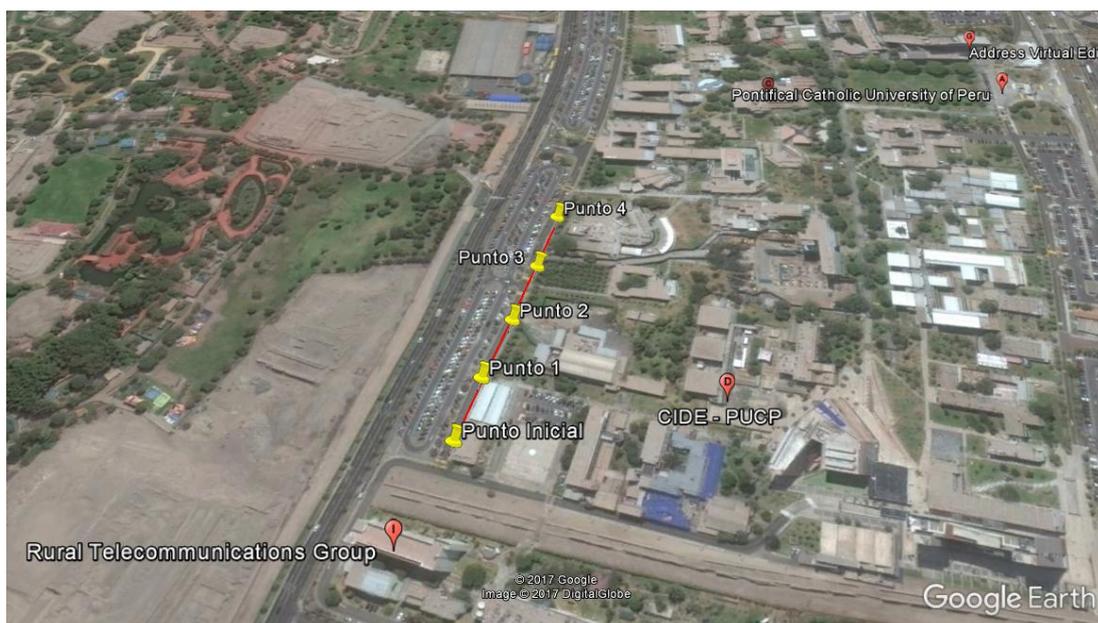


Figura 4-1: Puntos de prueba

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-5: Ubicación de los puntos

Nombre	Latitud	Longitud	Distancia al punto inicial (m)
Punto Inicial	12° 4'19.89"S	77° 4'56.72"W	0
Punto 1	12° 4'18.36"S	77° 4'56.24"W	50
Punto 2	12° 4'16.83"S	77° 4'55.64"W	100
Punto 3	12° 4'15.26"S	77° 4'55.11"W	150
Punto 4	12° 4'13.68"S	77° 4'54.65"W	200

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Resultados obtenidos

4.2.2.1 Cálculo de la primera zona de Fresnel

Antes de efectuar las pruebas se calculó el radio de la primera zona de Fresnel para determinar la altura mínima del nodo sensor con respecto al suelo.

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

r_n = radio de la n -ésima zona de Fresnel en metros.

d_1 = distancia desde el transmisor al objeto en metros.

d_2 = distancia desde el objeto al receptor en metros.

λ = longitud de onda de la señal transmitida en metros.

Tabla 4-6: Cálculo de la primera zona de Fresnel

Frecuencia (Ghz)	Distancia (m)	Radio (m)	60% Radio (m)
0.9	50	2.040	1.224
	100	2.886	1.731
	150	3.534	2.121
	200	4.081	2.449
	250	4.563	2.738
6500	300	4.998	2.999
	6500	23.265	13.959
	15500	35.926	21.556

Fuente: Elaboración propia

Las radios XBee-PRO 900HP, según su hoja técnica, tienen un alcance de hasta 6.5 km a 200 kb/s y 15.5 km a 10 kb/s; sin embargo, para lograr estas distancias, de acuerdo a los cálculos expresados en la tabla anterior, se requiere que las antenas estén situadas por lo menos a 14 m y 22 m sobre el nivel del piso respectivamente, lo cual no es viable para la implementación del

sistema WMSN ya que por cada sensor se tendría que hacer un despliegue de cables y fijación de antenas a las alturas mínimas. Por otro lado, las cámaras trampa se suelen fijar en los troncos de los árboles o estacas a una altura que varía de 20 a 100 cm sobre el nivel del piso; por ello, el criterio que tomo el tesista para las siguientes pruebas fue considerar una altura de 60 cm sobre el nivel del piso para los nodos sensores.

