



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Diseño e implementación de un prototipo de sistema de monitoreo remoto para la protección de territorios de pueblos indígenas en aislamiento en el Parque Nacional Natural Río Puré

Jorge Andres Torres Cepeda

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá D.C., Colombia
2023

Diseño e implementación de un prototipo de sistema de monitoreo remoto para la protección de territorios de pueblos indígenas en aislamiento en el Parque Nacional Natural Río Puré

Jorge Andres Torres Cepeda

**Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería – Ingeniería Electrónica**

Director (a):

Ph.D. Gloria Margarita Varón Durán

Codirector (a):

Ph.D. Juan Fernando Coronel Rico

Línea de Investigación:

Ingeniería para la sociedad la vida y la naturaleza

Grupo de Investigación:

**Grupo de Investigación en Electrónica de Altas Frecuencias y Telecomunicaciones
(CMUN)**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bogotá D.C., Colombia

2023

A mi familia

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Jorge Andres Torres Cepeda
Fecha 02/08/2023

Agradecimientos

En este espacio, expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que me han acompañado y brindado su apoyo durante estos últimos años. Su compañía y colaboración no solo han sido fundamentales en la ejecución de este trabajo, sino también han contribuido significativamente a mi crecimiento personal.

En primer lugar, quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis directores, la profesora Margarita Varón y el profesor Juan Fernando Coronel, cuyo apoyo, paciencia, compromiso y dedicación fueron fundamentales para hacer posible la realización de este trabajo. Siempre estuvieron dispuestos a guiarme a través de su ejemplo y su valioso conocimiento, lo cual ha despertado en mí una gran motivación por la investigación. No tengo más que palabras de gratitud por todo el tiempo que han dedicado a enseñarme y por ser una fuente de inspiración en este proceso, donde, trabajar a su lado es un gran privilegio.

Agradezco, a los profesores y amigos, Camilo Cano y Andrés Triana, quienes no solo apoyaron esta iniciativa, sino que se han convertido en un modelo a seguir para mí. Agradezco la confianza y toda la colaboración brindada en este proceso.

A todos mis compañeros y amigos del grupo de Comunicaciones y Electrónica de Alta Frecuencia CMUN, en especial a Nicolas, Danny, Diana, Valentina, Oscar y Felipe, con quienes hemos trabajado en esta iniciativa de la mano y con quienes hemos fomentado una gran amistad.

A la Universidad Nacional de Colombia, que se convirtió en mi hogar y donde estoy cumpliendo mis sueños. Además, de financiar la ejecución de este proyecto mediante la “*Convocatoria de Extensión Solidaria 2018: Regiones Y Comunidades sostenibles*”.

A Daniel Aristizábal y Valentina Cardona y todo el equipo de Amazon Conservation Team, cuya iniciativa y motivación han sido parte fundamental de este conjunto de iniciativas y siempre han sido muy participativos en la ejecución de este trabajo.

A Parques Nacionales Naturales de Colombia, a la Dirección Territorial de la Amazonia, quienes han brindado toda la colaboración y disposición en la ejecución de este proyecto. En especial al grupo de guardaparques del Parque Nacional Natural Amacayacu, cuyo acompañamiento ha sido fundamental en la ejecución de las pruebas de campo.

Por último, a toda mi familia, quienes acompañaron y apoyaron todo este proceso incondicionalmente, tanto en los buenos y los malos momentos, convirtiéndose en bastión fundamental para alcanzar mis sueños.

¡Gracias totales a todos!

Resumen

Diseño e implementación de un prototipo de sistema de monitoreo remoto para la protección de territorios de pueblos indígenas en aislamiento en el Parque Nacional Natural Río Puré

En este trabajo, se describe el diseño y la implementación de un prototipo preliminar de una herramienta tecnológica destinada a identificar amenazas y perturbaciones al *Parque Nacional Natural Río Puré*, complementando así las estrategias de vigilancia y control, y contribuyendo a la conservación de la biodiversidad y la cultura del bosque tropical húmedo del noroeste amazónico colombiano, así como a la protección de los derechos de los pueblos indígenas en aislamiento.

Para lograr el objetivo propuesto, se realizó una revisión sistemática con el fin de determinar las tecnologías existentes más adecuadas para diseñar el prototipo que se adaptara a las particulares condiciones de la Amazonia. Una vez identificadas estas tecnologías, se propuso el diseño de la arquitectura preliminar del sistema. Posteriormente, se llevó a cabo la implementación de la herramienta tecnológica, que integró tres módulos fundamentales: un sistema de sensado e identificación, basado en un sistema de radar y una cámara PTZ (del inglés Pan-Tilt-Zoom) para el seguimiento visual; un sistema de comunicaciones, basado en un enlace satelital; y un sistema de alimentación de energía eléctrica autónomo.

Finalmente, se realizaron pruebas del prototipo implementado, se evaluó el desempeño de este en diferentes escenarios, lo que permitió identificar tanto sus fortalezas como debilidades, ofreciendo así una oportunidad para realizar mejoras en el sistema. Las pruebas preliminares demostraron que, a pesar de las desafiantes condiciones propias de la Amazonia colombiana, el sistema de radar funcionó correctamente y proporcionó información precisa sobre los objetivos detectados. En consecuencia, este sistema de radar en etapa de desarrollo y pruebas preliminares puede convertirse en una herramienta valiosa para proporcionar información y complementar las estrategias de seguridad y vigilancia en zonas protegidas, contribuyendo a controlar y eventualmente reducir las presiones y amenazas sobre la selva amazónica.

Palabras clave: sistema de monitoreo, radar, comunicación satelital, sistema fotovoltaico, bosque tropical húmedo amazónico.

Abstract

Design and implementation of a prototype of a remote monitoring system for the protection of the territories of indigenous peoples in isolation in the Rio Puré National Natural Park

This work describes the design and implementation of a preliminary prototype of a technological tool to identify threats and disturbances at the *Rio Puré National Natural Park*, complementing the surveillance and control strategies and contributing to the conservation of biodiversity and culture of the tropical rainforest of the northwestern Colombian Amazon, as well as the protection of the rights of isolated indigenous peoples.

To achieve the proposed objective, a systematic review was carried out to decide the most appropriate technologies to design the prototype that would be adapted to the specific conditions of the Amazon. Once these technologies were identified, the design of the preliminary architecture of the system was proposed. Subsequently, the technological tool was implemented, integrating three basic modules: a detection and identification system, based on a radar system and a PTZ (Pan-Tilt-Zoom) camera for visual tracking; a communication system, based on a satellite link; and an autonomous power supply system.

Finally, the prototype was tested, and its performance was evaluated in different scenarios, identifying both its strengths and weaknesses and providing an opportunity to make improvements to the system. Preliminary tests showed that, despite the challenging conditions of the Colombian Amazon, the radar system worked correctly and supplied accurate information about the detected targets. As a result, this radar system, under development and preliminary testing, could become a valuable tool for supplying information and complementing security and surveillance strategies in protected areas, contributing to the control and eventual reduction of pressures and threats to the Amazon rainforest.

Keywords: monitoring system, radar, satellite communication, photovoltaic system, Amazon rainforest.

Contenido

Resumen	VIII
Lista de figuras	XII
Lista de tablas.....	XIV
Lista de Abreviaturas	1
Lista de Símbolos	2
Introducción	4
Objetivos	7
Estructura del proyecto.....	8
Capítulo 1	9
Capítulo 1. Marco Teórico y antecedentes.....	9
1.1. Parque Nacional Natural Río Puré (PNNRP).....	9
1.1.1. Aspectos físicos del PNNRP	10
1.1.2. Contexto histórico cultural del PNNRP	10
1.2. Arquitectura preliminar del sistema y antecedentes.....	12
1.2.1. Sistema de sensado e identificación.....	14
1.2.1.1. Sensado con tecnología acústica.....	14
1.2.1.2. Sensado con tecnología ultrasónica.....	15
1.2.1.3. Sensado con tecnología radar	16
1.2.2. Sistema de comunicación.....	17
1.2.2.1. Comunicaciones satelitales.....	17
1.2.2.1.1. Tecnología VSAT.....	17
1.2.2.1.2. Tecnología BGAN.....	18
1.2.2.1.3. Starlink.....	18
1.2.3. Sistema de alimentación autónomo.....	19
1.2.3.1. Energía solar	20
1.2.3.1.1. Sistema Fotovoltaico.....	20
1.2.3.2. Energía eólica.....	20
1.2.3.3. Energía hidráulica	21
Capítulo 2	23
Capítulo 2. Diseño detallado e integración del sistema de monitoreo.....	23
2.1. Selección de las tecnologías a emplear para cada uno de los módulos del prototipo	25
2.1.1. Sistema de sensado e identificación.....	25
2.1.1.1. Tecnología radar	25
2.1.1.2. Tecnología ultrasónica	28
2.1.1.3. Tecnología acústica.....	31
Conclusiones acerca de la tecnología de sensado.....	34

2.1.2. Sistema de comunicaciones	38
Conclusiones acerca del sistema de comunicaciones	39
2.1.3. Sistema de alimentación autónomo	41
Conclusiones acerca del sistema de alimentación autónomo	42
2.2. Arquitectura de tecnologías para el prototipo del sistema de monitoreo	45
2.2.1. Diseño del Sistema Fotovoltaico (SFV) off-grid para el prototipo	45
2.2.1.1. Dimensionamiento de equipos del SFV	46
2.3. Integración de tecnologías para el prototipo del sistema de monitoreo.....	51
Capítulo 3.....	55
Capítulo 3. Resultados y Análisis de las pruebas realizadas con el prototipo	55
3.1. Escenario de pruebas 1 – Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá	55
3.1.1. Pruebas Starlink vs VSAT - Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá..	62
3.1.2. Pruebas de consumo de energía eléctrica del prototipo - Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá	67
3.2. Pruebas en el Parque Nacional Natural Amacayacu (PNNA)	68
3.2.1. Escenario de Pruebas 2 en la Cabaña PNNA – Río Amacayacu - diciembre de 2022	69
3.2.2. Escenario de pruebas 3 en la Cabaña del PNNA – Río Matamatá -mayo de 2023	75
3.2.2.1. Pruebas Starlink - Escenario de pruebas 3 en la Cabaña del PNNA – Río Matamatá -mayo de 2023.....	81
Conclusiones	85
Trabajo Futuro	87
A. Anexo: Análisis de la demanda energética y las condiciones de la ubicación geográfica para el diseño del SFV.....	88
B. Anexo: Paper "Radar based monitoring system to protect the Colombian Amazon Rainforest", IEEE IHTC 2023	92
Bibliografía.....	93

Lista de figuras

<i>Figura 1. Metodología de Revisión de Diseño Preliminar (PDR) propuesta para la ejecución del proyecto.</i>	8
<i>Figura 2. Ubicación del PNNRP dentro del territorio colombiano [22].</i>	9
<i>Figura 3. Hitos contexto histórico y cultural de los PIA y el PNNRP.</i>	11
<i>Figura 4. Diagrama de bloques sistema de monitoreo propuesto para detección de amenazas o perturbaciones en el PNNRP.</i>	13
<i>Figura 5. Arquitectura básica prototipo de sistema de monitoreo remoto en el PNNRP.</i>	24
<i>Figura 6. Comparación sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, HikVision DSPRP100, Axis D2110-VE.</i>	28
<i>Figura 7. Comparación sistemas de sonar Norbit GuardPoint 400, Kongsberg Maritime M3, Teledyne Marine M900.</i>	30
<i>Figura 8. Comparación sistemas de sensor acústico tipo hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103 y RESON TC4013.</i>	33
<i>Figura 9. Comparación sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, Sonar Norbit GuardPoint 400 e Hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103.</i>	36
<i>Figura 10. Diagrama comparación características sistemas de comunicación satelital VSAT; BGAN y Starlink.</i>	40
<i>Figura 11. Diagrama comparación características de las tecnologías de los sistemas de alimentación autónomo solar, eólico e hidráulico.</i>	44
<i>Figura 12. Diagrama de bloques arquitectura final prototipo de monitoreo remoto para la protección de territorios de PIA en el PNNRP.</i>	45
<i>Figura 13. Arquitectura SFV.</i>	51
<i>Figura 14. Diagrama esquemático general del prototipo de monitoreo remoto para la protección de territorios de PIA en el PNNRP.</i>	52
<i>Figura 15. Prototipo de prueba Escenario de pruebas 1 – Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá.</i>	53
<i>Figura 16. Prototipo de prueba Escenario de Pruebas 2 en la Cabaña PNNA – Río Amacayacu - diciembre de 2022.</i>	53
<i>Figura 17. Prototipo de prueba Escenario de pruebas 3 en la Cabaña del PNNA – Río Matamatá -mayo de 2023.</i>	54
<i>Figura 18. Escenario de pruebas 1 - Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá.</i>	56
<i>Figura 19. Montaje radar CK-5, cámara PTZ y NIO HUB, para el escenario de pruebas 1- Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá.</i>	57
<i>Figura 20. Interfaz gráfica sistema de radar CK-5 escenario de prueba 1 - Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá.</i>	58
<i>Figura 21. Porcentaje de clasificación de objetivos escenario de pruebas 1.</i>	59
<i>Figura 22. Promedio de duración y desplazamiento por tipos de objetivos escenario de pruebas 1.</i>	60
<i>Figura 23. Promedio de velocidades, velocidades máximas y mínimas por objetivos en el escenario de pruebas 1.</i>	61

<i>Figura 24. Ejemplo fotografías de seguimiento Track ID:5690 mediante email usando el protocolo SMTP escenario de pruebas 1.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 25. Comparación antenas Starlink vs VSAT.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 26. Velocidad de descarga, velocidad de subida y latencia del sistema VSAT.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 27. Velocidad de descarga, velocidad de subida y latencia del sistema Starlink. ..</i>	<i>65</i>
<i>Figura 28. Interfaz de latencia y uso del sistema Starlink.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 29. Test de velocidad de bajada y subida del sistema Starlink.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 30. Montaje para prueba de consumo de energía eléctrica prototipo con un SFV.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 31. Consumo de energía eléctrica en W del prototipo de monitoreo.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 32. Escenario de pruebas 2. Cabaña PNNA – Río Amacayacu.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 33. Montaje radar CK-5, cámara PTZ y NIO HUB, para el escenario de pruebas 2.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 34. Interfaz gráfica sistema de radar CK-5 escenario de prueba 2.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 35. Porcentaje de clasificación de objetivos Pruebas escenario 2.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 36. Promedio de duración y desplazamiento por tipos de objetivos escenario de pruebas 2.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 37. Promedio de velocidades, velocidades máximas y mínimas por objetivos en el escenario de pruebas 2.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 38. Escenario de pruebas 3. Cabaña PNNA – Río Matamatá.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 39. Montaje radar CK-5, cámara PTZ y NIO HUB, para el escenario de pruebas 3.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 40. Interfaz gráfica sistema de radar CK-5 escenario de prueba 3.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 41. Porcentaje de clasificación de objetivos Pruebas escenario 3.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 42. Promedio de duración y desplazamiento por tipos de objetivos escenario de pruebas 3.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 43. Promedio de velocidades, velocidades máximas y mínimas por objetivos en el escenario de pruebas 3.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 44. Ejemplo fotografías de seguimiento Track ID:727 mediante email usando el protocolo SMTP escenario de pruebas 3.</i>	<i>81</i>
<i>Figura 45. sistema Starlink ubicado en la cabaña del PNNA río Matamatá.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 46. Latencia (ms) Starlink Escenario 3.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 47. Velocidad subida (Mbps) Starlink escenario 3.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 48. Velocidad bajada (Mbps) Starlink Escenario 3.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 49. Demanda de potencia diaria del SFV.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 50. Comparación datos irradiancia solar (kWh/m2-dia) en las coordenadas geográficas del PNNRP, según las fuentes del IDEAM, NASA y METEONORM.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 51. irradiancia solar por mes de acuerdo con el atlas del IDEAM.....</i>	<i>91</i>

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Análisis de ventajas y desventajas de diferentes del uso de fuentes de energía renovables fotovoltaicos, eólica e hidráulica [54].</i>	21
<i>Tabla 2. Características Compact Surveillance Radar.</i>	26
<i>Tabla 3. Escala de evaluación de los sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, HikVision DSPRP100, Axis D2110-VE.</i>	27
<i>Tabla 4. Resultado de valoración de los sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, HikVision DSPRP100, Axis D2110-VE.</i>	27
<i>Tabla 5. Características Compact Sonar.</i>	29
<i>Tabla 6. Escala de evaluación de los sistemas de sonar Norbit GuardPoint 400, Kongsberg Maritime M3, Teledyne Marine M900.</i>	29
<i>Tabla 7. Resultado de valoración de los sistemas de sonar Norbit GuardPoint 400, Kongsberg Maritime M3, Teledyne Marine M900.</i>	30
<i>Tabla 8. Características hidrófonos.</i>	32
<i>Tabla 9. Escala de evaluación de sistemas de sensor acústico tipo hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103 y RESON TC4013.</i>	32
<i>Tabla 10. Resultado de valoración de sistemas de sensor acústico tipo hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103 y RESON TC4013.</i>	33
<i>Tabla 11. Comparación entre los sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, Sonar Norbit GuardPoint 400 e Hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103.</i>	35
<i>Tabla 12. Escala de evaluación de los sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, Sonar Norbit GuardPoint 400 e Hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103.</i>	35
<i>Tabla 13. Resultado de valoración de los sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, Sonar Norbit GuardPoint 400 e Hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103.</i>	36
<i>Tabla 14. Características técnicas de las tecnologías de comunicación satelital tipo VSAT, BGAN y Starlink.</i>	38
<i>Tabla 15. Escala de evaluación de las tecnologías de comunicación satelital tipo VSAT, BGAN y Starlink.</i>	39
<i>Tabla 16. Resultado de valoración de las tecnologías de comunicación satelital tipo VSAT, BGAN y Starlink.</i>	39
<i>Tabla 17. Características técnicas de las tecnologías de los sistemas de alimentación autónomo solar, eólico e hidráulico.</i>	42
<i>Tabla 18. Escala de evaluación de las tecnologías de los sistemas de alimentación autónomo solar, eólico e hidráulico.</i>	43
<i>Tabla 19. Resultado de valoración de las tecnologías de los sistemas de alimentación autónomo solar, eólico e hidráulico.</i>	43
<i>Tabla 20. Características módulo TrinaSolar 580 W [57].</i>	47
<i>Tabla 21. Características SmartSolar MPPT 150/45-Tr Victron [58].</i>	48
<i>Tabla 22. Características Phoenix Inverter 48/375 120V VE.Direct NEMA 5-15R Victron Energy [59].</i>	49
<i>Tabla 23. Características Batería de Ion litio 48V 4,8Kwh(100Ah) 6000 ciclos Pylontech [60].</i>	50

<i>Tabla 24. Resultados test velocidad internet Starlink en el escenario 3.</i>	82
<i>Tabla 25. Estudio de las necesidades de carga y consumo en W por día para cada uno de los equipos.</i>	88
<i>Tabla 26. Estudio de las necesidades de carga y consumo AC en kW/h.</i>	89
<i>Tabla 27. Datos de irradiancia solar (kWh/m²-día) en las coordenadas geográficas del PNNRP.</i>	90
<i>Tabla 28. irradiancia solar por mes de acuerdo con el atlas del IDEAM.</i>	91

Lista de Abreviaturas

3G - tercera generación de tecnologías de transmisión de voz y datos a través de telefonía móvil.

ACNUDH - Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos.

ACT - Amazon Conservation Team.

AECID - Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo.

AI - Artificial Intelligence.

BGAN - Broadband Global Area Network.

BID - Banco Interamericano de Desarrollo.

CEPAL - Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

CIDH - Comisión Interamericana de Derechos Humanos.

CMUN - Grupo de Investigación en Electrónica de Alta Frecuencia y Telecomunicaciones.

COP - peso colombiano, moneda oficial de Colombia.

EMS - Energy Management System.

FMCW - Frequency Modulated Continuous Wave radar.

GSM - Global System for Mobile communications.

GPS - Global Positioning System.

IoT - Internet of Things.

IP - Internet Protocol.

LEO - Low Earth Orbit.

OEA - Organización de Estados Americanos.

ONU - Organización de las Naciones Unidas.

PDR - Preliminary Design Review.

PIA - Pueblos Indígenas en Aislamiento.

PNNA - Parque Nacional Natural Amacayacu.

PNNC - Parques Nacionales Naturales de Colombia.

PNNRP - Parque Nacional Natural Río Puré.

PoE - Power over Ethernet.

PTZ - Pan, Tilt, Zoom camera.

SFV - Sistema Fotovoltaico.

SMS - Short Message Service.

SMTP - Simple Mail Transfer Protocol.

VSAT - Very Small Aperture Terminal.

WASN - Wireless Acoustic Sensor Network.

WiFi - Wireless Fidelity.

UPME - Unidad de Planeación Minero Energética (Ministerio de Minas y Energía de la República de Colombia).

USD - dólar estadounidense, moneda oficial de Estados Unidos.

ZNI - Zonas No Interconectadas eléctricamente.

Lista de Símbolos

°C - grado Celsius o centígrado (unidad de medida de temperatura).
A - amperio (unidad de medida de intensidad de corriente eléctrica).
AC - Alternating Current.
Ah - amperio por hora (unidad de medida de carga eléctrica).
cm - centímetro (unidad de medida de longitud).
dB - decibel (unidad relativa empleada en acústica, electricidad, telecomunicaciones y otras especialidades para expresar la relación entre dos magnitudes).
dB re 1 μ Pa / $\sqrt{\text{Hz}}$ - decibel relativo a 1 micro Pascal sobre la raíz de la frecuencia en hercios (unidad dominante en acústica subacuática, usado para medir Sound pressure level (SPL)).
DC - Direct Current.
g - gramo (unidad de medida de masa).
GHz - gigahercio (múltiplo de la unidad de medida de frecuencia).
h - hora (unidad de medida de tiempo).
ha - hectárea (unidad de medida de superficie).
Hz - hercio (unidad de medida de frecuencia).
kbps - kilobit por segundo (unidad de medida que se usa para calcular la velocidad de transferencia de información a través de una red).
kg - kilogramo (unidad de medida de masa).
kHz - kilohercio (múltiplo de la unidad de medida de frecuencia).
km² - kilómetro cuadrado (unidad de medida de superficie).
km - kilómetro (unidad de medida de longitud).
km/h - kilómetro por hora (unidad de medida de velocidad).
kW - kilovatio (múltiplo de la unidad de medida de potencia eléctrica).
kWh - kilovatio por hora (unidad de medida de energía).
LiFePo₄ - batería de litio ferro fosfato.
m² - metro cuadrado (unidad de medida de superficie).
m - metro (unidad de medida de longitud).
Mbps - megabit por segundo (unidad de medida que se usa para calcular la velocidad de transferencia de información a través de una red).
mm - 1 milímetro de agua de lluvia equivale a 1 L (Litro) de agua por m².
MPPT - Maximum Power Point Tracking.
ms - milisegundo (múltiplo de la unidad de medida de tiempo).
MWh - Megavatio/hora (múltiplo de la unidad de medida de energía eléctrica).
pH - medida de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa.
s - Segundo (unidad de medida de tiempo).
V - voltio (unidad de medida de potencial eléctrico).
V / μ Pa - decibel relativo a 1 voltio por 1 pascal (medida logarítmica absoluta de la sensibilidad de los micrófonos).
VA - voltiamperio (unidad de la potencia aparente y de la potencia compleja).
VAC - Volts Alternating Current.

VDC - Volts Direct Current.

W - vatio (unidad de medida de potencia eléctrica).

Introducción

La selva amazónica es considerada Patrimonio de la Humanidad y comprende una vasta extensión de aproximadamente 7 millones de km² abarcando territorios en Brasil y Perú, así como partes de Guyana, Colombia, Ecuador, Bolivia, Surinam, Guayana Francesa y Venezuela. La cuenca del río Amazonas es el sistema de drenaje más grande del mundo y alberga más del 50 % de la selva tropical total en el planeta, lo que la convierte en una reserva de agua vital para la humanidad. En Colombia, la selva amazónica cubre el 36 % del territorio nacional representando el 10 % de la biodiversidad mundial [1].

La selva amazónica se caracteriza por su bioma de bosque tropical húmedo, caracterizado por su densa vegetación, terreno accidentado y un clima cálido y húmedo [2]. Además, es crucial para estabilizar el clima mundial al controlar el ciclo del carbono. Los científicos de la Universidad de Leeds han calculado que la Amazonia alberga el 20 % del carbono terrestre del planeta, por lo que su destrucción aumentaría el cambio climático [3]. La selva amazónica actúa como una esponja y un canal, absorbiendo las precipitaciones y devolviendo la humedad a la atmósfera durante la transpiración. La destrucción de la selva no solo reduce las precipitaciones locales, sino que también puede provocar sequías [4].

