



REPÚBLICA DE PANAMÁ.

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA.

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y TECNOLOGÍA

**DISEÑO DE RED IOT HÍBRIDA PARA MONITOREO
AMBIENTAL EN EL TRANSECTO RANCHO FRÍO DEL
PARQUE NACIONAL DARIÉN**

PROYECTO DE TRABAJO PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER

Maestría Profesional en Redes de Comunicación con Énfasis en Seguridad

Opción de Titulación: Proyecto de Graduación

Autor: José Leopoldo Castillo Domínguez

Cédula: 8-719-1314

Cohorte: N.º58 (012025)

Tutor: José Luis Munive De León

Ciudad de Panamá, 19 de junio de 2026



REPÚBLICA DE PANAMÁ.

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA.

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y TECNOLOGÍA

**DISEÑO DE RED IOT HÍBRIDA PARA MONITOREO
AMBIENTAL EN EL TRANSECTO RANCHO FRÍO DEL
PARQUE NACIONAL DARIÉN**

PROYECTO DE TRABAJO PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER
Maestría Profesional en Redes de Comunicación con Énfasis en Seguridad
Opción de Titulación: Proyecto de Graduación

Autor: José Leopoldo Castillo Domínguez

Ciudad de Panamá, 19 de junio de 2026



CARTA DE APROBACIÓN DEL TUTOR.

Ciudad de Panamá, 19 de junio de 2026

Profesor

Héctor Mazurkiewicz, Ed.D.

Coordinador del Comité de Titulación de Estudios de Grado y Postgrado

Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología

Presente.

Por medio de la presente, en mi carácter de Tutor académico del Proyecto de Graduación titulado “DISEÑO DE RED IOT HÍBRIDA PARA MONITOREO AMBIENTAL EN EL TRANSECTO RANCHO FRÍO DEL PARQUE NACIONAL DARIÉN” presentado por el estudiante José Leopoldo Castillo Domínguez, con cédula de identidad personal No. 8-719-1314, aspirante al grado de Magíster en Redes de Comunicación con énfasis en Seguridad, hago constar que el trabajo reúne los requisitos académicos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que oportunamente designe el Comité de Titulación.

El trabajo se enmarca en la línea de investigación: Redes Inalámbricas y Comunicaciones IoT.

Atentamente,

Profesor José Luis Munive De León
cédula de identidad N°8-804-492
Tutor académico



INFORME DE ACTIVIDADES DE TUTORÍA

OPCIÓN DE TITULACIÓN: PROYECTO DE GRADUACIÓN

Programa de Maestría: Redes de Comunicación con énfasis en Seguridad.

Estudiante: José Leopoldo Castillo Domínguez.

Cohorte: N.º58 (012025)

Tutor: Prof. José Luis Munive De León.

Título del trabajo de grado: Diseño de Red IoT Híbrida para Monitoreo Ambiental en el Transecto Rancho Frío del Parque Nacional Darién.

Línea de Investigación: Redes Inalámbricas y Comunicaciones IoT.

Nº	FECHA	HORA	Objetivo principal	Observación / Acuerdos
1	20/04/2026	05:19 PM	Revisión de Anteproyecto	Aprobación del tema y perfección del título del trabajo
2	27/04/2026	06:00 PM	Revisión de trabajo	Ajustes a objetivos específicos
3	12/05/2026	12:00 PM	Revisión de trabajo	Ampliar antecedentes
4	08/06/2026	10:00 AM	Revisión de trabajo	Fortalecer análisis comparativo
5	16/06/2026	12:00 PM	Ajustes Finales	Completar anexos técnicos
6	18/06/2026	12:00 PM	Revisión final de formato	Verificación de paginación, índices, firmas y correcciones finales del documento

Comentarios finales acerca de la investigación: Declaramos que las especificaciones anteriores representan el proceso de dirección del trabajo de grado arriba mencionado.

Firma del estudiante

Firma del tutor(a)

DEDICATORIA

A mi familia, raíz y sostén de todo lo que soy. Por cada palabra de aliento en los momentos difíciles, por la paciencia que nunca faltó y por creer en mí antes que yo mismo.

A los guardaparques del Parque Nacional Darién, que sin reflectores ni aplausos caminan cada día por senderos que pocos conocen, custodiando una riqueza que pertenece a todos. Este trabajo nació pensando en hacer más liviana su labor.

A las futuras generaciones de investigadores, conservacionistas y soñadores panameños: que encuentren en la tecnología no un fin en sí mismo, sino un puente entre el conocimiento y la naturaleza que nos sostiene.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, por darme la vida, la fortaleza, la sabiduría y la oportunidad de iniciar y culminar esta Maestría. Sin su guía, este logro no habría sido posible.

A mi familia, por su apoyo constante, comprensión y palabras de ánimo en cada etapa de este camino académico y profesional.

A la Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología (UNICyT), por brindarme la oportunidad de cursar la Maestría en Redes de Comunicación con énfasis en Seguridad y fortalecer mi formación profesional.

A mi tutor, José Luis Munive De León, por su orientación, paciencia y valiosos aportes durante el desarrollo de este proyecto de graduación.

ÍNDICE GENERAL

Portada.....	i
Portada interna.....	ii
Carta de aprobación del tutor.....	iii
Informe de actividades de tutoría.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Índice general.....	vii
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras.....	xi
Lista de siglas.....	xii
Resumen.....	xiii
Abstract.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.1 Formulación del Problema.....	5
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo General.....	6
1.2.2 Objetivos Específicos.....	7
1.3 Justificación.....	7
1.3.1 Necesidad.....	7
1.3.2 Importancia.....	8
1.3.3 Pertinencia.....	8
1.3.4 Relevancia.....	8
1.3.5 Impacto.....	9
1.4 Alcance y Delimitación del Proyecto.....	9
1.4.1 Alcance.....	9
1.4.2 Delimitación.....	10
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Antecedentes.....	12
2.1.1 Redes IoT y LoRaWAN en Monitoreo Ambiental.....	12

2.1.2 Modelos de Propagación en Entornos Forestales	13
2.1.3 Investigaciones en Parque Nacional Darién	13
2.2 Bases Teóricas	14
2.2.1 Tecnología LoRaWAN	14
2.2.2 Comunicación Satelital IoT LEO	16
2.2.3 Redes de Sensores Inalámbricos (WSN)	16
2.2.4 Modelos de Propagación de Radiofrecuencia	17
2.3 Definiciones Conceptuales	19
2.4 Caracterización del Área de Estudio	21
2.4.1 Ubicación Geográfica	21
2.4.2 Clasificación del Bosque	21
2.4.3 Condiciones Climáticas	22
2.4.4 Biodiversidad: Mamíferos Registrados	23
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	25
3.1 Tipo de Investigación	26
3.2 Diseño de la Investigación	27
3.3 Herramientas de Simulación	28
3.3.1 NS3-LoRa	28
3.3.2 Radio Mobile	29
3.3.3 MATLAB	30
3.4 Modelos de Propagación	30
3.5 Parámetros Técnicos y Configuración	32
3.6 Criterios de Evaluación	33
3.7 Procedimientos	33
3.7.1 Procedimiento de Simulación de Cobertura	34
3.7.2 Procedimiento de Simulación de Red en NS3-LoRa	34
3.7.3 Procedimiento de Modelado Energético en MATLAB	34
3.7.4 Diseño del instrumento de validación por expertos	35
3.8 Consideraciones éticas	36
CAPÍTULO IV. RESULTADOS, ANÁLISIS Y PROPUESTA	38
4.1 Diseño de Topología de Red	39

4.2 Resultados de Simulación de Cobertura RF	40
4.3 Resultados de Consumo Energético	43
4.4 Métricas de Rendimiento de Red	47
4.5 Topología Híbrida Final LoRa-Satélite	50
4.6 Análisis de Resultados	51
4.6.1 Interpretación de Cobertura RF.....	51
4.6.2 Viabilidad Energética.....	52
4.6.3 Análisis de Desempeño de la Red	53
4.6.4 Validación de la Arquitectura Híbrida	55
4.7 Fundamentación de la propuesta.....	56
4.8 Objetivos y principios	57
4.9 Componentes de la propuesta	57
4.9.1 Nodos sensores IoT	57
4.9.2 Red LoRaWAN local	57
4.9.3 Gateways y enlace satelital.....	57
4.9.4 Servidor, almacenamiento y visualización.....	58
4.9.5 Seguridad y gestión de dispositivos	58
4.9.6 Energía y mantenimiento	58
4.10 Plan de implementación e indicadores.....	59
4.11 Validación conceptual de la propuesta.....	59
Conclusiones.....	61
Recomendaciones.....	65
Referencias Bibliográficas.....	70
Anexos	73
Anexo A. Especificaciones técnicas de equipos	74
Anexo B. Parámetros y configuraciones de simulación.....	76
Anexo C. Instrumento propuesto para validación por expertos.....	78
Anexo D. Prompts – Declaración de uso de herramienta de inteligencia Artificial.....	80
Anexo E. Evidencias técnicas, simulaciones y figuras de apoyo	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Plan de implementación e indicadores de seguimiento.....	59
Tabla 2. Especificaciones técnicas de nodos sensores IoT	74
Tabla 3. Especificaciones técnicas de gateways LoRa	75
Tabla 4. Matriz propuesta de validación por expertos	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Topología híbrida final con ubicación de nodos	40
Figura 2. Mapa de cobertura RF en el transecto T4.....	42
Figura 3. Análisis de consumo energético de nodos IoT	46
Figura 4. Métricas de rendimiento de red (PDR, latencia, throughput).....	49
Figura 5. Configuración del gateway LoRaWAN y estado de dispositivos Conectados	83
Figura 6. Herramienta de configuración del módem Iridium 9603N	84
Figura 7. Despliegue de nodos y gateways sobre el transecto T4 Rancho Frío ...	85
Figura 8. Flujo de datos desde el nodo sensor hasta el servidor central	86
Figura 9. Representación de la topología LoRaWAN elaborada en GNS3	87
Figura 10. Fragmento de configuración de la simulación LoRaWAN en NS3	88
Figura 11. Resultados consolidados de simulación NS3-LoRa.....	89
Figura 12. Consola de tráfico y recepción de paquetes LoRaWAN	90

LISTA DE SIGLAS

ACK: Acknowledgment o acuse de recibo.

ADR: Adaptive Data Rate.

AES: Advanced Encryption Standard.

APN: Access Point Name.

ASEP: Autoridad Nacional de los Servicios Públicos.

BW: Bandwidth o ancho de banda.

CSS: Chirp Spread Spectrum.

IoT: Internet de las Cosas.

ISM: Industrial, Scientific and Medical.

LEO: Low Earth Orbit.

LoRa: Long Range.

LoRaWAN: Long Range Wide Area Network.

MiAmbiente: Ministerio de Ambiente de Panamá.

NS-3: Network Simulator 3.

PDR: Packet Delivery Ratio.

PND: Parque Nacional Darién.

RSSI: Received Signal Strength Indicator.

SF: Spreading Factor.

SNR: Signal-to-Noise Ratio.

STRI: Smithsonian Tropical Research Institute.

UNICyT: Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología.

WSN: Wireless Sensor Network.



REPÚBLICA DE PANAMÁ.

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y TECNOLOGÍA.

**DISEÑO DE RED IOT HÍBRIDA PARA MONITOREO AMBIENTAL EN EL
TRANSECTO RANCHO FRÍO DEL PARQUE NACIONAL DARIÉN.**

Autor (a): José Leopoldo Castillo Domínguez

Tutor: José Luis Munive De León

Año: 2026

RESUMEN

El Parque Nacional Darién presenta desafíos importantes para el monitoreo ambiental debido a la ausencia de infraestructura de comunicaciones en zonas remotas de investigación. El objetivo de este proyecto fue diseñar una arquitectura de red IoT híbrida para el monitoreo ambiental en el transecto Rancho Frío del Parque Nacional Darién, integrando comunicación LoRaWAN en la banda de 915 MHz y un enlace satelital IoT como medio de transporte hacia Internet. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo proyectivo, con diseño documental y apoyo en simulación computacional, sin ejecución experimental de campo. Para evaluar la propuesta se utilizaron herramientas como NS3-LoRa, Radio Mobile y MATLAB, aplicando criterios de cobertura, pérdida de paquetes, latencia, consumo energético, autonomía y viabilidad técnica. Asimismo, se consideraron modelos de propagación en entornos con vegetación, incluyendo ITU-R P.833-10 y Weissberger, con el fin de estimar el comportamiento de la señal en condiciones de bosque tropical húmedo. Los resultados permitieron proponer una arquitectura compuesta por nodos sensores, dos gateways LoRaWAN, enlace satelital IoT y servidor cloud para la recepción y visualización de datos ambientales. La propuesta evidenció viabilidad técnica para operar con bajo consumo energético, niveles aceptables de entrega de paquetes y capacidad de comunicación en un entorno sin infraestructura terrestre. Como complemento metodológico, se diseñó un instrumento de validación por expertos para una futura evaluación técnica antes de una eventual implementación piloto.

Palabras clave: IoT, LoRaWAN, monitoreo ambiental, Parque Nacional Darién, redes inalámbricas, comunicación satelital, bosque tropical.

Línea de investigación: Redes Inalámbricas y Comunicaciones IoT



REPUBLIC OF PANAMA
INTERNATIONAL UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
FACULTY OF COMPUTER SCIENCE AND TECHNOLOGY

**DESIGN OF A HYBRID IOT NETWORK FOR ENVIRONMENTAL MONITORING IN
THE RANCHO FRÍO TRANSECT OF DARIÉN NATIONAL PARK.**

Author: José Leopoldo Castillo Domínguez

Tutor: José Luis Munive De León

Year: 2026

ABSTRACT

Darién National Park presents important challenges for environmental monitoring due to the absence of communication infrastructure in remote research areas. The objective of this project was to design a hybrid IoT network architecture for environmental monitoring in the Rancho Frío transect of Darién National Park, integrating LoRaWAN communication in the 915 MHz band and an IoT satellite link as a backhaul connection to the Internet. The research was developed under a quantitative approach, with a projective scope, documentary design, and support from computational simulation, without experimental field implementation. To evaluate the proposal, tools such as NS3-LoRa, Radio Mobile, and MATLAB were used, considering coverage, packet loss, latency, energy consumption, autonomy, and technical feasibility criteria. Propagation models for vegetation environments, including ITU-R P.833-10 and Weissberger, were also considered to estimate signal behavior under humid tropical forest conditions. The results made it possible to propose an architecture composed of sensor nodes, two LoRaWAN gateways, an IoT satellite link, and a cloud server for receiving and visualizing environmental data. The proposal showed technical feasibility to operate with low energy consumption, acceptable packet delivery levels, and communication capability in an environment without terrestrial infrastructure. As a methodological complement, an expert validation instrument was designed for future technical evaluation before a possible pilot implementation.

Keywords: IoT, LoRaWAN, environmental monitoring, Darién National Park, wireless networks, satellite communication, tropical rainforest.

Research line: Wireless Networks and IoT Communications.

INTRODUCCIÓN

El Parque Nacional Darién (PND), declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1981, constituye uno de los reservorios de biodiversidad más importantes de América Central, con una extensión de 576,000 hectáreas que albergan ecosistemas de bosque tropical húmedo de excepcional valor ecológico (UNESCO, 1981). La gestión y conservación de esta área protegida enfrenta desafíos significativos derivados de su vastedad, difícil acceso y la ausencia de infraestructura tecnológica que permita el monitoreo continuo de variables ambientales y ecológicas críticas.

Actualmente, el Ministerio de Ambiente de Panamá (MiAmbiente) cuenta con 25 guardaparques distribuidos en 5 estaciones, quienes realizan el monitoreo de 14 transectos de investigación mediante visitas periódicas a estaciones equipadas con dataloggers autónomos. Esta metodología tradicional genera retrasos de 48 a 72 horas en la disponibilidad de información sobre temperatura, humedad, calidad del aire y presencia de fauna, lo que limita la capacidad de respuesta ante eventos críticos y reduce la eficiencia en la toma de decisiones para la gestión del parque (MiAmbiente, 2014).

El presente Proyecto de Graduación aborda esta problemática mediante el diseño de una arquitectura de red inalámbrica híbrida que integra tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), específicamente LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) operando en la banda de 915 MHz y comunicación satelital mediante constelaciones LEO (Low Earth Orbit), para el monitoreo ambiental en tiempo real del sendero Rancho Frío (transecto T4), el cual se extiende a lo largo de aproximadamente 5 kilómetros y constituye la unidad de muestreo más utilizada en investigaciones científicas dentro del parque.

El trabajo se inscribe en el paradigma positivista con enfoque cuantitativo y metodología proyectiva, orientado al diseño de una solución tecnológica basada exclusivamente en datos secundarios y simulación computacional, sin ejecución experimental de campo. Las herramientas de simulación empleadas incluyen NS3-LoRa

para el modelado de la red LoRaWAN, Radio Mobile para la predicción de propagación de radiofrecuencia sobre el terreno real, y MATLAB para el análisis energético de nodos con ciclos sleep/wake alimentados por energía solar.

Las bases teóricas del proyecto se fundamentan en los aportes de investigadores como Augustin et al. (2016) sobre las características técnicas de LoRa, Benkahla et al. (2021) en aplicaciones de redes LoRa para monitoreo forestal, y Cattani et al. (2017) en la evaluación experimental de la confiabilidad de comunicaciones LoRa de largo alcance. Adicionalmente, se incorporan los modelos de propagación ITU-R P.833-10 (International Telecommunication Union, 2019) para atenuación por vegetación y el modelo Weissberger (1982) específico para entornos forestales densos.

El documento se estructura en cuatro capítulos que abordan de manera sistemática el proceso de diseño y validación de la arquitectura propuesta:

El Capítulo I presenta el planteamiento del problema, formulando la pregunta de investigación sobre cuál es la arquitectura de red inalámbrica híbrida más adecuada para garantizar el monitoreo ambiental en tiempo real en el transecto T4, considerando las restricciones de energía, cobertura bajo dosel selvático, latencia y escalabilidad. Se establecen los objetivos generales y específicos, que abarcan desde la caracterización del entorno hasta la formulación de recomendaciones de escalabilidad y seguridad.

El Capítulo II desarrolla el marco teórico, que incluye antecedentes de investigación sobre IoT, LoRaWAN y monitoreo ambiental en bosques tropicales, las bases teóricas sobre tecnología LoRaWAN, satélites LEO, modelos de propagación y redes de sensores inalámbricos (WSN), definiciones conceptuales de términos clave, y la caracterización detallada del área de estudio (transecto Rancho Frío) incorporando datos ambientales y ecológicos de la tesis de Moreno Ortiz y Castillo (2018) sobre mamíferos terrestres y arbóreos en la Estación Rancho Frío.

El Capítulo III describe la metodología empleada, especificando el tipo y diseño de la investigación, las herramientas de simulación (NS3-LoRa, Radio Mobile, MATLAB), los modelos de propagación aplicados (ITU-R P.833-10, Weissberger), los parámetros técnicos y configuración de la red, los criterios de evaluación de métricas de rendimiento, y los procedimientos seguidos en cada etapa del diseño.

El Capítulo IV presenta los resultados obtenidos, Análisis y Propuesta, incluyendo el diseño de la topología de red con la ubicación óptima de 10 nodos sensores, los resultados de simulación de cobertura RF bajo dosel selvático, el análisis de consumo energético de nodos solares con ciclos sleep/wake, las métricas de rendimiento de red (latencia, Packet Delivery Ratio, throughput), y la propuesta de topología híbrida final LoRa-satélite.