4.2.2.2 Prueba de RSSI y Packet Data Rate

En la realización de estas pruebas se utilizó el programa XCTU que provee el fabricante de la radio, Digi, ya que ofrece diferentes herramientas de gran precisión para el desarrollador y muestra representaciones graficas.

Para la ejecución de las pruebas se configuró el envío de 100 paquetes de datos con un tamaño de 50 bytes cada uno, con un timeout de 1000 ms cada uno, con un intervalo de 1000 ms entre paquetes y ubicando los nodos sensores a 60 cm sobre el nivel del piso. Cabe resaltar que para efectuar las pruebas se insertó ruido ubicando a 10 personas en desplazamiento entre la línea de vista de los nodos sensores. A continuación, se muestran los resultados de las 4 pruebas efectuadas con una distancia de 50 m, 100 m, 150 m y 200 m.

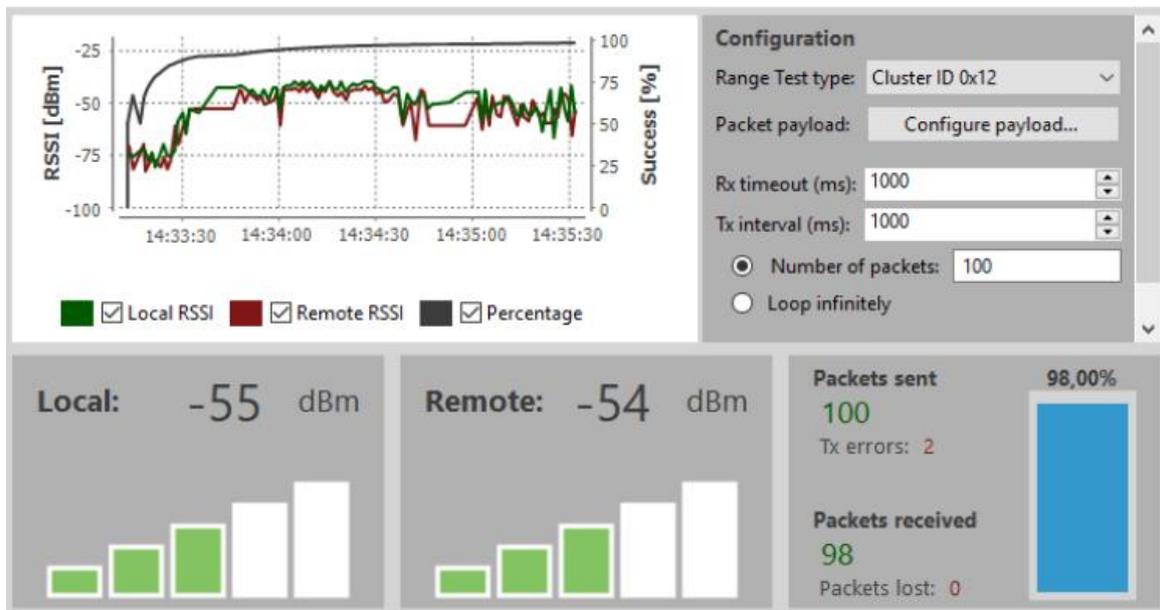


Figura 4-2: Prueba a 50 m del punto inicial

Fuente: Elaboración propia

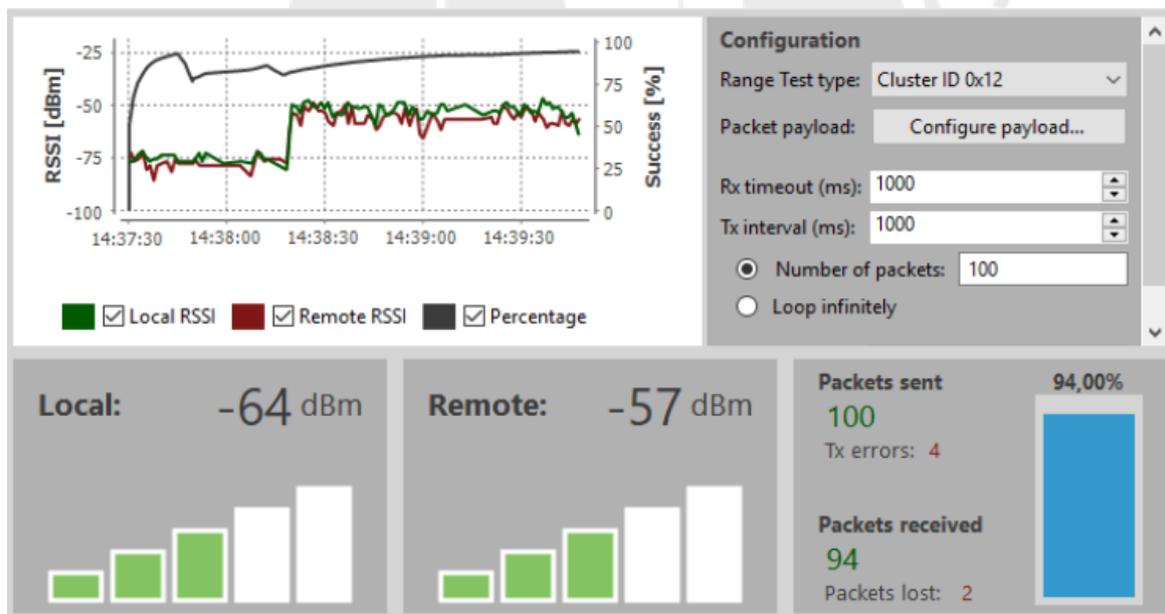


Figura 4-3: Prueba a 100 m del punto inicial

Fuente: Elaboración propia

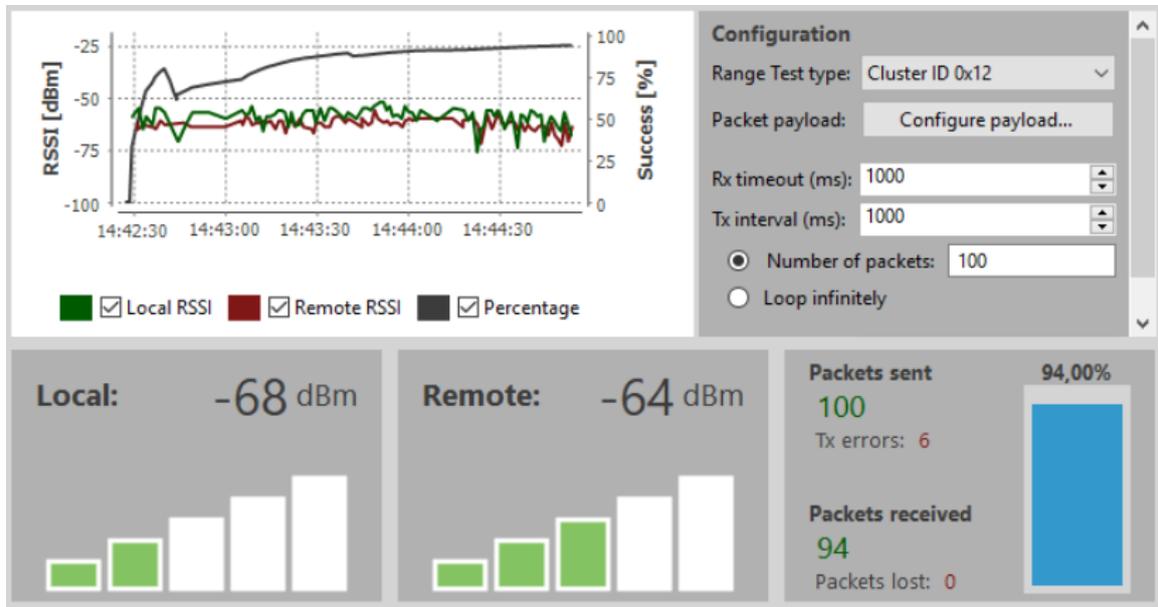


Figura 4-4: Prueba a 150 m del punto inicial

Fuente: Elaboración propia

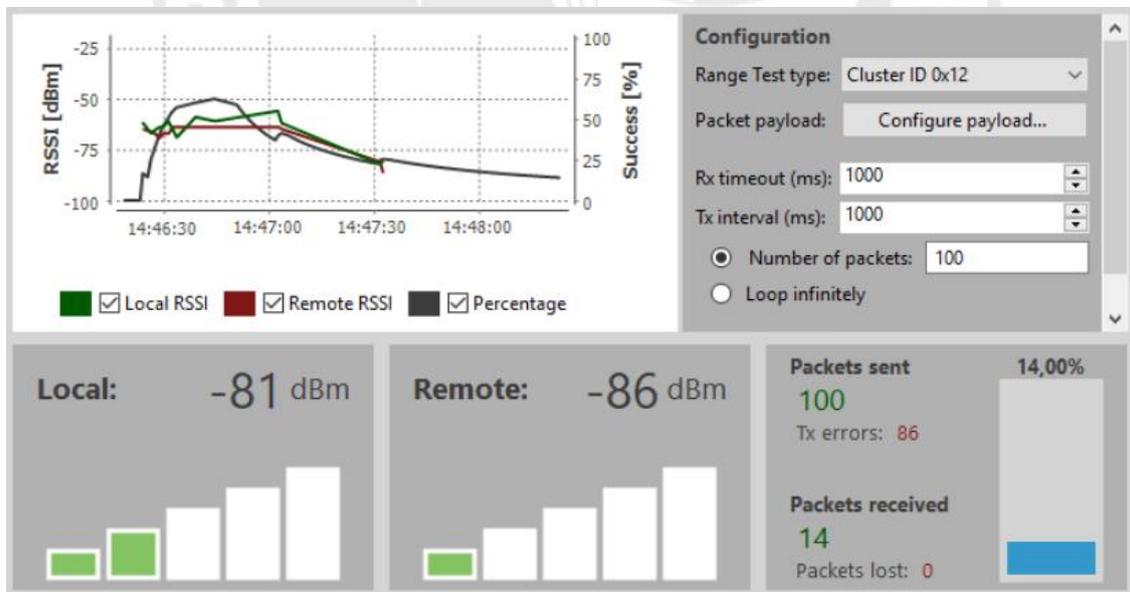


Figura 4-5: Prueba a 200 m del punto inicial

Fuente: Elaboración propia

A partir de las figuras anteriores se concluye que la distancia máxima que soportan los nodos sensores a 60 cm sobre el nivel del piso es 150 m con un 94% de