Por lo anterior, la protección de la Amazonia está relacionada con múltiples objetivos de desarrollo sostenible de la ONU, ya que su preservación es crucial para mitigar el cambio climático, preservar la vida marina y silvestre, promover la justicia ambiental y proteger los derechos de los pueblos indígenas. Algunos de estos objetivos incluyen:

- *Objetivo 13: Acción por el clima:* La Amazonia es un importante sumidero de carbono y su preservación es crucial para mitigar el cambio climático [5], [6], [7], [8].
- *Objetivo 14: Vida submarina:* La Amazonia está conectada a numerosos ríos y sistemas acuáticos, y su protección es importante para preservar la vida marina [5], [6], [9], [10].
- *Objetivo 15: Vida de ecosistemas terrestres:* La Amazonia es una de las regiones más biodiversas del mundo y su protección es importante para la preservación de la vida silvestre y la diversidad biológica [5], [6], [11], [12].
- *Objetivo 16: Paz, justicia e instituciones sólidas:* La protección de la Amazonia también está relacionada con la promoción de la justicia ambiental y la protección de los derechos de los pueblos indígenas que habitan en la región [5], [6], [13], [14].

Las zonas protegidas son cruciales para la conservación de la selva tropical y la Amazonia cuenta con varios parques nacionales, como el Parque Nacional Natural Río Puré (PNNRP) en Colombia, que tiene una extensión de aproximadamente 10.000 km² [15].

A pesar de los esfuerzos para proteger la selva amazónica, esta sigue siendo afectada por problemas como el narcotráfico, los conflictos armados, la explotación de fauna salvaje, la minería ilegal, la extracción selectiva de madera, la deforestación para la agricultura y la ganadería, y la explotación petrolífera. Además, debido a que los parques nacionales se

encuentran en zonas remotas alejadas de los centros urbanos, puede resultar difícil vigilarlos y protegerlos. Por lo tanto, se necesitan sistemas de monitorización remota eficaces para detectar y vigilar las amenazas a la selva amazónica en estas regiones protegidas [15].

El PNNRP es un área protegida de gran importancia ecológica y cultural en Colombia, hogar de diversas especies de fauna y flora, así como de comunidades indígenas que han habitado la región durante siglos. Entre estas comunidades se encuentran los pueblos indígenas en aislamiento (PIA), quienes se han mantenido apartados de la sociedad moderna y han conservado sus formas tradicionales de vida [15], [16], [17]. Sin embargo, estos pueblos enfrentan diversas amenazas, como la explotación de recursos naturales y la invasión de sus territorios por parte de terceros. Para proteger su integridad y preservar su cultura, es necesario implementar sistemas de monitoreo y vigilancia que permitan detectar y prevenir actividades ilegales dentro del parque.

Según las problemáticas identificadas en la región, es claro que el área del PNNRP es una zona sensible donde se puede atentar sin mayor dificultad contra la libre determinación de los PIA, donde, a pesar de la presencia de cabañas de control y vigilancia en el PNNRP, destinadas a la protección de la cuenca del río Puré, es evidente que estas carecen de personal suficiente y de recursos financieros adecuados. Esta insuficiencia de recursos compromete la efectividad de las medidas de seguridad, dado el vasto territorio que abarca el parque, aproximadamente un millón de hectáreas. Como resultado, se dificulta considerablemente la implementación efectiva de estrategias de prevención, vigilancia y control en todas las vías fluviales que acceden al área protegida. Esta situación se agrava aún más cuando se considera la violación de las rutas pertenecientes al territorio intangible de los pueblos en aislamiento, debido a las presiones ejercidas sobre el territorio [15], [18].

Dentro del marco del Plan de Manejo del PNNRP, se han priorizado estrategias destinadas al monitoreo de las presiones y amenazas que representan riesgos para los objetivos de conservación de este espacio protegido. Sin embargo, este monitoreo supone un desafío considerable tanto en términos humanos como financieros, dado que el parque se ubica en una de las regiones más remotas de Colombia y abarca casi un millón de hectáreas. Hasta la fecha, el monitoreo se ha llevado a cabo mediante tres enfoques principales [19]:

- i) Recorridos fluviales
- ii) Sobrevuelos
- iii) Imágenes de satélite

En los dos primeros métodos, se establecen previamente las cuencas y rutas de recorrido. Sin embargo, se enfrenta el problema del tamaño del parque, lo que limita la capacidad de los funcionarios para cubrir toda el área de manera efectiva. Además, el alto costo del combustible necesario para las lanchas y avionetas utilizadas en estos recorridos agrava esta limitación.

En el tercer enfoque, las imágenes de satélite se utilizan como complemento antes y/o después de los recorridos o sobrevuelos. Sin embargo, su utilidad se ve condicionada por el clima de la región y los plazos prolongados de hasta dos meses para obtener imágenes específicas de ciertas áreas. Esto significa que, en muchas ocasiones, cuando se detecta un problema, ya es demasiado tarde para tomar medidas preventivas.

Dada esta situación, es crucial para la gestión del área protegida y su estrategia de prevención, control y vigilancia, explorar alternativas innovadoras que refuercen el ejercicio de autoridad mediante la identificación de presiones o amenazas en áreas del parque donde el acceso frecuente de los funcionarios del PNNRP es dificultoso.

En este contexto, se propone el diseño e implementación de un prototipo de sistema de monitoreo remoto para la protección de los territorios de los pueblos indígenas en aislamiento en el Parque Nacional Natural Río Puré. Este sistema combinará tecnologías de detección y seguimiento de actividad humana con herramientas de comunicación y alerta para garantizar una respuesta rápida y efectiva ante cualquier amenaza. Con este proyecto se busca contribuir a la conservación de la biodiversidad y la cultura de la región, así como a la protección de los derechos de los pueblos indígenas en aislamiento.

El presente documento se encuentra organizado de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se presentan el marco contextual, teórico y los antecedentes de este trabajo, además se muestran las tecnologías que posteriormente son evaluadas para el diseño del prototipo de monitoreo. El Capítulo 2 presenta el diseño y evaluación preliminar de diferentes tecnologías existentes en el mercado, con el fin de seleccionar las más adecuadas para la implementación del prototipo. En el Capítulo 3, se presentan los resultados obtenidos y el análisis de funcionamiento del prototipo en cada uno de los escenarios de pruebas propuestos. Por último, se presentan las conclusiones obtenidas de este trabajo y los trabajos y desafíos futuros del mismo.

Objetivos

Objetivo General

Implementar un prototipo de un sistema de monitoreo para identificar la presencia de infractores que puedan vulnerar el territorio protegido de los pueblos indígenas en aislamiento ubicados en el Parque Nacional Natural Río Puré.

Objetivos Específicos

- 1) Determinar las tecnologías adecuadas para la implementación del prototipo para el sistema de monitoreo.
- 2) Integrar los subsistemas de sensado e identificación, comunicaciones y alimentación teniendo en cuenta las tecnologías seleccionadas de acuerdo con los requerimientos específicos del proyecto y las condiciones particulares de noroeste Amazónico.
- 3) Evaluar el funcionamiento y desempeño del prototipo propuesto en un entorno que permita recrear las condiciones del noroeste Amazónico.

Estructura del proyecto

En la *Figura 1* se muestra la Metodología de Revisión de Diseño Preliminar (PDR) que se utilizó en la ejecución de este proyecto. Esta metodología abarca la presentación de soluciones, así como sus respectivas ventajas e inconvenientes. La PDR es una revisión se lleva a cabo generalmente en la fase inicial de diseño conceptual y antes de entrar en la etapa de diseño detallado, allí, se evalúa y se discute el diseño preliminar del proyecto en detalle. Esto incluye la arquitectura general, los requisitos de rendimiento, la viabilidad técnica, los riesgos identificados y las estrategias de mitigación, así como la planificación general del proyecto.

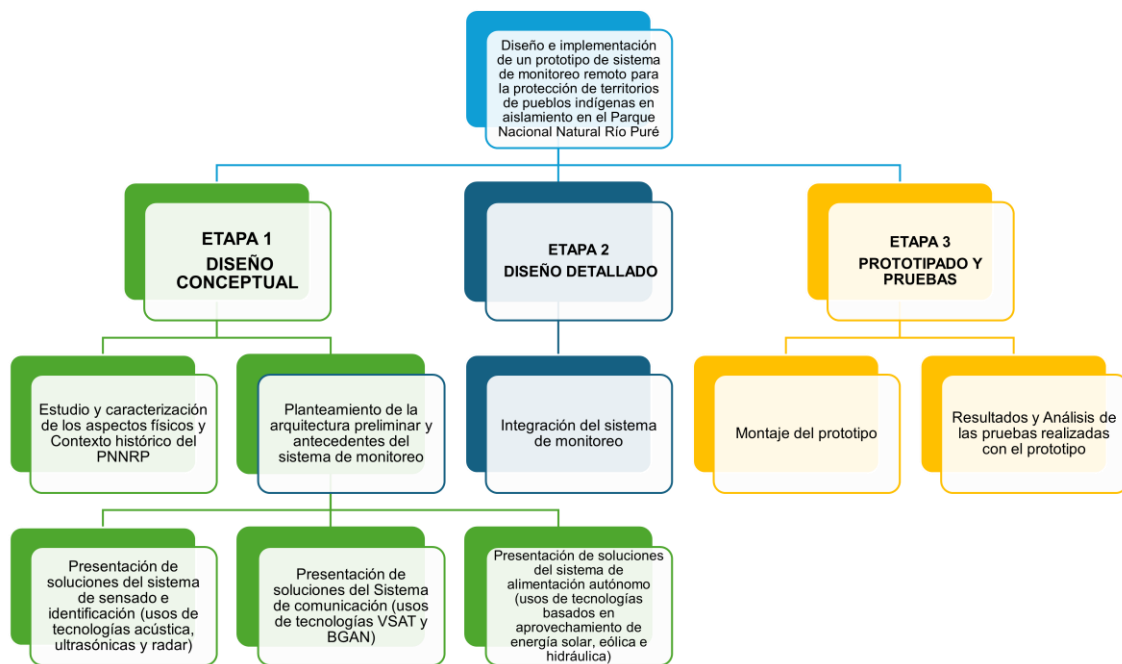


Figura 1. Metodología de Revisión de Diseño Preliminar (PDR) propuesta para la ejecución del proyecto.

Capítulo 1. Marco Teórico y antecedentes

1.1. Parque Nacional Natural Río Puré (PNNRP)

El PNNRP, se encuentra ubicado entre las coordenadas geográficas 1°30´ Sur – 2°45´ Sur de latitud y 71°40´ Oeste 69°30´ Oeste de longitud, tiene definida un área de 970643,22 ha en jurisdicción de los corregimientos de La Pedrera, Tarapacá y Puerto Arica. El Parque está situado en el interfluvio de los ríos Caquetá y Putumayo en el noroeste del departamento del Amazonas [20], [21]. En la *Figura 2*, se puede observar el PNNRP ubicado dentro del territorio colombiano.

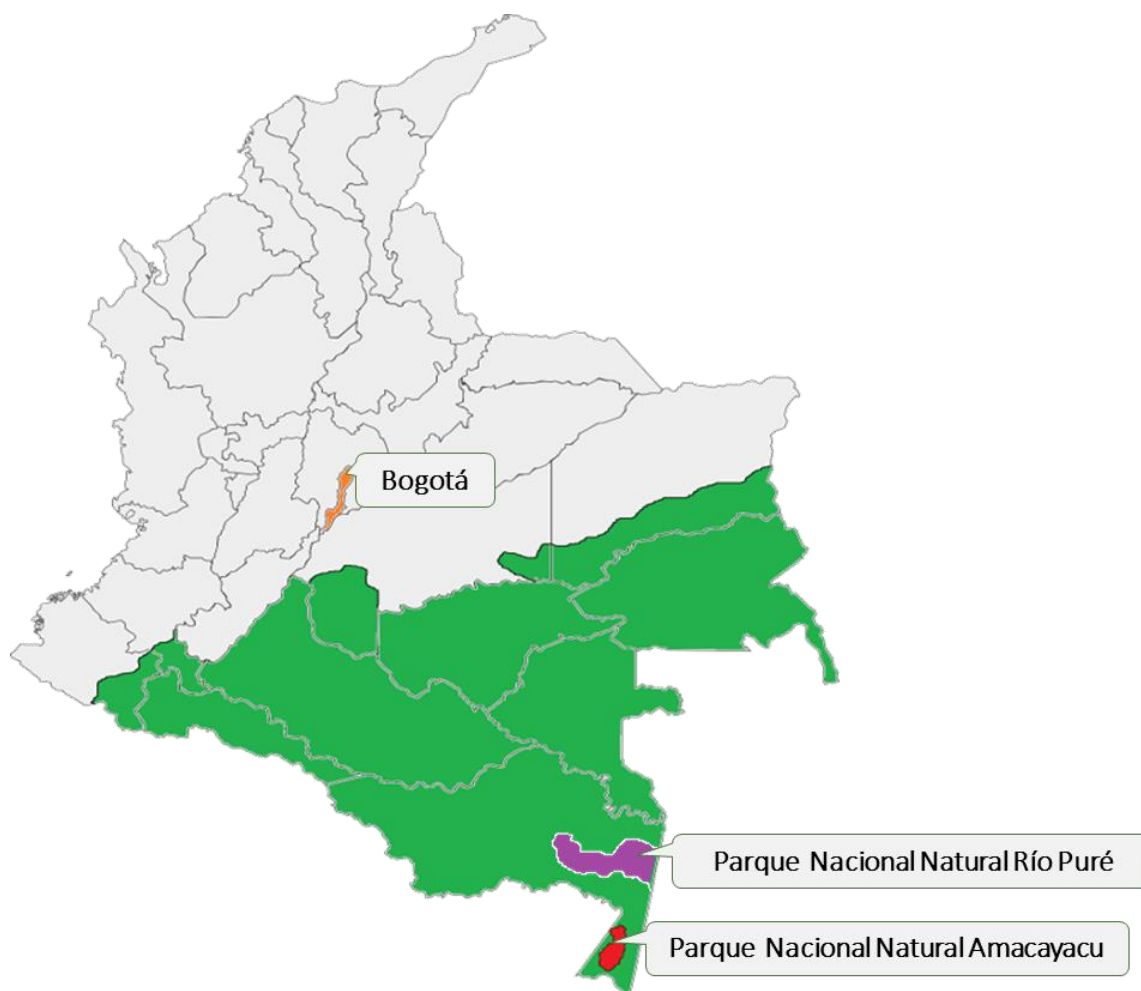


Figura 2. Ubicación del PNNRP dentro del territorio colombiano [22].

1.1.1. Aspectos físicos del PNNRP

El PNNRP, es un bosque tropical húmedo conformado por ríos, caños, quebradas, lagos y humedales, lo que lo hace una importante fuente de agua dulce. Durante la temporada invernal, una gran extensión de este bosque se ve inundada [19].

Las precipitaciones en el PNNRP oscilan anualmente entre los 3084 mm y 3438 mm con un promedio de 3148 mm. Los meses de mayor pluviosidad son marzo, abril y mayo, mientras que junio y agosto presentan menor actividad pluvial [19].

El clima que caracteriza este entorno es cálido, con temperaturas medias anuales que oscilan entre 25 °C y 26,5 °C. Las temperaturas mínimas se sitúan entre 20,6 °C y 22,3 °C, mientras que las máximas alcanzan valores de 29,1 °C y 30,8 °C. El mes de julio se destaca como el más frío, contrastando con un diciembre que emerge como el más caluroso [19].

La evapotranspiración potencial anual se estima en 1500 mm. Este entorno no padece déficit hídrico a lo largo del año y, en promedio, se registran entre 40 y 50 días de sequía anual. La radiación solar varía entre 1.600 y 1.820 horas al año, mientras que la humedad se mantiene en un rango de 86 % a 87 % [19].

1.1.2. Contexto histórico cultural del PNNRP

El PNNRP es considerado una zona de especial importancia por ser un ecosistema estratégico para la seguridad ecológica del país, pues dichos territorios albergan una gran riqueza de ambientes forestales que incluyen especies de fauna y flora únicas en conjunto con importantes recursos hídricos como ríos, cuencas y humedales [20]. Además, tiene un gran valor para el patrimonio cultural del país, debido a que en los territorios del PNNRP se ha identificado plenamente la existencia de Pueblos Indígenas en Aislamiento - PIA que, *“...son aquellos pueblos o segmentos de pueblos indígenas que, en ejercicio de su autodeterminación, se mantienen en aislamiento y evitan contacto permanente o regular con personas ajenas a su grupo, o con el resto de la sociedad mayoritaria [15], [20]”*.

El Ministerio del Interior cuenta con indicios relevantes acerca de la posible existencia de al menos quince pueblos en situación de aislamiento dentro del área protegida [23], y ha comprobado plenamente la existencia de las etnias Yuri y Arojes o Caraballo [15], [21]. A continuación, en la *Figura 3*, se presenta un resumen del contexto histórico y cultural de los PIA y el PNNRP.

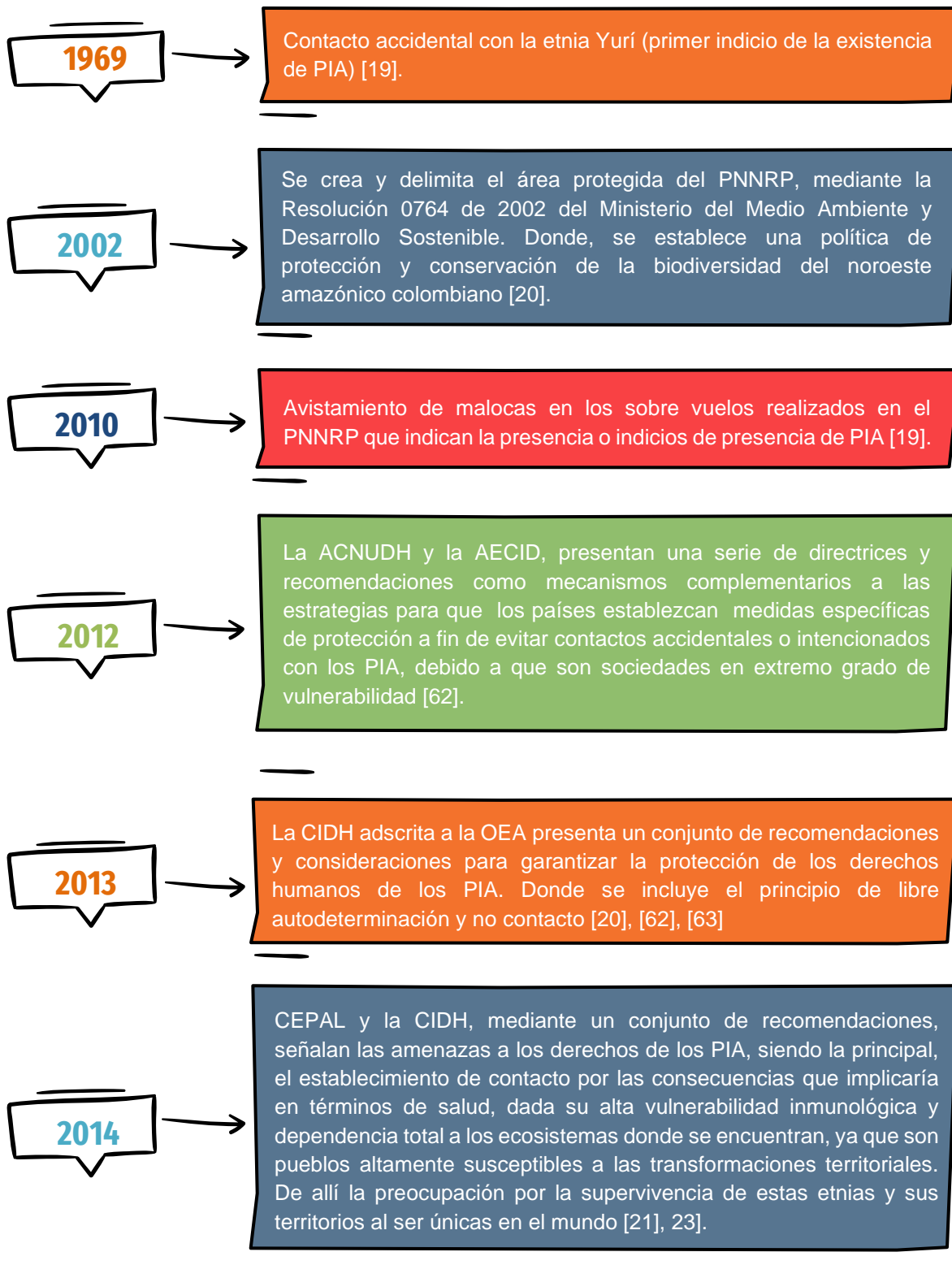


Figura 3. Hitos contexto histórico y cultural de los PIA y el PNNRP.

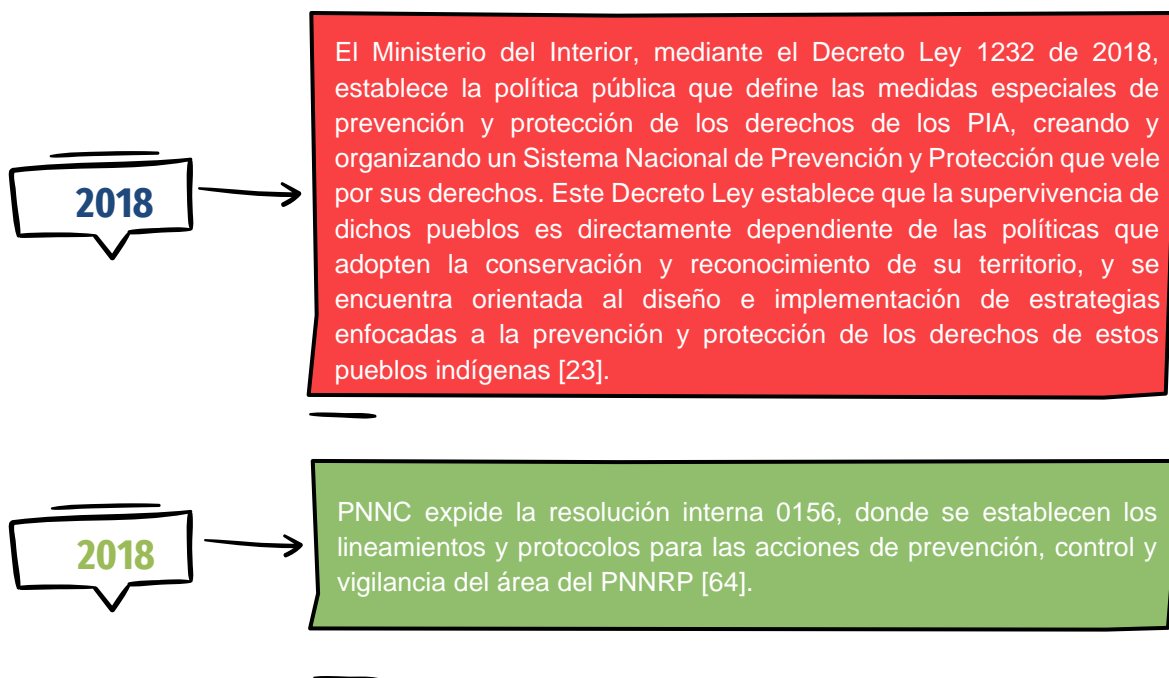


Figura 3. Hitos contexto histórico y cultural de los PIA y el PNNRP (Continuación).

El área protegida se convirtió en una zona sensible y vulnerable, por la aparición de presiones y amenazas como: narcotráfico, conflicto armado, tráfico de fauna y flora, sobreexplotación de recursos ícticos, minería ilegal, extracción selectiva de maderas, deforestación para agricultura y ganadería, exploración petrolera. Las anteriores problemáticas además de afectar el territorio ancestral protegido estarían atentando contra la libre determinación de los PIA [15], [24]. Pese a que existe un marco jurídico que proporciona a los entes nacionales y regionales las garantías normativas para salvaguardar estos territorios ancestrales, actualmente las estrategias de control y vigilancia adoptadas por los guardaparques consisten en: recorridos fluviales, sobrevuelos y toma de imágenes satelitales. Sin embargo, estas medidas no son suficientes para contrarrestar las amenazas y perturbaciones en el área protegida. Y es justamente allí donde nuevas herramientas tecnológicas aparecen para crear y desarrollar elementos que permitan la protección, monitoreo y vigilancia de dichos territorios remotos.

1.2. Arquitectura preliminar del sistema y antecedentes

De acuerdo con el contexto anteriormente planteado la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, bajo el liderazgo del grupo de investigación CMUN adscrito al Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, en

asociación con ACT¹ y PNNC, presentó una propuesta de trabajo, que posteriormente fue aprobada por medio de la Convocatoria nacional de extensión solidaria de la Universidad Nacional de Colombia 2018: Regiones y comunidades sostenibles. En esta convocatoria, en la modalidad de proyectos de extensión solidaria con enfoque en innovación social, se planteó desarrollar un prototipo para un proyecto piloto de un sistema de monitoreo remoto para la protección de territorios de PIA ubicados en el PNNRP. Es en el marco de este proyecto que se desarrolla este trabajo.