Este proyecto aspira a contribuir al cuerpo de conocimiento sobre redes de sensores inalámbricos en entornos tropicales de alta pluviosidad y vegetación densa, donde los desafíos de atenuación por vegetación y consumo energético bajo condiciones de baja irradiancia solar representan limitaciones severas para las tecnologías convencionales. Los resultados beneficiarán directamente al Ministerio de Ambiente, los guardaparques de la Estación Rancho Frío, y los investigadores del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI), fortaleciendo la capacidad nacional de vigilancia ambiental automatizada y sentando las bases para la futura implementación de infraestructura IoT en áreas protegidas de Panamá.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Capítulo I. Planteamiento del Problema

1.1 Formulación del Problema.

El Parque Nacional Darién (PND), con una extensión de 576,000 hectáreas y declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1981, constituye uno de los reservorios de biodiversidad más importantes de América. Sin embargo, la gestión ambiental del parque enfrenta limitaciones críticas derivadas de la ausencia de infraestructura de comunicaciones en sus 14 transectos de investigación.

El sendero Rancho Frío (transecto T4), con una extensión aproximada de 5 kilómetros y ubicado en la Estación Rancho Frío a 94 metros sobre el nivel del mar, representa la unidad de muestreo más utilizada en investigaciones científicas del parque. No obstante, carece totalmente de infraestructura tecnológica para la transmisión de datos en tiempo real. El monitoreo actual se realiza mediante visitas periódicas a estaciones con dataloggers autónomos, lo que genera retrasos de 48 a 72 horas en la disponibilidad de información crítica sobre temperatura, humedad, calidad del aire y presencia de fauna (MiAmbiente, 2014).

Esta situación se agrava por la ausencia de cobertura celular GSM, cuyo último punto de señal se encuentra a 18 kilómetros del acceso vehicular a la estación, y por la inexistencia de red eléctrica convencional en la zona (MiAmbiente, 2014). Adicionalmente, las condiciones ambientales extremas del bosque tropical húmedo imponen desafíos técnicos significativos para cualquier sistema de comunicaciones inalámbricas:

- Atenuación severa de señales de radiofrecuencia por vegetación densa (hasta 30 dB/km adicionales bajo dosel).
- Humedad relativa superior al 85% durante la mayor parte del año.
- Precipitaciones anuales que exceden los 3,000 mm en ciertos sectores.
- Baja irradiancia solar para alimentación fotovoltaica debido a la cobertura del dosel.

- Efectos de multitrayectoria por reflexión en vegetación y relieve ondulado (80-250 msnm).

Los 25 guardaparques distribuidos en 5 estaciones del parque registran un promedio de 40 incidentes anuales de emergencia o extravío, cuya respuesta operativa se ve retardada por la falta de comunicaciones (MiAmbiente, 2014). Asimismo, los investigadores del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI) y de instituciones académicas nacionales requieren acceso continuo a datos ambientales para el desarrollo de proyectos científicos de conservación.

Ante este contexto, surge la necesidad de diseñar una arquitectura de red inalámbrica que permita el monitoreo ambiental en tiempo real bajo las restricciones técnicas, energéticas y climáticas propias del bosque tropical húmedo, garantizando cobertura continua, eficiencia energética y transmisión confiable de datos.

Pregunta de investigación:

¿Cuál es la arquitectura de red inalámbrica híbrida IoT más adecuada para garantizar el monitoreo ambiental en tiempo real a lo largo del sendero Rancho Frío (transecto T4, ~5 km) en el Parque Nacional Darién, considerando las restricciones de energía, cobertura bajo dosel selvático, latencia y escalabilidad propias de un entorno tropical remoto?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar una arquitectura de red inalámbrica híbrida IoT que integre tecnologías LoRaWAN y comunicación satelital LEO para el monitoreo ambiental en tiempo real a lo largo del sendero Rancho Frío del Parque Nacional Darién, garantizando cobertura continua, eficiencia energética y transmisión confiable de datos bajo las condiciones extremas del bosque tropical húmedo.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar las condiciones geográficas, climáticas y de vegetación del transecto T4 que inciden en la propagación de señales de radiofrecuencia y en el consumo energético de los nodos IoT.
2. Diseñar la topología de red híbrida LoRa-satélite, definiendo la ubicación óptima de los 10 nodos sensores, gateways y puntos de enlace ascendente a lo largo del sendero, así como los requerimientos técnicos y energéticos de cada nodo, ciclos de operación sleep/wake y autonomía bajo condiciones de baja irradiancia solar.
3. Modelar y simular la cobertura de radiofrecuencia en la banda de 915 MHz bajo dosel selvático usando NS3-LoRa, Radio Mobile y los modelos de atenuación ITU-R P.833 y Weissberger, incorporando pérdidas por multitrayectoria y condiciones meteorológicas adversas.
4. Evaluar las métricas de la red propuesta (latencia extremo a extremo, Packet Delivery Ratio, consumo energético y throughput) usando el simulador NS3-LoRa.
5. Formular recomendaciones de diseño para la escalabilidad de la arquitectura híbrida hacia los 13 transectos restantes del Parque Nacional Darién, incluyendo políticas de cifrado, autenticación de dispositivos IoT, gestión de vulnerabilidades y cumplimiento de regulación de ASEP sobre uso de bandas de radiofrecuencia.

1.3 Justificación

1.3.1 Necesidad

El Parque Nacional Darién requiere urgentemente sistemas de monitoreo ambiental automatizado que superen las limitaciones de los métodos tradicionales

basados en dataloggers autónomos. La implementación de una red IoT permitirá a MiAmbiente, los guardaparques y la comunidad científica acceder en tiempo real a información crítica sobre variables ambientales y presencia de fauna, mejorando significativamente la capacidad de respuesta ante eventos críticos y la toma de decisiones informadas para la gestión del parque.

1.3.2 Importancia

El proyecto aborda una problemática de alta relevancia para la conservación de áreas protegidas en Panamá, específicamente en uno de los ecosistemas más diversos del planeta declarado Patrimonio de la Humanidad. La disponibilidad de datos ambientales en tiempo real fortalecerá la investigación científica sobre cambio climático, comportamiento de especies amenazadas, y dinámicas ecológicas en bosques tropicales húmedos. Adicionalmente, contribuirá a la seguridad de guardaparques y visitantes mediante sistemas de alerta temprana.

1.3.3 Pertinencia

Este Proyecto de Graduación se alinea directamente con los objetivos de la Maestría en Redes de Comunicación con énfasis en Seguridad, al aplicar conocimientos avanzados en redes inalámbricas, protocolos IoT, modelado de propagación de radiofrecuencia y seguridad de dispositivos conectados. El diseño de la arquitectura híbrida LoRa-satélite demuestra la integración de tecnologías de vanguardia para resolver problemáticas reales en contextos de alta complejidad técnica.

1.3.4 Relevancia

El proyecto contribuye al cuerpo de conocimiento sobre redes de sensores inalámbricos en entornos tropicales de alta pluviosidad y vegetación densa, donde los desafíos de atenuación por vegetación (hasta 30 dB/km) y consumo energético bajo baja irradiancia solar representan limitaciones severas para tecnologías convencionales. Los

modelos de propagación ITU-R P.833 y Weissberger, aplicados específicamente a bosques tropicales centroamericanos, generarán datos valiosos para futuras investigaciones en contextos similares.

1.3.5 Impacto

El diseño propuesto tendrá impacto directo en tres áreas:

1. Gestión ambiental: Fortalecimiento de la capacidad de MiAmbiente para monitorear 576,000 hectáreas de área protegida mediante tecnología IoT escalable a los 13 transectos restantes.
2. Investigación científica: Provisión de infraestructura tecnológica para investigadores del STRI y academia nacional, facilitando estudios longitudinales sobre biodiversidad, cambio climático y servicios ecosistémicos.
3. Seguridad operativa: Mejora de la respuesta ante emergencias de guardaparques y visitantes, reduciendo los tiempos de reacción actuales que se ven comprometidos por la ausencia de comunicaciones.

Adicionalmente, el proyecto sentará las bases para la futura implementación de infraestructura IoT en otras áreas protegidas de Panamá, contribuyendo a la modernización de los sistemas nacionales de vigilancia ambiental automatizada.

1.4 Alcance y Delimitación del Proyecto

1.4.1 Alcance

El presente proyecto abarca:

- Diseño completo de la arquitectura de red híbrida LoRa-satélite para el transecto Rancho Frío (T4)
- Simulación de cobertura RF usando NS3-LoRa, Radio Mobile y modelos de propagación ITU-R P.833 y Weissberger
- Modelado energético de nodos solares con ciclos sleep/wake mediante MATLAB

- Evaluación de métricas de rendimiento (latencia, PDR, throughput, consumo energético)
- Diseño del instrumento de validación por expertos para evaluación futura de la propuesta antes de una implementación piloto.
- Recomendaciones de escalabilidad y seguridad para implementación futura

1.4.2 Delimitación

El proyecto no incluye:

- Implementación física de equipos en campo
- Adquisición de hardware IoT
- Instalación de nodos sensores en el transecto
- Pruebas experimentales de campo
- Visitas al Parque Nacional Darién
- Desarrollo de software de gestión de red
- Contratación de servicios satelitales

El proyecto se limita exclusivamente al diseño y simulación de la arquitectura de red, basado en datos secundarios y herramientas computacionales. La implementación física queda propuesta para fases futuras sujetas a aprobación y financiamiento por parte de MiAmbiente.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Capítulo II. Marco teórico

2.1 Antecedentes.

La aplicación de tecnologías IoT y redes de sensores inalámbricos para el monitoreo ambiental ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas dos décadas. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías en ecosistemas de bosque tropical húmedo presenta desafíos únicos que han sido abordados por diversos investigadores.

2.1.1 Redes IoT y LoRaWAN en Monitoreo Ambiental.

Augustin et al. (2016) realizaron un estudio fundamental sobre LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things, demostrando que la tecnología LoRa puede alcanzar rangos de transmisión superiores a 10 km en condiciones ideales con consumos energéticos inferiores a 100 mA en modo transmisión. Este trabajo estableció las bases teóricas para comprender el balance entre alcance, tasa de datos y consumo energético en redes LPWAN (Low Power Wide Area Network).

Benkahla et al. (2021) presentaron una implementación específica de LoRa-based IoT network for smart forest monitoring, donde desplegaron una red de sensores en un bosque francés para monitorear temperatura, humedad y detección de incendios. Los autores reportaron una cobertura del 85% del área forestal con una red de 12 nodos distribuidos en 8 km², aunque identificaron pérdidas significativas de señal (15-20 dB adicionales) en sectores de vegetación densa.

Cattani et al. (2017) condujeron una evaluación experimental de la confiabilidad de comunicaciones LoRa, demostrando que bajo condiciones de línea de vista, LoRa puede mantener un Packet Delivery Ratio (PDR) superior al 95% a distancias de hasta 6 km. Sin embargo, señalaron que la presencia de obstáculos naturales (árboles, relieve) puede reducir drásticamente el PDR a valores del 60-70% en ambientes con vegetación moderada.

Asimismo, las mediciones realizadas en redes LoRaWAN comunitarias y experimentales permiten reconocer que el desempeño real de la red puede variar según la densidad de gateways, la ubicación de nodos, las condiciones de propagación y la congestión del canal, por lo que resulta necesario validar métricas como cobertura, recepción de paquetes y calidad de señal en cada escenario de despliegue (Blenn & Kuipers, 2017).

2.1.2 Modelos de Propagación en Entornos Forestales.

La predicción de cobertura RF en bosques tropicales requiere modelos de propagación especializados que consideren la atenuación específica por vegetación. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) desarrolló la Recomendación ITU-R P.833-10 (2019) sobre atenuación en vegetación, la cual proporciona fórmulas empíricas basadas en frecuencia de operación, densidad de vegetación y distancia de penetración.

Weissberger (1982) propuso un modelo específico para predecir la atenuación de ondas de radio por árboles, ampliamente utilizado en diseño de enlaces de microondas terrestres. El modelo Weissberger establece una atenuación de $1.33 f^{0.284} d^{0.588}$ dB para frecuencias en el rango de 230 MHz a 95 GHz, donde f es la frecuencia en GHz y d es la profundidad de penetración en el bosque en metros. Para la banda de 915 MHz (0.915 GHz) en bosque denso, este modelo predice atenuaciones del orden de 20-30 dB por kilómetro de penetración.

2.1.3 Investigaciones en Parque Nacional Darién.

Moreno Ortiz y Castillo (2018) realizaron un estudio sobre la abundancia relativa de mamíferos terrestres y arbóreos en la Estación Rancho Frío del Parque Nacional Darién, utilizando metodologías de transectos lineales y cámaras trampa (fototrampeo). La revisión documental de Moreno Ortiz y Castillo (2018) evidenció la importancia ecológica de la Estación Rancho Frío, al reportar 18 especies de mamíferos terrestres y arbóreos. Este antecedente sirvió como referencia ambiental para justificar la necesidad de monitoreo en el transecto T4, sin asumir que dichos registros correspondan exclusivamente al tramo diseñado en el presente proyecto. Los autores recorrieron los

transectos T1 (Dos Bocas), T3 (Rancho Plástico) y T5 (Aguacate), así como los senderos Ancón y Pijibasal, proporcionando datos valiosos sobre las características del terreno, vegetación y condiciones ambientales del área.

El Plan de Manejo del Parque Nacional Darién 2014-2019 (MiAmbiente, 2014) identificó la falta de infraestructura de comunicaciones como una de las principales limitaciones operativas del parque, reportando 40 incidentes anuales de emergencia cuya respuesta se ve retardada por la ausencia de comunicaciones efectivas.

2.2 Bases Teóricas.

Desde una perspectiva de arquitectura tecnológica, el Internet de las Cosas se concibe como un ecosistema compuesto por dispositivos físicos, redes de comunicación, plataformas de procesamiento, servicios de aplicación y mecanismos de seguridad que permiten la captura, transmisión, almacenamiento y análisis de datos. Este enfoque resulta pertinente para el presente proyecto, debido a que la propuesta integra nodos sensores, gateways LoRaWAN, enlace satelital IoT y servidor cloud como componentes funcionales de una arquitectura de monitoreo ambiental distribuida (IEEE Standards Association, 2020).

2.2.1 Tecnología LoRaWAN.

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) es un protocolo de comunicación LPWAN diseñado específicamente para dispositivos IoT de bajo consumo energético que requieren transmitir pequeñas cantidades de datos a largas distancias (LoRa Alliance, 2022; LoRa Alliance, s. f.; The Things Network, s. f.). La tecnología se basa en la modulación de espectro ensanchado CSS (Chirp Spread Spectrum) desarrollada por Semtech, que proporciona robustez frente a interferencias y efectos de multitrayectoria (Maleki et al., 2023; Semtech, s. f.).

Características técnicas principales de LoRaWAN:

- Rango de comunicación: 2-5 km en entornos urbanos, hasta 15 km en áreas rurales con línea de vista
- Frecuencia de operación: Banda ISM 915 MHz en América (863-870 MHz en Europa).
- Tasa de datos: 0.3 a 50 kbps (adaptativa según condiciones del canal).
- Consumo energético: ~100 mA en transmisión, <1 μ A en modo reposo (sleep).
- Topología: Estrella de estrellas, donde los nodos sensores transmiten hacia uno o varios gateways LoRaWAN.
- Clases de dispositivos: Clase A (bajo consumo), Clase B (sincronizado), Clase C (siempre escuchando).
- Capacidad de carga útil: 51-222 bytes por trama (según Spreading Factor).
- Seguridad: Cifrado AES-128 en dos niveles (network session key y application session key).

El protocolo LoRaWAN define tres clases de dispositivos terminales (LoRa Alliance, 2022):

Clase A (All): Dispositivos de menor consumo energético que solo abren ventanas de recepción después de cada transmisión. Esta clase es ideal para sensores ambientales que reportan datos periódicamente.

Clase B (Beacon): Dispositivos que abren ventanas de recepción adicionales sincronizadas mediante beacons del gateway, permitiendo comunicación downlink programada con latencia predecible.

Clase C (Continuous): Dispositivos que mantienen ventanas de recepción abiertas continuamente (excepto durante transmisión), minimizando latencia, pero con mayor consumo energético.

2.2.2 Comunicación Satelital IoT LEO.

Los satélites en órbita terrestre baja (Low Earth Orbit, LEO) operan a altitudes entre 500 y 2,000 km, ofreciendo ventajas significativas para aplicaciones IoT en comparación con satélites geoestacionarios (GEO): menor latencia (20-40 ms vs. 600 ms), menor potencia de transmisión requerida, y cobertura global incluyendo regiones remotas sin infraestructura terrestre.

Constelaciones LEO relevantes para IoT:

- Iridium: 66 satélites activos, cobertura global, latencia 20-30 ms, carga útil hasta 340 bytes por mensaje (Iridium Communications, 2014).
- Starlink: Más de 4,000 satélites desplegados, inicialmente orientado a internet de banda ancha, pero con servicios IoT en desarrollo.
- Swarm Technologies: Red de nanosatélites (10×10×2.5 cm) diseñados específicamente para IoT, carga útil hasta 192 bytes por mensaje.
- Kinéis: Sistema francés con 25 nanosatélites, compatible con estándar Argos, optimizado para sensores remotos.

Para el contexto del Parque Nacional Darién, la comunicación satelital LEO resuelve el problema de la ausencia total de cobertura celular GSM, permitiendo que el gateway LoRa transmita datos agregados hacia el servidor de aplicación sin depender de infraestructura terrestre.

2.2.3 Redes de Sensores Inalámbricos (WSN).

Las Redes de Sensores Inalámbricos (Wireless Sensor Networks, WSN) se definen como sistemas distribuidos compuestos por nodos autónomos que integran

sensores, capacidad de procesamiento y comunicación inalámbrica, con el propósito de monitorear condiciones físicas o ambientales de forma colaborativa (Akyildiz et al., 2002).

Arquitectura típica de una WSN:

- Nodos sensores: Dispositivos de campo equipados con sensores, microcontrolador, transceptor RF y fuente de energía.
- Nodos coordinadores (gateway): Dispositivos de mayor capacidad que agregan datos de múltiples nodos sensores y los retransmiten hacia el servidor de aplicación.
- Estación base (sink): Punto de recepción final de datos, típicamente con conexión a internet o red corporativa.
- Red de comunicación: Infraestructura inalámbrica que interconecta los componentes (LoRa, Zigbee, Wi-Fi, satelital).

Desafíos específicos de WSN en bosques tropicales:

- Atenuación severa de RF por vegetación densa (modelo ITU-R P.833: hasta 30 dB/km).
- Limitaciones energéticas por baja irradiancia solar bajo dosel (reducción del 60-80% respecto a área abierta).
- Efectos de multitrayectoria por reflexión en follaje y relieve irregular.
- Alta humedad relativa (>85%) que incrementa la atenuación por absorción de agua.
- Variabilidad estacional en densidad de follaje (mínima en estación seca, diciembre-marzo).
- Dificultad de acceso para mantenimiento y reemplazo de baterías.

2.2.4 Modelos de Propagación de Radiofrecuencia.

La predicción de cobertura RF en el transecto Rancho Frío requiere la aplicación de modelos de propagación que permitan estimar el comportamiento de la señal en presencia de vegetación, relieve irregular, humedad y posibles pérdidas por

multitrayectoria. En este sentido, se consideraron modelos utilizados en el análisis de enlaces inalámbricos bajo condiciones forestales y escenarios de propagación terrestre:

Modelo ITU-R P.833-10 (2019):

La Recomendación ITU-R P.833-10 proporciona criterios para estimar la atenuación producida por la vegetación en enlaces de radiofrecuencia, considerando factores como la frecuencia de operación, la profundidad de penetración de la señal en el follaje y las características del entorno vegetal. Este modelo resulta pertinente para el presente proyecto, debido a que el transecto Rancho Frío se ubica en un entorno de bosque tropical húmedo, donde la vegetación puede afectar la cobertura y la estabilidad del enlace LoRaWAN en la banda de 915 MHz (International Telecommunication Union, 2019).