packet data rate y con un nivel de potencia de -68 dBm en la radio transmisora y -64 dBm en la radio receptora.

4.2.2.3 Prueba de Throughput

En esta prueba se envió 200 fotos a una altura de 60 cm con respecto del piso desde el nodo sensor trampa hacia el nodo sensor sumidero ubicados a una distancia de 50 m entre sí.

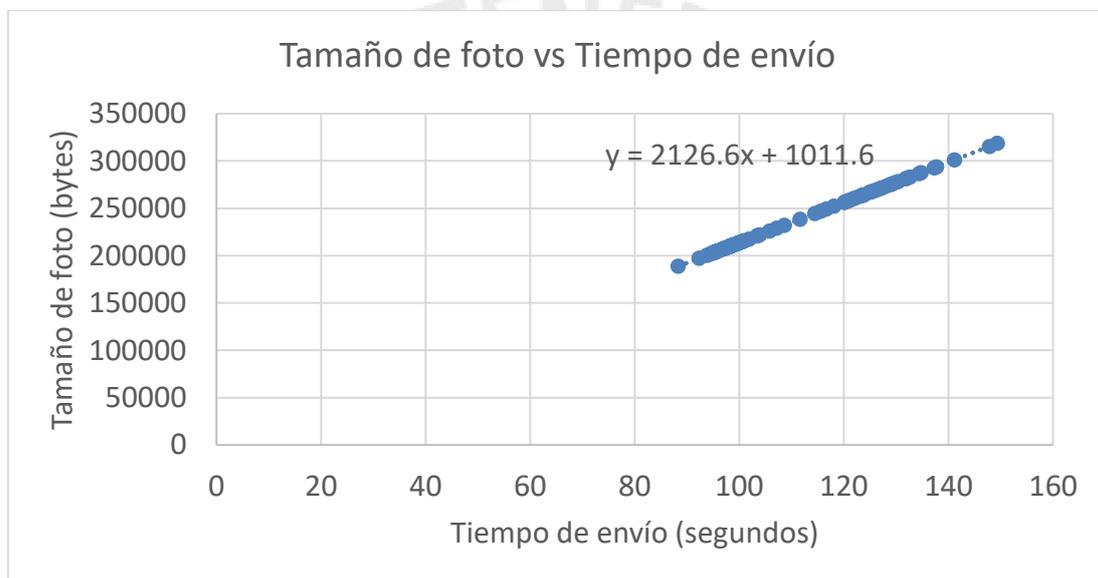


Figura 4-6: Throughput a una distancia de 50m

Fuente: Elaboración propia

Del gráfico anterior se puede deducir que en promedio el tamaño de una foto de 5 MP, obtenida por el prototipo, es de 250 000 bytes y la duración del envío está en un intervalo de 90 – 150 segundos por foto. Asimismo, el throughput promedio es de 2126.6 bytes/segundo.