El prototipo se diseñó buscando brindar información a los miembros del PNNRP sobre la presencia de infractores en el área protegida que agredan los ecosistemas de la región y afecten la seguridad de los PIA, para que de esta manera las autoridades correspondientes puedan tomar las acciones correctivas necesarias.

El sistema de monitoreo remoto propuesto en este proyecto está basado en el diseño y desarrollo de tres subsistemas: 1) sistema de sensado e identificación, 2) sistema de comunicaciones y 3) sistema de alimentación autónoma, de acuerdo con la *Figura 4*.

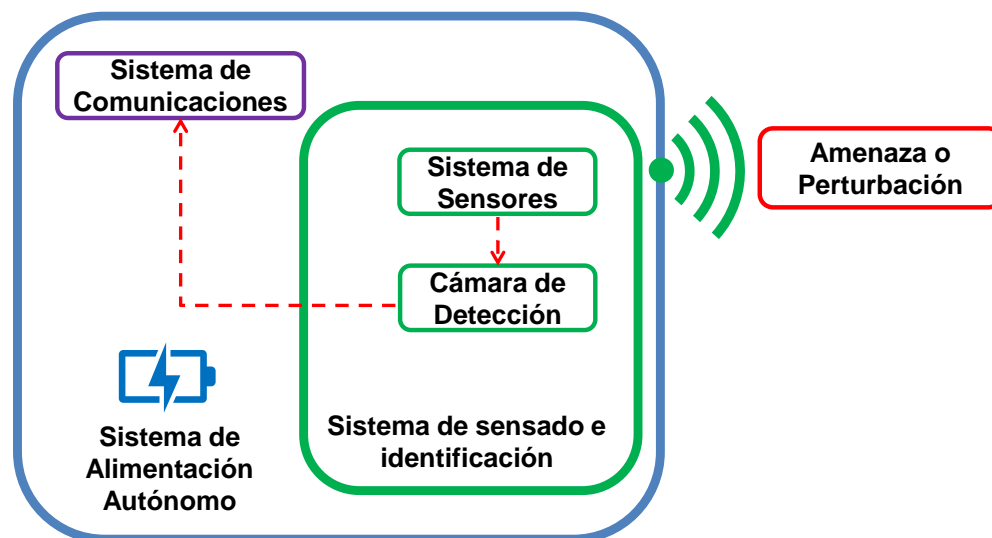


Figura 4. Diagrama de bloques sistema de monitoreo propuesto para detección de amenazas o perturbaciones en el PNNRP.

A continuación, se describen los principios básicos de funcionamiento de las tecnologías que pueden utilizarse en cada uno de ellos.

¹ Amazon Conservation Team es una organización sin ánimo de lucro, con más de 20 años de existencia cuya visión es la conservación de bosques tropicales y supervivencia de las comunidades indígenas en relación armónica con el territorio. Página Web: <https://www.amazonteam.org/colombia/>

1.2.1. Sistema de sensado e identificación

Este sistema tiene la responsabilidad de detectar y registrar amenazas y perturbaciones que puedan surgir en el territorio protegido. Se fundamentará en la utilización de sensores de tipo industrial y comercial, diseñados para ajustarse a las condiciones y requerimientos precisos de este proyecto en particular. Asimismo, se complementará con cámaras que posibilitarán la captura de imágenes o videos en caso de que se identifique alguna perturbación o amenaza en el área resguardada del PNNRP.

A continuación, se presenta una descripción general de los diferentes tipos de sensores y tecnologías que han sido utilizados para la detección y protección de territorios, de acuerdo con la revisión sistemática realizada.

1.2.1.1. Sensado con tecnología acústica

Los sensores acústicos convierten las ondas de sonido en señales eléctricas. Estos se utilizan en aplicaciones como grabación de sonido, comunicación, sonar y ultrasonido. Los dos tipos más comunes de sensores acústicos son los micrófonos y los hidrófonos. Los micrófonos se utilizan para detectar ondas de sonido en el aire, mientras que los hidrófonos se utilizan para detectar ondas de sonido en el agua. Su principio de funcionamiento se basa en la vibración de un diafragma. Cuando las ondas de sonido golpean el diafragma, este se mueve y crea una señal eléctrica. La señal eléctrica es entonces amplificada y enviada a un dispositivo de grabación o reproducción de sonido [25], [26], [27], [28].

A continuación, se presentan algunos ejemplos de uso de sensores acústicos para monitoreo:

En 2023, investigadores del Hindustan Institute of Technology and Science (India), presentaron la propuesta de un sistema de detección de caza furtiva y la tala ilegal basado en IoT para proteger los árboles y los bosques. El sistema utiliza sensores de inclinación, sensores acústicos y sensores de movimiento. Los datos de los sensores se transmiten a una plataforma de IoT, que analiza los datos para detectar posibles incidentes en el área protegida. Cuando se detecta un posible incidente, se envía una alerta a los guardabosques, quienes pueden tomar las medidas necesarias para detener la caza furtiva. Este sistema se implementó en un bosque en India y se evaluó durante un período de seis meses. Los resultados de la evaluación mostraron que el sistema tiene una precisión del 95 % en la detección de la actividad de caza furtiva [29].

A partir de 2018, Rainforest Connections, en colaboración con Huawei, diseñaron la plataforma Guardian, que utiliza datos de satélite, imágenes aéreas, inteligencia artificial y sensores acústicos alimentados por energía solar, con paneles fotovoltaicos de hasta 30 W, instalados en las copas de los árboles, para identificar amenazas potenciales a las selvas tropicales, como la tala ilegal, minería y deforestación. Los sensores están basados

en el uso de sensores externos, con una sensibilidad de -22 dB, en el rango de frecuencias entre 50 Hz a 18000 Hz y cuyo alcance está en el rango de 50 m a 1500 m. Los sonidos captados son enviados mediante red GSM, WiFi o satelitalmente [30], [31].

El proyecto Providence iniciado desde 2018 es una iniciativa del Instituto Mamirauá (Brasil), The Sense of Silence Foundation y el Laboratorio de Aplicaciones Bioacústicas de la Universidad Politécnica de Cataluña (España), que utiliza tecnología acústica para monitorear la selva amazónica y detectar actividades ilegales, como la caza furtiva y la deforestación. El proyecto utiliza una red de sensores acústicos para capturar datos sobre los sonidos de la selva, incluidos los sonidos de los animales, los humanos y las máquinas (como motosierras, embarcaciones entre otros). La distancia y la cobertura de la red de sensores acústicos utilizados en el Proyecto Providence varían según la ubicación de los sensores y las condiciones ambientales. En general, los sensores pueden detectar sonidos hasta una distancia de 10 km. La cobertura de la red puede variar entre 100 km² y 1.000 km² [32]. Estos módulos en tiempo real capturan, identifican y transmiten audio por WiFi, 3G o satelitalmente. Allí, mediante un software de análisis de datos se filtran e identifican patrones en los sonidos que puedan indicar actividades ilegales [33], [34].

1.2.1.2. Sensado con tecnología ultrasónica

Los sensores de ultrasonido utilizan ondas sonoras para medir la distancia, la velocidad o la posición de un objeto y son utilizados en una variedad de aplicaciones como automatización industrial, robótica, seguridad y medicina. El sensor emite una onda ultrasónica, que es una onda sonora en frecuencias generalmente de 40 kHz, 80 kHz y 160 kHz. La onda ultrasónica viaja a través del aire y se refleja en el objeto. El sensor mide el tiempo que tarda la onda ultrasónica en viajar al objeto y regresar. Al conocer la velocidad del sonido en el aire, el sensor puede calcular la distancia al objeto [35], [36].

Como ventaja, es importante mencionar que los sensores ultrasónicos son capaces de detectar la mayoría de los objetos que tienen suficiente reflectividad acústica, por esta razón estos sensores son empleados con gran éxito sobre otros tipos de sensores para detectar objetos a cierta distancia que son transparentes a la radiación electromagnética [28], [35], [36].

A continuación, se presentan algunos ejemplos de uso de sensores ultrasónicos para monitoreo:

En 2019, investigadores del PDEA's College of Engineering Manjari (India), presentan un sistema de alarma para detección de tala ilegal de árboles en el bosque. El sistema utiliza sensores ultrasónicos HC-SR04, con rango de detección de máximo 45 cm, estos permiten detectar el corte o daño a los árboles. Junto a estos sensores se implementó un sensor de

pH y un sensor de gas. Cuando el sistema detecta una actividad, envía una alerta a los guardabosques o a las autoridades locales [37].

En 2018, investigadores del D.J. Sanghvi College of Engineering (India), presentaron un sistema de monitoreo forestal de tres módulos: un módulo de sensor, compuesto por una cámara térmica, sensor de temperatura y humedad, sensor de infrarrojo, sensor ultrasónico, sensor de gas y un sensor de humedad de suelo. El módulo de comunicación inalámbrica, con un módulo para conexión WiFi y un módulo de procesamiento de imagen. El sensor de ultrasonido se usa para medir la posición aproximada de animales en el bosque, el sensor usado tiene un alcance de hasta 45 cm. El sistema monitorea las condiciones de la fauna y recopila datos como temperatura, humedad, entrada y salida de animales y humanos en el bosque [38].

1.2.1.3. Sensado con tecnología radar

La tecnología RADAR, del inglés Radio Detection and Ranging, usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos o móviles. Su funcionamiento está basado en un dispositivo capaz de enviar ondas de radio, con la intención de que cuando estas se encuentren con un obstáculo u objetivo se reflejen hacia un detector cercano al emisor, donde se pueden procesar para determinar las características y propiedades del objeto detectado [39], [40].

Un sistema radar puede operar en diferentes frecuencias, y dependiendo de dichas frecuencias las características de propagación en el medio pueden variar, por ejemplo, en entornos con alta humedad y materiales muy densos [28], [39], [40].

A continuación, se presentan ejemplos de sistemas de radar usados en aplicaciones de monitoreo:

En 2023, PSG Institute of Technology and Applied Research (India), Qualcomm India Pvt. Ltd y Delta Electronics Pvt Ltd, presentaron un sistema de radar basado en espectrogramas para la detección y clasificación de objetivos en movimiento y determinar si se trata de una persona o un animal. Sus aplicaciones potenciales abarcan desde la tarea de detectar y prevenir la caza furtiva en áreas protegidas hasta diversas aplicaciones de vigilancia y seguridad. El sistema utiliza un radar de efecto Doppler de corto alcance (entre 1 m y 25 m) [41], para generar un espectrograma de los objetivos en movimiento [42].

Desde 2016, Parques Nacionales de Sudáfrica (SANParks), Peace Parks Foundation y el Consejo de Investigación Científica e Industrial de Sudáfrica (CSIR), presentaron la iniciativa de vigilancia Postcode Meerkat. Esta iniciativa tiene como objetivo la protección de rinocerontes de la caza furtiva. Este proyecto se implementó en el Parque Nacional Kruger ubicado en Sudáfrica. El sistema está conformado por un sistema de radares FMCW, con las siguientes características: peso 60 kg, alcance 20 km, resolución 1 m,

potencia de salida 1 kW, frecuencia de funcionamiento banda X (8,2 GHz – 12,4 GHz) [43]. El sistema se complementa con sensores ópticos que permiten clasificar entre humanos y animales, el sistema también posee una doble cámara que ofrece la capacidad de realizar vigilancia diurna y nocturna. Cuando se detecta una intrusión en el territorio una aplicación genera la alerta temprana permitiendo una rápida respuesta por parte de las autoridades del parque [43], [44], [45], [46].

1.2.2. Sistema de comunicación

El Sistema de Comunicación tiene la responsabilidad de transmitir los datos relacionados con cualquier perturbación o amenaza detectada. Cuando el sistema de detección identifica una perturbación o amenaza, este sistema se encarga de enviar de manera oportuna y eficiente los datos correspondientes a los responsables del Parque.

1.2.2.1. Comunicaciones satelitales

En este tipo de comunicaciones se utilizan satélites en órbita alrededor de la Tierra para transmitir información entre dos o más puntos. Los satélites se utilizan para transmitir voz, datos, televisión e imágenes. La comunicación satelital tiene diversas aplicaciones, entre las que se destacan: telecomunicaciones, navegación (GPS), monitoreo climático, aplicaciones militares y de seguridad [47].

La principal ventaja de este tipo de comunicación es la cobertura global y acceso a áreas remotas, ya que un enlace satelital puede proporcionar cobertura en regiones apartadas como montañas, desiertos, selvas y regiones polares. Sin embargo, la comunicación satelital no está exenta de desventajas. Una de las principales desventajas es el retardo de señal denominado latencia. Debido a las grandes distancias entre la Tierra y los satélites en órbita, existe un retardo perceptible en las comunicaciones. Esto puede ser problemático para aplicaciones que requieren comunicación en tiempo real [47].

A continuación, se presentan algunas tecnologías utilizadas comúnmente para establecer enlaces de comunicaciones satelitales.

1.2.2.1.1. Tecnología VSAT

VSAT (por sus siglas en inglés Very Small Aperture Terminal), para realizar el enlace satelital utiliza una antena generalmente parabólica capaz de recibir y transmitir datos. Estos sistemas constan de pequeños terminales que se pueden instalar en sitios dispersos y conectarse a un Hub central gracias a un satélite; además se destaca que el tamaño de

sus platos puede variar de 0,75 m hasta 3,8 m, dependiendo de su frecuencia de operación, que suele ser en las bandas C (3 A 7 GHz) y Ku (10 A 18 GHz) [47].

1.2.2.1.2. Tecnología BGAN

La Red Global de Banda Ancha BGAN (por sus siglas en inglés Broadband Global Area Network) cuenta con una red de satélites dedicados para operación en condiciones difíciles, con dispositivos portátiles y compactos que permiten la comunicación desde estas zonas no interconectadas. BGAN, es un servicio de conectividad de banda ancha y voz portátil a nivel global.

A esta red se tiene acceso a través de una gama de terminales ligeros, compactos y portátiles, la red BGAN proporciona una velocidad de datos confiable de 3G con datos básicos IP (Internet Protocol), para uso regular de datos y streaming IP (transmisión de videos en vivo), característica de voz muy clara y SMS (Short Message Service), con una confiabilidad hasta del 99,9 % [48]. El BGAN HDR (High Data Rate) ofrece transmisión simétrica y asimétrica de datos con canal de tráfico de velocidades promedio de 600 kbps hasta 800 kbps [49].

Los terminales BGAN son de rápida y fácil instalación, la conexión de banda ancha se establece en pocos minutos. Estos terminales están caracterizados por un consumo en potencia alrededor de 65 W. En caso de requerirse, también están dotados de un sistema de baterías, cuya recarga puede hacerse mediante el uso de celdas fotovoltaicas [49], [50], [51].

1.2.2.1.3. Starlink

Starlink es una tecnología de SpaceX que tiene como objetivo proporcionar acceso a internet de alta velocidad y baja latencia a través de una constelación de satélites en órbita terrestre baja (LEO). Según el sitio web oficial de Starlink, cada satélite pesa unos 260 kg y tiene un panel solar desplegable que le proporciona energía. Los satélites se comunican entre sí mediante enlaces láser ópticos y con las estaciones terrestres mediante antenas de banda Ku y Ka. Los usuarios finales se conectan a los satélites mediante una antena parabólica plana que se autoorienta hacia el satélite más cercano. La antena tiene un diámetro de 51,3 cm y se conecta a un router WiFi mediante un cable de 15,2 m. El router WiFi tiene unas dimensiones de 18 cm x 25,4 cm x 6,5 cm y ofrece una velocidad de datos de hasta 150 Mbps. Starlink pretende ofrecer una cobertura global de internet con una latencia de entre 20 ms y 40 ms (milisegundos) [52].

Algunas de sus características técnicas son:

- Está compuesto por aproximadamente 4000 satélites que orbitan la Tierra a una altitud de unos 550 km, mucho más baja que los satélites tradicionales de comunicaciones [52].
- Cada satélite pesa unos 260 kg y tiene un tamaño aproximado de 2,8 m x 1,4 m x 0,3 m. Están equipados con cuatro antenas de banda Ku y una antena de banda Ka, así como con propulsores de kriptón para mantener su posición y evitar colisiones [52].
- Los satélites se comunican entre sí mediante enlaces láser ópticos que permiten transferir datos a alta velocidad y reducir la latencia. También se comunican con las estaciones terrestres que conectan el sistema con la red global de internet [52].
- Para acceder al servicio de Starlink, los usuarios necesitan una antena parabólica especial llamada "Dishy McFlatface" que se autoorienta hacia el satélite más cercano. La antena tiene un diámetro de unos 50 cm y se conecta a un router WiFi que proporciona la conexión inalámbrica [52].
- El servicio de Starlink está pensado para zonas rurales o remotas donde no hay otras opciones de internet de calidad. También puede ser útil para aplicaciones que requieren una baja latencia, como los juegos en línea o la telemedicina [52].

1.2.3. Sistema de alimentación autónomo

Este sistema proporcionará la fuente de alimentación a los demás módulos que componen el prototipo, su principal característica debe ser la autonomía y eficiencia.

El PNNRP se ubica en la amazonia colombiana y su territorio hace parte de las denominadas Zonas No Interconectadas (ZNI), al no estar conectadas al sistema de interconexión eléctrico nacional colombiano, dichas zonas demandan para su abastecimiento de energía eléctrica alternativas de generación locales y por tratarse de una zona protegida no es posible ejecutar grandes obras de infraestructura que afectarían el medio ambiente [53].

Las fuentes de energía renovables o no convencionales son todas aquellas fuentes de generación energéticas que no incurrir en el consumo o agotamiento de su fuente, generalmente son llamadas, energías limpias; porque son aquellas procedentes de recursos limpios e inagotables y son capaces de regenerarse de manera natural [54]. La UPME y el BID presentan un marco referencial donde se evalúan las posibilidades y las condiciones propicias para la implementación de fuentes no convencionales de energía renovables en el contexto colombiano [53], a continuación, se presentan algunas opciones exploradas:

1.2.3.1. Energía solar

Utiliza la energía radiante procedente del Sol y que llega a la superficie de la Tierra en forma de radiación infrarroja, luz visible y ultravioleta [54]. A continuación, se presentan las principales características de los sistemas fotovoltaicos:

1.2.3.1.1. Sistema Fotovoltaico

Estos sistemas transforman la energía solar en energía eléctrica, aprovechando el efecto fotovoltaico, en las denominadas células solares o fotovoltaicas. Estas celdas son fabricadas con materiales semiconductores cristalinos, utilizando el efecto fotovoltaico son capaces de generar una corriente eléctrica cuando sobre ellas incide la radiación solar. La mayoría de estas células fotovoltaicas alrededor del mundo se encuentran construidas a base de silicio, el material semiconductor por excelencia y de amplio uso en la industria electrónica [54].

La corriente eléctrica generada a partir de la energía solar fotovoltaica tiene actualmente distintas aplicaciones, tales como proporcionar energía eléctrica a zonas aisladas con deficiencias en el abastecimiento eléctrico convencional, realizar inyección de energía eléctrica en las redes eléctricas, suministro de energía a satélites artificiales, alimentación de automóviles entre muchas otras [54].

Generalmente, un sistema fotovoltaico se encuentra compuesto de las siguientes partes [54]:

- *Paneles solares*: son los encargados de convertir la luz solar en electricidad.
- *Inversor*: es el encargado de convertir la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en AC, que es la corriente que utilizan los electrodomésticos.
- *Baterías*: son utilizadas para el almacenamiento de energía eléctrica del sistema fotovoltaico.
- *Regulador de carga*: es el encargado de controlar la carga de las baterías.
- *Disyuntor*: es el encargado de proteger el sistema fotovoltaico de sobrecargas eléctricas.

1.2.3.2. Energía eólica

La energía eólica es la energía cinética de una masa de aire en movimiento, dicha energía cinética se origina por la existencia sobre la Tierra de masas de aire que se hallan a diferentes temperaturas, a su vez los cambios de temperatura son provocados por las variaciones en las intensidades de radiación solar, a nivel global o local, las cuales

producen corrientes ascendentes y descendentes, formando anillos de circulación del aire [54].

Para el aprovechamiento de esta fuente energética se utiliza tecnología de conversión directa en energía mecánica a través del giro del eje de una turbina eólica con una cierta potencia. La energía mecánica se transforma posteriormente en energía potencial (bombeo) o energía eléctrica (por accionamiento de un generador eléctrico acoplado al eje de la turbina) [54].

1.2.3.3. Energía hidráulica

La energía hidráulica es la energía cinética del movimiento de masas de agua y la energía potencial del agua disponible a una cierta altura, esta se obtiene a partir de cualquier masa de agua que se encuentre en movimiento, por ejemplo: la corriente de un río, donde la energía potencial del agua se transforma en energía cinética y ésta a su vez en energía mecánica, mediante el uso de tecnologías de turbinas hidráulicas. El empleo de la energía captada es, casi exclusivamente, para la producción de electricidad [54].

A continuación, en la *Tabla 1*, se presenta un análisis de ventajas y desventajas del uso de dichas tecnologías.

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Energía solar (sistema fotovoltaico)	No tiene partes móviles. Fácil instalación. Requiere menos operación y mantenimiento. Generalmente los equipos tienen una vida útil entre 15 y 25 años.	Los paneles solares con mayor eficiencia convierten en electricidad de media un 22 % de la energía solar. Los sistemas fotovoltaicos requieren de baterías para aprovechar la energía excedente en horas nocturnas.
Energía eólica	Este tipo de energía está disponible a cualquier hora del día, por lo que el uso de baterías es opcional. Mayor generación con un menos factor de planta.	Los aerogeneradores poseen piezas móviles (rotor), por lo que su mantenimiento debe ser con mayor frecuencia. Equipos son más costosos. El giro del rotor emite ruido.
Energía hidráulica	Producción de energía eléctrica estable.	Requiere inversión mayor con respecto a la solar y la eólica, ya que demanda mayor infraestructura. Requiere mayores estudios ya que tiene un impacto medioambiental.

Tabla 1. Análisis de ventajas y desventajas de diferentes del uso de fuentes de energía renovables fotovoltaicos, eólica e hidráulica [54].

Capítulo 2. Diseño detallado e integración del sistema de monitoreo

El diseño preliminar de este prototipo se debe adaptar a las condiciones climáticas propias del noroeste amazónico. Debido a la naturaleza propia del proyecto, el prototipo deberá probarse en la proximidad de los ríos amazónicos por lo cual, este debe ser robusto, económico, tener autonomía energética, debe ser difícil de identificar por parte de los infractores, confiable, adaptable y resistente a las condiciones de la Amazonia.

Teniendo en mente lo anterior el diseño de este prototipo de sistema de monitoreo se realizó considerando las siguientes propiedades:



Eficiencia Energética

Debido a la inexistencia la red eléctrica comercial cercana y por las condiciones propias del territorio ya mencionadas, el prototipo deberá poseer un sistema que se adapte a las necesidades de eficiencia energética, por lo que se buscará implementar una solución de bajo consumo de intensidad de corriente eléctrica que sea suplida de forma autónoma.



Facilidad de manipulación

Se busca diseñar un prototipo piloto que sea de fácil manipulación, manejo e instalación, escalable. los consumidores finales serán los guardabosques de PNNC y los especialistas de ACT que estarán encargados de la operación de dicho prototipo.



Durabilidad

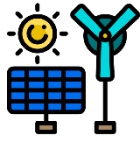
Con anterioridad se mencionaron las características propias del ecosistema del noroeste amazónico, resulta evidente este prototipo debe ser funcional durante el mayor tiempo posible, por lo tanto, los materiales usados para el diseño de este deben ser robustos para que proporcionen la calidad suficiente para una larga vida útil del dispositivo.



Camuflaje

El prototipo debe cumplir con requisitos específicos de camuflaje, con la finalidad de que no se afecten o alteren los ecosistemas de fauna y flora propios existentes en la Amazonia colombiana y buscando que no sea fácilmente identificable por los infractores.

Teniendo presentes las características mencionadas y las tecnologías estudiadas en el capítulo anterior, se diseñó un prototipo de sistema de monitoreo compuesto de tres módulos:



Módulo de alimentación autónomo

Sistema que proporcionará la fuente de alimentación a todo el prototipo, cuya principal característica debe ser la autonomía.



Módulo de sensado e identificación

Este sistema será el encargado la detección remota. También estará encargado de las cámaras que permitan la captura de imágenes o video.



Módulo de comunicación

Sistema encargado de la comunicación, en la cual se enviarán las fotos o videos correspondientes cuando se presente un evento.

De acuerdo con todos los aspectos anteriormente mencionados, el diagrama de bloques del sistema a desarrollar se ilustra en la *Figura 5*.