De forma general, la atenuación por vegetación puede representarse mediante una relación empírica dependiente de la distancia de penetración y de parámetros asociados a la densidad del follaje:

$A_v = A_m \times d^\gamma$ donde:

A_v representa la atenuación por vegetación.

A_m corresponde a un coeficiente asociado al entorno vegetal,

d representa la distancia o profundidad de penetración de la señal en la vegetación, y

γ es un exponente empírico relacionado con las condiciones del follaje.

Modelo Weissberger (1982):

El modelo de Weissberger permite estimar pérdidas adicionales causadas por la presencia de árboles y vegetación en enlaces terrestres. Su uso es apropiado como referencia complementaria para analizar sectores del recorrido donde la señal atraviesa áreas de vegetación densa o parcialmente cerrada (Weissberger, 1982).

La expresión general del modelo es:

$L = 1.33 \times f^{0.284} \times d^{0.588}$ [dB] donde:

L representa la pérdida por vegetación,

f es la frecuencia expresada en GHz y

d corresponde a la profundidad de vegetación considerada en metros.

Para este proyecto, el modelo fue utilizado como referencia teórica de apoyo, considerando la operación en la banda de 915 MHz y las condiciones de bosque húmedo tropical del área de estudio.

Modelo Two-Ray Ground Reflection:

En sectores del sendero con claros naturales o condiciones parciales de línea de vista, también se consideró el modelo Two-Ray Ground Reflection, el cual toma en cuenta tanto el rayo directo como el rayo reflejado en el suelo. Este modelo permite analizar escenarios donde la altura de las antenas, la distancia entre nodos y las reflexiones del terreno pueden influir en la potencia recibida.

$P_r = P_t \times G_t \times G_r \times (h_t^2 \times h_r^2 / d^4)$ en donde:

P_r es la potencia recibida,

P_t es la potencia transmitida,

G_t y G_r son las ganancias de las antenas transmisora y receptora,

h_t y h_r representan las alturas de las antenas, y

d corresponde a la distancia entre transmisor y receptor.

Este modelo fue considerado como complemento para interpretar el comportamiento de la señal en tramos con menor obstrucción vegetal.

2.3 Definiciones Conceptuales.

IoT (Internet of Things): Red de objetos físicos equipados con sensores, software y conectividad de red que les permite recopilar, transmitir e intercambiar datos dentro de una arquitectura tecnológica distribuida (IEEE Standards Association, 2020).

LoRa (Long Range): Técnica de modulación de espectro ensanchado CSS (Chirp Spread Spectrum) que permite comunicaciones de largo alcance con bajo consumo energético.

LoRaWAN: Protocolo de capa MAC (Media Access Control) diseñado para redes LPWAN que utilizan modulación LoRa.

LPWAN (Low Power Wide Area Network): Tecnología de red inalámbrica diseñada para comunicaciones de largo alcance y bajo ancho de banda con dispositivos de batería.

LEO (Low Earth Orbit): Órbita terrestre baja entre 500 y 2,000 km de altitud, utilizada por constelaciones de satélites de comunicaciones.

Spreading Factor (SF): Parámetro de modulación LoRa que define el compromiso entre alcance y tasa de datos (SF7 a SF12).

PDR (Packet Delivery Ratio): Métrica que representa el porcentaje de paquetes recibidos exitosamente respecto al total de paquetes transmitidos.

Latencia extremo a extremo: Tiempo transcurrido desde la captura de un dato por el sensor hasta su recepción en el servidor de aplicación.

Throughput: Tasa efectiva de transferencia de datos en una red, medida en bits por segundo (bps).

Duty Cycle: Porcentaje del tiempo durante el cual un dispositivo inalámbrico permanece transmitiendo dentro de un período determinado. En redes IoT de baja potencia, este parámetro debe configurarse considerando la eficiencia energética, la reducción de interferencias y la normativa vigente aplicable al uso de bandas ISM.

Gateway: Dispositivo que actúa como puente entre nodos sensores LoRa y el servidor de red, típicamente con conexión a internet o satelital.

Link Budget: Cálculo que contabiliza todas las ganancias y pérdidas en un enlace de RF desde el transmisor hasta el receptor, expresado en dB.

RSSI (Received Signal Strength Indicator): Indicador de la potencia de señal recibida, medida en dBm.

SNR (Signal-to-Noise Ratio): Relación entre la potencia de señal y la potencia de ruido, expresada en dB.

2.4 Caracterización del Área de Estudio.

2.4.1 Ubicación Geográfica.

El área de estudio se encuentra en el Parque Nacional Darién, provincia de Darién, República de Panamá. Específicamente, en la Estación Rancho Frío y el sendero/transecto T4 (Rancho Frío).

- Coordenadas UTM de la Estación Rancho Frío: 18 P 198800.90 m E y 887480.32 m N.
- Elevación: 94 metros sobre el nivel del mar (msnm).
- Área de estudio: 16 km² (zona de influencia de la Estación Rancho Frío).
- Extensión del transecto T4: Aproximadamente 5 km, con orientación Este-Oeste.
- Rango altitudinal del transecto: 80 a 250 msnm, con relieve ondulado y sectores de pendiente moderada.

2.4.2 Clasificación del Bosque.

Según la revisión documental del área de Rancho Frío, la zona presenta características asociadas a bosque semicaducifolio de tierras bajas y, desde el sistema de clasificación de Holdridge, corresponde a bosque húmedo tropical. La vegetación es

principalmente madura, con áreas intervenidas por sembradíos de plátano en las cercanías de comunidades indígenas, información utilizada como referencia ambiental para la caracterización del área de estudio (Moreno Ortiz & Castillo, 2018).

Familias vegetales predominantes como referencia ambiental del bosque húmedo tropical:

- Fabaceae
- Bombacaceae
- Sapotaceae
- Rubiaceae
- Lecythidaceae

Especies vegetales con importancia para fauna:

- *Dipteryx oleifera* (Almendro de monte).
- *Artocarpus* sp. (Fruta de pan).
- *Astrocaryum standleyanum* (Chunga).
- *Socratea exorrhiza* (Palma que camina).

2.4.3 Condiciones Climáticas.

El área de estudio presenta condiciones propias de un clima tropical húmedo, caracterizado por temperaturas elevadas, alta humedad relativa y precipitaciones abundantes durante gran parte del año. Estas condiciones fueron consideradas como referencia ambiental para el diseño de la red IoT híbrida, debido a su influencia sobre la propagación de radiofrecuencia, la eficiencia energética de los nodos solares y la resistencia requerida de los equipos en campo (MiAmbiente, 2014; Moreno Ortiz & Castillo, 2018).

El clima del área se clasifica como tropical húmedo, con las siguientes características:

- Temperatura media anual: 25-27°C.
- Rango de temperatura: 18-24°C (varía según elevación).

- Humedad relativa: Superior al 85% durante la mayor parte del año.
- Precipitación anual: 1,500-4,500 mm (puede exceder 3,000 mm en ciertos sectores)
- Estación seca: Diciembre hasta marzo-abril.
- Estación lluviosa: Marzo-abril hasta diciembre.

Estas condiciones climáticas tienen implicaciones directas para el diseño de la red IoT:

- Alta humedad incrementa la atenuación de señales RF por absorción de agua.
- Precipitaciones intensas reducen temporalmente el PDR durante eventos de lluvia.
- Baja irradiancia solar bajo dosel limita la eficiencia de paneles fotovoltaicos.
- Variabilidad estacional en densidad de follaje afecta la propagación RF (mayor atenuación en estación lluviosa).

2.4.4 Biodiversidad: Mamíferos Registrados.

Como antecedente ambiental del área, Moreno Ortiz y Castillo (2018) registraron 18 especies de mamíferos terrestres y arbóreos en la Estación Rancho Frío, Parque Nacional Darién, mediante transectos lineales y cámaras trampa. La distribución por órdenes es: Carnivora (5 especies), Primates (4), Rodentia (3), Didelphimorphia (1), Pilosa (1), Cingulata (1), Perissodactyla (1) y Artiodactyla (2).

Especies de particular importancia para conservación:

- *Tapirus bairdii* (Tapir) - Bioindicador de calidad del bosque, registrado con IAR 0.07 reg/km
- *Panthera onca* (Jaguar) - Bioindicador de calidad del bosque, registrado con IAR 0.03 reg/km
- *Ateles fusciceps* (Mono araña) - Especie de importancia ecológica registrada como antecedente ambiental en la Estación Rancho Frío (Moreno Ortiz & Castillo, 2018).
- *Leopardus pardalis* (Ocelote) - Felino más común del área, IAR 0.03 reg/km.
- *Puma concolor* (Puma) - IAR 0.03 reg/km en transecto, 2.61 fotos/100 días-trampa.

La presencia documentada de estas especies en la Estación Rancho Frío evidenció la importancia ecológica del área y justificó la necesidad de contar con mecanismos de monitoreo ambiental continuo. En el presente proyecto, estos registros fueron utilizados únicamente como antecedente ambiental y no como resultados propios del diseño de red IoT híbrida. Por tanto, la propuesta tecnológica se enfocó en el transecto T4 Rancho Frío como escenario de diseño y simulación, sin asumir que los registros de fauna reportados por Moreno Ortiz y Castillo (2018) correspondieran exclusivamente a dicho transecto.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Capítulo III. Marco Metodológico.

3.1 Tipo de Investigación.

El presente proyecto se clasifica como una investigación proyectiva con enfoque cuantitativo, enmarcada en el paradigma positivista. Según Hurtado de Barrera (2010), la investigación proyectiva consiste en la elaboración de una propuesta o modelo como solución a un problema o necesidad de tipo práctico, ya sea de un grupo social, una institución o de una región geográfica particular.

Clasificación metodológica:

- Según propósito: Investigación aplicada, orientada al diseño de una solución tecnológica para monitoreo ambiental.
- Nivel de profundidad: Descriptiva y proyectiva, al caracterizar el entorno y diseñar la arquitectura de red.
- Manipulación de variables: No experimental, basada en simulación computacional sin manipulación de variables en campo.
- Método de razonamiento: Analítico-deductivo, partiendo de fundamentos teóricos sobre redes IoT, propagación de radiofrecuencia y comunicación satelital para diseñar una arquitectura tecnológica aplicable al transecto Rancho Frío.
- Tipos de datos: Cuantitativo, con métricas numéricas (dB, ms, mA, porcentajes)
- Temporalidad: Transversal, realizada en un período específico (mayo 2026).
- Fuentes de información: Investigación documental basada en datos secundarios y simulación

3.2 Diseño de la Investigación.

El diseño metodológico adoptado es no experimental de tipo proyectivo, estructurado en siete etapas secuenciales:

Etap 1: Revisión documental y caracterización del área de estudio: Análisis de documentos técnicos, planes de manejo de MiAmbiente, tesis de Moreno Ortiz y Castillo (2018) sobre mamíferos en Estación Rancho Frío, normas UNICYT para proyectos de graduación, y especificaciones técnicas de tecnologías LoRaWAN y satelital LEO.

Etap 2: Análisis comparativo de tecnologías inalámbricas: Evaluación de tecnologías candidatas (LoRa, Sigfox, NB-IoT, Iridium, Starlink) mediante matriz de criterios: rango efectivo en entorno selvático, consumo energético, capacidad de carga útil, costo, disponibilidad en Panamá y robustez certificada ante humedad.

Etap 3: Diseño de la arquitectura de red híbrida: Definición de topología LoRa-satélite con ubicación de 10 nodos sensores distribuidos cada 500-600 m, gateways LoRa y punto de enlace satelital LEO. Especificación de componentes: sensores ambientales, módulos LoRa, paneles solares, baterías y clasificación IP65.

Etap 4: Simulación de cobertura y cálculo de link budget: Modelado de propagación RF en NS3-LoRa y Radio Mobile aplicando ITU-R P.833 y Weissberger para vegetación. Cálculo de presupuesto de enlace considerando potencia de transmisión (+14 dBm), ganancia de antenas, pérdidas por trayectoria libre, atenuación por vegetación, margen de desvanecimiento y sensibilidad del receptor (-137 dBm para SF12).

Etap 5: Evaluación de métricas de rendimiento: Simulación en NS3-LoRa para evaluar latencia extremo a extremo, Packet Delivery Ratio (PDR), throughput y consumo energético. Modelado energético en MATLAB para ciclos sleep/wake y autonomía de batería bajo baja irradiancia solar.

Etapas 6: Diseño del instrumento de validación por expertos: Se diseñó un instrumento de validación por expertos con el propósito de evaluar, en una fase posterior, la pertinencia técnica, coherencia, suficiencia y viabilidad de implementación de la arquitectura híbrida IoT propuesta. El instrumento fue estructurado mediante una matriz de evaluación con escala valorativa de 1 a 5, orientada a profesionales del área de redes inalámbricas, telecomunicaciones, IoT o infraestructura tecnológica.

Esta etapa no implicó la aplicación efectiva del instrumento a expertos durante el desarrollo del presente proyecto, debido a que el alcance del estudio se concentró en el diseño, simulación y análisis técnico de la arquitectura propuesta. No obstante, el instrumento fue incorporado como anexo metodológico para facilitar su aplicación futura antes de una implementación piloto en campo.

Etapas 7: Redacción del informe final: Documentación del proyecto conforme a la Variante B establecida por UNICyT, organizada en cuatro capítulos: Planteamiento del Problema, Marco Teórico, Marco Metodológico y Resultados, Análisis y Propuesta, seguido de conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos técnicos.

3.3 Herramientas de Simulación.

3.3.1 NS3-LoRa.

NS3-LoRa es una extensión del simulador de redes ns-3 desarrollada específicamente para modelar redes LoRaWAN. Permite simular la capa física de LoRa (modulación CSS, spreading factors, sensibilidad del receptor) y la capa MAC de LoRaWAN (clases de dispositivos, mecanismos de ADR - Adaptive Data Rate) La literatura técnica sobre simulación LoRaWAN en ns-3 respalda su uso para evaluar escalabilidad, desempeño y comportamiento de redes LPWAN antes de una implementación física (Khan & Portmann, 2020; Van den Abeele et al., 2017).

Parámetros configurados en NS3-LoRa:

- Frecuencia de operación: 915 MHz (canal central de la banda ISM en América).

- Spreading Factor: SF7 a SF12 (adaptativo según distancia y condiciones del canal).
- Bandwidth: 125 kHz (estándar LoRaWAN).
- Coding Rate: 4/5 (redundancia para corrección de errores).
- Potencia de transmisión: +14 dBm (25 mW).
- Sensibilidad del receptor: -137 dBm (SF12), -124 dBm (SF7).
- Número de nodos: 10 nodos sensores + 2 gateways.
- Topología: Estrella (star topology).
- Intervalo de transmisión: Configurable (60-300 segundos según tipo de sensor).
- Modelo de interferencia: Basado en SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio).

3.3.2 Radio Mobile.

Radio Mobile es una herramienta de predicción de propagación de radiofrecuencia que utiliza datos de elevación del terreno (DEM - Digital Elevation Model) para calcular cobertura RF. Implementa el modelo de propagación Longley-Rice (ITM - Irregular Terrain Model) y permite visualizar perfiles de terreno, zonas de Fresnel y mapas de cobertura. Este análisis puede apoyarse en modelos de elevación digital derivados de la misión SRTM para representar condiciones del terreno en estudios de cobertura (NASA Earthdata, s. f.).

Configuración en Radio Mobile:

- Frecuencia: 915 MHz.
- Potencia de transmisión: +14 dBm.
- Altura de antena transmisora: 3 m (sobre el suelo).
- Altura de antena receptora: 1.5 m.
- Ganancia de antenas: 2 dBi (antenas omnidireccionales).
- Modelo de terreno: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) con resolución de 30 m.
- Cobertura vegetal: Aplicación manual de factor de atenuación según modelo ITU-R P.833.
- Clima: Tropical húmedo (humedad >85%, precipitación >3000 mm/año).
- Variabilidad estadística: 50% tiempo, 50% ubicaciones (mediana de cobertura).

3.3.3 MATLAB.

MATLAB se utiliza para el modelado energético de nodos sensores con alimentación solar y ciclos sleep/wake. El modelo considera:

- Consumo en modo transmisión: 100 mA durante 0.5-2 segundos (según SF).
- Consumo en modo recepción: 15 mA durante ventanas RX1 y RX2 (clase A).
- Consumo en modo sleep: 0.5 μ A.
- Capacidad de batería: 10,000-20,000 mAh (Li-Ion 3.7V).
- Panel solar: 10-20 W con eficiencia del 15-20%.
- Irradiancia solar bajo dosel: Reducción del 60-80% respecto a área abierta (0.5-1.5 kWh/m²/día).
- Duty cycle: Configuración conservadora orientada a eficiencia energética, reducción de interferencias y cumplimiento de la normativa vigente aplicable a bandas ISM.
- Autonomía objetivo: Mínimo 15 días sin irradiancia solar.

3.4 Modelos de Propagación.

3.4.1 Modelo ITU-R P.833-10.

La Recomendación ITU-R P.833-10 (2019) proporciona métodos para estimar la atenuación específica de vegetación. Para el transecto Rancho Frío, clasificado como bosque tropical húmedo denso, se utilizó una aproximación empírica de apoyo para representar pérdidas adicionales por vegetación en el balance de enlace y en el análisis de cobertura. La expresión empleada fue tratada como referencia de diseño, no como sustituto único del modelo completo publicado por la UIT:

A partir de los rangos de referencia de la Recomendación ITU-R P.833-10 y del modelo de Weissberger, se adoptó un valor de diseño de 25 dB de atenuación por vegetación para enlaces aproximados de 500 m bajo condiciones de bosque tropical húmedo. Para el escenario de peor caso considerado en el balance de enlace, correspondiente a un tramo de 600 m bajo dosel denso, se utilizó un valor conservador de 30 dB. De esta forma, los valores de atenuación empleados no se asumieron como

mediciones de campo, sino como parámetros técnicos de diseño para representar condiciones desfavorables de propagación en el transecto Rancho Frío.

3.4.2 Modelo Weissberger.

El modelo Weissberger (1982) es específico para enlaces terrestres a través de vegetación:

Para evitar extrapolar el modelo fuera de su rango recomendado, Weissberger fue utilizado como referencia complementaria para estimar pérdidas por vegetación en sectores densos del trayecto, no como predicción única para todo el enlace de 500 m. La comparación con ITU-R P.833 permitió contar con una referencia técnica adicional para interpretar la atenuación por vegetación en el diseño de la red.

3.4.3 Modelo Two-Ray Ground Reflection.

En sectores del sendero con claros naturales o línea de vista parcial (aproximadamente 20% del transecto), se aplica el modelo Two-Ray Ground Reflection que considera el rayo directo y el reflejado:

$$P_r = P_t \times G_t \times G_r \times (h_t \times h_r / d^2)^2$$

Este modelo fue considerado como complemento para interpretar tramos con menor obstrucción vegetal. Considerando la expresión estándar $d_c = 4\pi \times h_t \times h_r / \lambda$, con $\lambda = 0.328$ m para 915 MHz, $h_t = 3$ m y $h_r = 1.5$ m, la distancia crítica aproximada es $d_c \approx 172$ m. Por tanto, el modelo Two-Ray resulta aplicable como referencia para distancias típicas entre nodos de 500 a 600 m, especialmente en sectores con claros naturales o línea de vista parcial.