4.2.2.4 Prueba de tiempo de captura de imagen

Para hallar el tiempo promedio desde que el sensor PIR se activa hasta que la foto es almacenada completamente en la memoria micro SD se realizó la captura de 200 fotografías con un tamaño que varía de 200 000 a 350 000 bytes.

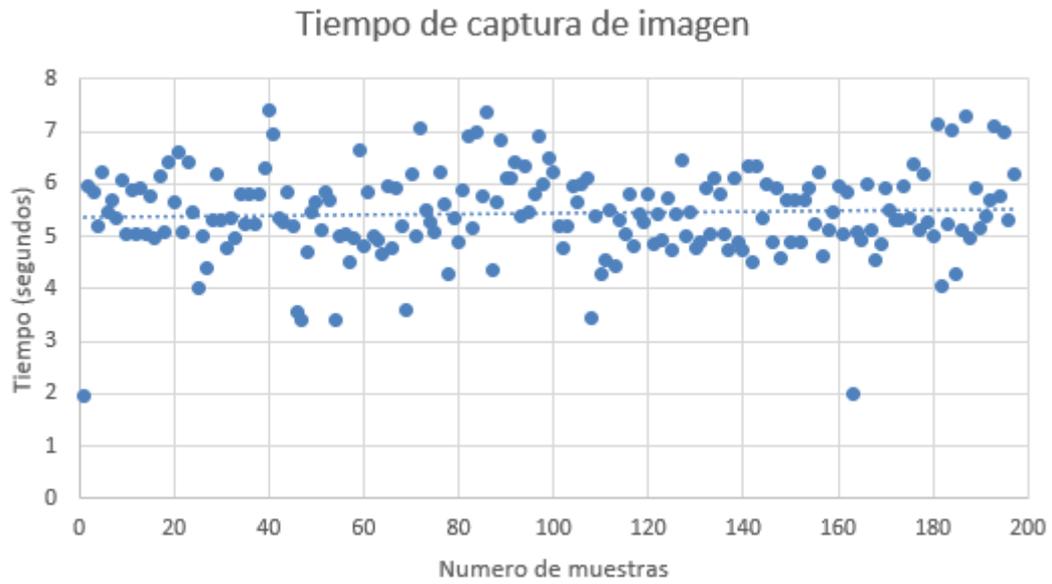


Figura 4-7: Tiempo de captura de imagen

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se aprecia que el promedio de tiempo de captura de imagen es 5.25 segundos.

CONCLUSIONES

- El sistema WMSN prototipo de cámaras trampa, conformado por un nodo sensor sumidero y un nodo sensor trampa, fue diseñado para asegurar un bajo consumo energético, fabricado con componentes de código abierto, programado para el funcionamiento de las cámaras y una comunicación en la banda de frecuencias de 916 - 928 MHz entre los nodos que conforman el sistema.
- La selección de componentes de código abierto para ambos nodos sensores fue la siguiente: una cámara OV5642 del fabricante ArduCam de 5 MP de resolución, un arreglo de 15 leds de luz amarilla de luz visible, un sensor PIR modelo AMN41121 del fabricante Panasonic, una radio XBee-PRO 900HP del fabricante Digi, un reloj digital (RTC) modelo DS323 y una memoria micro SD.
- Se diseñó las placas de circuito impreso (PCB) de ambos nodos sensores en el programa Eagle, tomando como referencia el diagrama esquemático matriz del Arduino Mega, del cual se retiró componentes prescindibles y se agregó los componentes propios de cámara trampa y WMSN, de tal manera que todos los componentes encajen en una sola placa sin el uso de shields; logrando así un tamaño compacto de dimensiones 6.00 x 9.50 cm.
- Se fabricó las placas de circuito impreso (PCB) de doble capa de ambos nodos sensores y se soldaron correctamente todos los componentes propios del sistema WMSN prototipo.
- Se programó las líneas de código que proporcionan un correcto funcionamiento de la cámara Arducam OV5642 de 5 MP de resolución en ambos nodos, asimismo, se adaptó las líneas de código elaboradas por el GTR – PUCP del proyecto TapirChip para la correcta comunicación entre los nodos sensores del sistema WMSN.