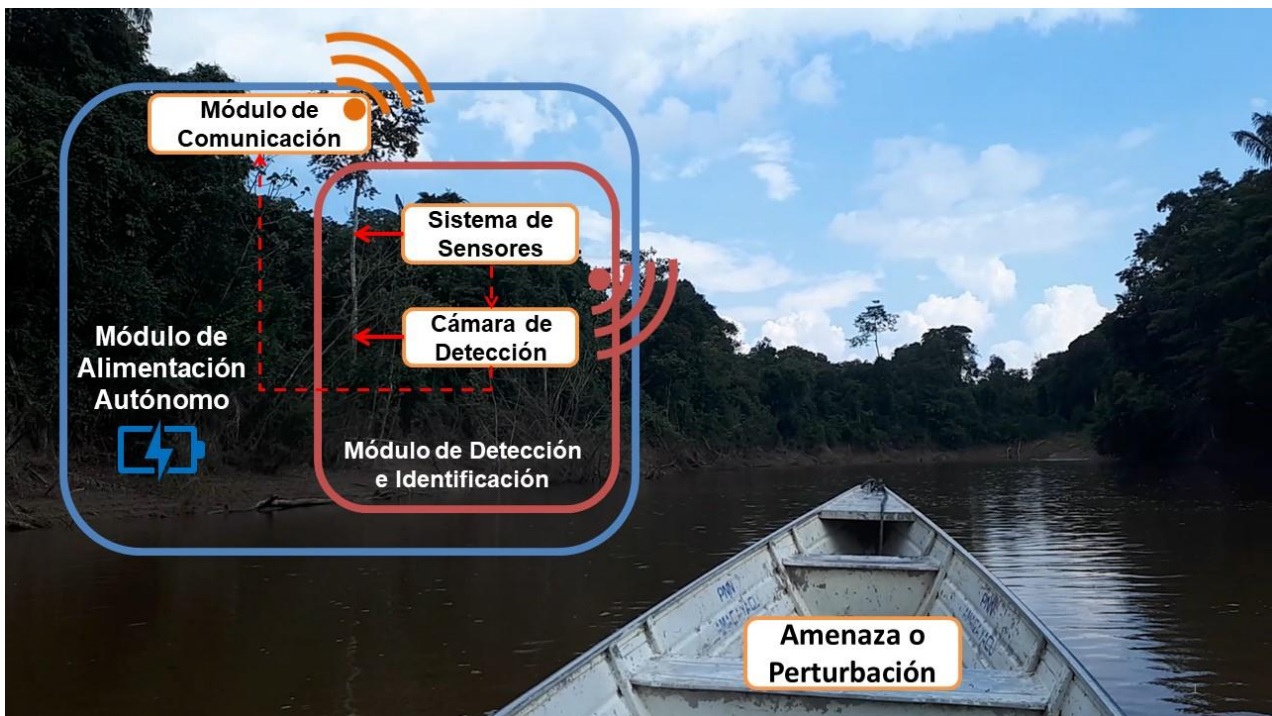


Figura 5. Arquitectura básica prototipo de sistema de monitoreo remoto en el PNNRP.

2.1. Selección de las tecnologías a emplear para cada uno de los módulos del prototipo

En este apartado se presenta la selección de las tecnologías que se determinaron para cada uno de los sistemas (sistema de sensado e identificación, sistema de comunicaciones y sistema de alimentación autónoma).

2.1.1. Sistema de sensado e identificación

A continuación, de acuerdo con la metodología PDR, se realizó una búsqueda de las soluciones comercialmente disponibles de cada una de las tecnologías lo que permitió realizar un estudio de mercado para evaluar cada una de ellas:

2.1.1.1. Tecnología radar

Para esta tecnología se enfocó la búsqueda en la tecnología Compact Surveillance Radar, debido a la naturaleza de la problemática, ya que estos sistemas de radar son compactos y livianos generalmente tienen un área de cobertura amplia (entre 50 m – 250 m), son capaces de hacer detección y tracking de múltiples objetivos en simultáneo, además de su bajo consumo de potencia (> 8 W hasta 15 W).

Durante esta etapa se encontraron y se presentan las siguientes soluciones como se observa en la *Tabla 2*.

Fabricante	SpotterRF	HikVision	Axis
Referencia	Radar CK5-CE	DS-PRP100	D2110-VE
Especificación	Característica	Característica	Característica
Rango de detección	Persona 5 m - 125 m Vehículo 5 m - 175 m	100 m	Persona 3 m - 60 m Vehículo 3 m - 85 m
Área de cobertura	100 m x 125 m	100 m	85 m
Campo de visión efectivo	Horizontal 100° Vertical 10°	Horizontal 6,2°	Horizontal 180°
Resolución	1 m	1,2 m	0,7 m
Precisión Angular	± 3°	-	± 1°
Rastros Simultáneos	10	32	
Frecuencia funcionamiento	24 GHz - 24,25 GHz	24,05 - 24,25 GHz	24,05 GHz - 24,25 GHz
Analíticas	Detección, tracking y clasificación de objetos	Detección, tracking y clasificación de objetos	Detección, tracking y clasificación de objetos

Fabricante	SpotterRF	HikVision	Axis
Referencia	Radar CK5-CE	DS-PRP100	D2110-VE
Temperatura Funcionamiento	-30 °C – 65 °C	-40 °C – 65 °C	-40 °C – 65 °C
Protección	IP67 ² / NEMA 6P	IP67 ² / NEMA 4X	IP66 ³ / NEMA 4X
Voltaje sistema	PoE 12 VDC – 30 VDC	PoE 12VDC	PoE 8 VDC – 28 VDC
Consumo sistema	7 W - 8.5 W	8 W	15 W
Interfaz	Ethernet	Ethernet	Ethernet
Dimensiones (Ancho x Alto x Profundidad)	22,86 x 17,526 x 4,318 (cm)	20,6 x 22,8 x 6,1 (cm)	28,5 x 20,6 x 15,2 (cm)
Color	Oliva	Blanco	Blanco
Peso	0,6 kg	1,74 kg	2,4 kg
Costo	\$8000 USD	\$6000 USD	\$4000 USD

Tabla 2. Características Compact Surveillance Radar.

A continuación, se realiza un análisis de valoración de los sistemas de radar presentados en la *Tabla 2*, donde, se realiza una evaluación de conformidad a los siguientes parámetros:

- **Cobertura:** Área máxima que puede cubrir el radar.
- **Rango de detección:** Distancia máxima a la que el radar puede detectar un objeto.
- **Costo:** Precio del radar.
- **Dimensiones/Peso:** Tamaño y peso del radar.
- **Consumo:** Cantidad de potencia que consume el radar.
- **Resolución:** Capacidad del radar para distinguir objetos pequeños.

La evaluación se realizó entre una escala de 0 a 5, donde 0 es el rendimiento más bajo y 5 rendimiento excelente, donde, se comparan cada los diferentes parámetros entre los sistemas de radar propuestos, como se presenta en la *Tabla 3*.

² IP67, donde el primer dígito 6, indica el nivel de protección contra ingreso de objetos sólidos, en este caso protección completa contra polvo y el segundo dígito indica el nivel de protección contra ingreso de agua, para este caso el nivel 7, indica protección ante inmersión completa en agua a 1 metro durante 30 minutos.

³ IP66, donde el primer dígito 6, indica el nivel de protección contra ingreso de objetos sólidos, en este caso protección completa contra polvo y el segundo dígito indica el nivel de protección contra ingreso de agua, para este caso el nivel 6, indica protección ante chorros de agua.

1	2	3	4	5
Bajo rendimiento	Rendimiento regular	Rendimiento bueno	Rendimiento muy bueno	Rendimiento excelente
El radar no cumple con los requisitos mínimos para la aplicación.	El radar cumple con los requisitos mínimos para la aplicación, pero podría ser mejor.	El radar cumple con los requisitos de la aplicación y ofrece un buen rendimiento.	El radar supera los requisitos de la aplicación y ofrece un rendimiento superior.	El radar ofrece el mejor rendimiento posible para la aplicación.

Tabla 3. Escala de evaluación de los sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, HikVision DSPRP100, Axis D2110-VE.

De conformidad a lo anterior se obtienen los resultados presentados en la *Tabla 4*.

Característica	SpotterRF CK5	Hikvision DS-PRP100	Axis D2110-VE
Rango de detección (m)	5	2,9	2,4
Cobertura (m)	5	5	5
Resolución (m)	4	2,5	5
Consumo del sistema (W)	4	4,8	3,5
Dimensiones/Peso	4,8	4,5	4
Costo	4	4,5	4,8
Resultado Valoración	26,8	24,2	24,7

Tabla 4. Resultado de valoración de los sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, HikVision DSPRP100, Axis D2110-VE.

En la *Figura 6*, se presenta el gráfico del análisis obtenido mediante el proceso de valoración propuesto.

De acuerdo con la información presentada en la *Figura 6*, el radar que ofrece las mejores características para la problemática propuesta con una calificación de 26,8 de 30 es el radar CK5-CE de la marca Spotter, debido a que tiene un rango de detección para personas entre 5 m y 125 m y para vehículos entre 5 m - 175 m, mientras que el DS-PRP100 que tiene un rango de detección de 100 m y el D2110-VE con un rango de máximo 85 m. Por lo tanto, el radar CK5 tiene un rango de detección significativamente mayor que el DS-PRP100 y el D2110-VE, lo que lo hace ideal para cubrir áreas más grandes. Además, sobresale por sus características de analítica, ya que cuenta con características de detección, tracking y clasificación de objetos, su frecuencia de funcionamiento entre 24 GHz y 24,25 GHz, tiene un consumo en potencia de 8 W, un índice de protección IP67.

Además, en cuanto a las características de construcción el dispositivo es de color verde oliva, es el que menor peso (0,6 kg) y dimensiones (22,86 cm x 17,526 cm x 4,318 cm), posee con respecto a los demás.

Sin embargo, es el de mayor costo (\$8000 USD) en comparación con los radares DS-PRP100 (\$6000 USD) de HikVision y el D2110-VE (\$4000 USD) de Axis.

En general, el radar SpotterRF CK5 es un radar superior al HikVision DS-PRP100 y al Axis D2110-VE en términos de rango de detección, precisión de ubicación, clasificación de objetivos, integración con cámaras y resistencia ambiental.

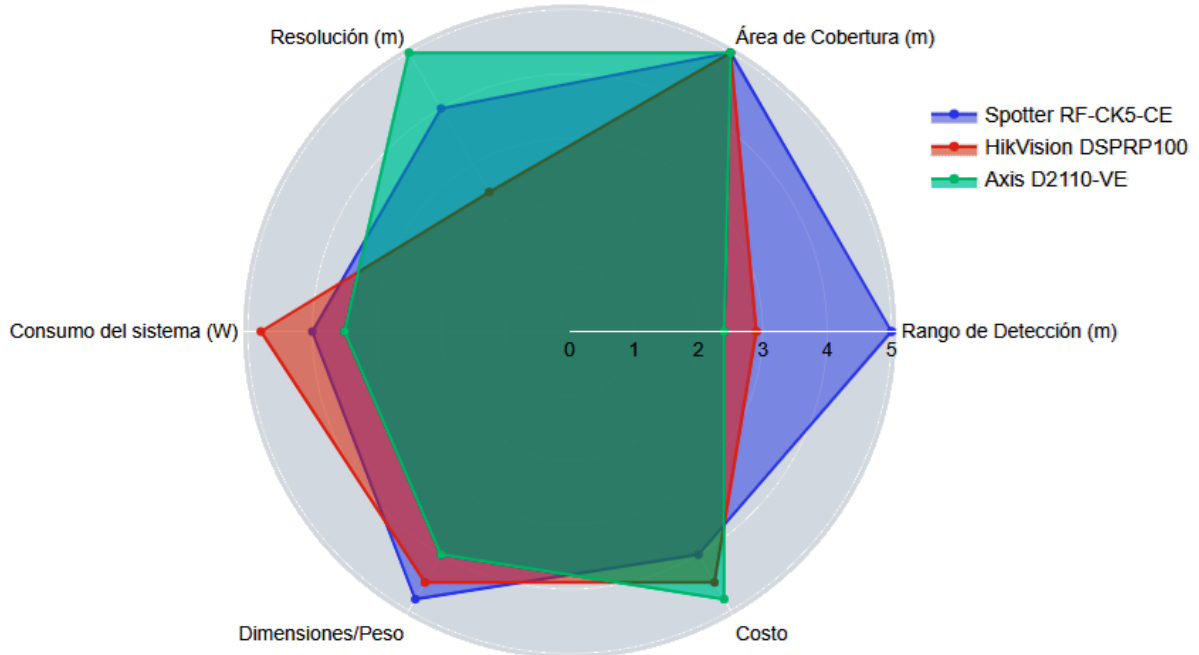


Figura 6. Comparación sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, HikVision DSPRP100, Axis D2110-VE.

2.1.1.2. Tecnología ultrasónica

Para esta tecnología se enfocó la búsqueda en la tecnología de tipo sonar. Este es un tipo de sensor submarino capaz de adquirir sonidos, ruidos y otras señales acústicas que se propagan en el mar o en agua dulce.

De conformidad con la metodología propuesta PDR, se relacionan las tecnologías que se identificaron y se presentan sus características en la *Tabla 5*.

Fabricante	Norbit GuardPoint	Kongsberg Maritime	Teledyne Marine
Referencia	GuardPoint 400	M3	M900-2250-S 130/45-Mk2
Especificación	Característica	Característica	Característica
Rango de detección	150 m	140 m	100 m
Campo de visión efectivo	Horizontal 180° Vertical 20°	Horizontal 140° Vertical 30°	Horizontal 130° Vertical 12°
Resolución	1 cm	1 cm	1,3 cm
Precisión Angular	0,1°	0,95°	1°
Frecuencia funcionamiento	400 kHz	500 kHz	900 kHz

Fabricante	Norbit GuardPoint	Kongsberg Maritime	Teledyne Marine
Referencia	GuardPoint 400	M3	M900-2250-S 130/45-Mk2
Temperatura Funcionamiento	-20°C - 55°C	-40°C - 55°C	-40°C - 55°C
Voltaje sistema	110 VAC - 240 VAC	120 VAC - 240 VAC	12 VDC - 48 VDC
Consumo sistema	200 W	180 W	20 W
Dimensiones (Ancho x Alto x Profundidad)	30 x 20 x 10 (cm)	18,5 x 12,6 (cm)	22,3 x 12,7 (cm)
Peso	2,9 kg	4,4 kg	2,6 kg
Costo	\$30000 USD	\$40000 USD	\$50000 USD

Tabla 5. Características Compact Sonar.

A continuación, se realiza un análisis de valoración de los sistemas de radar presentados en la Tabla 5, donde, se realiza una evaluación de conformidad a los siguientes parámetros:

- **Rango de detección:** Distancia máxima a la que el sonar puede detectar un objeto.
- **Costo:** Precio del sonar.
- **Dimensiones/Peso:** Tamaño y peso del sonar.
- **Consumo:** Cantidad de potencia que consume el sonar.
- **Campo de visión:** Área que puede cubrir el sonar.
- **Resolución:** Capacidad del sonar para distinguir objetos pequeños.

La evaluación se realizó entre una escala de 0 a 5, donde 0 es el rendimiento más bajo y 5 rendimiento excelente, donde, se comparan cada los diferentes parámetros entre los sistemas de radar propuestos, como se presenta en la Tabla 6.

1	2	3	4	5
Bajo rendimiento	Rendimiento regular	Rendimiento bueno	Rendimiento muy bueno	Rendimiento excelente
El sonar no cumple con los requisitos mínimos para la aplicación.	El sonar cumple con los requisitos mínimos para la aplicación, pero podría ser mejor.	El sonar cumple con los requisitos de la aplicación y ofrece un buen rendimiento.	El sonar supera los requisitos de la aplicación y ofrece un rendimiento superior.	El sonar ofrece el mejor rendimiento posible para la aplicación.

Tabla 6. Escala de evaluación de los sistemas de sonar Norbit GuardPoint 400, Kongsberg Maritime M3, Teledyne Marine M900.

De conformidad a lo anterior se obtienen los resultados presentados en la Tabla 7.

Característica	Norbit GuardPoint GuardPoint 400	Kongsberg Maritime M3	Teledyne Marine M900-2250 S130/45-Mk2
Rango de detección (m)	4,8	4,2	3,9
Resolución (cm)	4,8	4,8	4,6
Campo de visión (°)	4,5	4,3	4
Consumo del sistema (W)	4	4,3	5
Dimensiones/Peso	4,3	4	4,5
Costo	3,5	2,5	2,5
Resultado Valoración	25,9	24,1	24,5

Tabla 7. Resultado de valoración de los sistemas de sonar Norbit GuardPoint 400, Kongsberg Maritime M3, Teledyne Marine M900.

En la Figura 7, se presenta el gráfico del análisis obtenido mediante el proceso de valoración propuesto.

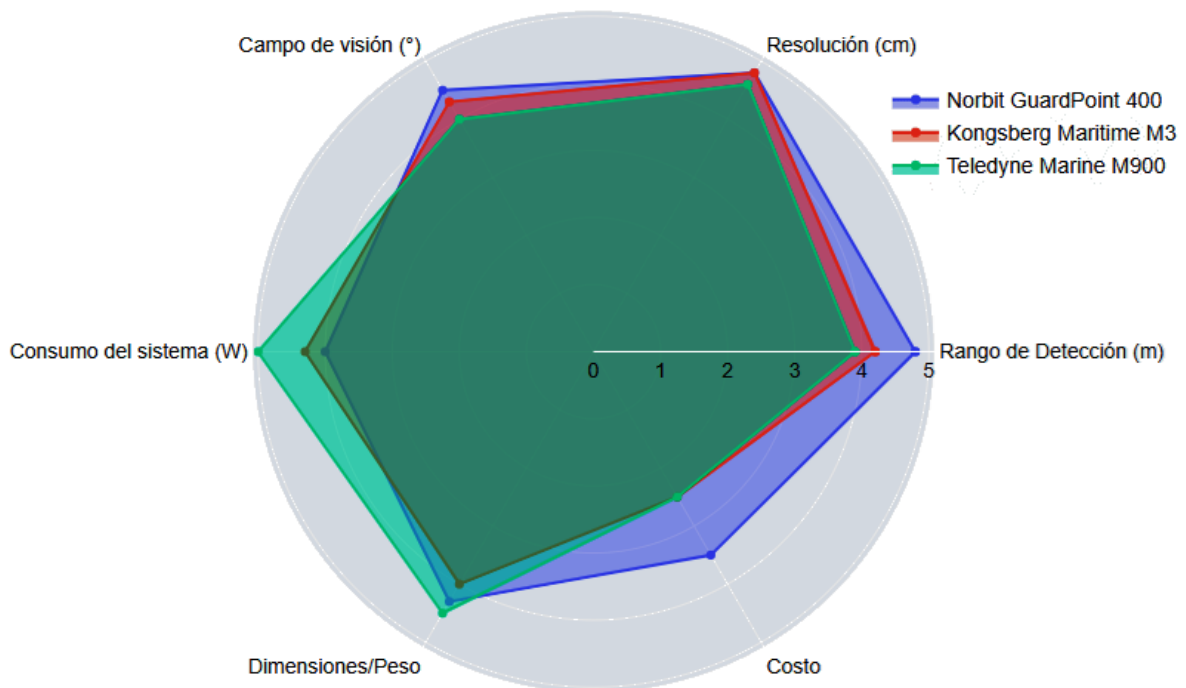


Figura 7. Comparación sistemas de sonar Norbit GuardPoint 400, Kongsberg Maritime M3, Teledyne Marine M900.

De acuerdo con el análisis realizado en la Figura 7, en general, el sonar que ofrece las mejores características para la problemática propuesta con una calificación de 25,9 sobre 30 es el sonar GuardPoint 400 de Norbit es la mejor opción para las necesidades específicas de este proyecto. Donde posee un rango de detección de 150 m, en comparación con el radar M3 de Kongsberg Maritime, de rango de 140 m y el M900 de Teledyne Marine con un rango de detección de 100 m.

La resolución del sonar es la capacidad de distinguir entre dos objetos cercanos. Una resolución más alta permite detectar objetos más pequeños y cercanos, es allí, donde, el sonar GuardPoint 400 y el M3, tienen una resolución de 1 cm, mientras que la del M900 es de 1,3 cm. Sin embargo, el GuardPoint 400, se destaca en la precisión angular de 0,1 °. Esto significa que este sonar puede distinguir entre dos objetos que están separados por 0,1 °.

2.1.1.3. Tecnología acústica

Para esta tecnología se enfocó la búsqueda en la tecnología de tipo hidrófono. Este es un tipo de sensor submarino capaz de adquirir sonidos, ruidos y otras señales acústicas que se propagan en el mar o en agua dulce. Dichos dispositivos están fabricados generalmente de un material piezoeléctrico, el cual funciona como un transductor electroacústico, convirtiendo una señal sonora en una diferencia de tensión eléctrica.

En esta etapa se encontraron y se presentan las siguientes soluciones como se observa en la *Tabla 8*. Sin embargo, estos dispositivos requieren una serie de equipos adicionales para adaptar la señal por lo que fueron descartados como opción para el sistema.

Fabricante	BRÜEL & KJÆR	RESON
Referencia	Type 8103	TC4013
Especificación	Característica	Característica
Uso	Medidas de cavitación, ultrasonidos en líquidos, investigación acústica de animales marinos, medidas de ruido en ambientes húmedos y atmosferas con polución.	Medidas de cavitación, ultrasonidos en líquidos, investigación acústica de animales marinos, medidas de ruido en ambientes húmedos y atmosferas con polución.
Rango de frecuencia	0,1 Hz - 180 kHz	1 Hz - 170 kHz
Sensibilidad	-211 dB – 1 V/μPa	-211 dB – 1 V/μPa
Voltaje de alimentación	12 VDC - 24 VDC	100 VAC
Consumo del sistema	10 W	3 W
Límite en el aire	- 3 dB a 15 kHz	n/a
Temperatura de funcionamiento	-10°C a 80°C	-2°C a 80°C
Protección	IP68 ⁴	IP68 ⁴
Conector	Coaxial	Coaxial

⁴ IP68, donde el primer dígito 6, indica el nivel de protección contra ingreso de objetos sólidos, en este caso protección completa contra polvo y el segundo dígito indica el nivel de protección contra ingreso de agua, para este caso el nivel 8, indica protección ante Inmersión completa y continua en agua.

Fabricante	BRÜEL & KJÆR	RESON
Referencia	Type 8103	TC4013
Especificación	Característica	Característica
Tamaño	5 x 0,95 (cm)	5 x 0,95 (cm)
Cable	6 m	6 m
Peso	170 g	75 g
Costo	\$4000 USD	\$4500 USD

Tabla 8. Características hidrófonos.

A continuación, se realiza un análisis de valoración de los sistemas de radar presentados en la *Tabla 8*, donde, se realiza una evaluación de conformidad a los siguientes parámetros:

- **Resolución:** Capacidad del hidrófono para distinguir objetos pequeños.
- **Rango de frecuencia:** Rango de frecuencias que el hidrófono puede detectar.
- **Costo:** Precio del hidrófono.
- **Peso:** Peso del hidrófono.
- **Tamaño:** Tamaño del hidrófono.
- **Sensibilidad:** Capacidad del hidrófono para detectar sonidos débiles.

La evaluación se realizó entre una escala de 0 a 5, donde 0 es el rendimiento más bajo y 5 rendimiento excelente, donde, se comparan cada los diferentes parámetros entre los sistemas de radar propuestos, como se presenta en la *Tabla 9*.

1	2	3	4	5
Bajo rendimiento	Rendimiento regular	Rendimiento bueno	Rendimiento muy bueno	Rendimiento excelente
El hidrófono no cumple con los requisitos mínimos para la aplicación.	El hidrófono cumple con los requisitos mínimos para la aplicación, pero podría ser mejor.	El hidrófono cumple con los requisitos de la aplicación y ofrece un buen rendimiento.	El hidrófono supera los requisitos de la aplicación y ofrece un rendimiento superior.	El hidrófono ofrece el mejor rendimiento posible para la aplicación.

Tabla 9. Escala de evaluación de sistemas de sensor acústico tipo hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103 y RESON TC4013.

De conformidad a lo anterior se obtienen los resultados presentados en la *Tabla 10*.

Característica	BRÜEL & KJÆR Type 8103	RESON TC4013
Rango de frecuencia (kHz)	4,8	4,2
Sensibilidad (dB)	4,5	4,5
Tamaño (milímetros)	4,8	4,8
Peso (g)	4,2	4,8
Costo	4,8	4,5
Resultado Valoración	23,1	22,8

Tabla 10. Resultado de valoración de sistemas de sensor acústico tipo hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103 y RESON TC4013.

En la *Figura 8*, se presenta el gráfico del análisis obtenido mediante el proceso de valoración propuesto.