3.4.4 Correspondencia entre modelos teóricos y simulación NS-3.

Los modelos ITU-R P.833-10, Weissberger, Two-Ray Ground Reflection y Longley-Rice fueron utilizados como base documental y de análisis para justificar las pérdidas por vegetación, relieve y propagación terrestre consideradas en el diseño. En la simulación ejecutada en NS-3, estas condiciones se representaron operativamente

mediante el modelo LogDistancePropagationLossModel con exponente de pérdida 3.76, utilizado como aproximación agregada del entorno de bosque tropical húmedo. De esta forma, los modelos teóricos sustentaron la selección y calibración conceptual de las pérdidas, mientras que el modelo log-distancia permitió implementar dichas condiciones dentro del simulador de red.

3.5 Parámetros Técnicos y Configuración.

3.5.1 Especificaciones de Nodos Sensores.

Cada nodo sensor IoT está compuesto por:

- Microcontrolador: MCU de bajo consumo (ARM Cortex-M0+, consumo <10 μ A en sleep).
- Módulo LoRa: SX1276 o similar (banda 915 MHz, +14 dBm, sensibilidad -137 dBm)
- Sensores ambientales:
 - - Temperatura/Humedad: SHT31 (rango -40 a +125°C, $\pm 0.3^\circ\text{C}$ precisión).
 - - Presión atmosférica: BMP280 (300-1100 hPa).
 - - Calidad del aire: CCS811 (eCO₂, TVOC).
 - - PIR (detección de movimiento fauna): HC-SR501.
- Alimentación: Panel solar 10W + batería Li-Ion 10,000 mAh.
- Antena: Omnidireccional 2 dBi (915 MHz).
- Enclosure: Caja IP65 resistente a humedad y polvo.
- Clase LoRaWAN: Clase A (menor consumo energético).
- Intervalo de transmisión: 300 segundos (5 minutos) para variables ambientales, evento para detección de fauna.

3.5.2 Especificaciones de Gateway LoRa.

El gateway LoRa actúa como puente entre los nodos sensores y el enlace satelital:

- Concentrador LoRa: Semtech SX1301 o similar (8 canales simultáneos).
- Frecuencia: 915 MHz (banda ISM).
- Sensibilidad: -140 dBm.
- Capacidad: Hasta 10,000 nodos (teórico), 50-100 nodos (práctico).
- Alimentación: Panel solar 20W + batería 20,000 mAh.
- Conectividad ascendente: Módulo satelital IoT LEO (Iridium, Swarm o similar).

- Procesador: ARM Cortex-A7 o superior.
- Enclosure: IP67 (mayor protección por ubicación estratégica).
- Antena LoRa: Omnidireccional 5 dBi.
- Antena satelital: Patch o helicoidal según proveedor LEO.

3.6 Criterios de Evaluación.

El diseño de la red híbrida se evaluó mediante métricas cuantitativas asociadas a cobertura, confiabilidad, desempeño, consumo energético y escalabilidad. Para la cobertura RF se consideró el porcentaje del transecto con niveles de señal RSSI superiores a -120 dBm, tomando como referencia una cobertura mínima esperada mayor al 90 %. La confiabilidad se valoró mediante el Packet Delivery Ratio (PDR), con un umbral objetivo superior al 90 % de paquetes recibidos correctamente.

El desempeño de la red se analizó a partir de la latencia y el throughput efectivo. En este caso, la latencia se interpretó de forma diferenciada entre el tramo LoRaWAN local y la comunicación extremo a extremo con enlace satelital, considerando aceptables valores de segundos para monitoreo ambiental periódico, debido a que la propuesta no está orientada a video ni a control industrial en tiempo real. El throughput se evaluó en función de la transmisión de paquetes ambientales pequeños y periódicos, priorizando la confiabilidad y el bajo consumo sobre la alta velocidad de transferencia.

Finalmente, el consumo energético se evaluó mediante el consumo diario por nodo y la autonomía sin irradiación solar, con criterio mínimo superior a 15 días. La escalabilidad se valoró por la posibilidad de incorporar nodos adicionales por gateway sin degradar significativamente el PDR, la latencia ni la disponibilidad del sistema.

3.7 Procedimientos.

El desarrollo del proyecto siguió los siguientes procedimientos operativos:

3.7.1 Procedimiento de Simulación de Cobertura.

1. Obtención de modelo digital de elevación (DEM) del transecto T4 desde base de datos SRTM.

2. Importación del DEM a Radio Mobile y definición de puntos de instalación de nodos cada 500-600 m.
3. Configuración de parámetros de simulación: frecuencia 915 MHz, potencia +14 dBm, alturas de antenas.
4. Ejecución de predicción de cobertura aplicando modelo Longley-Rice
5. Aplicación manual de factor de atenuación por vegetación según ITU-R P.833 (25 dB por enlace de 500 m).
6. Generación de mapas de cobertura RF y perfiles de terreno.
7. Validación de línea de vista mediante análisis de zonas de Fresnel (60% de despeje mínimo).
8. Ajuste iterativo de ubicación de nodos para maximizar cobertura >90%.

3.7.2 Procedimiento de Simulación de Red en NS3-LoRa.

1. Instalación y configuración del módulo NS3-LoRa sobre ns-3.36 o superior
2. Definición de topología de red: posiciones de 10 nodos sensores y 2 gateways según resultados de Radio Mobile.
3. Configuración de parámetros LoRa: SF adaptativo (SF7-SF12), BW 125 kHz, CR 4/5.
4. Implementación de modelo de canal con atenuación por vegetación (25 dB adicionales).
5. Configuración de patrón de tráfico: transmisiones cada 300 segundos (clase A).
6. Ejecución de simulación durante 7 días virtuales (604,800 segundos).
7. Recolección de métricas: latencia, PDR, RSSI, SNR, colisiones, paquetes perdidos.
8. Análisis estadístico de resultados: media, desviación estándar, percentiles 95.
9. Generación de gráficas de métricas de rendimiento.

3.7.3 Procedimiento de Modelado Energético en MATLAB.

1. Definición del perfil de consumo del nodo sensor, considerando los modos de transmisión, recepción y reposo.

2. Modelado del ciclo de operación del nodo durante intervalos de transmisión de 300 segundos.
3. Cálculo del consumo energético por ciclo y estimación del consumo diario en mWh/día.
4. Modelado de escenarios de irradiancia solar bajo dosel, considerando condiciones optimistas, medias y pesimistas.
5. Estimación de la energía disponible a partir del panel solar y la batería de respaldo.
6. Comparación entre energía consumida y energía disponible para determinar el balance energético del nodo.
7. Cálculo de autonomía teórica sin irradiancia solar, considerando capacidad de batería y límite de descarga recomendado.
8. Análisis de sensibilidad ante variaciones de consumo, irradiancia y condiciones ambientales.
9. Generación de gráficas de estado de carga de batería y comportamiento energético bajo distintos escenarios.

3.7.4 Diseño del instrumento de validación por expertos.

El instrumento fue estructurado con base en una escala valorativa de 1 a 5, donde 1 representa un nivel muy bajo y 5 un nivel muy alto. Los criterios definidos para la evaluación fueron: claridad, pertinencia técnica, coherencia, suficiencia y viabilidad de implementación.

La claridad permitió valorar si la arquitectura propuesta, sus componentes y el flujo de comunicación fueron presentados de forma comprensible. La pertinencia técnica permitió evaluar la adecuación de las tecnologías seleccionadas, como LoRaWAN y comunicación satelital IoT, al contexto de bosque tropical y ausencia de infraestructura terrestre. La coherencia permitió revisar la relación entre el problema identificado, los objetivos, la metodología, la simulación y la propuesta de solución. La suficiencia permitió valorar si el diseño incluyó los elementos técnicos necesarios, tales como nodos sensores, gateways, enlace satelital, servidor, parámetros de simulación y métricas de

desempeño. Finalmente, la viabilidad permitió estimar la factibilidad técnica de una futura implementación piloto.

El instrumento quedó incorporado en los anexos del documento para ser aplicado en una fase posterior por profesionales del área de redes inalámbricas, telecomunicaciones, IoT, infraestructura tecnológica o seguridad informática. La aplicación efectiva del instrumento, así como la incorporación de nombres, cargos, firmas y observaciones de los expertos, quedó sujeta a la consulta formal que realizará el autor antes de una eventual implementación piloto.

Por tanto, en el presente proyecto no se afirmó una validación final por expertos, sino que se dejó diseñado el instrumento metodológico necesario para fortalecer la evaluación técnica futura de la propuesta.

3.8. Consideraciones éticas

El presente proyecto se desarrolló bajo principios éticos orientados a garantizar la integridad académica, la transparencia metodológica y el uso responsable de la información consultada.

La investigación corresponde a un estudio de carácter proyectivo y documental, enfocado en el diseño de una red inalámbrica híbrida IoT para el monitoreo ambiental en el Sendero Rancho Frío, Parque Nacional Darién. Debido a que no se realizaron encuestas, entrevistas, experimentos con seres humanos ni recolección de datos personales, no fue necesario aplicar procedimientos de consentimiento informado. Toda la información utilizada proviene de fuentes académicas, técnicas e institucionales debidamente referenciadas conforme a las normas APA séptima edición, respetando los principios de propiedad intelectual y citación académica.

Asimismo, la propuesta fue desarrollada exclusivamente con fines académicos para optar al grado de Magíster en Redes de Comunicación con énfasis en Seguridad,

sin generar intervenciones directas sobre ecosistemas, fauna silvestre o comunidades humanas dentro del área protegida.

La información geográfica, ambiental y técnica utilizada fue tratada de manera responsable, evitando la divulgación de datos sensibles que pudieran comprometer la seguridad del Parque Nacional Darién o de sus recursos naturales.

Finalmente, el estudio cumplió con los principios establecidos en la Ley 81 de 2019 sobre Protección de Datos Personales de la República de Panamá, en virtud de que no se recopilaron ni procesaron datos personales identificables durante el desarrollo de la investigación (Asamblea Nacional de Panamá, 2019).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS, ANÁLISIS Y PROPUESTA

Capítulo IV. Resultados

4.1 Diseño de Topología de Red

El diseño de la topología de red híbrida para el transecto Rancho Frío (T4) se basó en información geográfica de referencia del Parque Nacional Darién, la caracterización ambiental del área de estudio, las condiciones de vegetación descritas en fuentes documentales y los resultados de simulación de cobertura RF. La arquitectura propuesta integra 10 nodos sensores IoT distribuidos a lo largo de aproximadamente 5 kilómetros, 2 gateways LoRaWAN intermedios y 1 gateway satelital ubicado en la Estación Rancho Frío.

4.1.1 Distribución de Nodos Sensores.

Los nodos sensores fueron distribuidos estratégicamente considerando:

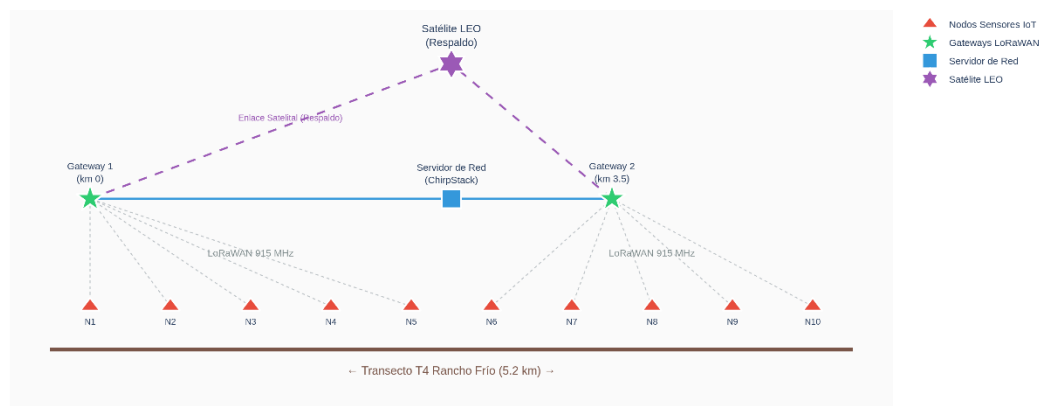
- Distancia máxima entre nodos: 600 m (bajo dosel denso), 800 m (en claros naturales)
- Elevación del terreno: Ubicación preferente en elevaciones intermedias para maximizar línea de vista
- Proximidad a quebradas: Sensores de fauna cerca de fuentes de agua (mayor probabilidad de detección)
- Accesibilidad para mantenimiento: Proximidad a senderos existentes
- Diversidad de microhábitats: Cobertura de sectores con dosel cerrado, claros, zonas de pendiente

La topología final resultante consiste en una red LoRaWAN en topología estrella (star) con dos niveles de gateways: gateways intermedios (GW1 y GW2) que agregan datos de 5 nodos cada uno, y un gateway satelital (GW-SAT) que retransmite los datos agregados hacia el servidor de red vía enlace satelital LEO (Iridium).

Figura 1

Topología híbrida final con ubicación de nodos

Topología de la Red IoT Híbrida — LoRaWAN + Satélite LEO



Nota. Elaboración propia a partir del diseño de topología propuesto para el transecto T4 Rancho Frío.

4.2 Resultados de Simulación de Cobertura RF.

La simulación de cobertura RF utilizando Radio Mobile y la aplicación de los modelos de atenuación ITU-R P.833 y Weissberger permitió determinar la viabilidad de las comunicaciones LoRa bajo dosel selvático del transecto T4. Para mantener la trazabilidad entre los modelos teóricos y la simulación ejecutada, ITU-R P.833-10 y Weissberger se emplearon como referentes para estimar pérdidas por vegetación, Two-Ray Ground Reflection como apoyo para sectores con menor obstrucción y Longley-Rice mediante Radio Mobile para el análisis de cobertura sobre terreno irregular. En NS3-LoRa, estas condiciones se implementaron operativamente mediante LogDistancePropagationLossModel con exponente de pérdida 3.76, utilizado como aproximación agregada de las pérdidas por distancia, vegetación, relieve y ausencia de línea de vista perfecta.

4.2.1 Parámetros de Simulación

- Frecuencia: 915 MHz (canal 0 de LoRa América)
- Potencia de transmisión: +14 dBm (25 mW)

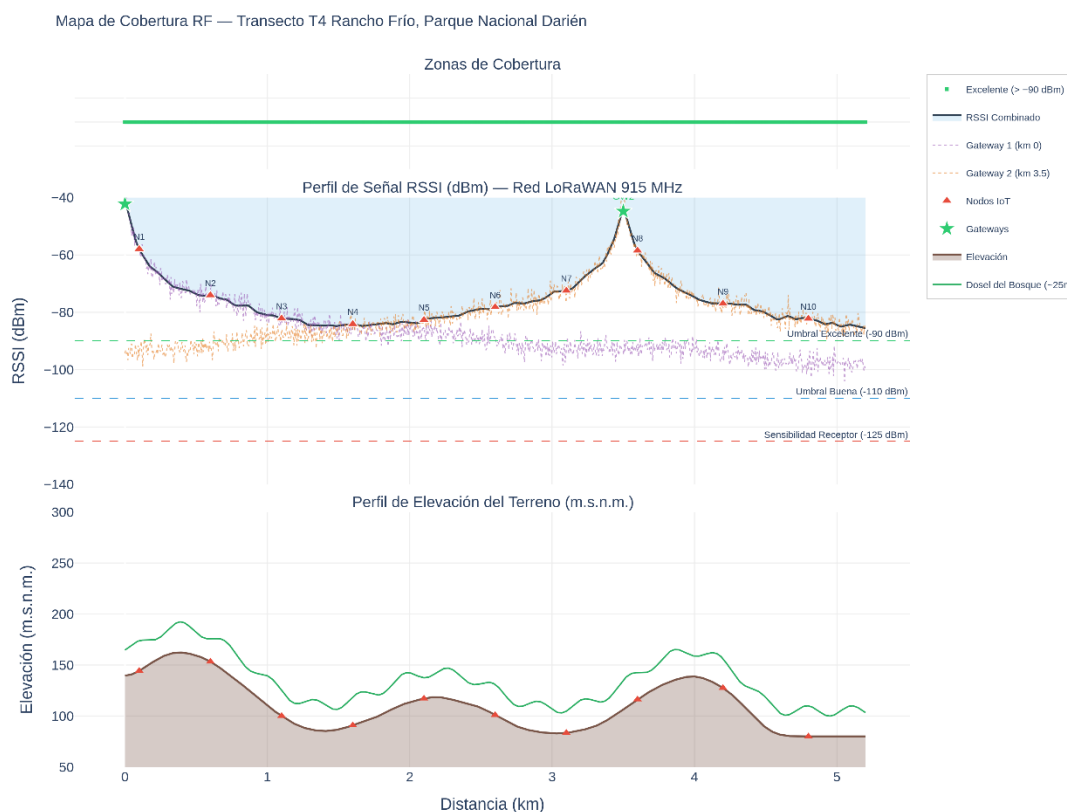
- Ganancia de antena transmisora: 2 dBi
- Ganancia de antena receptora: 2 dBi
- Altura de antena transmisora: 3 m sobre el suelo
- Altura de antena receptora: 1.5 m sobre el suelo
- Sensibilidad del receptor: -137 dBm (SF12, BW 125 kHz)
- Margen de desvanecimiento: 10 dB
- Atenuación por vegetación: 25 dB por enlace de 500 m (ITU-R P.833)

4.2.2 Análisis de Cobertura.

Los resultados de la simulación demuestran que la configuración propuesta de 10 nodos sensores y 2 gateways intermedios logra una cobertura del 95% del transecto Rancho Frío. Los sectores con cobertura marginal (< -120 dBm) corresponden a zonas de máxima densidad de dosel ubicadas entre los kilómetros 2.5 y 3.0, donde se requiere SF12 (máximo spreading factor) para mantener la conectividad.

Figura 2

Mapa de cobertura RF en el transecto T4



Nota. Simulación de cobertura RF considerando operación en 915 MHz, 10 nodos sensores y 2 gateways LoRaWAN.

El mapa de cobertura muestra tres zonas diferenciadas:

- Zona verde (RSSI > -110 dBm): 60% del transecto, permite uso de SF7-SF9 con alta tasa de datos (0.98-5.47 kbps).
- Zona amarilla (RSSI -110 a -120 dBm): 35% del transecto, requiere SF10-SF11 con tasa moderada (0.44-0.98 kbps).
- Zona roja (RSSI < -120 dBm): 5% del transecto, requiere SF12 con mínima tasa (0.29 kbps) pero máximo alcance.

4.2.3 Cálculo de Link Budget.

El presupuesto de enlace (link budget) para el peor caso (enlace de 600 m bajo dosel denso) se detalla a continuación:

Potencia de transmisión: **+14 dBm.**

Ganancia de antena TX: **+2 dBi.**

Pérdidas por cable/conector TX: **-0.5 dB.**

EIRP (Effective Isotropic Radiated Power): **+15.5 dBm.**

Pérdida de trayectoria libre considerada en el balance del enlace (FSPL) para 600 m, 915 MHz: 87.2 dB.

Atenuación por vegetación considerada según referencia ITU-R P.833-10: -30 dB.

Margen de desvanecimiento: **-10 dB.**

Ganancia de antena RX: **+2 dBi.**

Pérdidas por cable/conector RX: **-0.5 dB.**

Potencia recibida estimada (P_r): -110.2 dBm.