- Se realizó pruebas de consumo de energía, tomando como criterio que cada nodo sensor toma 24 fotos por día y usa una batería de 20 Ah, en las que se obtuvo una autonomía de 110.45 y 99.46 días para el nodo sensor sumidero y nodo sensor trampa, respectivamente. Asimismo, la autonomía del nodo sensor sumidero disminuye conforme aumenta la cantidad de nodos trampa asociados a él; por ejemplo, con 2, 3 y 4 nodos sensores trampa se obtiene una autonomía de 89.13, 74.71 y 64.31 días, respectivamente.
- Se realizó pruebas para obtener RSSI y packet data rate en las que se obtuvo una distancia máxima de transmisión de 150 m con un 94% de packet data rate y con un nivel de potencia (RSSI) de -68 dBm en la radio transmisora y -64 dBm en la radio receptora. Por otro lado, se determinó que al enviar fotos de 250 kB el throughput promedio es de 2126.6 bytes/segundo con una duración de envío de 90 – 150 segundos por foto.
- Se determinó que el tiempo de captura de imagen promedio es de 5.25 segundos en ambos nodos sensores desde que el sensor PIR se activa hasta que la foto se almacena completamente en la memoria micro SD.

RECOMENDACIONES

- Los nodos sensores del sistema WMSN por su uso se ubican en zonas de la amazonia peruana en la que se presentan condiciones climáticas adversas como lluvia, humedad, alto gradiente térmico; además, están expuestos al polvo y a posibles daños producidos por pobladores locales y animales; por ello, es recomendable la fabricación de un case que garantice protección contra el polvo, agua y vandalismo.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Estado Peruano, «Plataforma digital única del Estado Peruano,» [En línea]. Available: <https://www.gob.pe/732-ministerio-del-ambiente-que-hacemos>.
- [2] J. Smith y J. Schwartz, «LA DEFORESTACIÓN EN EL PERÚ,» WWF-PERÚ, Lima, 2015.
- [3] Ministerio de Ambiente, Cuarto informe nacional sobre la aplicación del Convenio de Diversidad Biológica (2006-2009) Capítulos I, II, III, IV Apéndices, y Anexo Áreas Protegidas, Lima: Dirección General de Diversidad Biológica del MINAM, 2010.
- [4] M. A. Plenge, List of the Birds of Peru, Perú: Sernanp, 2010.
- [5] Frost, Darrel; American Museum of Natural History, «Amphibians Species of the World (Version 6.0): an Online Reference,» 1 Julio 2014. [En línea]. Available: <http://research.amnh.org/vz/herpetology/amphibia/>.
- [6] P. Uetz y J. Hallermann, «The Reptile Database,» 1 Julio 2014. [En línea]. Available: http://reptile-database.reptarium.cz/advanced_search.
- [7] V. Pacheco, R. Cadenillas, E. Salas, C. Tello y H. Zeballos, «Diversidad y endemismo de los mamíferos del Perú,» *Revista Peruana de Biología*, vol. 16, n° 1, pp. 005-032, 2009.
- [8] J. M. Thiollay, «Disturbance, Selective Logging and Bird Diversity: A Neotropical Forest Study,» *Biodiversity and Conservation*, vol. 6, pp. 1155-1173, 1997.
- [9] Ministerio del Ambiente, Guía de inventario de la fauna silvestre, Lima: Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural, 2015, p. 8.
- [10] Estado Peruano, «Plataforma Digital Única del Estado Peruano,» [En línea]. Available: <https://www.peru.gob.pe/docs/estado.pdf>.
- [11] Estado Peruano, «Plataforma digital única del Estado Peruano,» [En línea]. Available: <https://www.gob.pe/4195-instituto-de-investigaciones-de-la-amazonia-peruana-que-hacemos>.
- [12] SERNANP, «SERNANP,» [En línea]. Available: <http://www.sernanp.gob.pe/ques-es-un-anp>.