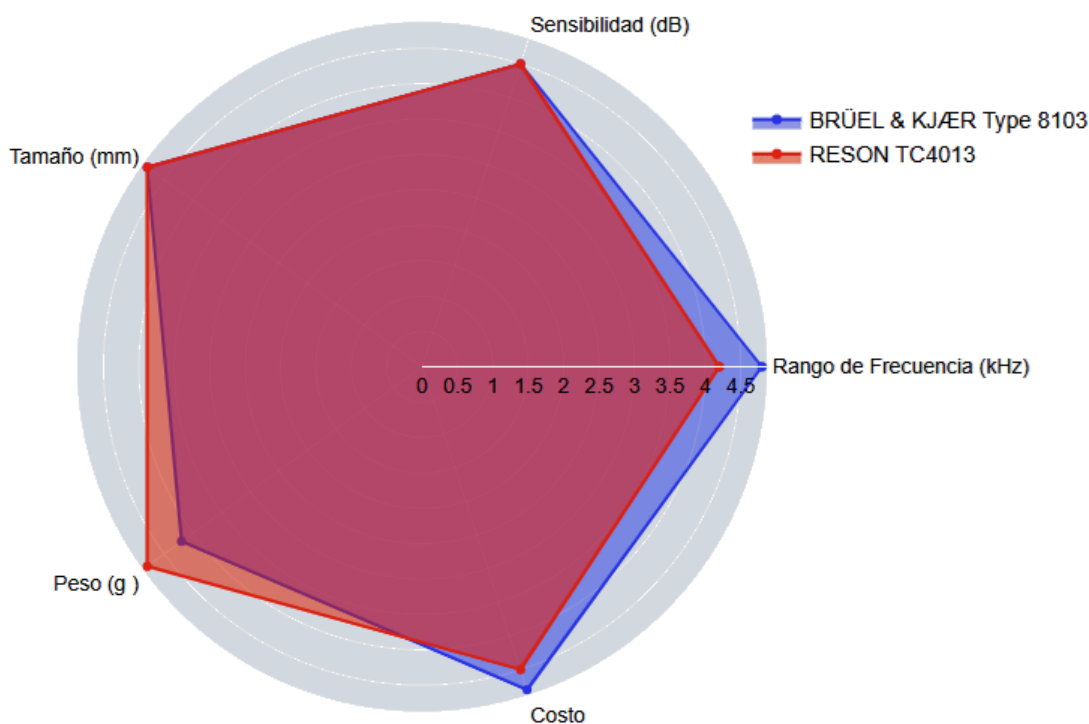


Figura 8. Comparación sistemas de sensor acústico tipo hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103 y RESON TC4013.

De acuerdo con la *Figura 8*, en general, el hidrófono que ofrece las mejores características para la problemática propuesta con una calificación de 23,1 sobre 25 es el hidrófono BRÜEL & KJÆR 8103 tiene una respuesta en frecuencia más plana que el hidrófono RESON TC4013, lo que significa que reproduce con mayor precisión las ondas sonoras en un rango más amplio de frecuencias. La respuesta en frecuencia del 8103 es de 0.1 Hz a 180 kHz,

con una pendiente de -3 dB, mientras que la respuesta en frecuencia del TC4013 es de 1 Hz a 170 kHz, con una pendiente de -3 dB.

En cuanto a sensibilidad, tanto el BRÜEL & KJÆR 8103 y RESON TC4013 poseen una sensibilidad de -211 dB – 1 V/ μ Pa. Esta sensibilidad es útil para aplicaciones como la vigilancia marina, donde es necesario detectar señales acústicas débiles.

El 8103 tiene un menor ruido propio que el TC4013. Esto significa que puede detectar señales acústicas más débiles sin que se vean afectadas por el ruido de la propia sonda. El ruido propio del 8103 es de 23 dB re 1 μ Pa/ \sqrt Hz, mientras que el ruido propio del TC4013 es de 25 dB re 1 μ Pa/ \sqrt Hz. Esta diferencia en ruido propio es importante para aplicaciones donde se necesita una alta precisión, como la medición de la presión sonora o la detección de señales acústicas débiles. El 8103 es un hidrófono omnidireccional, mientras que el TC4013 es un hidrófono unidireccional. Esto significa que el 8103 es sensible a la presión sonora en todas las direcciones, mientras que el TC4013 es sensible a la presión sonora en una sola dirección.

También, el TC4013 es un hidrófono más caro que el 8103. El precio del 8103 es de aproximadamente \$4000 USD, mientras que el precio del TC4013 es de aproximadamente \$4500 UDS.

Conclusiones acerca de la tecnología de sensado

En la *Tabla 11* y la *Figura 9*, se presenta la comparación de los sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, Sonar Norbit GuardPoint 400 e Hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103, que son los de mejores características según el análisis realizado.

Tecnología	Radar	Ultrasónico	Acústico
Referencia	Radar CK5-CE	GuardPoint 400	Type 8103
Especificación			
Rango de detección (máx.)	175 m	150 m	400 m
Campo de visión efectivo	Horizontal 100° Vertical 10°	Horizontal 180° Vertical 20°	-
Resolución	1 m	1 cm	1 Hz
Precisión Angular	$\pm 3^\circ$	0,1°	-
Frecuencia funcionamiento	24 - 24,25 GHz	400 kHz	0,1 Hz - 180 kHz
Temperatura Funcionamiento	-30°C - 65°C	-20°C - 55°C	-10°C a 80°C
Protección	IP67	IP68	IP68
Voltaje sistema	PoE/ 12 VDC –30 VDC	110 VAC - 240 VAC	12 VDC - 24 VDC
Consumo sistema	7 - 8.5 W	200 W	10 W

Tecnología	Radar	Ultrasónico	Acústico
Referencia	Radar CK5-CE	GuardPoint 400	Type 8103
Especificación			
Dimensiones (Ancho x Alto x Profundidad)	22,86 x 17,526 x 4,318 (cm)	30 x 20 x 10 (cm)	5 x 0,95 (cm)
Peso	0,6 kg	2,9 kg	170 g
Costo	\$8000 USD	\$20000 - \$30000 USD	\$4000 USD

Tabla 11. Comparación entre los sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, Sonar Norbit GuardPoint 400 e Hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103.

A continuación, se realiza un análisis de valoración de los sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, Sonar Norbit GuardPoint 400 e Hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103 presentados en la Tabla 11, donde, se realiza una evaluación de conformidad a los siguientes parámetros:

- **Cobertura:** Área máxima que puede cubrir el radar.
- **Rango de detección:** Distancia máxima a la que el sistema puede detectar un objeto.
- **Dimensiones/Peso:** Tamaño y peso del sistema.
- **Consumo:** Cantidad de potencia que consume el sistema.
- **Resolución:** Capacidad del sistema para distinguir objetos pequeños.
- **Campo de visión:** Área que puede cubrir el sistema.

La evaluación se realizó entre una escala de 0 a 5, donde 0 es el rendimiento más bajo y 5 rendimiento excelente, donde, se comparan cada los diferentes parámetros entre los sistemas propuestos, como se presenta en la Tabla 12.

1	2	3	4	5
Bajo rendimiento	Rendimiento regular	Rendimiento bueno	Rendimiento muy bueno	Rendimiento excelente
El sistema no cumple con los requisitos mínimos para la aplicación.	El sistema cumple con los requisitos mínimos para la aplicación, pero podría ser mejor.	El sistema cumple con los requisitos de la aplicación y ofrece un buen rendimiento.	El sistema supera los requisitos de la aplicación y ofrece un rendimiento superior.	El sistema ofrece el mejor rendimiento posible para la aplicación.

Tabla 12. Escala de evaluación de los sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, Sonar Norbit GuardPoint 400 e Hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103.

De conformidad a lo anterior se obtienen los resultados presentados en la Tabla 13.

Característica	SpotterRF CK5	Norbit GuardPoint GuardPoint 400	BRÜEL & KJÆR Type 8103
Rango de detección (m)	4,5	4,3	4,8
Resolución (cm)	4,5	5	4,5
Campo de visión (°)	4,5	4,8	0
Consumo del sistema (W)	4,8	3,8	4,5
Dimensiones/Peso	4,7	4	4,8
Costo	4,5	3,5	4,8
Resultado Valoración	27,5	25,4	23,4

Tabla 13. Resultado de valoración de los sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, Sonar Norbit GuardPoint 400 e Hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103.

En la Figura 9, se presenta el gráfico del análisis obtenido mediante el proceso de valoración propuesto.

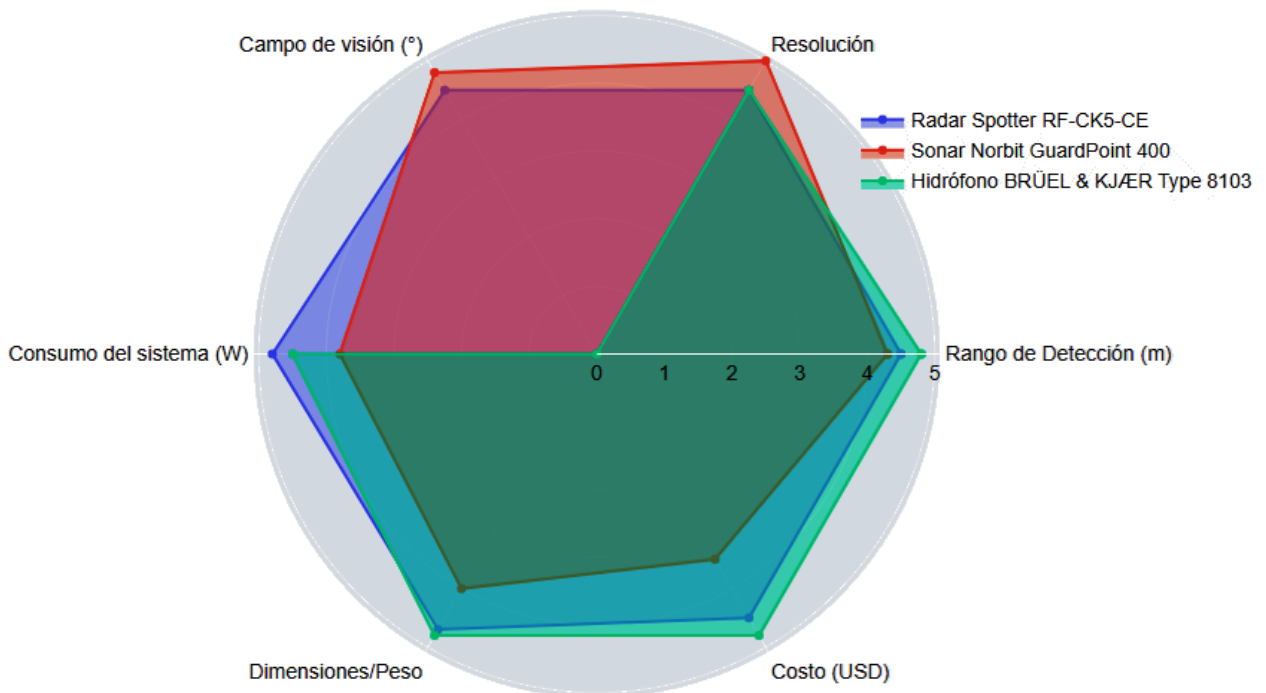


Figura 9. Comparación sistemas de radar Spotter RF-CK5-CE, Sonar Norbit GuardPoint 400 e Hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103.

Luego de evaluar las opciones para el monitoreo remoto en la Amazonia, se determinó que el uso de un sistema de radar Spotter CK5 era la elección más acertada con una calificación de 27,5 sobre 30, considerando diversos factores clave de acuerdo con la Figura 9.

El radar CK5-CE tiene un rango de detección de 175 m, que es comparable al ultrasónico GuardPoint 400 (150 m), pero menor que el sensor acústico BRÜEL & KJÆR Type 8103 (400 m). Sin embargo, el radar tiene una prestación adicional para complementar su rango,

el cual es el área de cobertura de 100 m x 125 m, convirtiéndolo en la opción ideal para monitorear el área deseada.

En cuanto a la resolución y precisión, el radar CK5-CE ofrece una resolución de 1 m y una precisión angular de $\pm 3^\circ$, mientras que el sensor ultrasónico GuardPoint 400 supera en resolución con 1 cm y una precisión angular de $0,1^\circ$. A primera vista, el GuardPoint 400 presenta ventajas en estos aspectos.

No obstante, en el contexto de esta aplicación específica de monitoreo remoto, el radar CK5 sobresale en múltiples aspectos cruciales. Por un lado, es capaz de detectar hasta 10 objetos simultáneamente, una característica valiosa para la vigilancia efectiva. Además, el CK5 está equipado con una cámara PTZ, que permite una rotación completa de 360° en el eje horizontal y 180° en el eje vertical, junto con un zoom de hasta 10 veces. Esto habilita una funcionalidad de seguimiento, lo que significa que puede seguir objetos en movimiento de manera eficiente.

Lo más destacado del radar CK5 radica en su capacidad de integrar inteligencia artificial. Esta capacidad permite el entrenamiento del sistema para llevar a cabo una clasificación e identificación precisa de los elementos monitoreados. Esto incluye la habilidad de reconocer cambios en la vegetación, identificar cuerpos de agua y detectar la presencia de fauna, así como cualquier otra perturbación o amenaza en la zona vigilada.

En cuanto al costo, el más económico es el Hidrófono BRÜEL & KJÆR Type 8103 (\$4000 USD), y el más costoso el sonar Norbit GuardPoint 400 (de \$20000 a \$30000 USD), mientras que el radar Spotter CK5 tiene un costo de \$8000 USD, lo que lo hace accesible de acuerdo con el presupuesto del proyecto.

Adicionalmente, hay que considerar que la Amazonia es una región con condiciones ambientales desafiantes, como densa vegetación y clima impredecible. En este sentido, el sistema de radar muestra una mayor capacidad para penetrar la vegetación y operar en condiciones adversas, lo que garantiza una mayor confiabilidad en el monitoreo remoto en esta región.

En conclusión, el uso de un sistema de radar se presenta como la opción preferida para el monitoreo remoto en la Amazonia. Su amplio rango de detección, cobertura, alta resolución, precisión y capacidad para enfrentar las condiciones ambientales de la selva, hacen que este sistema sea más efectivo y eficiente en comparación con los sensores ultrasónicos y acústicos. Aunque pueda requerir una inversión inicial más alta, sus ventajas a largo plazo y la calidad de los datos obtenidos hacen que sea la elección más sólida para el monitoreo y preservación de este invaluable ecosistema.

2.1.2. Sistema de comunicaciones

Los sistemas de comunicaciones satelitales tipo VSAT, BGAN y Starlink ofrecen diversas ventajas y desventajas que deben considerarse al elegir la opción más adecuada para el escenario particular de este proyecto. Por lo tanto, en la *Tabla 14*, se presentan estas características para cada uno de los sistemas.

TECNOLOGÍA	VSAT	BGAN	Starlink
Velocidad del enlace	25 Mbps – 1024 Mbps. 64 kbps a múltiples Mbps.	Explorer 510 – 464 kbps Explorer 710 – 650 kbps Conexión IP estándar con velocidad pico 490 kbps y servicio de transmisión IP con velocidades seleccionables de 32 a 384 kbps	50 - 350 Mbps
Banda de Funcionamiento	Banda Ku 12 GHz - 14 GHz Banda Ka 20 GHz - 31 GHz Banda C 4 GHz - 6 GHz	Banda L 1 GHz - 2 GHz	Banda Ku 12 GHz - 18 GHz
Consumo energético	30 W	65 W	110 W 150 W
Costos	SAT tiene tarifa fija mensual basada en velocidad del enlace y ancho de banda	El servicio IP estándar de BGAN se cobra por megabyte de datos transferidos / recibidos Comodato Explorer 510 - \$1414 USD Explorer 710 - \$1750 USD Compra Explorer 510 - \$3540 USD Explorer 710 - \$7800 USD Servicio mes - \$1620 USD	Equipo \$2200000 COP Servicio Mes \$210000 COP

Tabla 14. Características técnicas de las tecnologías de comunicación satelital tipo VSAT, BGAN y Starlink.

En cuanto a las ventajas, el sistema VSAT destaca por su capacidad de proporcionar una conexión de alta velocidad y confiable en áreas remotas, lo que lo hace ideal para comunicaciones en zonas rurales o regiones sin infraestructura de telecomunicaciones desarrollada. Por otro lado, BGAN ofrece una movilidad excepcional, lo que permite una conexión confiable mientras se desplaza, siendo una opción valiosa para equipos de campo y aplicaciones en movimiento. Por último, Starlink, el sistema desarrollado por SpaceX destaca por su constelación de satélites en órbita baja, lo que ofrece una baja latencia y una cobertura global, lo que lo convierte en una opción atractiva para usuarios en todo el mundo.

Conclusiones acerca del sistema de comunicaciones

A continuación, se realiza un análisis de valoración de los sistemas de comunicaciones VSAT, BGAN y Starlink presentados en la *Tabla 14*, donde, se realiza una evaluación de conformidad a los siguientes parámetros:

- **Velocidad:** Tasa de transferencia de datos del sistema.
- **Latencia:** Retraso en la transmisión de datos del sistema.
- **Costo:** Precio del sistema.
- **Dimensiones/Peso:** Tamaño y peso del sistema.
- **Consumo del sistema:** Cantidad de energía que consume el sistema.

La evaluación se realizó entre una escala de 0 a 5, donde 0 es el rendimiento más bajo y 5 rendimiento excelente, donde, se comparan cada los diferentes parámetros entre los sistemas propuestos, como se presenta en la *Tabla 15*.

1	2	3	4	5
Bajo rendimiento	Rendimiento regular	Rendimiento bueno	Rendimiento muy bueno	Rendimiento excelente
El sistema no cumple con los requisitos mínimos para la aplicación.	El sistema cumple con los requisitos mínimos para la aplicación, pero podría ser mejor.	El sistema cumple con los requisitos de la aplicación y ofrece un buen rendimiento.	El sistema supera los requisitos de la aplicación y ofrece un rendimiento superior.	El sistema ofrece el mejor rendimiento posible para la aplicación.

Tabla 15. Escala de evaluación de las tecnologías de comunicación satelital tipo VSAT, BGAN y Starlink.

De conformidad a lo anterior se obtienen los resultados presentados en la *Tabla 16*.

Característica	VSAT	BGAN	Starlink
Latencia (ms)	2	3	5
Velocidad (Kbps)	2	3	5
Consumo del sistema (W)	5	4	2
Dimensiones/Peso	1	4	5
Costo	3	1	5
Resultado Valoración	13	15	22

Tabla 16. Resultado de valoración de las tecnologías de comunicación satelital tipo VSAT, BGAN y Starlink.

En la *Figura 10*, se presenta el gráfico del análisis obtenido mediante el proceso de valoración propuesto.

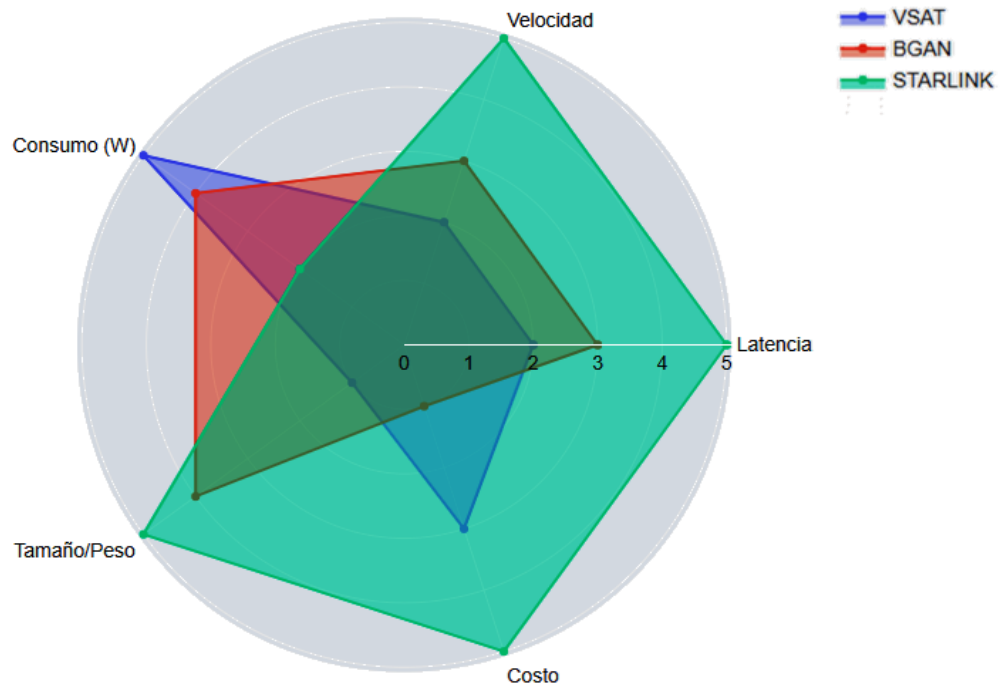


Figura 10. Diagrama comparación características sistemas de comunicación satelital VSAT; BGAN y Starlink.

Los sistemas VSAT y BGAN tienen sus propias ventajas en términos de movilidad y acceso en áreas remotas, sin embargo, Starlink destaca como una opción superior en varios aspectos clave, lo que lo convierte en una opción más atractiva y eficiente en general.

En primer lugar, en términos de costo, Starlink es más asequible que los sistemas VSAT y BGAN. El costo inicial de Starlink es de \$499 USD, mientras que el costo inicial de un sistema VSAT puede ser de \$5000 USD o más. El costo mensual de Starlink es de \$99 USD, mientras que el costo mensual de un sistema VSAT puede ser de \$200 USD o más. Por lo tanto, Starlink ha demostrado ser competitivo y atractivo en comparación con los sistemas VSAT y BGAN. La constelación de satélites en órbita baja de Starlink permite una mayor eficiencia en la transmisión de datos, lo que se traduce en tarifas más competitivas para los usuarios. Además, su enfoque en el desarrollo de tecnología reutilizable y escalable ha contribuido a una disminución significativa en los costos de lanzamiento y mantenimiento, lo que beneficia directamente a los consumidores.

En cuanto a la latencia, Starlink ofrece una ventaja considerable sobre los sistemas VSAT y BGAN debido a la proximidad de sus satélites en órbita baja. Esto reduce la latencia de la señal, lo que resulta en una experiencia de navegación más rápida y receptiva para los usuarios. En comparación, los sistemas VSAT y BGAN, que dependen de satélites en órbitas

más altas, suelen experimentar latencias más altas, lo que puede afectar negativamente aplicaciones en tiempo real, como videoconferencias o juegos en línea.

En términos de velocidad, Starlink ofrece velocidades de descarga más rápidas que los sistemas VSAT y BGAN. Starlink ofrece velocidades de descarga de hasta 1 Gbps, mientras que los sistemas VSAT y BGAN ofrecen velocidades de descarga de hasta 10 Mbps. Lo anterior, gracias a su constelación de satélites y el enfoque en una amplia cobertura, los usuarios de Starlink pueden disfrutar de velocidades de internet mucho más rápidas y estables en comparación con los sistemas VSAT y BGAN.

El tamaño y la cobertura son otros aspectos en los que Starlink sobresale como se observa en la *Figura 10*. Los sistemas VSAT y BGAN suelen requerir equipos más grandes y complejos para su operación, mientras que los terminales de Starlink son más compactos y fáciles de instalar, lo que los hace más convenientes y accesibles para los usuarios. Además, la constelación de satélites de Starlink ofrece una cobertura global, lo que permite a los usuarios en cualquier parte del mundo acceder a su servicio, en contraste con algunos sistemas VSAT y BGAN que pueden tener limitaciones de cobertura en ciertas regiones.

En conclusión, Starlink se destaca como una opción superior obteniendo una calificación de 22/25 en comparación con los sistemas VSAT y BGAN debido a su competitivo costo, baja latencia, alta velocidad, tamaño compacto y cobertura global, como se presenta en la *Figura 10*. Estas ventajas combinadas hacen de Starlink una solución más completa y atractiva para aquellos que buscan una conectividad confiable y eficiente en cualquier lugar del mundo. Por lo tanto, el sistema Starlink, es la solución escogida de acuerdo con las necesidades y requisitos específicos de esta aplicación.

2.1.3. Sistema de alimentación autónomo

El PNNRP se ubica dentro de las ZNI, lo que sugiere la implementación de una alimentación off-grid (desconectada de la red eléctrica convencional). Este enfoque se emplea comúnmente para generar energía en áreas remotas o aisladas. Sin embargo, dadas las condiciones particulares de un bosque tropical húmedo amazónico y la naturaleza del prototipo propuesto, se plantea la evaluación de tres tecnologías de fuentes de energía renovables: solar, eólica e hidráulica. Estas últimas se consideran opciones a microescala y potenciales soluciones para el módulo de alimentación autónomo. Mediante este análisis, se busca determinar la alternativa más adecuada para garantizar un suministro sostenible y eficiente en el entorno del proyecto. Por lo tanto, en la *Tabla 17*, se presentan estas características para cada uno de los sistemas.

TECNOLOGÍA	Eólico Microgenerador	Hidráulico Microturbina	Fotovoltaico
Capacidad de generación (MWh/año)	3	2	4
Eficiencia de conversión (%)	30 % - 50 %	80 % - 90 %	20 % - 25 %
Costo inicial (US\$/MW)	Medio (1000-2000))	Medio (1000-2000)	Medio (1000-2000)
Costo de operación y mantenimiento (US\$/MWh)	Medio	Bajo	Bajo
Impacto ambiental	Bajo	Medio	Bajo
Vida útil (Años)	20 - 25	10 - 15	25-30

Tabla 17. Características técnicas de las tecnologías de los sistemas de alimentación autónomo solar, eólico e hidráulico.