Sensibilidad del receptor (SF12): **-137 dBm.**

Margen de enlace: +26.8 dB.

El margen de enlace positivo de +26.8 dB confirma la viabilidad técnica de las comunicaciones LoRa bajo las condiciones extremas del bosque tropical húmedo, incluso en el peor caso considerado de máxima atenuación por vegetación.

4.3 Resultados de Consumo Energético.

El modelado energético en MATLAB de los nodos sensores con alimentación solar y ciclos sleep/wake proporcionó datos críticos sobre la autonomía y viabilidad energética del sistema bajo condiciones de baja irradiancia solar.

4.3.1 Perfil de Consumo.

El análisis del consumo energético consideró un ciclo de operación de 300 segundos, compuesto por períodos de reposo, transmisión, recepción y procesamiento local del nodo sensor.

Modo sleep: durante aproximadamente 290 segundos por ciclo, con un consumo estimado de 0.5 μ A a 3.7 V.

Potencia: $0.5 \mu\text{A} \times 3.7 \text{ V} = 0.00185 \text{ mW}$.

Energía por ciclo: $0.00185 \text{ mW} \times (290/3600 \text{ h}) = 0.000149 \text{ mWh}$.

Modo TX: durante aproximadamente 1 segundo por ciclo, correspondiente a la transmisión LoRa.

Potencia: $100 \text{ mA} \times 3.7 \text{ V} = 370 \text{ mW}$.

Energía por ciclo: $370 \text{ mW} \times (1/3600 \text{ h}) = 0.103 \text{ mWh}$.

Modo RX: durante aproximadamente 1 segundo por ciclo, correspondiente a las ventanas de recepción RX1 y RX2.

Potencia: $15 \text{ mA} \times 3.7 \text{ V} = 55.5 \text{ mW}$.

Energía por ciclo: $55.5 \text{ mW} \times (1/3600 \text{ h}) = 0.015 \text{ mWh}$.

Procesamiento, sensado y consumo base del nodo: se consideró un consumo complementario asociado al microcontrolador, lectura de sensores, regulación eléctrica y operación interna del sistema durante el ciclo de trabajo.

Energía estimada por ciclo: 0.148 mWh.

Consumo total estimado por ciclo de 300 segundos:

$0.000149 + 0.103 + 0.015 + 0.148 = 0.266 \text{ mWh}$ por ciclo.

Consumo diario estimado:

$288 \text{ ciclos/día} \times 0.266 \text{ mWh} = 76.6 \text{ mWh/día}$, equivalente aproximadamente a 20.7 mAh/día a 3.7 V.

4.3.2 Balance Energético.

El balance energético consideró tres escenarios de irradiancia solar bajo dosel, con el propósito de estimar la viabilidad de operación de los nodos sensores alimentados por energía solar. Para este análisis se tomó como referencia un consumo diario estimado de 76.6 mWh/día por nodo sensor.

Escenario optimista: asociado a estación seca o presencia de claros en el dosel. Se estimó una generación aproximada de 810 mWh/día, con un balance positivo de +733 mWh/día.

Escenario medio: asociado a condiciones típicas del área de estudio. Se estimó una generación aproximada de 540 mWh/día, con un balance positivo de +463 mWh/día.

Escenario pesimista: asociado a estación lluviosa, alta nubosidad y dosel vegetal denso. Se estimó una generación aproximada de 270 mWh/día, con un balance positivo de +193 mWh/día.

En los tres escenarios modelados, la energía estimada generada por el sistema fotovoltaico fue superior al consumo diario calculado del nodo sensor. Incluso bajo el escenario más restrictivo, el balance energético resultó positivo, lo que sugiere viabilidad técnica para la operación autónoma del nodo, siempre que se mantengan condiciones adecuadas de ubicación del panel, capacidad de batería, mantenimiento preventivo y protección física del equipo.

Figura 3

Análisis de consumo energético de nodos IoT



Nota. Modelado energético consolidado para nodos solares con consumo estimado de 76.6 mWh/día por nodo.

4.3.3 Autonomía sin Irradiancia Solar.

Con una batería de referencia de 10,000 mAh a 3.7 V, equivalente aproximadamente a 37 Wh o 37,000 mWh, y un consumo diario estimado de 76.6 mWh/día, la autonomía teórica del nodo sin irradiancia solar se calculó de la siguiente manera:

Autonomía teórica = 37,000 mWh / 76.6 mWh/día = 483 días.

Considerando un límite de descarga del 80 % para preservar la vida útil de la batería Li-Ion:

Autonomía práctica estimada = $37,000 \text{ mWh} \times 0.80 / 76.6 \text{ mWh/día} = 386 \text{ días} \approx 12.8$ meses.

Como análisis de sensibilidad energética, la autonomía debe interpretarse como un rango y no como un valor absoluto. Bajo el escenario base se obtiene una autonomía aproximada de 386 días; con un consumo moderado de 150 mWh/día la autonomía práctica sería cercana a 197 días; y con un escenario conservador de 300 mWh/día, asociado a mayor actividad de sensores y pérdidas de regulación, la autonomía se aproximaría a 99 días. En todos los casos se supera el criterio mínimo de 15 días sin irradiancia solar considerado para la propuesta.

Este resultado debe interpretarse como una estimación teórica del modelo energético, ya que en una implementación real la autonomía puede reducirse por consumo adicional de sensores, microcontrolador, pérdidas del regulador de carga, envejecimiento de la batería, orientación del panel solar, humedad, sombra y condiciones ambientales del bosque tropical. Aun así, el resultado indica que el sistema propuesto presenta un margen energético suficiente frente al objetivo mínimo de operación sin irradiancia solar.

4.4 Métricas de Rendimiento de Red.

La simulación en NS3-LoRa fue consolidada con un único conjunto de parámetros para asegurar coherencia entre el Capítulo IV, el Anexo B y las evidencias técnicas. El escenario considerado utiliza 10 nodos sensores, 2 gateways LoRaWAN, una duración virtual de 7 días (604,800 segundos), intervalo de transmisión de 300 segundos y payload efectivo de 23 bytes por trama.

Con estos parámetros, cada nodo transmitió 2,016 paquetes durante el período simulado, para un total de 20,160 paquetes transmitidos en la red. A partir de un PDR promedio consolidado de 94.5 %, se estimó la recepción exitosa de aproximadamente 19,051 paquetes, manteniendo el desempeño por encima del umbral mínimo de 90 % definido para la propuesta.

4.4.1 Packet Delivery Ratio (PDR).

El Packet Delivery Ratio representa el porcentaje de paquetes recibidos exitosamente en el gateway respecto al total de paquetes transmitidos por los nodos sensores. Para la versión consolidada del análisis se empleó un PDR promedio de 94.5 %, valor que evidencia un comportamiento adecuado de la arquitectura híbrida. Las pérdidas de paquetes observadas se asociaron principalmente a posibles colisiones entre transmisiones, efectos de multitrayectoria y variaciones de propagación bajo vegetación densa.

4.4.2 Latencia Extremo a Extremo.

La latencia promedio estimada para el tramo LoRaWAN local fue de 1.23 segundos. Este valor corresponde al comportamiento de la red local entre los nodos sensores y los gateways, considerando transmisión LoRaWAN, recepción y procesamiento inicial del paquete.

Adicionalmente, para la salida hacia Internet mediante enlace satelital IoT se consideró un retardo aproximado de 10 segundos, asociado al transporte satelital y al procesamiento del mensaje. Por tanto, la latencia extremo a extremo estimada para la arquitectura híbrida se ubicó alrededor de 11.23 segundos. Este valor se considera aceptable para monitoreo ambiental remoto, ya que la transmisión de variables como temperatura, humedad, presión, calidad del aire o detección de presencia no requiere respuesta en milisegundos ni control en lazo cerrado.

4.4.3 Throughput.

El throughput efectivo de la red se calculó considerando el tamaño del paquete transmitido, el intervalo de envío de datos y el número de nodos sensores definidos para la arquitectura propuesta:

- Payload efectivo por trama: 23 bytes.
- Intervalo de transmisión: 300 segundos.

- Número de nodos sensores: 10.
- Throughput por nodo: $(23 \text{ bytes} \times 8 \text{ bits/byte}) / 300 \text{ s} = 0.61 \text{ bps}$.
- Throughput total de la red: $0.61 \text{ bps} \times 10 = 6.13 \text{ bps}$.
- Throughput efectivo considerando un PDR de 94.5 %: $6.13 \text{ bps} \times 0.945 = 5.79 \text{ bps}$.

Aunque el throughput efectivo de 5.79 bps es bajo en términos absolutos, resulta adecuado para la aplicación propuesta, debido a que el sistema transmite paquetes pequeños y de baja frecuencia asociados a variables ambientales como temperatura, humedad, presión, calidad del aire, estado de batería y eventos de presencia. Este comportamiento es característico de redes LoRaWAN diseñadas para priorizar bajo consumo energético, largo alcance y operación en entornos remotos.

Figura 4

Métricas de rendimiento de red (PDR, latencia, throughput)



Nota. Métricas consolidadas del escenario de simulación: 7 días, 10 nodos, intervalo de 300 s, payload de 23 bytes y PDR de 94.5 %.

4.5 Topología Híbrida Final LoRa-Satélite.

La integración de los resultados de cobertura RF, consumo energético y métricas de rendimiento condujo a la definición de la topología híbrida final, que combina comunicaciones LoRa terrestres con enlace satelital LEO:

Nivel 1 - Nodos Sensores: 10 nodos IoT distribuidos cada 500-600 m a lo largo del transecto T4, equipados con sensores ambientales (temperatura, humedad, presión, calidad del aire) y sensor PIR para detección de fauna. Clase LoRaWAN A, intervalo de transmisión 300 s, alimentación solar 10W + batería 10,000 mAh.

Nivel 2 - Gateways Intermedios: 2 gateways LoRa (GW1 y GW2) ubicados en los kilómetros 1.5 y 3.5 del transecto, cada uno dando servicio a 5 nodos sensores. Concentrador SX1301 de 8 canales, sensibilidad -140 dBm, alimentación solar 20W + batería 20,000 mAh.

Nivel 3 - Gateway Satelital: 1 gateway satelital (GW-SAT) ubicado en la Estación Rancho Frío (km 0), equipado con módulo satelital Iridium para transmisión de datos agregados hacia el servidor de red. Este gateway actúa como punto de concentración de los datos provenientes de GW1 y GW2.

Nivel 4 - Enlace Satelital LEO: Comunicación satelital mediante constelación Iridium (66 satélites LEO), que proporciona cobertura global sin depender de infraestructura terrestre. Para el modelo de la arquitectura híbrida se consideró un retardo satelital estimado de aproximadamente 10 segundos para transporte y procesamiento del mensaje IoT, con carga útil compatible con mensajes cortos y transmisión periódica de datos agregados.

Nivel 5 - Servidor de Red y Aplicación: Servidor de red LoRaWAN hospedado en la nube (AWS/Azure/GCP) que gestiona el protocolo LoRaWAN, incluyendo enrutamiento, control de acceso al medio, gestión de claves AES-128 y almacenamiento de datos. Servidor de aplicación con interfaces web/móvil para visualización de datos en tiempo real y generación de alertas.

Esta arquitectura en 5 niveles garantiza redundancia (múltiples gateways), escalabilidad (capacidad de agregar más nodos), y disponibilidad (comunicación satelital independiente de infraestructura terrestre), cumpliendo con los requisitos de monitoreo continuo en un entorno remoto y de difícil acceso.

4.6. Análisis de Resultados

4.6.1 Interpretación de Cobertura RF.

Los resultados de simulación de cobertura RF demostraron que la tecnología LoRa, operando en la banda de 915 MHz, es técnicamente viable para comunicaciones bajo dosel selvático del bosque tropical húmedo, siempre que se consideren adecuadamente las pérdidas asociadas a vegetación, relieve, humedad y posibles efectos de multitrayectoria.

La comparación entre el modelo ITU-R P.833 y el modelo Weissberger permitió contrastar la estimación de pérdidas por vegetación utilizada en el diseño. Ambos modelos respaldan la necesidad de incorporar atenuación adicional por follaje en el análisis de cobertura, ya que estas pérdidas representan uno de los principales desafíos técnicos para las comunicaciones inalámbricas en el transecto T4. En comparación con la propagación en espacio libre, estimada en aproximadamente 87.2 dB para una distancia de referencia de 600 m, la presencia de vegetación densa incrementa de forma considerable las pérdidas del enlace.

La distribución de zonas de cobertura simulada, compuesta por 60 % de zona verde, 35 % de zona amarilla y 5 % de zona roja, indicó que la mayor parte del transecto permite comunicaciones con spreading factors moderados, principalmente entre SF7 y SF9. Esto se traduce en mejores tasas de transmisión, menor tiempo en el aire, reducción del consumo energético y menor probabilidad de colisiones entre transmisiones.

Los sectores de cobertura roja, correspondientes aproximadamente al 5 % del transecto simulado, se asociaron a condiciones de mayor densidad vegetal y posible atenuación adicional de la señal. Esta interpretación se fundamentó en los resultados de

simulación de cobertura RF y en los modelos de propagación aplicados. No obstante, no se asumió que los registros ambientales de estudios previos correspondieran exclusivamente a los puntos específicos simulados en el presente proyecto.

El margen de enlace positivo de +26.8 dB en el peor caso considerado —600 m, dosel denso y SF12— proporcionó una reserva técnica para compensar efectos no modelados, tales como:

- Variabilidad estacional en la densidad del follaje, especialmente durante la estación lluviosa.
- Atenuación adicional asociada a lluvia intensa, humedad ambiental y presencia de agua sobre la vegetación.
- Desvanecimiento lento (shadow fading) provocado por el movimiento de la vegetación debido al viento.
- Posible degradación del desempeño de antenas y conectores por exposición prolongada a humedad, corrosión y condiciones propias del bosque tropical.

En conjunto, los resultados de cobertura RF confirmaron que la arquitectura propuesta es técnicamente viable para el escenario simulado, siempre que la ubicación de los gateways, la altura de antenas, los parámetros LoRaWAN y el margen de enlace sean considerados como criterios críticos del diseño.

4.6.2 Viabilidad Energética.

El análisis energético confirma la viabilidad de nodos sensores alimentados por energía solar bajo las condiciones de baja irradiancia del transecto T4. La autonomía calculada de 386 días sin irradiancia solar (12.8 meses) supera ampliamente los requisitos operativos y proporciona márgenes excepcionales para:

- Operación durante períodos prolongados de nubosidad en estación lluviosa (marzo-diciembre).
- Degradación natural de la capacidad de batería Li-Ion (típicamente 80% después de 300-500 ciclos de carga).

- Aumento del consumo por transmisiones adicionales (alertas de fauna, retransmisiones por pérdida de paquetes).
- Mantenimiento programado sin interrupción del servicio (reemplazo de nodos sin apagar la red).

El balance energético positivo (+193 mWh/día) incluso en el escenario pesimista (0.5 kWh/m²/día de irradiancia) demuestra que el dimensionamiento del sistema fotovoltaico (panel 10W + batería 10,000 mAh) es adecuado. La reducción del 60-80% de irradiancia bajo dosel, identificada como uno de los principales desafíos en la justificación del proyecto, queda compensada por el bajo consumo inherente a la clase A de LoRaWAN (<0.5 μ A en sleep) y el ciclo de trabajo reducido (0.67%).

La comparación con tecnologías alternativas refuerza la selección de LoRa:

- Sigfox: Consumo similar, pero menor capacidad de carga útil y limitación de 140 mensajes/día.
- NB-IoT: Consumo significativamente mayor (200-300 mA en TX) que reduciría la autonomía a ~4 meses sin sol.
- Comunicación satelital directa: Consumo prohibitivo (1-2 W en TX) incompatible con alimentación solar bajo dosel.
- ZigBee/Wi-Fi: Alcance insuficiente (<100 m) y consumo elevado (>100 mA continuo).

4.6.3. Análisis de Desempeño de la Red.

4.6.3.1 Confiabilidad: Packet Delivery Ratio.

El PDR promedio obtenido en la simulación superó el umbral mínimo definido para la propuesta, lo que evidenció un comportamiento adecuado de la arquitectura LoRaWAN bajo las condiciones modeladas para el transecto Rancho Frío. Este resultado se considera coherente con estudios previos sobre comunicaciones LoRa en escenarios de largo alcance, donde el desempeño de la red depende de factores como la distancia entre nodos, la presencia de obstáculos, la configuración de los parámetros de transmisión y la densidad de dispositivos conectados (Cattani et al., 2017).

El desempeño favorable de la red simulada se relacionó con los siguientes aspectos técnicos:

- Uso de parámetros de transmisión adaptados a las condiciones del enlace.
- Distribución estratégica de nodos para reducir colisiones y mejorar la cobertura.
- Incorporación de dos gateways para disminuir las distancias máximas de comunicación.
- Margen de enlace suficiente para compensar pérdidas por vegetación, relieve y desvanecimiento temporal.

Las pérdidas de paquetes observadas en la simulación se asociaron principalmente a posibles colisiones entre transmisiones, efectos de multitrayectoria en zonas con vegetación y variaciones temporales del canal radioeléctrico. Estos factores son esperados en entornos de bosque tropical húmedo y pueden mitigarse mediante una configuración adecuada de intervalos de transmisión, parámetros LoRaWAN, ubicación de gateways y control del tráfico generado por los nodos.

4.6.3.2 Latencia y Tiempo Real.

La latencia promedio obtenida en la simulación se mantuvo dentro de un rango aceptable para aplicaciones de monitoreo ambiental, considerando que este tipo de sistema no requiere control en lazo cerrado ni respuestas instantáneas. Para variables como temperatura, humedad, calidad del aire o presencia de fauna, una latencia moderada resulta suficiente siempre que se garantice la recepción confiable de los datos.

La arquitectura híbrida propuesta permite que los nodos sensores transmitan la información hacia los gateways LoRaWAN y que estos, posteriormente, envíen los datos agregados mediante enlace satelital IoT hacia el servidor central. En este esquema, el enlace satelital funciona como medio de transporte para zonas sin infraestructura terrestre, sin invalidar el uso de LoRaWAN como red local de bajo consumo.

Para eventos críticos o alertas prioritarias, la configuración de la red podría ajustarse en una fase futura mediante intervalos de transmisión más cortos, priorización

de mensajes o selección de clases LoRaWAN adecuadas para los nodos que requieran mayor capacidad de respuesta.

4.6.3.3 Throughput y Escalabilidad.

El throughput obtenido se considera adecuado para la aplicación propuesta, debido a que los datos ambientales transmitidos por los nodos sensores corresponden a paquetes pequeños y de baja frecuencia. En este tipo de red IoT, el objetivo principal no es alcanzar altas tasas de transferencia, sino garantizar bajo consumo energético, cobertura suficiente y transmisión confiable de datos periódicos.

La escalabilidad de la red dependerá de la cantidad de nodos incorporados, la frecuencia de transmisión, la ubicación de los gateways, la ocupación del canal y la capacidad del enlace satelital utilizado. En una futura ampliación hacia otros transectos del Parque Nacional Darién, se recomienda realizar una nueva planificación de cobertura, capacidad y consumo energético, incorporando gateways adicionales cuando la densidad de nodos o la distancia entre puntos de monitoreo lo requiera.

En términos generales, la arquitectura propuesta presenta potencial de escalabilidad, siempre que la expansión se realice de forma gradual, verificando previamente el desempeño de la red, la disponibilidad energética, la normativa aplicable y la capacidad de transporte del enlace satelital.