- [13] SERNANP, INEI, «SERNANP,» 03 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://www.sernanp.gob.pe/documents/10181/165198/Mapa+ANP+03.03.2020.jpg/4dc6ee8f-286c-4ee2-837c-2183e11b2225?t=1583338509253>. [Último acceso: 23 Junio 2020].
- [14] Estado Peruano, «Plataforma Única del Estado Peruano,» [En línea]. Available: <https://www.gob.pe/870-organismo-de-evaluacion-y-fiscalizacion-ambiental-que-hacemos>.
- [15] SENACE, «SENACE,» [En línea]. Available: <https://www.senace.gob.pe/nosotros/sobre-senace/>.
- [16] Estado Peruano, «Plataforma Única del Estado Peruano,» [En línea]. Available: <https://www.gob.pe/717-ministerio-de-agricultura-y-riego-que-hacemos>.
- [17] Estado Peruano, «Plataforma Digital Única del Estado Peruano,» [En línea]. Available: <https://www.gob.pe/4495-servicio-nacional-forestal-y-de-fauna-silvestre-que-hacemos>.
- [18] «International Union for Conservation of Nature,» [En línea]. Available: <https://www.iucn.org/es/acerca-de-la-uicn>.
- [19] «World Wildlife Fund,» [En línea]. Available: <http://www.wwf.org.pe/nosotros/>.
- [20] FAO y SERFOR, Nuestros Bosques en Numeros. Primer reporte del Inventario Nacional Forestal y de Fauna Silvestre, Lima: Colectivo Comunicación y Sostenibilidad SAC, 2017.
- [21] A. & D. J. Barnett, Expedition field techniques: small mammals (excluding bats), London: Expedition Advisory Centre, Royal, 1995.
- [22] C. J. Krebs, D. Reid y D. & G. S. Morris, «Small mammal population monitoring. Artic Wolves sampling protocols,» 2008, pp. 1-12.
- [23] D. E. Wilson, F. R. Cole, J. D. Nichols, R. R. y M. S. Foster, Measuring and monitoring biological diversity: Standard Methods for Mammals, Washington D.C.: Smithsonian Institution Press, 1996.
- [24] J. L. Tellería, Manual para el censo de los vertebrados terrestres, Madrid: Raíces, 1986.
- [25] C. Vargas Gonzáles, E. Rojas Báez, D. Castillo Soto, V. Espinoza Mendoza, A. Calderón-Urquiza Carbonel, R. Giudice Granados y N. Málaga Durán, «Reporte de la

perdida de los bosques húmedos amazónicos al 2011 - 2013,» Ministerio del Ambiente, Lima, 2013.

- [26] O. R. Wearn y P. Glover-Kapfer, *Camera-trapping for conservation: a guide to best-practices*, Woking: WWF-UK, 2017.
- [27] National Geographic Society, «National Geographic,» 20 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.nationalgeographic.com/photography/proof/2015/11/20/meet-grandfather-flash-the-pioneer-of-wildlife-photography/>. [Último acceso: 19 Junio 2020].
- [28] V. Athreya, V. Chavan, M. Ghosh, F. Hanssen, A. Harihar y T. Hirsch, *Publishing Camera Trap Data, a Best Practice Guide*, Copenhagen: Global Biodiversity Information Facility, 2014.
- [29] M. Raby, «Ark and Archive: making a place for long-term research on Barro Colorado Island,» Panama, *Isis*, 2015, p. 798–824.
- [30] L. Beaudrot, J. Ahumada, T. O'Brien, P. Alvarez-Loayza, K. Boekee y A. Campos-Arceiz, «Standardized assessment of biodiversity trends in tropical forest protected areas: the end is not in sight,» *PLOS Biology*, 2016.
- [31] WWF-UK, «WWF-UK,» [En línea]. Available: <https://www.wwf.org.uk/project/conservationtechnology/camera-trap>.
- [32] Bushnell, «Naturespy Shop,» [En línea]. Available: <https://shop.naturespy.org/product/bushnell-natureview-cam-hd-119438/>. [Último acceso: 2020 Junio 23].
- [33] T. Berkel, *Expedition Field Techniques Camera Trapping for Wildlife Conservation*, London: Royal Geographical Society with IBG, 2014.
- [34] J. Brown y S. D. Gehrt, *The basics of using remote cameras to monitor wildlife*, Columbus: Ohio State University Extension Agriculture and Natural Resources Fact Sheet, 2009.
- [35] R. M. Jackson, J. D. Roe, R. Wangchuk y D. O. Hunter, «Estimating Snow Leopard Population Abundance Using Photography and Capture-Recapture Techniques,» *Wildlife Society Bulletin*, pp. 772-781, 2006.
- [36] P. Wegge, C. P. Pokheral y S. R. and Jnawali, «Effects of trapping effort and trap shyness on estimates of tiger abundance from camera trap studies,» *Animal Conservation*, p. 251–256, 2004.