Conclusiones acerca del sistema de alimentación autónomo

A continuación, se realiza un análisis de valoración de los sistemas de alimentación autónomo solar, eólico e hidráulico presentados en *la Tabla 1* y *Tabla 17*. De acuerdo con las ventajas y desventajas que presenta la implementación de cada uno de los sistemas, se realiza una evaluación de conformidad a los siguientes parámetros:

- **Capacidad de generación:** Se refiere a la cantidad de energía eléctrica que puede generar un sistema en un año. El sistema hidráulico tiene la mayor capacidad de generación, seguido por el eólico y el fotovoltaico.
- **Eficiencia de conversión:** Es la medida de la cantidad de energía que se convierte de una forma a otra. El sistema hidráulico tiene la mayor eficiencia de conversión, seguido por el eólico y el fotovoltaico.
- **Costo inicial:** Es el costo de instalar el sistema. El sistema hidráulico tiene el costo inicial más alto, seguido por el eólico y el fotovoltaico.
- **Costo de operación y mantenimiento:** Es el costo de mantener y operar el sistema durante su vida útil. El sistema fotovoltaico tiene el costo de operación y mantenimiento más bajo, seguido por el hidráulico y el eólico.
- **Impacto ambiental:** Es el impacto que tiene el sistema en el medio ambiente. Los sistemas fotovoltaico y eólico tienen un impacto ambiental bajo, mientras que el sistema hidráulico tiene un impacto ambiental medio.
- **Vida útil:** Es el tiempo que el sistema puede funcionar de manera eficiente. El sistema hidráulico tiene la vida útil más larga, seguido por el fotovoltaico y el eólico.

La evaluación se realizó basados en el entorno del noroeste amazónico entre una escala de 0 a 5, donde 0 es el rendimiento más bajo y 5 rendimiento excelente, donde, se comparan cada los diferentes parámetros entre los sistemas propuestos, como se presenta en la *Tabla 18*.

1	2	3	4	5
Bajo rendimiento	Rendimiento regular	Rendimiento bueno	Rendimiento muy bueno	Rendimiento excelente
El sistema no cumple con los requisitos mínimos para la aplicación.	El sistema cumple con los requisitos mínimos para la aplicación, pero podría ser mejor.	El sistema cumple con los requisitos de la aplicación y ofrece un buen rendimiento.	El sistema supera los requisitos de la aplicación y ofrece un rendimiento superior.	El sistema ofrece el mejor rendimiento posible para la aplicación.

Tabla 18. Escala de evaluación de las tecnologías de los sistemas de alimentación autónomo solar, eólico e hidráulico.

De conformidad a lo anterior se obtienen los resultados presentados en la *Tabla 19*.

Característica	Fotovoltaico	Eólico	Hidráulico
Capacidad de generación (MWh/año)	5	4	3
Eficiencia de conversión (%)	3	4	5
Costo inicial (US\$/MW)	5	5	5
Costo de operación y mantenimiento (US\$/MWh)	5	1	4
Impacto ambiental	5	4	3
Vida útil (Años)	4	4	3
Resultado Valoración	27	22	23

Tabla 19. Resultado de valoración de las tecnologías de los sistemas de alimentación autónomo solar, eólico e hidráulico.

En la *Figura 11*, se presenta el gráfico del análisis obtenido mediante el proceso de valoración propuesto.

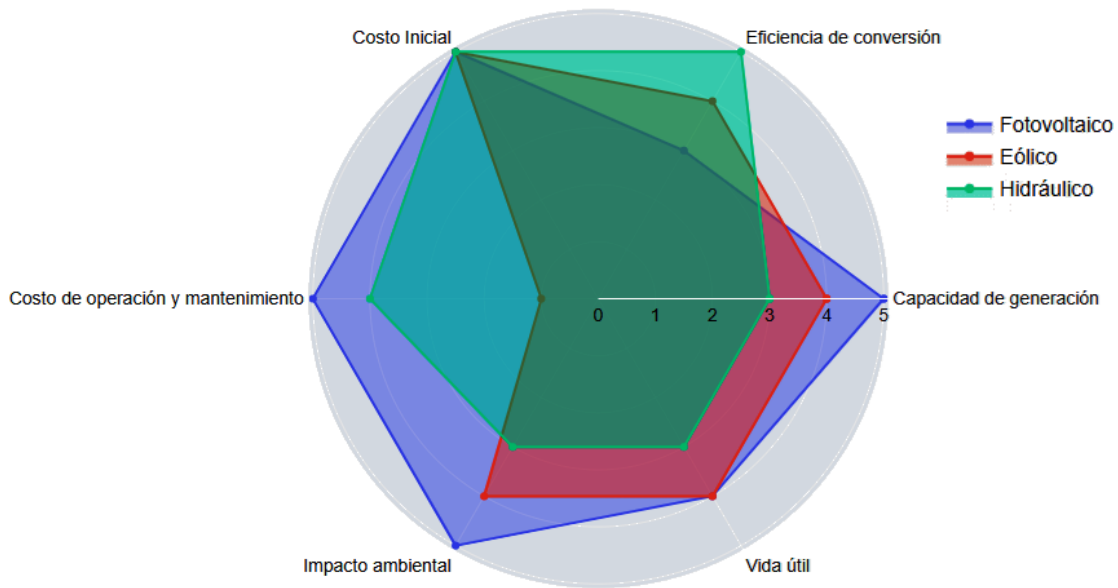


Figura 11. Diagrama comparación características de las tecnologías de los sistemas de alimentación autónoma solar, eólico e hidráulico.

Tras analizar detalladamente las opciones de generación de energía off-grid en la Amazonia, se determinó que el uso de un sistema fotovoltaico se destaca como la mejor alternativa con una calificación de 27/30 como se presenta en la *Figura 11*. En primer lugar, la región amazónica cuenta con abundante radiación solar durante gran parte del año, lo que garantiza un suministro constante de energía eléctrica a partir de paneles solares. A diferencia de los sistemas eólicos, que pueden depender de la presencia de vientos adecuados, y los sistemas hidráulicos, que pueden verse afectados por variaciones en el caudal de los ríos durante las estaciones, la energía solar es más predecible y confiable en esta región.

Además, el uso de un sistema fotovoltaico presenta ventajas en términos de tamaño y mantenimiento. Los paneles solares son relativamente compactos y fáciles de instalar, lo que es especialmente beneficioso en áreas remotas y de difícil acceso como la Amazonia. Por otro lado, los sistemas eólicos pueden requerir torres altas y grandes aspas, mientras que los sistemas hidráulicos podrían necesitar infraestructuras más complejas, lo que incrementa su costo y complejidad de instalación.

Otro factor para considerar es el impacto ambiental. Los sistemas fotovoltaicos no generan emisiones de gases de efecto invernadero ni contaminantes durante su operación, lo que ayuda a preservar la frágil biodiversidad y los ecosistemas sensibles de la Amazonia. En cambio, tanto los sistemas eólicos como los hidráulicos pueden tener efectos negativos en el hábitat local, como la alteración del paisaje y la afectación a la fauna.

En conclusión, el uso de un sistema fotovoltaico se muestra como la opción más favorable para un sistema de generación de energía eléctrica off-grid en la Amazonia. Su fiabilidad, sencillez de instalación, escaso impacto ambiental y su capacidad para aprovechar la abundante radiación solar de la región hacen que esta tecnología sea la mejor elección para asegurar un suministro sostenible y eficiente de energía eléctrica en este entorno único y valioso.

2.2. Arquitectura de tecnologías para el prototipo del sistema de monitoreo

De acuerdo con el apartado 2.1. y la selección de tecnologías realizada según el análisis de las características propias de las necesidades de este prototipo, en la *Figura 12*, se presenta el diagrama de bloques de la arquitectura final del prototipo de sistema de monitoreo remoto para la protección de territorios de pueblos indígenas en aislamiento en el Parque Nacional Natural Río Puré.

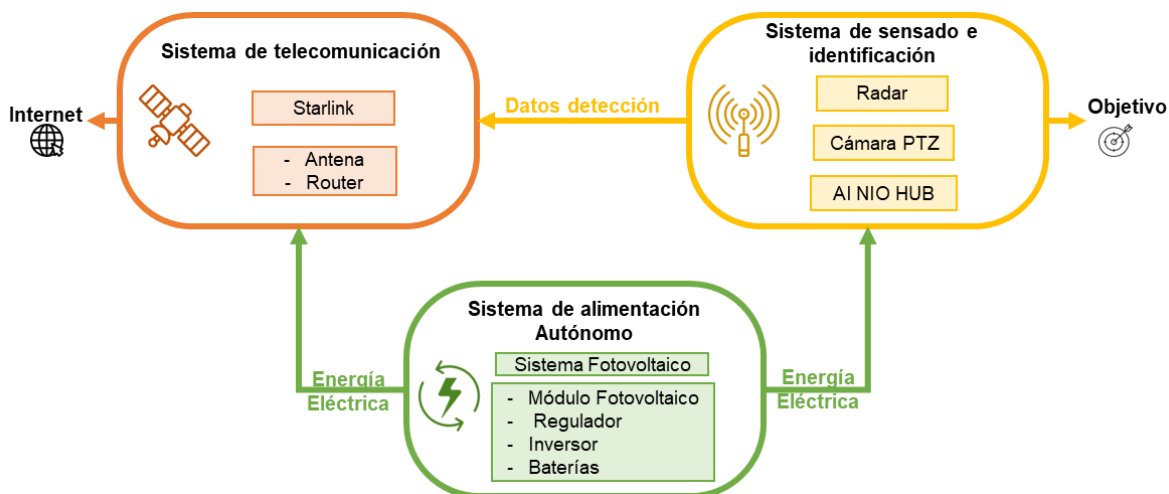


Figura 12. Diagrama de bloques arquitectura final prototipo de monitoreo remoto para la protección de territorios de PIA en el PNNRP.

2.2.1. Diseño del Sistema Fotovoltaico (SFV) off-grid para el prototipo

El dimensionamiento de un sistema fotovoltaico off-grid permitirá garantizar un suministro de energía confiable y sostenible basado en la captación de energía solar mediante paneles fotovoltaicos y su almacenamiento en baterías para su posterior uso. Para llevar a cabo un

dimensionamiento adecuado, es esencial considerar una serie de factores clave que determinarán la capacidad y la eficiencia del sistema. A continuación, se presenta el dimensionamiento propuesto para la solución particular de este proyecto.

En el *Anexo: Análisis de la demanda energética y las condiciones de la ubicación geográfica para el diseño del SFV*, donde en la *Tabla 26*, proporciona una visión detallada de la potencia y el consumo energético diario de varios equipos utilizados en un sistema. Los cálculos muestran que la potencia total de estos equipos es de 120 W, lo que equivale a 0,12 kW. Además, el consumo de energía en AC totaliza 1928 kWh por día.

2.2.1.1. Dimensionamiento de equipos del SFV

Los paneles fotovoltaicos tienen una eficiencia en la conversión de la radiación solar en electricidad. Esta eficiencia varía según la tecnología de fabricación utilizada (monocristalinos y policristalinos). Se debe seleccionar el tipo de panel que mejor se adapte a las condiciones locales y a las necesidades de energía. A continuación, se presenta el diseño del SFV, basado en el modelo de dimensionamiento de los libros *“Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers de Sonnenenergie”* [55] y *“Solar Photovoltaic Basics: A Study Guide for the NABCEP Associate Exam de White”* [56].

Primero, se calcula la energía total E_T , como se muestra en la ecuación (2.1)

$$E_T = \left(\frac{E_{DC}}{\eta_{reg}} + \frac{E_{AC}}{\eta_{reg} \times \eta_{inv}} \right) = \left(\frac{kWh}{día} \right) \quad (2.1)$$

Donde:

E_{DC} : Consumo de energía diario en corriente directa (Wh)

E_{AC} : Consumo de energía diario en corriente alterna (Wh)

η_{reg} : Eficiencia del regulador de voltaje, se considera un factor de 0,98

η_{inv} : Eficiencia del inversor de VDC a VAC, se considera un factor de 0,9

Para el diseño actual, no se consideran cargas en DC, por lo tanto, se utiliza la ecuación (2.2).

$$E_T = \left(\frac{E_{AC}}{\eta_{reg} \times \eta_{inv}} \right) = \left(\frac{kWh}{día} \right) \quad (2.2)$$

Considerando la eficiencia del regulador de 0,98 y la eficiencia del inversor de 0,90:

$$E_T = \left(\frac{1928 \text{ Wh}}{0,98 \times 0,9} \right) = 2185,941 \text{ Wh} = 2,185 \text{ kWh} \quad (2.3)$$

El siguiente paso es calcular la potencia pico del campo generador P_{GEN} , de acuerdo con la ecuación (2.4).

$$PG_{min} = \frac{E_T \times G_{CEM}}{G_{dm}(\alpha, \beta) \times PR} \quad (2.4)$$

Donde:

E_T : Consumo de energía diario

PG_{min} : Potencia del generador (W)

$G_{dm}(\alpha, \beta)$: Peor promedio mensual de radiación global diaria en $\frac{kWh}{m^2}$, correspondiente a 3,25 del mes de junio de acuerdo con la *Tabla 28 (Anexo A)*.

PR : Rendimiento energético de la instalación, expresado en tanto por uno

Por lo tanto, el valor de la potencia del generador está dado por la ecuación (2.5).

$$PG_{min} = \frac{2185,941 \frac{W}{h} \times \frac{1kWh}{m^2}}{3,25 \frac{kWh}{m^2} \times 0.6} = 1120,995 \frac{W}{h} \quad (2.5)$$

Entonces, la potencia del generador debe estar entre los valores de:

$$PG_{min} \leq PG \leq 1.2 \times PG_{min} \quad (2.6)$$

$$1120,995 W \leq PG \leq 1345,194 W \quad (2.7)$$

A continuación, se dimensiona y selecciona el número de módulos fotovoltaicos de acuerdo con la potencia calculada. Para la instalación se escoge una tensión nominal de la instalación V_n igual a 48 VDC ya que se va a trabajar con módulos de potencias mayores o iguales a 450W con el fin de garantizar la potencia en la menor área posible. Se opta por usar el módulo solar de marca Trina Solar monocristalino con potencia nominal de 580 W [57]. Este módulo tiene las características técnicas que se muestran en la *Tabla 20*.

Módulo TrinaSolar 580W	
Potencia máxima P_{max} (W)	580
Tensión en máxima potencia V_{mp} (VDC)	39
Corriente en máxima potencia I_{mp} (ADC)	14,86
Tensión en circuito abierto V_{oc} (VDC)	46,3
Corriente en cortocircuito I_{sc} (ADC)	15,94
Eficiencia	21,5

Tabla 20. Características módulo TrinaSolar 580 W [57].

Por lo tanto, el número de módulos que se necesitan para conseguir la potencia esta dado por la ecuación (2.8).

$$N_p \cdot N_s \geq \frac{PG_{min}}{P_{max}} = \frac{1120,995 \text{ W}}{580 \text{ W}} = 1,93 \quad (2.8)$$

El número de módulos fotovoltaicos debe ser igual a 2.

Los Controladores de Carga MPPT e Inversores son responsables de gestionar la carga de las baterías y la conversión de la DC generada por los paneles en AC para su uso en dispositivos eléctricos. Deben seleccionarse adecuadamente para garantizar una operación eficiente y segura del sistema. El controlador de carga a usar es un MPPT, debido al seguimiento del punto de máxima potencia que hace, lo cual permite aprovechar al máximo la potencia generada del sistema. Para el cálculo del controlador de carga, se calcula la corriente de cortocircuito I_{SC} y la tensión de circuito abierto V_{OC} del sistema de paneles solares.

Los módulos se conectan serie, por lo cual $N_s = 2$ y $N_p = 1$, es decir, que la V_{OC} es igual a como se muestra en la ecuación (2.9).

$$V_{OC} = 2 \times 46,3 \text{ VDC} = 92,6 \text{ VDC} \quad (2.9)$$

La corriente mantiene su valor debido a que los módulos se conectan en serie. La corriente del regulador debe soportar I_{SC} multiplicada por un factor de seguridad igual a 1,25, según la ecuación (2.10).

$$I_{reg} = 15,94 \text{ A} \times 1,25 = 19,92 \text{ A} \quad (2.10)$$

El controlador escogido para este proyecto es SmartSolar MPPT 150/45 Victron Energy, cuyas características se presentan en la *Tabla 21*. Este soporta un máximo de 150 VDC de tensión de circuito abierto de los módulos fotovoltaicos, que para este caso es de 92,6 VDC, la máxima corriente de corto circuito del controlador es de 45 A, la de los módulos es de 19,92 A y por último, la potencia máxima de entrada es igual a 2,6 kW (con una tensión nominal de carga de 48 VDC) y la de los módulos es igual a 1,16 kW [58].

SmartSolar MPPT 150/45-Tr Victron Energy	
Tensión de la batería	12 VDC - 48 VDC
Corriente de carga nominal	45 A
Potencia FV nominal	650 W (12 VDC)
	1300 W (24 VDC)
	1950 W (36 VDC)
	2600 W (48 VDC)

Tabla 21. Características SmartSolar MPPT 150/45-Tr Victron [58].

El dimensionamiento del inversor básicamente se realiza teniendo en cuenta las siguientes variables: tensión nominal de la instalación en DC, la cual para este proyecto y con respecto al banco de baterías escogido es $V_n = 48 \text{ VDC}$, tipo de aplicación dependiendo del uso final

de la carga, que para este caso sería monofásica. La potencia del inversor en AC, se calcula de acuerdo con la ecuación (2.11).

$$P_{inv} = 1,25 \times \sum_{i=1}^n P_i = 1,25 \times 120W = 150W \quad (2.11)$$

Por lo tanto, se propone el uso de un inversor Phoenix Inverter 48/375 120V VE.Direct NEMA 5-15R Victron Energy [59] con las características presentadas en la *Tabla 22*.

Phoenix Inverter 48/375 120V VE.Direct NEMA 5-15R Victron Energy	
Potencia	375 VA
Pico de potencia	70 W
Tensión de salida	Programable entre 120 VAC y 230 VAC.
Frecuencia de funcionamiento	50 Hz - 60 Hz

Tabla 22. Características Phoenix Inverter 48/375 120V VE.Direct NEMA 5-15R Victron Energy [59].

Las baterías son esenciales en un sistema off-grid para almacenar la energía generada durante el día y utilizarla durante la noche o en días nublados. Se debe calcular la capacidad de almacenamiento necesaria para satisfacer la demanda energética durante los períodos sin sol. Para esto se debe escoger la autonomía que se requiere y que para este proyecto se proyecta en 2 días ya que es posible que se tenga un día o dos de poca irradiancia debido a lluvias, por otro lado, se escoge la tensión de batería de 48 VDC, como procede:

$$\text{consumo diario} = 2185,941 \text{ Wh}$$

La capacidad de baterías se dimensiona para el voltaje de trabajo de los paneles solares, de tal forma que proporcionen al menos 2 días de autonomía de la instalación, además considerando una capacidad de descarga para baterías de litio del 90 %. Luego se determina la profundidad de descarga que se requiere para la instalación que es muy importante ya que determina la vida útil de las baterías.

$$\text{Profundidad de desarga (DoD)} = 90 \% \Rightarrow 0,9P.U$$

A continuación, se calcula la capacidad total de las baterías con la ecuación (2.12) y (2.13).

$$\text{Capacidad - total - baterías} = \frac{1,2 \times E_T \times A}{V_n \times DoD} \quad (2.12)$$

Donde:

E_T es el consumo de energía diario en kWh

A días de autonomía de la instalación capaces de satisfacer el consumo de electricidad en condiciones completamente desfavorables

V_N Voltaje nominal del banco de baterías

DoD Profundidad máxima de descarga

$$C_{n48V} = \frac{1,2 \times 2185,941 \text{ Wh} \times 2 \text{ dias}}{48 \text{ V} \times 0,95} = 115,0495 \text{ Ah} \quad (2.13)$$

Por consiguiente, las baterías escogidas para este proyecto serán de la referencia Batería de Ion Litio (LiFePo₄) 48V 4,8 kWh (100 Ah) 6000 ciclos Pylontech [60], con las siguientes características que se muestran en la *Tabla 23*.

Batería de Ion litio 48V 4,8kWh(100Ah) 6000 ciclos Pylontech	
Tensión nominal	48 VDC
Ciclos de vida	> 4500
Dimensiones (Length + Width + Height)	44,2 x 42 x 16,1 cm
Peso	39,7 kg
Temperatura de trabajo	0°C - 50°C

Tabla 23. Características Batería de Ion litio 48V 4,8Kwh(100Ah) 6000 ciclos Pylontech [60].

En este caso la cantidad de baterías necesarias serán 2 unidades y se conectarán en serie para el arreglo final.

De acuerdo con el dimensionamiento del SFV presentado en el apartado anterior, en la *Figura 13* se presenta el esquemático de la solución propuesta para la implementación del sistema de alimentación autónomo.

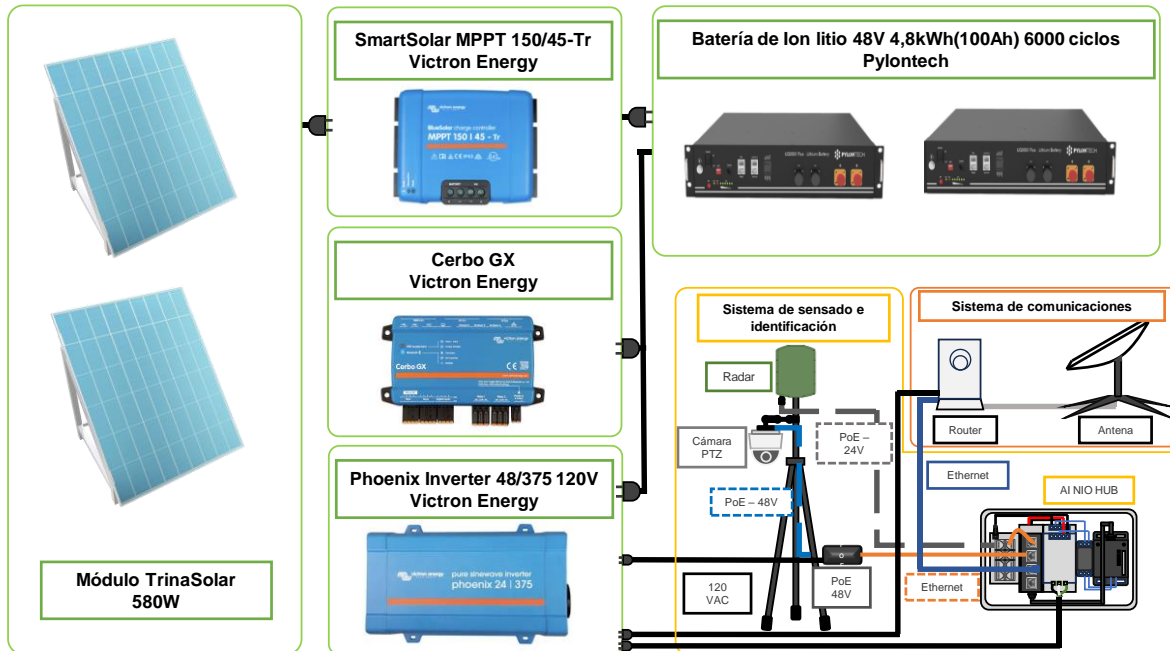


Figura 13. Arquitectura SFV.

2.3. Integración de tecnologías para el prototipo del sistema de monitoreo

En la *Figura 14*, se muestra un diagrama esquemático del prototipo de monitoreo remoto propuesto, que surge de la etapa de diseño detallada previamente presentada. En esta figura, se detallan las conexiones entre los distintos módulos del sistema destinado a la protección de territorios PIA en el PNNRP.