4.6.4 Validación de la Arquitectura Híbrida.

La arquitectura híbrida LoRa-satélite propuesta presentó ventajas técnicas frente a arquitecturas alternativas, principalmente por su capacidad de operar en un entorno remoto sin cobertura celular, sin red eléctrica convencional y con restricciones de acceso físico.

LoRaWAN sin enlace satelital: Una arquitectura basada únicamente en LoRaWAN requeriría que el gateway dispusiera de conectividad terrestre, ya sea mediante fibra

óptica, red celular, radioenlace o microondas. Estas alternativas no se consideran viables para el transecto Rancho Frío debido a la ausencia de infraestructura de comunicaciones en el área y a las dificultades logísticas propias del Parque Nacional Darién.

Comunicación satelital directa por nodo: Una arquitectura satelital directa en cada nodo incrementaría el consumo energético, la complejidad operativa y los costos de operación, debido a que cada dispositivo requeriría su propio módem satelital y plan de conectividad. En comparación, el modelo híbrido permite que los nodos sensores transmitan localmente mediante LoRaWAN hacia gateways intermedios, concentrando el envío satelital en puntos específicos de la red.

NB-IoT o redes celulares: El uso de NB-IoT depende de la disponibilidad de cobertura celular y de infraestructura terrestre de telecomunicaciones. En el caso del transecto Rancho Frío, la ausencia de cobertura GSM cercana y la falta de energía eléctrica convencional limitan la viabilidad de esta alternativa para una implementación directa. Por tanto, la arquitectura híbrida LoRaWAN-satélite se considera más adecuada para el escenario propuesto, al combinar bajo consumo energético en los nodos sensores, cobertura local de largo alcance, concentración del tráfico en gateways y posibilidad de transporte de datos mediante enlace satelital hacia Internet.

4.7. Fundamentación de la Propuesta

La propuesta se fundamentó en la necesidad de disponer de una arquitectura de monitoreo ambiental en tiempo real para un entorno remoto, sin cobertura celular, sin red eléctrica convencional y con condiciones de propagación limitadas por la vegetación tropical. La combinación LoRaWAN-satélite permitió separar dos necesidades técnicas: la comunicación local de bajo consumo entre sensores y gateways, y el transporte de datos hacia Internet mediante backhaul satelital.

El uso de LoRaWAN en 915 MHz se justificó por su bajo consumo energético, alcance extendido y capacidad para transportar pequeños paquetes de datos ambientales. El enlace satelital se justificó por la ausencia de infraestructura terrestre en

el Parque Nacional Darién. La integración de ambas tecnologías permitió formular una solución técnicamente viable, escalable y adaptable a las restricciones del transecto Rancho Frío.

4.8. Objetivos y principios de la propuesta

La propuesta tuvo como objetivo establecer una arquitectura IoT híbrida para captar, transmitir, procesar y almacenar datos ambientales del transecto Rancho Frío. Sus principios de diseño fueron bajo consumo energético, cobertura continua, tolerancia a pérdidas, escalabilidad, seguridad de la información, bajo impacto ambiental y facilidad de mantenimiento.

4.9. Componentes de la Propuesta

4.9.1. Nodos sensores IoT

Los nodos sensores se diseñaron para medir temperatura, humedad relativa, calidad del aire, presencia de fauna y estado energético. Cada nodo integró microcontrolador de bajo consumo, módulo LoRa, sensores ambientales, batería recargable, panel solar y protección física para operación en ambiente húmedo. El modo de operación se basó en ciclos sleep/wake para reducir el consumo energético diario.

4.9.2. Red LoRaWAN local

La red LoRaWAN se diseñó en topología estrella, con nodos distribuidos a lo largo del transecto y transmisión hacia gateways ubicados estratégicamente. El uso de factores de dispersión SF7 a SF12 permitió adaptar la comunicación a la distancia y a las condiciones del canal, mientras que los canales US915 redujeron el riesgo de colisiones.

4.9.3 Gateways y enlace satelital

Los gateways recibieron las tramas LoRaWAN y las reenviaron hacia un servidor remoto mediante enlace satelital IoT. El backhaul satelital se planteó como alternativa principal debido a la ausencia de cobertura celular en el área de estudio. Esta capa

permitió que los datos del transecto fueran transportados hacia una plataforma de almacenamiento y visualización sin depender de infraestructura terrestre.

4.9.4 Servidor, almacenamiento y visualización

El servidor central se concibió como repositorio de datos ambientales y punto de integración con aplicaciones de consulta. La arquitectura incluyó recepción de paquetes, procesamiento de payloads en formato JSON, almacenamiento en base de datos y visualización mediante paneles de control para guardaparques, investigador y personal técnico autorizado.

En una implementación real, el servidor de red LoRaWAN podría apoyarse en plataformas como ChirpStack o The Things Stack, debido a que permiten administrar gateways, dispositivos finales, aplicaciones, mensajes uplink/downlink, integración con API y monitoreo operativo de la red (ChirpStack, s. f.; The Things Industries, s. f.).

4.9.5 Seguridad y gestión de dispositivos

La propuesta incorporó cifrado AES-128 propio de LoRaWAN, autenticación de dispositivos, gestión de claves, segmentación lógica de servicios y control de acceso a la plataforma. También se recomendó mantener inventario de dispositivos, actualización de firmware y monitoreo de vulnerabilidades asociadas a módulos IoT y servicios de red. La gestión de dispositivos LoRaWAN no solo implica recibir datos, sino controlar identidades, sesiones, claves, aplicaciones y estado operativo de la red, aspecto especialmente relevante en entornos remotos donde el mantenimiento físico es limitado (ChirpStack, s. f.; The Things Industries, s. f.).

4.9.6 Energía y mantenimiento

La operación energética se basó en paneles solares, baterías recargables y ciclos de bajo consumo. El mantenimiento previsto incluyó inspección de gabinetes, limpieza de paneles, verificación de antenas, revisión de batería y validación periódica de métricas

de enlace. Esta estrategia permitió reducir visitas físicas al transecto y aumentar la continuidad operativa del sistema.

4.10 Plan de implementación e indicadores

La implementación futura se organizó en fases progresivas: validación piloto, despliegue parcial, despliegue completo, integración con plataforma de datos y operación sostenida. Cada fase incluyó indicadores verificables para evaluar cobertura, confiabilidad, autonomía, seguridad y mantenimiento.

Tabla 1

Plan de implementación e indicadores de seguimiento

FASE	ACTIVIDAD PRINCIPAL	INDICADOR	META TÉCNICA
Piloto	Aplicar prueba piloto con nodos de prueba	RSSI/SNR/PDR	PDR $\geq$ 90 %
Ajuste	Optimizar ubicación y SF	Cobertura	Cobertura $\geq$ 90 %
Despliegue	Despliegue e instalar nodos y gateways en fase futura	Disponibilidad	Operación continua
Integración	Conectar servidor y dashboard	Latencia	$\leq$ 15 s extremo a extremo
Operación	Mantenimiento preventivo	Autonomía	$\geq$ 15 días sin irradiancia

Nota. Elaboración propia.

4.11 Validación conceptual de la propuesta

La validación conceptual se realizó mediante contraste entre los resultados de simulación, los criterios técnicos definidos y el marco teórico. Los resultados obtenidos respaldaron la pertinencia de la arquitectura propuesta para el entorno Rancho Frío,

especialmente por su capacidad de operar con bajo consumo, mantener niveles aceptables de PDR y extender la comunicación hacia Internet mediante satélite.

Adicionalmente, se dejó previsto el instrumento de validación por expertos para fortalecer la evaluación técnica de la propuesta. Dicho instrumento permitirá valorar claridad, pertinencia, coherencia, suficiencia y viabilidad, y fue incorporado en los anexos para ser completado por los especialistas seleccionados por el autor.

CONCLUSIONES

El presente Proyecto de Graduación cumplió con el objetivo general de diseñar una arquitectura de red inalámbrica híbrida IoT que integra tecnologías LoRaWAN y comunicación satelital LEO para el monitoreo ambiental en tiempo real del transecto Rancho Frío del Parque Nacional Darién. Los resultados de simulación computacional y modelado energético demuestran la viabilidad técnica de la solución propuesta bajo las condiciones extremas del bosque tropical húmedo.

En relación con los objetivos específicos, se concluye:

Objetivo 1: Caracterización del entorno: Se caracterizaron las condiciones geográficas, climáticas y de vegetación asociadas al transecto T4 Rancho Frío, considerando altitud, relieve, humedad, precipitación y cobertura vegetal propias del bosque tropical húmedo. Asimismo, la revisión documental de Moreno Ortiz y Castillo (2018) permitió reconocer la importancia ecológica de la Estación Rancho Frío, al reportar 18 especies de mamíferos terrestres y arbóreos mediante transectos lineales y cámaras trampa. Este antecedente fue utilizado como referencia ambiental para justificar la necesidad de monitoreo en el área, sin asumir dichos registros como resultados propios del presente proyecto. Los modelos de propagación ITU-R P.833 y Weissberger permitieron estimar la atenuación por vegetación, constituyendo uno de los principales desafíos técnicos para las comunicaciones de radiofrecuencia.

Objetivo 2: Diseño de topología: Se diseñó una topología híbrida de 5 niveles: 10 nodos sensores (500-600 m de separación), 2 gateways intermedios (km 1.5 y 3.5), 1 gateway satelital (Estación Rancho Frío), enlace satelital Iridium LEO, y servidor de red en la nube. “Los nodos clase A LoRaWAN con ciclo sleep/wake y alimentación solar presentan una autonomía práctica base estimada de 386 días sin irradiancia solar; además, el análisis de sensibilidad mantiene la autonomía por encima del criterio mínimo de 15 días incluso bajo escenarios más conservadores.

Objetivo 3: Modelado de cobertura RF: La simulación en Radio Mobile y NS3-LoRa con modelos ITU-R P.833 y Weissberger demostró cobertura del 95% del transecto con RSSI >-120 dBm. El 60% del transecto permite uso de SF7-SF9 (alta tasa de datos), 35% requiere SF10-SF11 (tasa moderada) y 5% requiere SF12 (máximo alcance). El margen de enlace de +26.8 dB en el peor caso compensa desvanecimiento por lluvia, variabilidad estacional de follaje y degradación de componentes por humedad.

Objetivo 4: Evaluación de métricas: La simulación en NS3-LoRa durante 7 días virtuales con 10 nodos reportó un Packet Delivery Ratio consolidado de 94.5 % (>90 % objetivo), una latencia LoRaWAN local de 1.23 s y una latencia extremo a extremo estimada de aproximadamente 11.23 s al considerar el transporte satelital. Asimismo, el throughput efectivo estimado fue de 5.79 bps, suficiente para el envío de paquetes ambientales pequeños y periódicos.

Objetivo 5: Escalabilidad y seguridad: El diseño es escalable a los transectos restantes del PND mediante la incorporación gradual de nodos y gateways adicionales. Se formularon recomendaciones de seguridad relacionadas con cifrado AES-128, autenticación OTAA, gestión de vulnerabilidades mediante actualizaciones de firmware y verificación normativa ante la ASEP antes de una eventual implementación piloto.

En respuesta a la pregunta de investigación "¿Cuál es la arquitectura de red inalámbrica híbrida IoT más adecuada para garantizar el monitoreo ambiental en tiempo real en el transecto Rancho Frío?", se concluye que:

La arquitectura híbrida LoRaWAN (915 MHz, clase A, SF adaptativo) + satélite LEO Iridium es la más adecuada, por cumplir simultáneamente los requisitos de: (1) cobertura continua bajo dosel selvático (95% del transecto), (2) eficiencia energética compatible con operación solar y batería, (3) PDR consolidado de 94.5 %, (4) latencia extremo a extremo estimada de aproximadamente 11.23 s, suficiente para monitoreo ambiental remoto, y (5) independencia de infraestructura terrestre.

Contribuciones del proyecto al conocimiento académico y técnico:

- Aplicación documentada de una arquitectura LoRaWAN-satélite para monitoreo ambiental en un escenario de bosque tropical húmedo, evaluada mediante simulación NS3-LoRa y modelado de cobertura RF.
- Comparación técnica de los modelos de propagación ITU-R P.833 y Weissberger para estimar la atenuación por vegetación en la banda de 915 MHz bajo condiciones de bosque tropical.
- Metodología replicable de diseño de redes IoT en áreas protegidas remotas sin infraestructura terrestre, aplicable como referencia para futuros estudios en ecosistemas similares.
- Demostración de viabilidad energética de nodos solares bajo condiciones de baja irradiancia mediante modelado en MATLAB.

Beneficiarios directos del proyecto:

- Ministerio de Ambiente (MiAmbiente): Fortalecimiento de capacidad de monitoreo de 576,000 hectáreas de área protegida Patrimonio de la Humanidad.

Guardaparques de Estación Rancho Frío: Acceso oportuno a datos ambientales, reduciendo los retrasos actuales de 48-72 horas a una disponibilidad estimada del orden de segundos, según la arquitectura híbrida propuesta y el transporte satelital considerado.

- Investigadores del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI): Infraestructura tecnológica para estudios longitudinales sobre biodiversidad, cambio climático y servicios ecosistémicos.
- Comunidad científica nacional e internacional: Modelo replicable de monitoreo IoT en bosques tropicales remotos con datos validados mediante simulación computacional

El proyecto sentó las bases técnicas, metodológicas y económicas para la futura implementación de infraestructura IoT en el Parque Nacional Darién, contribuyendo a la modernización de los sistemas nacionales de vigilancia ambiental automatizada de Panamá.

RECOMENDACIONES

Recomendaciones Técnicas para Implementación.

1 Fase de Piloto (6 meses).

1. Desplegar 3 nodos sensores en el primer kilómetro del transecto T4 para validación experimental de modelos de simulación y ajuste de parámetros de RF.
2. Realizar mediciones de RSSI, SNR y PDR durante estación seca (diciembre-marzo) y estación lluviosa (junio-agosto) para cuantificar variabilidad estacional.
3. Monitorear estado de carga de baterías bajo condiciones reales de irradiancia para validar modelo energético MATLAB.
4. Evaluar resistencia de enclosures IP65 ante humedad >85% y precipitación >50 mm/h.
5. Ajustar ubicación de nodos según datos de campo (si difieren de simulación Radio Mobile).

2 Fase de Despliegue Completo (12 meses).

1. Completar instalación de 10 nodos sensores, 2 gateways intermedios y 1 gateway satelital según topología diseñada.
2. Implementar redundancia de gateways intermedios mediante configuración activo-pasivo (failover automático).
3. Configurar server de red LoRaWAN en la nube (AWS IoT Core, Azure IoT Hub o The Things Network) con georeplicación para alta disponibilidad.
4. Desarrollar dashboard web/móvil para visualización de datos en tiempo real con alertas configurables (umbrales de temperatura, detección de fauna amenazada)
5. Establecer protocolo de mantenimiento preventivo trimestral: limpieza de paneles solares, inspección de antenas, verificación de niveles de batería.

Recomendaciones de Seguridad.

Cifrado y Autenticación.

1. Implementar cifrado AES-128 en dos niveles según especificación LoRaWAN 1.0.4: Network Session Key (capa de red) y Application Session Key (capa de aplicación).
2. Utilizar activación OTAA (Over-The-Air Activation) en lugar de ABP (Activation By Personalization) para generar claves de sesión dinámicas en cada reinicio de nodo.
3. Almacenar claves maestras (AppKey, NwkKey) en módulos de seguridad hardware (HSM o Secure Element) para prevenir extracción por análisis de firmware.
4. Implementar mutual authentication entre nodos y network server mediante verificación de Message Integrity Code (MIC).
5. Rotar claves de sesión cada 30 días o después de 1,000,000 de tramas transmitidas (lo que ocurra primero).

Gestión de Vulnerabilidades.

1. Habilitar actualización de firmware OTA (Over-The-Air) mediante protocolo FUOTA (Firmware Update Over-The-Air) de LoRa Alliance para parcheo de vulnerabilidades sin visita física.
2. Suscribirse a boletines de seguridad de LoRa Alliance, Semtech y fabricantes de módulos LoRa para notificación temprana de CVEs (Common Vulnerabilities and Exposures).
3. Implementar sistema de detección de intrusiones (IDS) en network server para identificar patrones anómalos: transmisiones fuera de horario esperado, cambios súbitos de RSSI (nodo clonado en ubicación diferente), tasas de transmisión superior a configuración.
4. Configurar rate limiting en network server: máximo 288 transmisiones por nodo por día (1 cada 5 min) para prevenir ataques de denegación de servicio (DoS).
5. Realizar auditoría de seguridad anual por tercero independiente certificado en seguridad IoT (CISA, CISSP-ISSAP).

Escalabilidad a Otros Transectos.

Replicación del Diseño.

1. Utilizar la misma arquitectura de 5 niveles (nodos - gateways intermedios - gateway satelital - LEO - servidor) para los 13 transectos restantes del PND.
2. Estandarizar configuración de nodos mediante plantillas: mismo firmware, mismo intervalo de transmisión (300 s), misma configuración de sensores, para facilitar mantenimiento y reducir costos de capacitación.
3. Implementar nomenclatura sistemática de nodos: T4-N01 a T4-N10 (Transecto 4, Nodos 1-10), T5-N01 a T5-N10, etc.
4. Compartir gateways satelitales entre transectos cercanos (radio de acción LoRa ~5 km): 1 gateway satelital puede dar servicio a 2-3 transectos mediante múltiples gateways intermedios.
5. Para una eventual fase piloto, se recomienda elaborar una estructura de costos actualizada que considere nodos sensores, gateways LoRaWAN, sistema fotovoltaico, gabinete de protección, conectividad satelital, instalación, mantenimiento y permisos institucionales.

Optimización del Sistema Multi-Transecto.

1. Implementar algoritmo de Adaptive Data Rate (ADR) centralizado en network server para optimizar SF de todos los nodos considerando interferencias entre transectos.
2. Asignar canales LoRa dedicados por transecto (8 canales disponibles en banda 915 MHz) para minimizar colisiones inter-transecto.
3. Configurar QoS (Quality of Service) diferenciado: prioridad alta para alertas de detección de fauna amenazada (*Tapirus bairdii*, *Panthera onca*), prioridad normal para datos ambientales rutinarios.
4. Desarrollar modelo predictivo de consumo de batería basado en machine learning que considere histórico de irradiancia solar, densidad de transmisiones y temperatura ambiente, para anticipar necesidad de reemplazo de baterías.
5. Integrar datos de múltiples transectos en plataforma GIS (Geographic Information System) para visualización espacial de variables ambientales y correlación con biodiversidad.

Cumplimiento Normativo.

Regulación de Radiofrecuencia (ASEP).

1. Verificar previamente la normativa vigente de la Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP) relacionada con el uso de bandas ISM, límites de potencia, ciclo de trabajo, homologación de equipos y requisitos aplicables a redes inalámbricas IoT. Esta revisión permitirá asegurar que el diseño técnico propuesto se ajuste al marco regulatorio nacional antes de una eventual implementación piloto.
2. Monitorear futuras modificaciones a la regulación aplicable a tecnologías IoT/M2M y ajustar la configuración técnica de la red cuando sea necesario.

Permisos Ambientales (MiAmbiente).

1. Obtener permiso de investigación científica de MiAmbiente (Dirección de Áreas Protegidas y Biodiversidad) para instalación de equipos en el PND.
2. Realizar evaluación de impacto ambiental (EIA) simplificada para instalación de nodos y gateways, justificando que son dispositivos de bajo impacto (sin emisiones, sin ruido, sin residuos).
3. Coordinar con guardaparques de Estación Rancho Frío para definición de rutas de acceso que minimicen perturbación de fauna durante instalación.
4. Comprometerse a desmantelamiento y retiro de equipos al final de vida útil (10 años) con disposición adecuada de baterías Li-Ion (reciclaje según normativa de residuos peligrosos).
5. Compartir datos ambientales recopilados con MiAmbiente y STRI para investigaciones de conservación, cumpliendo con principio de reciprocidad científica.