- [37] J. Schipper, «Camera-trap avoidance by Kinkajous *Potos flavus*: rethinking the ‘non invasive’ paradigm,» *Small Carnivore Conservation*, n° 38–41, 2007.
- [38] Trailcampro, «Trailcampro,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.trailcampro.com/rechargeablebatteriesforgamecameras.aspx>.
- [39] F. Trolliet, M.-C. Huynen, C. Vermeulen y A. Hambuckers, «Use of camera traps for wildlife studies. A review,» *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, pp. 446-454, 2014.
- [40] E. Meijaard, A. Chener y C. Smeenk, «“New Bornean carnivore” is most likely a little known flying squirrel,» *Mammal Review*, p. 318–324, 2006.
- [41] W. McShea, T. Forrester, R. Costello, Z. He y R. Kays, «Volunteer-run cameras as distributed sensors for macrosystem mammal research,» *Landscape Ecology*, p. 55–66, 2016.
- [42] A. Swanson, M. Kosmala, C. Lintott y C. Packer, «A generalized approach for producing, quantifying, and validating citizen science data from wildlife images,» *Conservation Biology*, p. 520–531, 2016.
- [43] D. Welbourne, «A method for surveying diurnal terrestrial reptiles with passive infrared automatically triggered cameras,» *Herpetological Review*, p. 247–25, 2013.
- [44] SERNANP, «Diseño de monitoreo de Oso Andino y Tapir de Montaña utilizando cámaras trampa: Experiencia en el Santuario Nacional Tabaconas Namballe,» CANO, Lima, 2017.
- [45] SERNANP, «Inventario y monitoreo de mamíferos medianos y grandes en el Parque Nacional de Cutervo utilizando trampas cámara,» Lima, 2015.
- [46] I. Akyildiz, T. Melodia y K. Chowdury, «Wireless Multimedia Sensor Networks: A Survey,» *IEEE Wireless Communication (IEEE)*, vol. 14, n° 6, p. 32–39, 2007.
- [47] J. Yick, B. Mukherjee y D. Ghosal, «Wireless Sensor Network Survey,» *Computer Networks (Elsevier)*, n° 52, p. 2292–2330, 2008.
- [48] B. Warneke y K. Pister, «MEMS for Distributed Wireless Sensor Networks,» *9th International Conf. on Electronics, Circuits and Systems. Dubrovnik: IEEE*, p. 291–294, 2002.

- [49] J. Yick, B. Mukherjee y D. Ghosal, «Analysis of a Prediction-based Mobility Adaptive,» de *Second International Conference on Broadband Networks (BROADNETS)*, IEEE, Ed., Boston, 2005, p. 753–760.
- [50] M. Castillo-Effen, D. Quintela, R. Jordan, W. Westhoff y W. Moreno, «Wireless Sensor Networks for Flash-Food Alerting,» de *Fifth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits, and Systems*, Dominican Republic, IEEE, 2004, p. 142–146.
- [51] T. Gao, D. Greenspan, M. Welsh, R. Juang y A. Alm, «Vital Signs Monitoring and Patient Tracking over a Wireless Network,» de *27th IEEE EMBS Annual International Conference*, Shanghai, IEEE, 2005, p. 102–105.
- [52] G. Wener-Allen, «Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano,» *Internet Computing (IEEE)*, p. 18–25, 2006.
- [53] A. Khalifeh, H. Salah, S. Alouneh, A. Al-Assaf y K. Darabkh, «Performance Evaluation of DigiMesh and ZigBee Wireless Mesh Networks,» de *International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, 2018, pp. 1-6.
- [54] XBee and Digi, «Wireless Mesh Networking: ZigBee vs. Digi Mesh,» Digi. Inc, 2008.
- [55] L. Camacho, R. Baquerizo, J. Palomino y M. Zarzosa, «Deployment of a Set of Camera Trap Networks for Wildlife Inventory in Western Amazon Rainforest,» *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, n° 23, pp. 8000-8007, 2017.
- [56] Arduino, «Arduino,» 2020. [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>.
- [57] «Digikey,» [En línea]. Available: <https://www.digikey.com/product-detail/en/microchip-technology/ATMEGA2560-16AUR/ATMEGA2560-16AURCT-ND/3789436>.
- [58] «Arducam,» [En línea]. Available: http://www.arducam.com/wp-content/uploads/2012/11/OV5642_module.jpg.
- [59] «Digikey,» [En línea]. Available: <https://www.digikey.com/product-detail/es/panasonic-electric-works/AMN41121/255-1808-ND/735391>.
- [60] M. C. A. L. M. P. P. F. C. B. T. Matteo Ceriotti, «Motes in the Jungle: Lessons Learned from a Short-Term,» *Real-World Wireless Sensor Networks: 4th International Workshop*, pp. 25-36, 2010.

- [61] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, «Plataforma digital única del Estado Peruano,» 2020. [En línea]. Available: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/893119/11_Bandas_de_899___915_MHz_y_944___960_MHz.pdf.
- [62] «Digi,» [En línea]. Available: <https://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/sub-1-ghz-modules/xbee-pro-xsc>.
- [63] «Digikey,» [En línea]. Available: <https://www.digikey.com/product-detail/es/maxim-integrated/DS3231SN-T-R/DS3231SN-T-RCT-ND/3894827>.