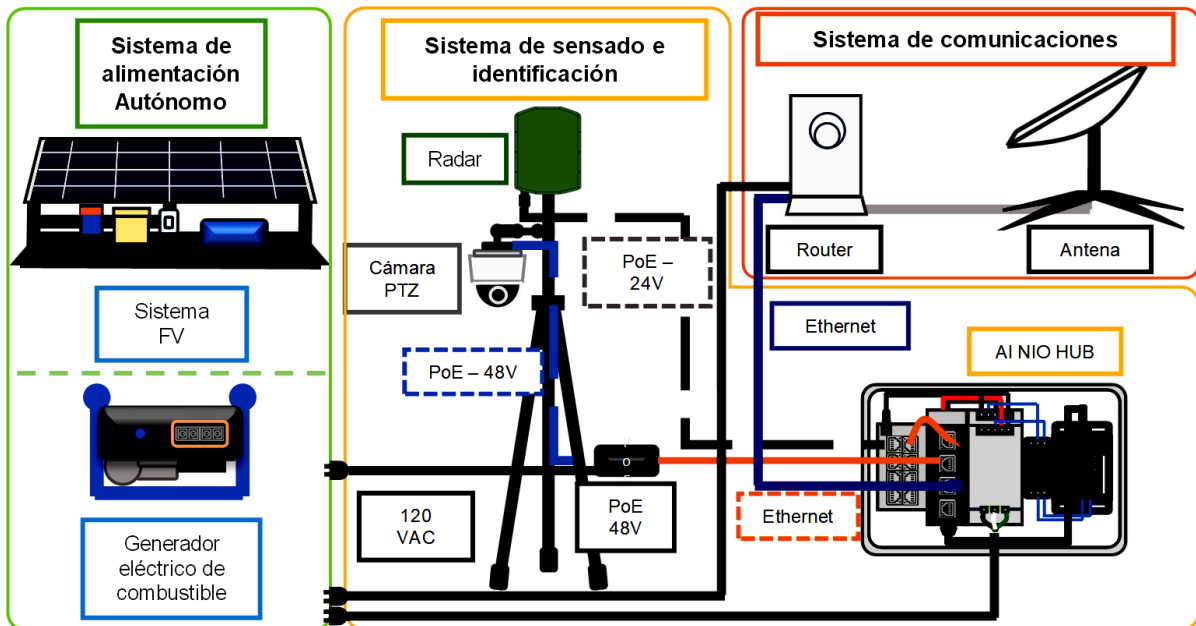


Figura 14. Diagrama esquemático general del prototipo de monitoreo remoto para la protección de territorios de PIA en el PNNRP.

A continuación, se expone la arquitectura del sistema implementado en tres escenarios de prueba. El primero de ellos, destinado a caracterizar el dispositivo (escenario de prueba 1, mientras que los escenarios 2 y 3 están diseñados para simular las condiciones específicas del noroeste amazónico colombiano.

Escenario de pruebas 1 – Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá: En este entorno, se llevaron a cabo pruebas del prototipo, tal como se ilustra en la Figura 15.

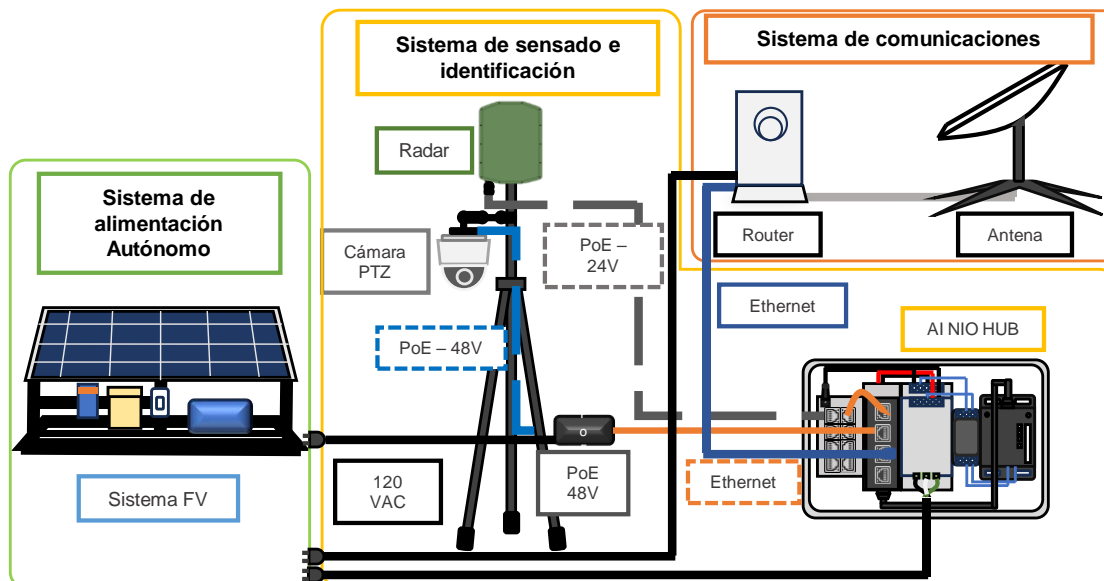


Figura 15. Prototipo de prueba Escenario de pruebas 1 – Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá.

Escenario de Pruebas 2 en la Cabaña PNNA – Río Amacayacu - diciembre de 2022:

Durante esta fase, se llevaron a cabo pruebas del prototipo, como se muestra en la Figura 16. Es importante destacar que, en este caso, se utilizaron pruebas con un generador eléctrico de combustible, dado que no se disponía de acceso al SFV. Asimismo, en este momento no se contaba aún con el sistema de comunicaciones Starlink.

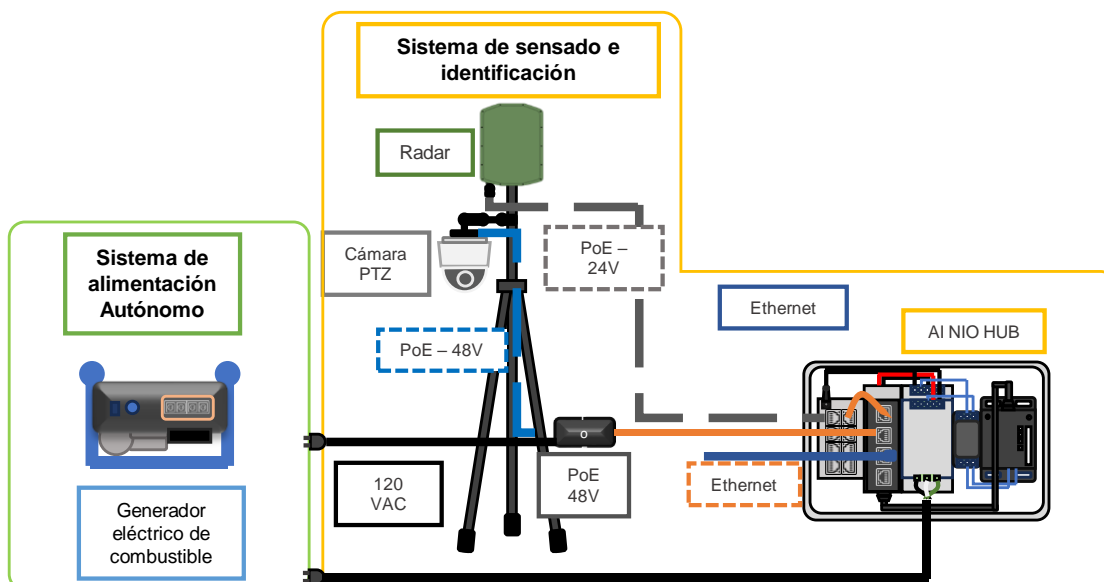


Figura 16. Prototipo de prueba Escenario de Pruebas 2 en la Cabaña PNNA – Río Amacayacu - diciembre de 2022.

Escenario de pruebas 3 en la Cabaña del PNNA – Río Matamatá -mayo de 2023: En este escenario, se llevaron a cabo pruebas con el prototipo, tal como se muestra en la *Figura 17*. Al igual que en las pruebas realizadas en el escenario 2, se utilizó un generador eléctrico de combustible en lugar del SFV. Es importante destacar que, para esta prueba, ya se disponía del sistema de comunicación Starlink.

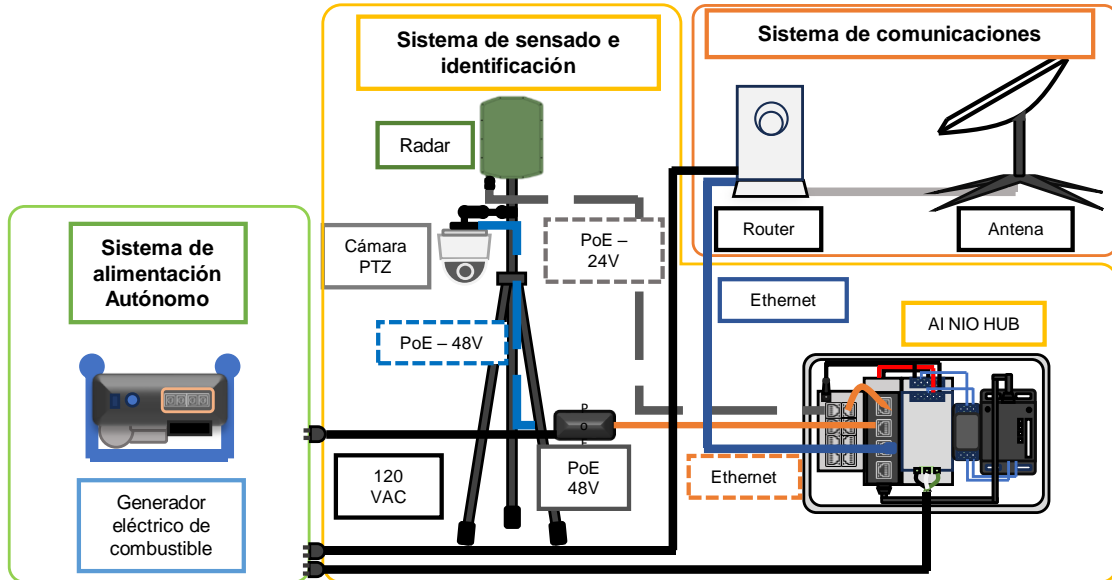


Figura 17. Prototipo de prueba Escenario de pruebas 3 en la Cabaña del PNNA – Río Matamatá -mayo de 2023.

Capítulo 3. Resultados y Análisis de las pruebas realizadas con el prototipo

Una vez terminada la etapa de definición de los diferentes subsistemas que conforman el prototipo y su integración se procedió a definir varios escenarios de pruebas. En esta sección se presentan los resultados y el análisis de los datos obtenidos para 3 escenarios de pruebas. Uno en la Universidad Nacional de Colombia y dos en el Parque Nacional Natural Amacayacu. Estas pruebas se describen en detalle a continuación.

3.1. Escenario de pruebas 1 – Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá

Para esta prueba, se seleccionaron carros (vehículos medianos), motos, bicicletas (vehículos pequeños) y personas como los objetivos de interés para el entrenamiento de la inteligencia artificial del radar. Con este propósito, el radar se ubicó en el anillo vial dentro del campus de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, en las siguientes coordenadas: 4,639545 ° de latitud y -74,082065 ° de longitud, con una elevación de 2576,7 m sobre el nivel del mar, como se presenta en la *Figura 18*. Se estableció un ángulo de rumbo de 131 ° con respecto al Norte y un ángulo de paso de -0,75 °, manteniendo la horizontalidad del dispositivo.



Figura 18. Escenario de pruebas 1 - Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá.

La zona de interés se definió específicamente sobre la calzada vehicular, la cual tiene una anchura de 5,5 m. Junto a esta calzada, se encuentra un carril de bicicletas de 2 m de ancho y un paso peatonal de 2,5 m de ancho. La distancia máxima desde el radar hasta la zona de detección es de aproximadamente 176,88 m, lo que resulta en un área total de detección de 2433,9 m².

Durante el desarrollo de la prueba, las condiciones climáticas fueron variadas e intermitentes, incluyendo momentos de nubosidad, sol y precipitaciones ocasionales. En promedio, la temperatura registrada fue de 12 °C, y la humedad media alcanzó el 88 %.

En la *Figura 19*, se presenta una imagen del sistema de radar Spotter CK-5, utilizado para este set de pruebas.

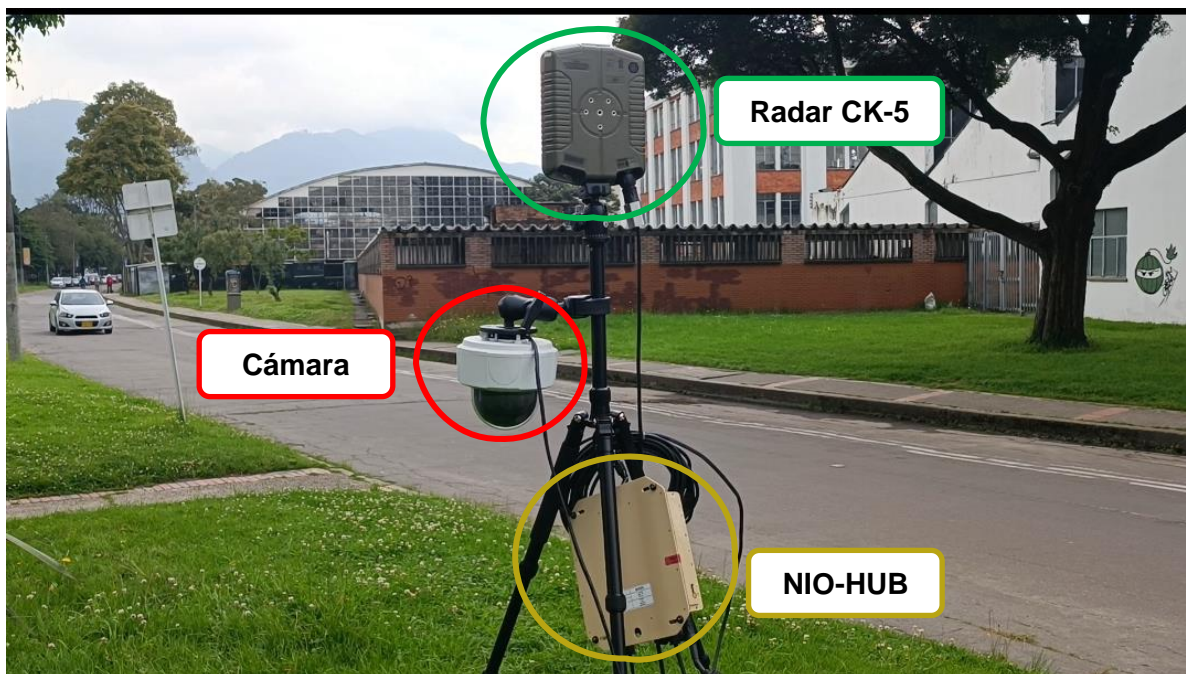


Figura 19. Montaje radar CK-5, cámara PTZ y NIO HUB, para el escenario de pruebas 1- Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá.

En la *Figura 20*, se muestra la interfaz gráfica del sistema de detección. El mapa satelital presenta la ubicación de los radares, junto con el área de detección de cada radar, representada con su azimut y directrices correspondientes. Se visualizan múltiples blancos detectados, cada uno acompañado de su respectiva imagen de clasificación. Además, se indica con un haz la dirección hacia la cual está apuntando la cámara. En la zona sombreada en rojo se destaca nuestra zona de interés previamente mencionada. En la esquina superior izquierda de la interfaz, se muestra una imagen en vivo de la cámara, mientras que debajo de ella se encuentra el historial de objetivos detectados junto con la información relevante de cada detección. Es en esta sección donde se lleva a cabo la confirmación visual de cada objetivo detectado, lo que contribuye al entrenamiento de la inteligencia artificial.

Para esta prueba, se realizó un entrenamiento de la inteligencia artificial corto, donde se tomaron 100 muestras con tres tipos de objetivos: personas, vehículos medianos y vehículos pequeños (motocicletas y bicicletas). Se lograron confirmar un total de 60 detecciones, con 20 detecciones por cada tipo de objetivo. Este sistema de detección proporciona una herramienta valiosa para la clasificación y seguimiento de objetivos en tiempo real, lo que contribuye significativamente a la eficiencia y precisión de las tareas de monitoreo y protección.

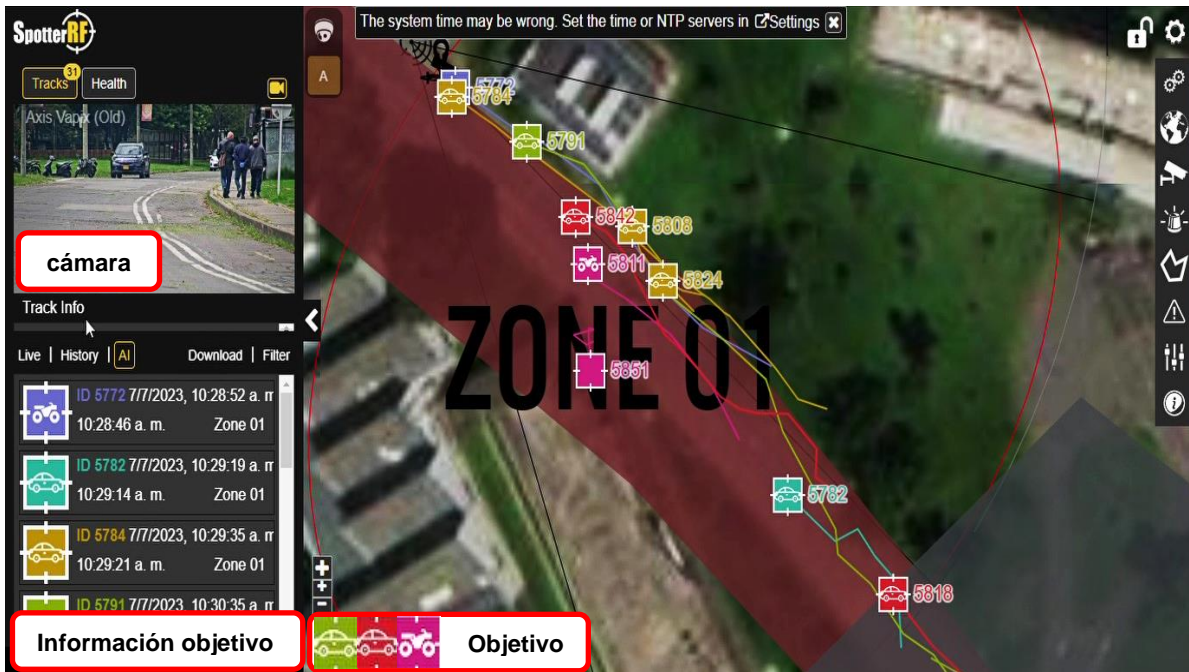


Figura 20. Interfaz gráfica sistema de radar CK-5 escenario de prueba 1 - Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá.

En el siguiente link se comparte un video del montaje del prototipo en el escenario de pruebas 1 [Montaje prototipo Escenario 1](#). Además, se comparte registro fotográfico adicional de las pruebas realizadas en el siguiente enlace [Registro fotográfico pruebas Escenario 1](#).

En la Figura 21, se muestra el porcentaje del número de detecciones por tipo de objetivo en la prueba con el entrenamiento de IA. Se realizó un muestreo de 100 detecciones, de las cuales el 24 % corresponden a personas detectadas (24 personas), el 47 % a vehículos medianos (47 vehículos medianos), el 21 % a vehículos pequeños (21 vehículos pequeños), y se presentó un 8 % de detecciones erróneas (8 objetivos), que se refieren a casos en los que el sistema de radar no pudo clasificar el objetivo dentro de la categoría correspondiente. Por lo tanto, se puede concluir que después del corto entrenamiento de la IA del sistema de radar, esta prueba logró una clasificación de objetivos con un porcentaje de aciertos del 92 % y un porcentaje de errores del 8 %.

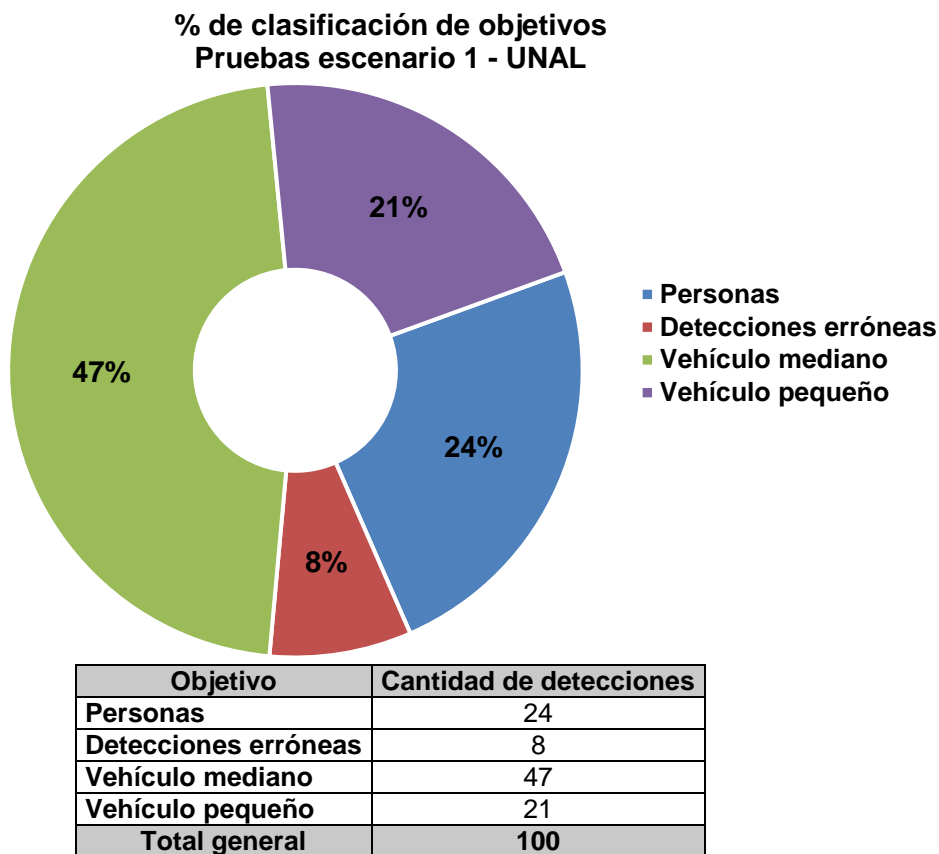
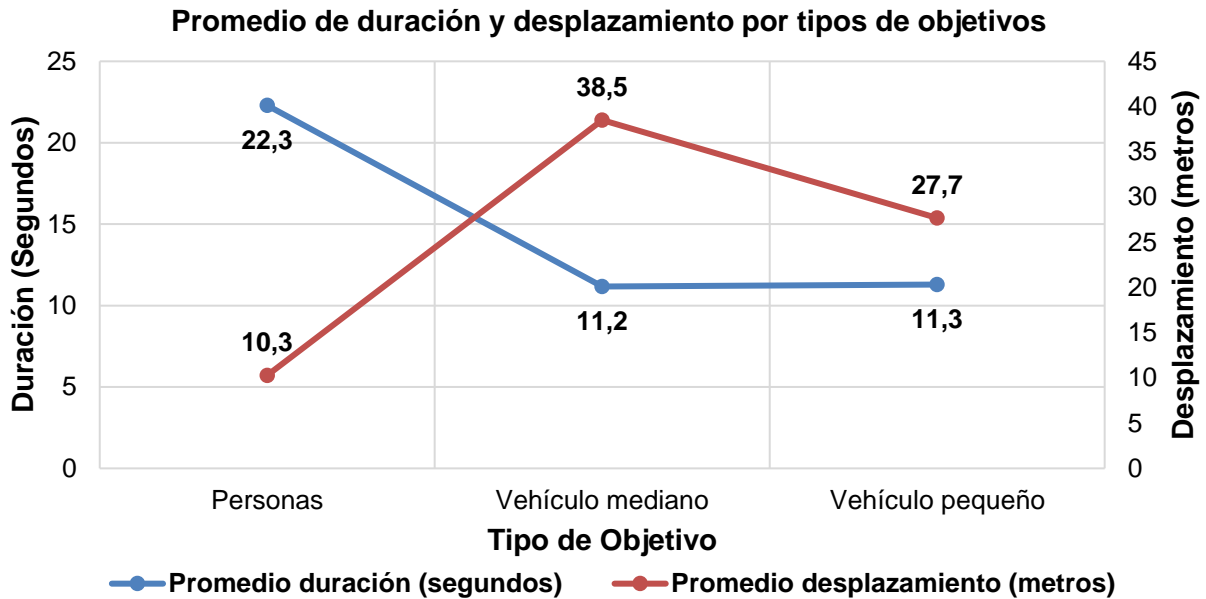


Figura 21. Porcentaje de clasificación de objetivos escenario de pruebas 1.

En la *Figura 22*, se presenta el promedio de desplazamiento en metros de los objetivos detectados por el radar, en función del tiempo en segundos que estos objetivos permanecen dentro del alcance del radar. Esta información es esencial para el sistema de seguimiento del radar, permitiendo trazar la ruta de los objetos detectados mientras se encuentran bajo su cobertura. Durante la prueba, se obtuvieron los siguientes resultados: las 24 personas detectadas, en promedio se desplazaron 10,3 m dentro del rango del radar, con un tiempo promedio de desplazamiento de alrededor de 22,3 s. Para los 21 vehículos pequeños detectados, el promedio de desplazamiento fue de 27,7 m en un tiempo aproximado de 11,3 s. En el caso de los 47 vehículos medianos detectados, el promedio de desplazamiento fue de 38,5 m en unos 11,2 s mientras permanecían dentro del rango del radar. Estos resultados ofrecen una visión clara del comportamiento de los objetivos detectados y su velocidad de movimiento mientras son monitoreados por el radar.