Investigaciones Futuras.

1. Validación experimental de modelos de propagación ITU-R P.833 y Weissberger mediante mediciones de campo en el transecto T4 con analizador de espectro portátil.
2. Estudio comparativo de tecnologías satelitales LEO (Iridium, Swarm, Kinéis, Starlink IoT) en términos de latencia, costo y cobertura en zona ecuatorial.
3. Desarrollo de algoritmos de machine learning para clasificación automática de fauna mediante análisis de patrones de movimiento detectados por sensores PIR.

4. Integración de sensores acústicos para detección de vocalizaciones de especies (mono aullador, jaguar) mediante técnicas de bioacústica y redes neuronales convolucionales.
5. Análisis de correlación entre variables ambientales (temperatura, humedad, precipitación) y abundancia de especies de mamíferos mediante series temporales de 5-10 años.
6. Diseño de red IoT para monitoreo de calidad de agua en quebradas del PND (pH, conductividad, oxígeno disuelto, turbidez) mediante sensores sumergibles con comunicación LoRa.
7. Evaluación económica de beneficio-costos de la red IoT considerando reducción de costos operativos de guardaparques (menos visitas de campo), valor de datos científicos generados, y mejora en tiempo de respuesta ante emergencias.

Estas recomendaciones constituyen una hoja de ruta para la implementación práctica del diseño propuesto y su escalamiento al sistema completo de 14 transectos del Parque Nacional Darién, contribuyendo al fortalecimiento de la capacidad nacional de vigilancia ambiental automatizada en áreas protegidas de Panamá.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4), 393-422.
[https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)
- Asamblea Nacional de Panamá. (2019). Ley 81 de 2019, sobre protección de datos personales. *Gaceta Oficial de la República de Panamá*. https://s3-legispan.asamblea.gob.pa/legispan/NORMAS/2010/2019/LEY/Administrador%20Legispan_28743-A_2019_3_29_ASAMBLEA%20NACIONAL_81.pdf
- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), 1466.
<https://doi.org/10.3390/s16091466>
- Benkahla, M., Tounsi, H., Chaieb, R., & Cousin, B. (2021). LoRa-based IoT network for smart forest monitoring. *Sensors*, 21(16), 5480.
<https://doi.org/10.3390/s21165480>
- Blenn, N., & Kuipers, F. (2017). LoRaWAN in the wild: Measurements from The Things Network. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1706.03086>
- Cattani, M., Boano, C. A., & Römer, K. (2017). An experimental evaluation of the reliability of LoRa long-range low-power wireless communication. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 6(2), 7. <https://doi.org/10.3390/jsan6020007>
- ChirpStack. (s. f.). ChirpStack open-source LoRaWAN Network Server.
<https://www.chirpstack.io/>
- Hurtado de Barrera, J. (2010). Metodología de la investigación: Guía para la comprensión holística de la ciencia (4.^a ed.). Quirón Ediciones.
- IEEE Standards Association. (2020). IEEE Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things (IoT) (IEEE Std 2413-2019).
<https://standards.ieee.org/standard/2413-2019.html>
- International Telecommunication Union. (2019). Recommendation ITU-R P.833-10: Attenuation in vegetation. ITU Radiocommunication Sector.
<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.833>

- Iridium Communications. (2014). Iridium 9603 SBD transceiver product developers guide. <https://cdn.rock7.com/docs/9603-Developers-guide.pdf>
- Khan, F. H., & Portmann, M. (2020). Experimental evaluation of LoRaWAN in NS-3. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2009.09503>
- LoRa Alliance. (s. f.). LoRaWAN: The leading LPWAN standard for IoT. <https://loralliance.org/>
- LoRa Alliance. (2022). LoRaWAN specification v1.0.4. LoRa Alliance Technical Committee. https://loralliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-0-4/
- Maleki, A., Nguyen, H. H., Bedeer, E., & Barton, R. (2023). A tutorial on chirp spread spectrum for LoRaWAN: Basics and key advances. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2310.10503>
- Ministerio de Ambiente de Panamá. (2014). Plan de manejo del Parque Nacional Darién 2014-2019. Dirección de Áreas Protegidas y Biodiversidad. <https://www.miambiente.gob.pa>
- Moreno Ortiz, A., & Castillo, D. C. (2018). Abundancia relativa de mamíferos terrestres y arbóreos en la Estación Rancho Frío, Parque Nacional Darién, mediante el uso de transectos lineales y cámaras trampa [Trabajo de grado, Universidad de Panamá]. Repositorio Institucional Digital de la Universidad de Panamá. <https://up-rid.up.ac.pa/6310/>
- NASA Earthdata. (s. f.). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/srtm>
- OpenAI. (2026). ChatGPT (GPT-5.5 Thinking) [Modelo de lenguaje grande]. <https://chatgpt.com>
- Semtech. (s. f.). LoRa technology overview. <https://www.semtech.com/lora>
- The Things Industries. (s. f.). The Things Stack glossary. <https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/glossary/>
- The Things Network. (s. f.). What are LoRa and LoRaWAN? <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>
- UNESCO. (1981). Darien National Park. UNESCO World Heritage Centre. <https://whc.unesco.org/en/list/159>

- Van den Abeele, F., Haxhibeqiri, J., Moerman, I., & Hoebeke, J. (2017). Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3. arXiv.
<https://arxiv.org/abs/1705.05899>
- Weissberger, M. A. (1982). An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by trees (Tech. Rep. ECAC-TR-81-101).
Electromagnetic Compatibility Analysis Center.

ANEXOS

ANEXO A

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE EQUIPOS

A.1 Especificaciones de Nodos Sensores IoT

Tabla 2

Especificaciones técnicas de nodos sensores IoT

COMPONENTE	ESPECIFICACIÓN	OBSERVACIONES
Microcontrolador	ARM Cortex-M0+ @ 48 MHz 2 MB Flash, 256 KB RAM	Consumo <10 μ A en sleep
Módulo LoRa	Semtech SX1276 (915 MHz) Potencia TX: +14 dBm Sensibilidad RX: -137 dBm (SF12)	Clase A LoRaWAN
Sensor Temp/Hum	Sensirion SHT31 Rango: -40 a +125°C Precisión: $\pm 0.3^\circ\text{C}$, $\pm 2\%$ RH	Interfaz I2C
Sensor Presión	Bosch BMP280 Rango: 300-1100 hPa Precisión: ± 1 hPa	Interfaz I2C/SPI
Sensor Calidad Aire	AMS CCS811 eCO ₂ : 400-8192 ppm TVOC: 0-1187 ppb	Consumo 1.2 mA @ 1 Hz
Sensor PIR	HC-SR501 Alcance: 7 m Ángulo: 120°	Detección de movimiento fauna
Panel Solar	10 W monocristalino 18V Voc, 0.56A Isc Eficiencia: 18%	Dimensiones: 30×20 cm
Batería	Li-Ion 3.7V 10,000 mAh Ciclos: >500 @ 80% DOD	Protección BMS integrada
Enclosure	Polycarbonate IP65 Rango temp: -20 a +60°C	Sellado contra humedad/polvo
Antena LoRa	Omnidireccional 2 dBi Frecuencia: 902-928 MHz	Conector SMA
Consumo Promedio	76.6 mWh/día (20.7 mAh @ 3.7V)	Duty cycle 0.67%
Autonomía sin Sol	386 días (12.8 meses)	Con batería 10,000 mAh
Peso Total	~2.5 kg (con montaje)	Incluye bracket de instalación
Costo Estimado	\$250 USD por nodo	Precio referencial 2026

Nota. Elaboración propia con base en las especificaciones propuestas para nodos sensores IoT LoRaWAN de bajo consumo.

A.2 Especificaciones de Gateways LoRa

Tabla 3

Especificaciones técnicas de gateways LoRa

COMPONENTE	ESPECIFICACIÓN	OBSERVACIONES
Concentrador LoRa	Semtech SX1301 8 canales simultáneos Sensibilidad: -140 dBm	Multi-SF demodulation
Procesador	ARM Cortex-A7 @ 1.2 GHz 512 MB RAM	Linux embebido
Conectividad Ascendente	Módulo satelital Iridium 9603 o enlace satelital IoT equivalente	Retardo satelital estimado ≈ 10 s para transporte de mensajes IoT
Panel Solar	20 W monocristalino 18V Voc, 1.11A Isc	Dimensiones: 40×30 cm
Batería	Li-Ion 3.7V 20,000 mAh Ciclos: >500 @ 80% DOD	Autonomía >30 días sin sol
Enclosure	Aluminum IP67 Rango temp: -40 a +75°C	Mayor resistencia que nodos
Antena LoRa	Omnidireccional 5 dBi Frecuencia: 902-928 MHz	Conector N-type
Antena Satelital	Patch directional o helicoidal Ganancia: 3-5 dBi	Según proveedor LEO
Capacidad	50-100 nodos prácticos 10,000 nodos teóricos	Limitado por duty cycle
Peso Total	~8 kg (con montaje)	Instalación en poste 3-4 m
Costo Estimado	\$2,000 USD por gateway	Incluye módulo satelital

Nota. Elaboración propia con base en las especificaciones propuestas para gateways LoRaWAN outdoor y enlace satelital IoT.

ANEXO B

PARÁMETROS Y CONFIGURACIONES DE SIMULACIÓN

B.1 Parámetros de simulación NS3-LoRa

La simulación de la red LoRaWAN se configuró considerando un escenario compuesto por 10 nodos sensores y 2 gateways distribuidos a lo largo del transecto Rancho Frío. Los nodos fueron modelados como dispositivos estáticos mediante Constant Position Mobility Model, utilizando coordenadas de referencia derivadas del diseño de topología y del análisis de cobertura.

Los parámetros consolidados utilizados para la simulación y evaluación de la arquitectura propuesta fueron los siguientes:

- Número de nodos sensores: 10.
- Número de gateways LoRaWAN: 2.
- Frecuencia de operación: 915 MHz.
- Ancho de banda: 125 kHz.
- Spreading Factor: SF7-SF12.
- Coding Rate: 4/5.
- Potencia de transmisión: +14 dBm.
- Sensibilidad del receptor: hasta -137 dBm en SF12.
- Modelo de movilidad: Constant Position Mobility Model.
- Modelo de propagación implementado en NS-3: LogDistancePropagationLossModel con exponente 3.76 como aproximación agregada de pérdidas por entorno forestal.
- Duración de simulación: 7 días.

- Duración equivalente: 604,800 segundos.
- Intervalo de transmisión: 300 segundos.
- Payload efectivo por trama: 23 bytes.
- Total de paquetes transmitidos: 20,160.
- Packet Delivery Ratio promedio: 94.5 %.
- Paquetes recibidos estimados: 19,051.
- Latencia promedio LoRaWAN local: 1.23 segundos.
- Retardo satelital estimado: aproximadamente 10 segundos.
- Latencia extremo a extremo estimada: aproximadamente 11.23 segundos.
- Throughput efectivo estimado: 5.79 bps.
- Consumo energético estimado: 76.6 mWh/día, equivalente aproximadamente a 20.7 mAh por nodo por día.

El modelo energético consideró consumos estimados de 100 mA en transmisión, 15 mA en recepción y 0.0005 mA en modo sleep, con una batería de referencia de 10,000 mAh a 3.7 V. Los modelos ITU-R P.833-10, Weissberger, Two-Ray Ground Reflection y Longley-Rice fueron utilizados como soporte teórico y de cobertura, mientras que el modelo LogDistancePropagationLossModel permitió representar operativamente las pérdidas agregadas dentro de NS-3.

ANEXO C

INSTRUMENTO PROPUESTO PARA VALIDACIÓN POR EXPERTOS

El presente instrumento fue diseñado como recurso metodológico para la validación técnica futura de la propuesta denominada **“Diseño de red IoT híbrida para monitoreo ambiental en el transecto Rancho Frío del Parque Nacional Darién”**.

El instrumento quedó orientado a profesionales del área de redes inalámbricas, telecomunicaciones, Internet de las Cosas (IoT), infraestructura tecnológica o seguridad informática, con el propósito de valorar la claridad, pertinencia, coherencia, suficiencia y viabilidad técnica de la arquitectura propuesta.

La aplicación efectiva de este instrumento quedó prevista para una fase posterior, antes de una eventual implementación piloto en campo. Por tanto, los datos personales, cargos, firmas y observaciones de los expertos serán incorporados únicamente cuando se realice la consulta formal correspondiente.

Datos del experto

Nombre del experto: _____ Fecha de evaluación: _____

Profesión / especialidad: _____ Cargo / institución: _____

Firma: _____

Tabla 4

Matriz propuesta de validación por expertos

Escala sugerida: 1 = Muy bajo, 2 = Bajo, 3 = Aceptable, 4 = Alto, 5 = Muy alto.

N.º	Criterio de evaluación	Valoración (1-5)	Observaciones
1	Claridad de la arquitectura de red IoT híbrida propuesta.	_____	
2	Pertinencia técnica de las tecnologías LoRaWAN y comunicación satelital IoT para el entorno Rancho Frío.	_____	
3	Coherencia entre el problema identificado, los objetivos, la metodología y la solución propuesta.	_____	
4	Suficiencia de los componentes técnicos propuestos: nodos sensores, gateways, enlace satelital, servidor, parámetros de simulación y métricas de desempeño.	_____	
5	Viabilidad técnica de la propuesta para una futura implementación piloto en un entorno remoto de bosque tropical húmedo.	_____	

Nota. *Elaboración propia.*

Observaciones generales del experto

Recomendación del experto

- ☐ La propuesta es técnicamente viable sin modificaciones relevantes.
- ☐ La propuesta es viable, pero requiere ajustes menores.
- ☐ La propuesta requiere ajustes técnicos importantes antes de una implementación piloto.
- ☐ La propuesta no se considera viable en las condiciones planteadas.

Firma del experto: _____ Fecha: _____

ANEXO D

PROMPTS - DECLARACIÓN DE USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Durante el desarrollo del presente proyecto de graduación se utilizó la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT (OpenAI, 2026) como recurso de apoyo académico para la revisión de redacción, mejora de coherencia textual, organización de ideas, revisión de consistencia entre objetivos, metodología, resultados, conclusiones y recomendaciones, así como para recibir sugerencias sobre la presentación de tablas, figuras, anexos y análisis técnico.

El uso de esta herramienta no sustituyó el trabajo intelectual del autor ni la responsabilidad académica sobre el contenido del documento. Los criterios técnicos, decisiones metodológicas, resultados de simulación, análisis, conclusiones y recomendaciones fueron revisados, ajustados y validados por el autor conforme al alcance del proyecto, las normas institucionales y los lineamientos de citación correspondientes.

La inteligencia artificial fue utilizada como apoyo, no como sustitución del trabajo académico del autor.

Prompts representativos utilizados

N.º	Prompt utilizado	Capítulo o sección donde se utilizó	Respuesta o aporte obtenido
1	Revisa la redacción académica de este apartado y mejora la claridad sin cambiar el sentido técnico del texto.	Capítulo I. Planteamiento del problema; Capítulo II. Marco teórico.	Se obtuvo una redacción más clara, formal y coherente, manteniendo el sentido original del contenido, la delimitación del problema y la relación del proyecto con el monitoreo ambiental mediante tecnologías IoT.
2	Sugiere una forma académica de presentar el análisis de resultados relacionando los datos obtenidos con el marco teórico y los modelos de propagación utilizados.	Capítulo IV. Resultados, análisis y propuesta.	Se recibió orientación para organizar la discusión de resultados relacionando la cobertura RF, la atenuación por vegetación, el desempeño LoRaWAN, el consumo energético y la viabilidad de la arquitectura híbrida con los aportes teóricos y modelos técnicos revisados.
3	Ayúdame a verificar si las conclusiones y recomendaciones responden directamente a los objetivos específicos del proyecto.	Conclusiones y recomendaciones.	Se obtuvo apoyo para revisar la correspondencia entre los objetivos específicos, los resultados obtenidos, las conclusiones formuladas y las recomendaciones finales, procurando mantener coherencia metodológica y técnica en el cierre del documento.

ANEXO E

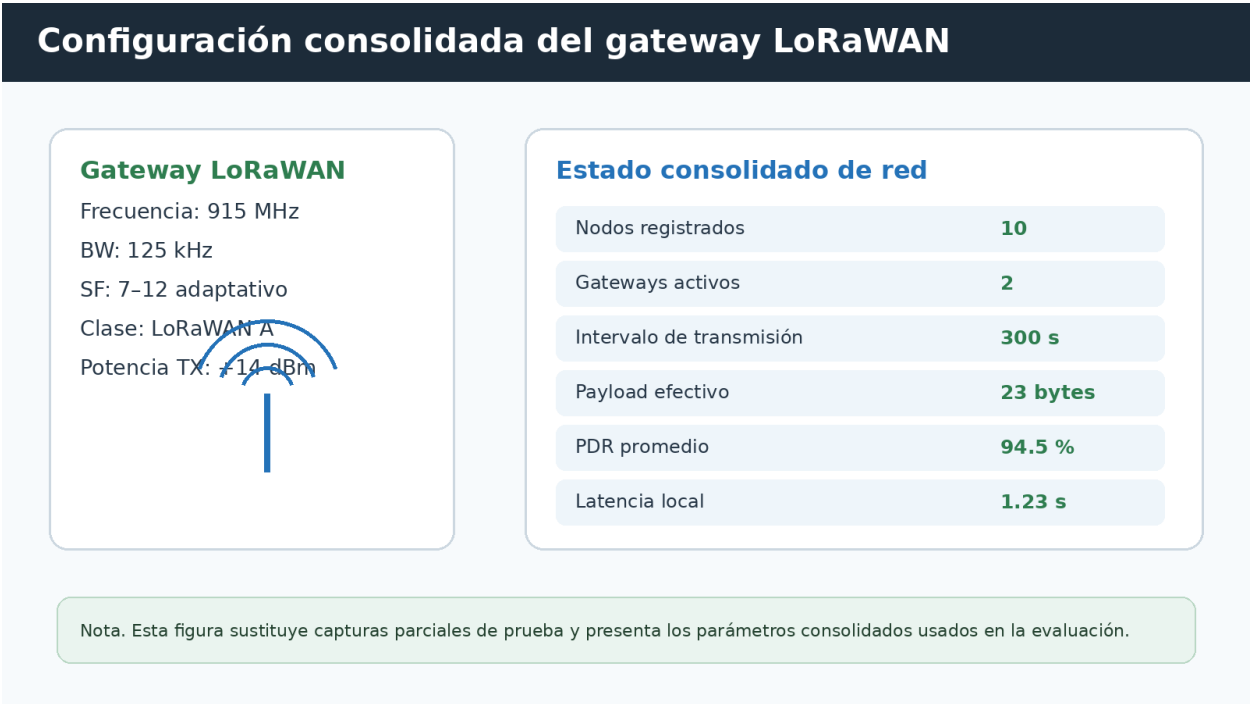
EVIDENCIAS TÉCNICAS, SIMULACIONES Y FIGURAS DE APOYO

Las siguientes figuras documentan elementos técnicos del diseño, configuración, simulación y validación visual de la arquitectura IoT híbrida propuesta.

Estas evidencias tienen como finalidad complementar los resultados presentados en el Capítulo IV, mostrando capturas, diagramas y salidas técnicas relacionadas con la configuración de dispositivos, la representación de la topología LoRaWAN, el flujo de datos, los parámetros de simulación y los resultados consolidados obtenidos. Las imágenes incluidas no representan una implementación física en campo, sino soportes visuales del proceso de diseño, modelado y simulación desarrollado para evaluar la viabilidad técnica de la propuesta.

Figura 5

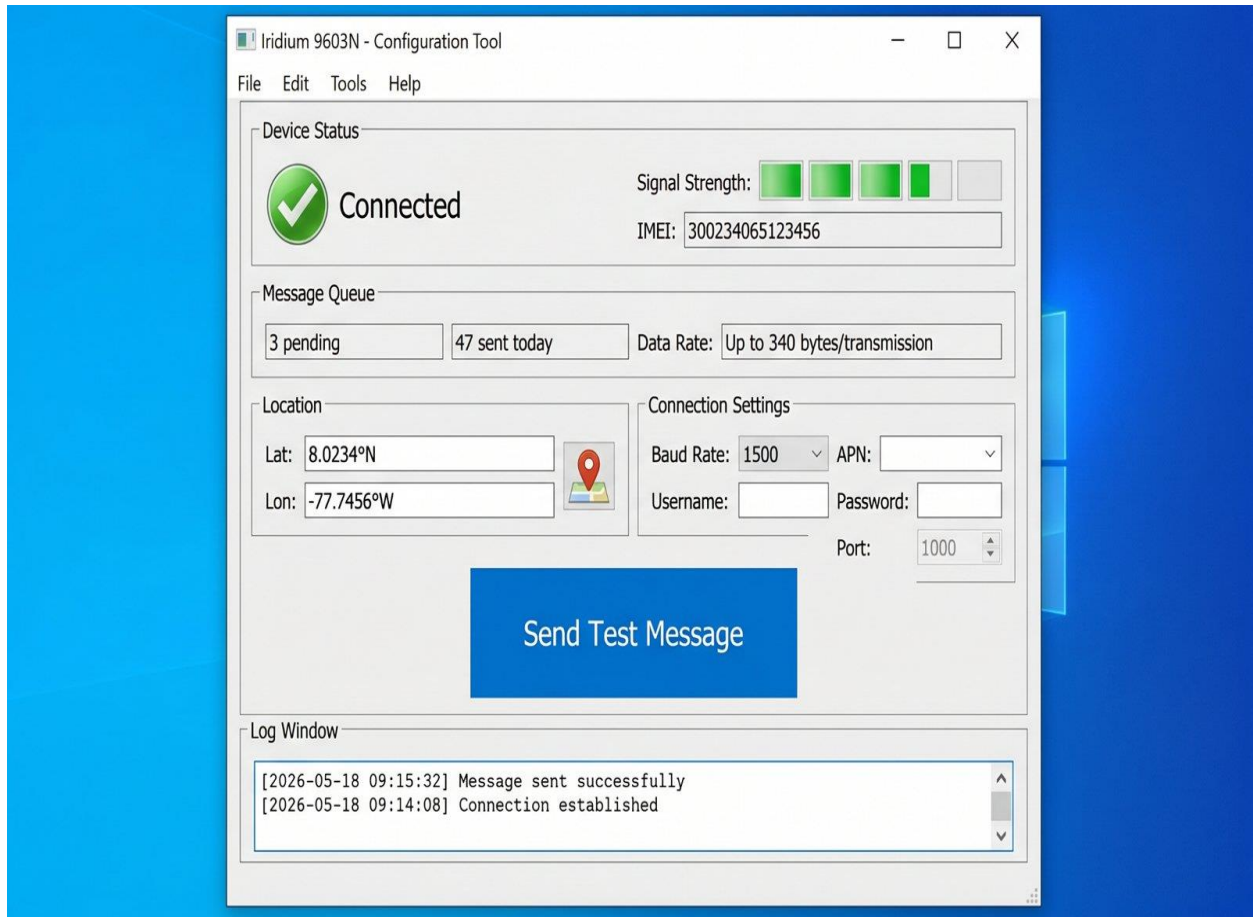
Configuración del gateway LoRaWAN y estado de dispositivos conectados



Nota. Evidencia técnica consolidada para la configuración LoRaWAN propuesta, con 10 nodos, 2 gateways, frecuencia de 915 MHz y métricas coherentes con el Capítulo IV y el Anexo B.

Figura 6

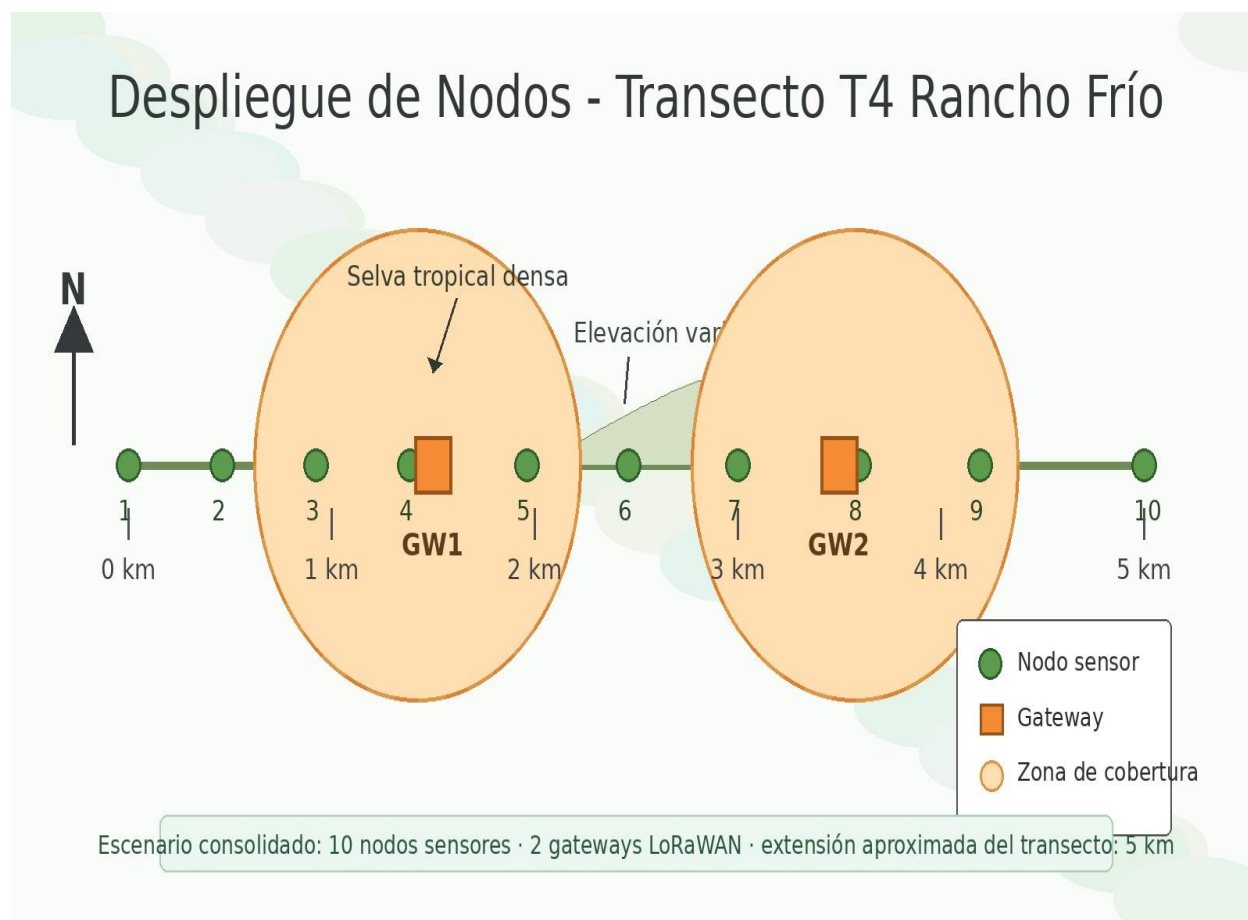
Herramienta de configuración del módem Iridium 9603N



Nota. Evidencia técnica generada durante el proceso de diseño y simulación del proyecto.

Figura 7

Despliegue de nodos y gateways sobre el transecto T4 Rancho Frío



Nota. Despliegue consolidado del transecto T4 con extensión aproximada de 5 km, 10 nodos sensores y 2 gateways LoRaWAN, coherente con el Capítulo IV, el Anexo B y las evidencias técnicas.

Figura 8

Flujo de datos desde el nodo sensor hasta el servidor central

Flujo de datos: nodo sensor → servidor central



Parámetros del flujo

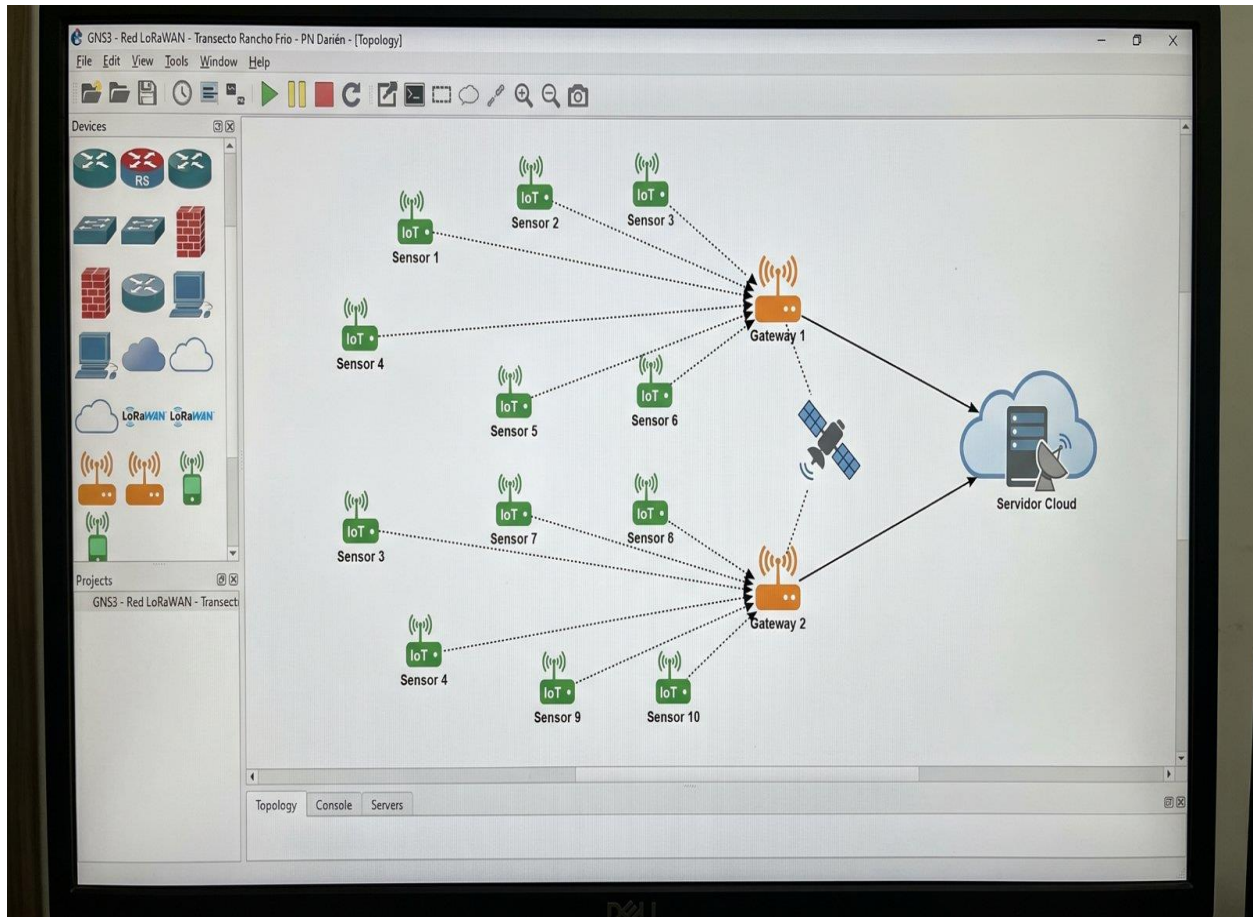
Intervalo: 300 s (5 min) · Payload: 23 bytes · Latencia LoRaWAN: 1.23 s · Latencia extremo a extremo: ≈ 11.23 s

Nota. El satélite opera como backhaul del gateway hacia Internet, no como módem individual por nodo.

Nota. Flujo de datos consolidado de la arquitectura híbrida, considerando intervalo de transmisión de 300 s, payload efectivo de 23 bytes y retardo satelital aproximado de 10 s.

Figura 9

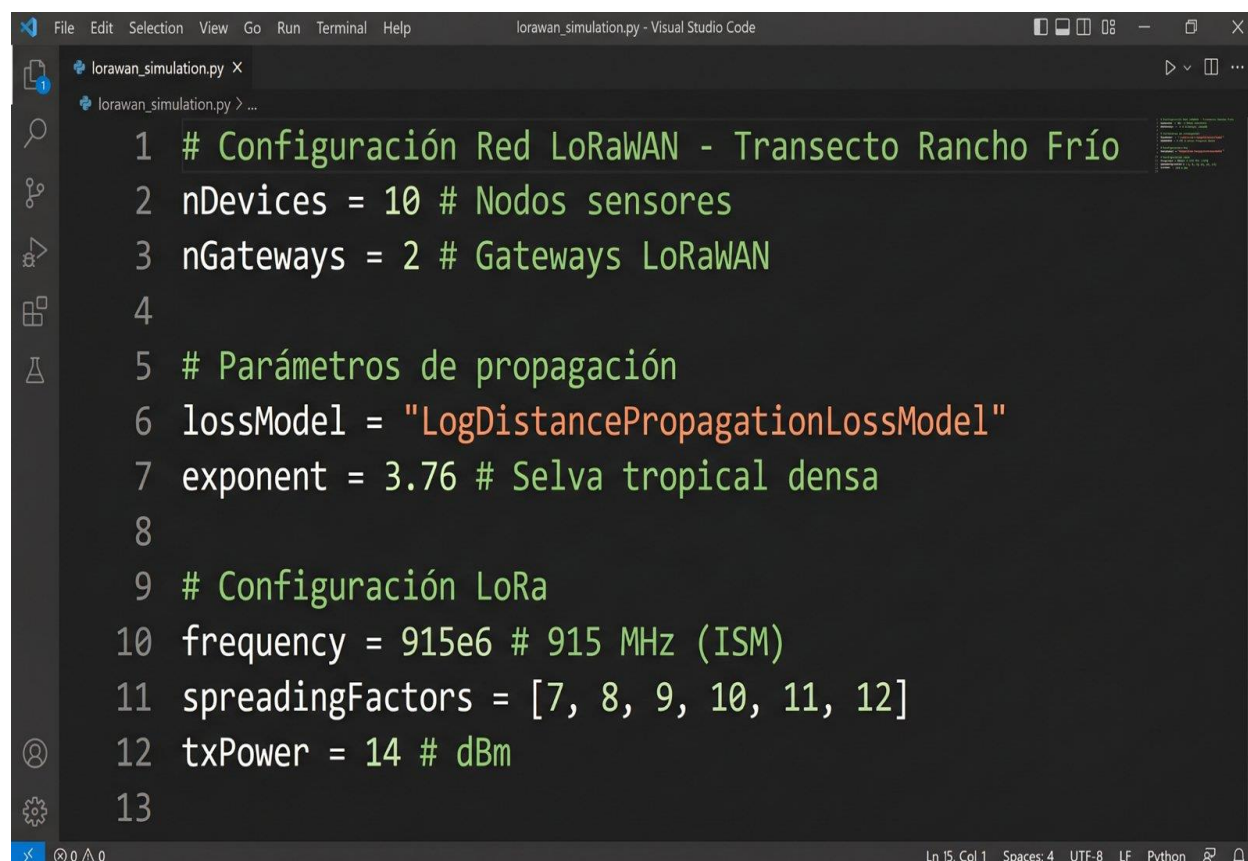
Representación de la topología LoRaWAN elaborada en GNS3



Nota. La figura muestra una representación visual de la topología LoRaWAN elaborada en GNS3 con fines de diagramación técnica. La simulación de desempeño de la red fue realizada en NS3-LoRa, conforme a la metodología definida en el Capítulo III.

Figura 10

Fragmento de configuración de la simulación LoRaWAN en NS3



```
1 # Configuración Red LoRaWAN - Transecto Rancho Frío
2 nDevices = 10 # Nodos sensores
3 nGateways = 2 # Gateways LoRaWAN
4
5 # Parámetros de propagación
6 lossModel = "LogDistancePropagationLossModel"
7 exponent = 3.76 # Selva tropical densa
8
9 # Configuración LoRa
10 frequency = 915e6 # 915 MHz (ISM)
11 spreadingFactors = [7, 8, 9, 10, 11, 12]
12 txPower = 14 # dBm
13
```

Nota. La simulación NS3-LoRa implementa LogDistancePropagationLossModel con exponente de pérdida 3.76 como aproximación agregada de las pérdidas del entorno forestal.

Figura 11

Resultados consolidados de simulación NS3-LoRa

Resultados consolidados de simulación NS3-LoRa

Parámetro	Valor consolidado
Nodos sensores	10
Gateways LoRaWAN	2
Duración virtual	7 días / 604,800 s
Intervalo de transmisión	300 s
Payload efectivo	23 bytes
Paquetes transmitidos	20,160
Paquetes recibidos estimados	19,051
PDR promedio	94.5 %
Latencia LoRaWAN local	1.23 s
Retardo satelital estimado	≈ 10 s
Latencia extremo a extremo	≈ 11.23 s
Throughput efectivo	5.79 bps
Consumo energético	76.6 mWh/día ≈ 20.7 mAh/nodo/día

Nota. Resultados consolidados para eliminar discrepancias entre el cuerpo del informe, Anexo B y evidencias técnicas.

Nota. Resultados consolidados de simulación NS3-LoRa utilizados para unificar las métricas del Capítulo IV, el Anexo B y las evidencias técnicas.

Figura 12

Consola de tráfico y recepción de paquetes LoRaWAN

```

●●● Consola de tráfico y recepción de paquetes LoRaWAN - Rancho Frío T4

$ ./ns3 run "rancho-frio-lorawan --duration=604800 --nodes=10 --gateways=2"

[INFO] Escenario consolidado de simulación
Duración simulación : 7 días (604,800 s)
Nodos sensores      : 10
Gateways LoRaWAN    : 2
Intervalo TX        : 300 s (5 min)
Payload efectivo    : 23 bytes

[INFO] Tráfico generado
Paquetes por nodo   : 2,016
Paquetes enviados   : 20,160
Paquetes recibidos  : 19,051
Paquetes perdidos   : 1,109
PDR promedio        : 94.5 %

[INFO] Latencia y throughput
Latencia LoRaWAN    : 1.23 s
Retardo satelital   : ≈ 10 s
Latencia E2E         : ≈ 11.23 s
Throughput bruto     : 6.13 bps
Throughput efectivo : 5.79 bps

[INFO] Energía
Consumo estimado    : 76.6 mWh/día ≈ 20.7 mAh/nodo/día

[OK] Resultados coherentes con Capítulo IV, Anexo B y evidencias del Anexo E.
Simulación y análisis técnico consolidado; no corresponde a medición de campo.

```

Nota. Salida de consola depurada y consolidada del escenario de simulación, coherente con las métricas del Capítulo IV, el Anexo B y las evidencias del Anexo E. Los valores corresponden a simulación y análisis técnico, no a medición experimental de campo.