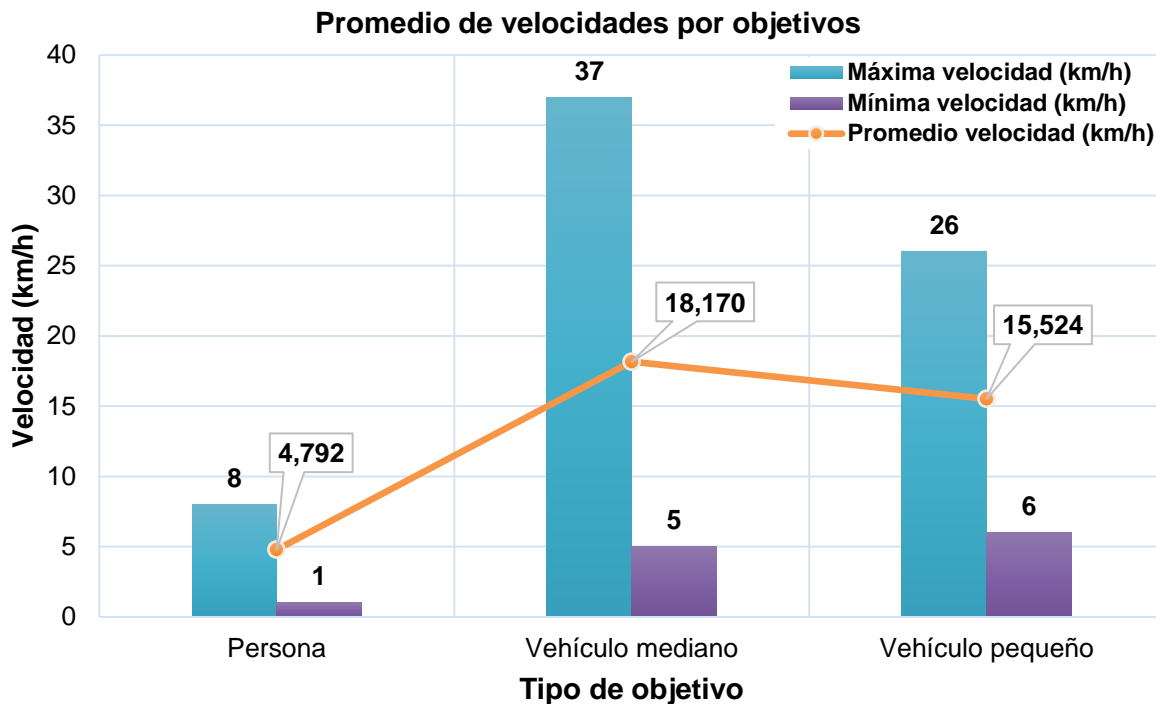
Etiquetas de fila	Promedio duración (segundos)	Promedio desplazamiento (metros)
Personas	22,292	10,290
Vehículo mediano	11,170	38,502
Vehículo pequeño	11,286	27,690
Total general	14,098	28,674

Figura 22. Promedio de duración y desplazamiento por tipos de objetivos escenario de pruebas 1.

A continuación, en la *Figura 23*, se presentan las velocidades mínima, máxima y media para cada tipo de objetivo. En el caso de las personas, la velocidad máxima registrada por el radar fue de 8 km/h, mientras que la mínima fue de 1 km/h. La velocidad promedio de las 24 personas detectadas fue de 4,79 km/h. Para el caso de los vehículos pequeños la velocidad máxima registrada por el radar fue de 26 km/h, mientras que la mínima fue de 6 km/h. La velocidad promedio de los 21 vehículos pequeños detectados fue de 15.52 km/h.

En cuanto a los vehículos medianos, se registró una velocidad máxima de 37 km/h y una mínima de 5 km/h, con una velocidad promedio de 18,17 km/h para los 47 vehículos medianos detectados.

En conclusión, y como era de esperarse, se puede afirmar que los objetivos que se desplazan a mayor velocidad son los vehículos medianos, seguidos de los vehículos pequeños y, por último, las personas.



Objetivo	Promedio velocidad (km/h)	Máxima velocidad (km/h)	Mínima velocidad (km/h)
Persona	4,792	8	1
Vehículo mediano	18,170	37	5
Vehículo pequeño	15,524	26	6
Total general	14,076	37	1

Figura 23. Promedio de velocidades, velocidades máximas y mínimas por objetivos en el escenario de pruebas 1.

En la *Figura 24 (a), (b), (c), (d)* se muestra un ejemplo de las imágenes enviadas a través de un correo electrónico enviado por el sistema SMTP activado con el sistema de radar. El sistema envía por correo fotos de cada objetivo detectado, de acuerdo con las especificaciones configuradas, y datos tales como ID del objetivo (track), duración, latitud, longitud, enlace de posición en un área de mapa, ángulo de rumbo y velocidad. Para esta prueba, se definió un seguimiento activo por cámara para cualquier tipo de objetivo que entrara en la zona de interés. Para este caso la información recibida en el correo fue Track ID: 5690, Duración: 24 s, Latitud: 4,6385, Longitud: -74,0811, Rumbo: 126.6 °, Velocidad: 34.9 km/h.

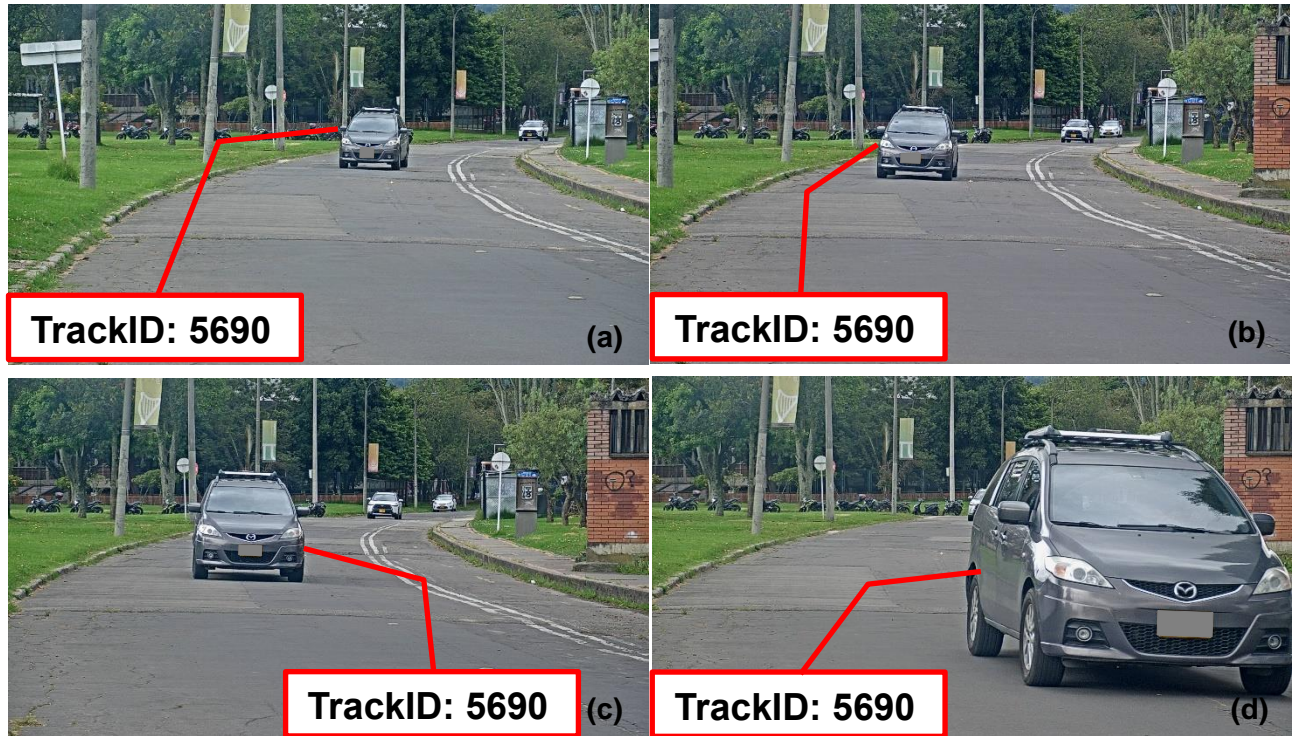


Figura 24. Ejemplo fotografías de seguimiento Track ID:5690 mediante email usando el protocolo SMTP escenario de pruebas 1.

3.1.1. Pruebas Starlink vs VSAT - Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá

Para el caso de las pruebas en el Campus de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá, se contaba con el sistema de comunicaciones satelitales tipo Starlink y un sistema VSAT como se presenta en la *Figura 25*.



Figura 25. Comparación antenas Starlink vs VSAT.

A través de la herramienta Speedtest, que es una herramienta en línea utilizada para medir y evaluar la velocidad de conexión a Internet. A través de esta herramienta, se obtienen tres métricas clave que ayudan a comprender el rendimiento de una conexión a Internet:

- **Velocidad de Descarga (Download Speed):** La velocidad de descarga se refiere a la velocidad a la que los datos fluyen desde Internet a tu dispositivo. Se mide en Mbps o Kbps, dependiendo de la velocidad de la conexión. Cuanto mayor sea el número de Mbps o Kbps, más rápido se puede descargar información.
- **Velocidad de Subida (Upload Speed):** La velocidad de subida se refiere a la velocidad a la que los datos se transfieren desde un dispositivo a Internet. Al igual que la velocidad de descarga, se mide en Mbps o Kbps. Una velocidad de subida más rápida es útil si es necesario cargar archivos a la nube o transmitir en vivo contenido a través de Internet.
- **Latencia (Ping):** La latencia, medida en milisegundos (ms), representa el tiempo que tarda un paquete de datos en viajar desde un dispositivo hasta un servidor y regresar. Cuanto menor sea la latencia, más rápida será la respuesta de la red. Una baja latencia es esencial para aplicaciones en tiempo real.

se llevaron a cabo pruebas para medir las velocidades de descarga y subida de datos, además de evaluar la latencia de cada uno de los sistemas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos como parte de este proceso de evaluación de rendimiento. Estos resultados son esenciales para comprender y comparar el desempeño de los sistemas en cuestión.

Para el caso del enlace satelital tipo VSAT, se midió una velocidad de subida de 0,22 Mbps y una velocidad de bajada de 0,39 Mbps, con una latencia de 593 ms. Como se observa en la *Figura 26*.



Figura 26. Velocidad de descarga, velocidad de subida y latencia del sistema VSAT.

En la *Figura 27*, se presenta las mediciones realizadas en el sistema de Starlink, donde se midió una velocidad de subida de 16,99 Mbps y una velocidad de bajada de 209,16 Mbps, con una latencia de 105 ms.



Figura 27. Velocidad de descarga, velocidad de subida y latencia del sistema Starlink.

En la Figura 28 que sigue se presenta la interfaz de usuario del sistema Starlink. En dicha interfaz, se puede apreciar el historial de latencia (latency), donde se detallan los valores máximos (171 ms) y mínimos (17 ms). Además, esta interfaz permite visualizar el uso acumulado del sistema, y en este caso en particular, se muestra que para la descarga (download) se han utilizado hasta 114 Mbps, mientras que para la subida (upload) se alcanzan los 33 Mbps. Por lo tanto, si se utiliza el sistema SMTP, la velocidad de envío estaría limitada a aproximadamente 33 Mbps.

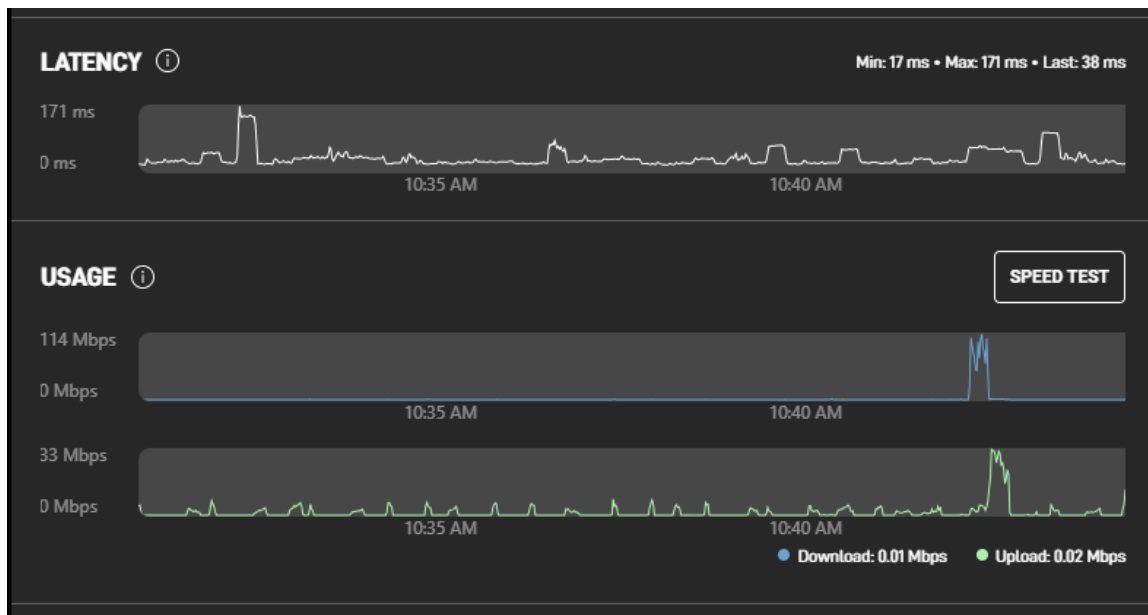


Figura 28. Interfaz de latencia y uso del sistema Starlink.

Además, en la *Figura 29*, se presenta también la interfaz incluida dentro del entorno de Starlink, donde se puede realizar directamente el test de velocidad del sistema. Para esta prueba se obtuvo una velocidad de bajada de 184 Mbps y de 23 Mbps de subida.

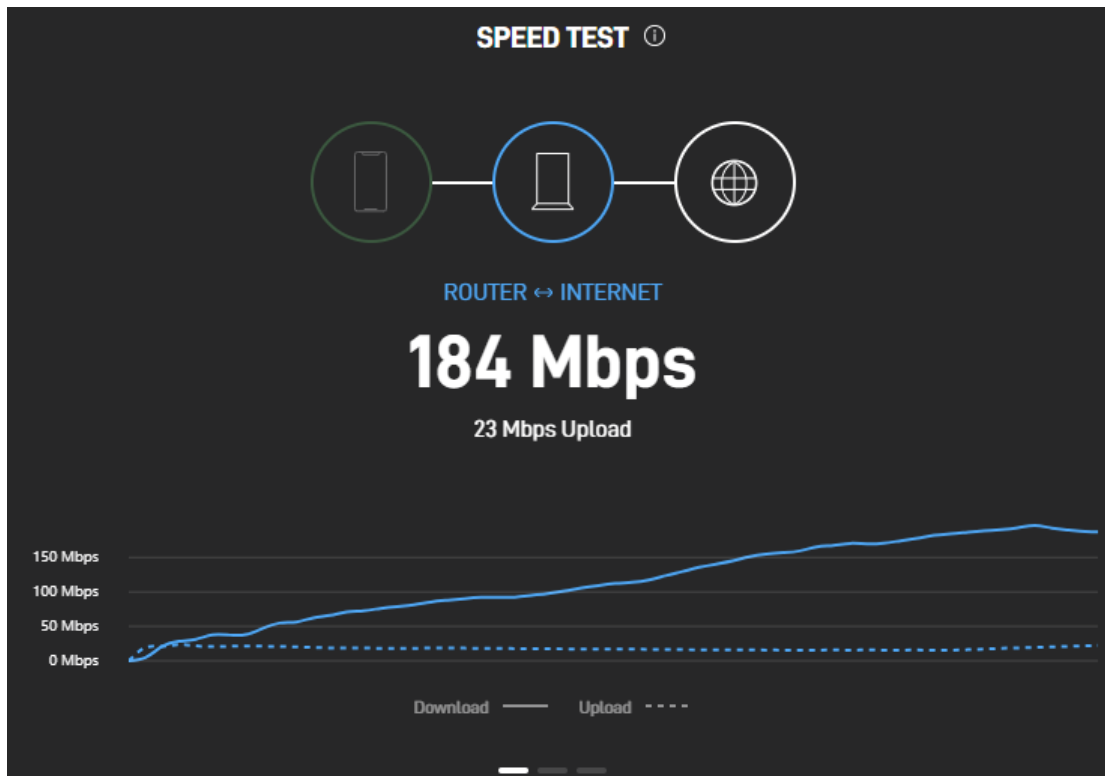


Figura 29. Test de velocidad de bajada y subida del sistema Starlink.

Los resultados de la evaluación de rendimiento de los sistemas de enlace satelital tipo VSAT y Starlink muestran que Starlink tiene un rendimiento significativamente superior al de VSAT.

En términos de velocidad, Starlink ofrece velocidades de subida y bajada de 16,99 Mbps y 209,16 Mbps, respectivamente, en comparación con las velocidades de VSAT de 0,22 Mbps y 0,39 Mbps, respectivamente. Esto significa que Starlink es hasta 100 veces más rápido que VSAT.

En términos de latencia, Starlink tiene una latencia de 105 ms, en comparación con la latencia de VSAT de 593 ms. Esto significa que Starlink tiene una latencia casi seis veces menor que VSAT.

En general, los resultados de la evaluación de rendimiento muestran que Starlink es un sistema de enlace satelital de alto rendimiento que ofrece velocidades y latencias significativamente superiores a las de VSAT.

3.1.2. Pruebas de consumo de energía eléctrica del prototipo - Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá

Se realizó una prueba de consumo de energía eléctrica del prototipo montado como se observa en la *Figura 30*.

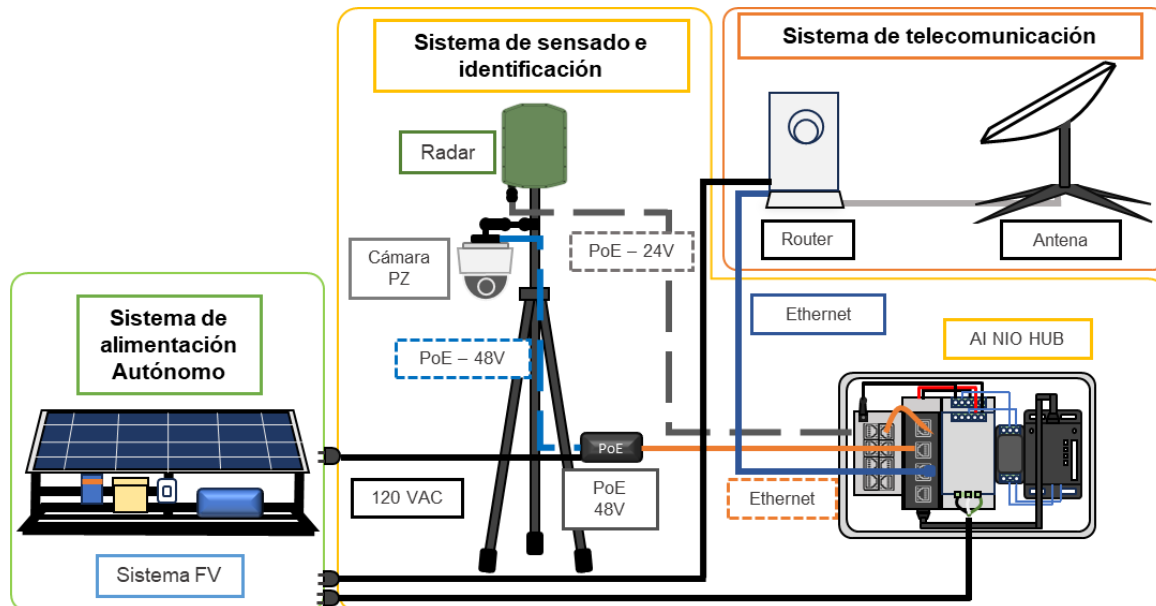


Figura 30. Montaje para prueba de consumo de energía eléctrica prototipo con un SFV.

Donde para esta prueba se utilizó el dispositivo Cerbo GX Victron Energy, es un sistema de gestión de energía (EMS) de Victron Energy que se utiliza para controlar y monitorear sistemas de energía solar fotovoltaico proporcionando información en tiempo real sobre el estado de su sistema de energía, incluyendo el voltaje, la corriente, la potencia, el estado de carga de las baterías y el consumo de energía [61].

Esta prueba se realizó para medir el consumo total de energía eléctrica donde por medio del Cerbo GX, se registró el consumo en W del prototipo funcionando durante un periodo de 12 h continuas. Esto permitirá validar el diseño presentado en la sección 2.2.1 *Diseño del Sistema Fotovoltaico (SFV) off-grid para el prototipo*. En esta prueba se obtuvieron los resultados presentados en la *Figura 31*.

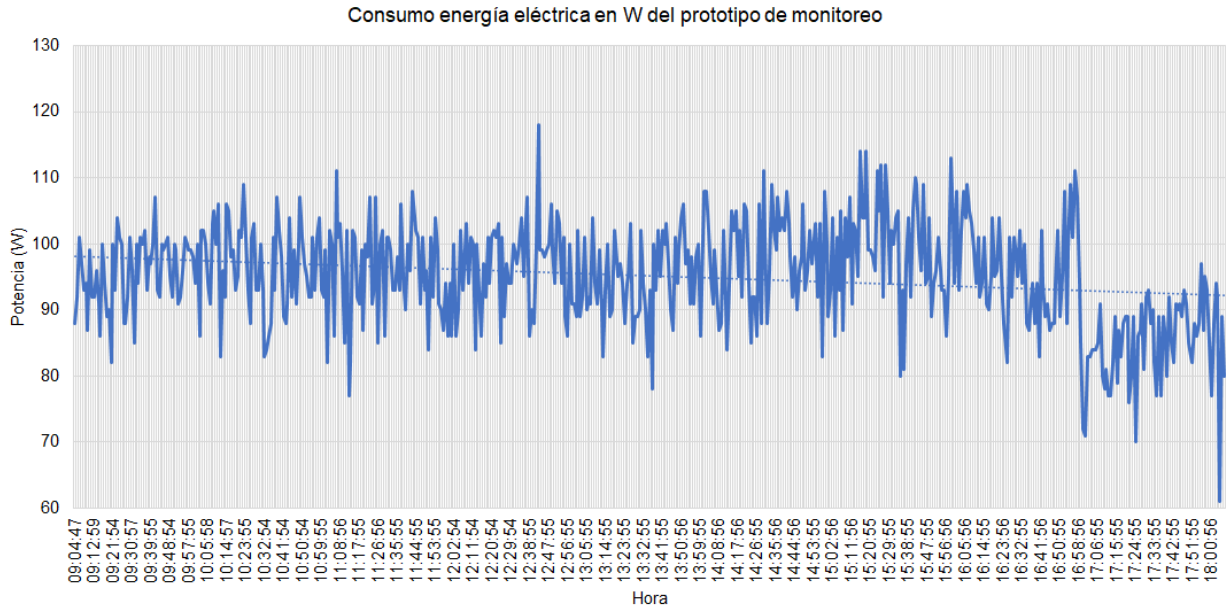


Figura 31. Consumo de energía eléctrica en W del prototipo de monitoreo.

Donde, durante el periodo de la prueba entre las 09:04 y las 18:00, el prototipo presentó un consumo en promedio de 95,14 W y los picos máximos y mínimos de consumo fueron 118 W y 61 W respectivamente.

3.2. Pruebas en el Parque Nacional Natural Amacayacu (PNNA)

Ante la imposibilidad de visitar el PNNRP y como se planteó en el tercer objetivo de este trabajo, se determinó un lugar que permitiera recrear las condiciones de este parque. Por lo tanto, la siguiente prueba de funcionamiento del sistema de radar se realizó en el PNNA, ubicado en la Amazonia colombiana. El parque tiene las características meteorológicas y climatológicas propias de la región, incluyendo una pluviosidad anual promedio de 3375 mm. Los meses de mayor pluviosidad son marzo y mayo, y los de menor pluviosidad son junio y agosto. Las temperaturas máximas oscilan entre los 30 °C y 31.6 °C, y las temperaturas mínimas entre 21.2 °C y 23 °C. La humedad es del 88 %.

Además de estas condiciones, el PNNA también tiene un espeso follaje, cambios climáticos súbitos basados en sol, lluvia y neblina y una dinámica de aguas bajas y altas. Las aguas bajas se producen durante el verano, cuando las cabeceras fluviales se secan. Las aguas altas se producen durante el invierno, cuando los niveles de las cabeceras fluviales aumentan y provocan inundaciones de algunas zonas.

3.2.1. Escenario de Pruebas 2 en la Cabaña PNNA – Río Amacayacu - diciembre de 2022

Estas pruebas se realizaron en diciembre de 2022 (aguas bajas – estación verano) en la siguiente localización: Cabaña PNNA – Río Amacayacu ubicado en las siguientes coordenadas: -3,805484 latitud, -70,305871 longitud como se muestra en la *Figura 32*.



Figura 32. Escenario de pruebas 2. Cabaña PNNA – Río Amacayacu.

En la *Figura 33*, se presenta una imagen del sistema de radar Spotter CK-5, utilizado para este set de pruebas.

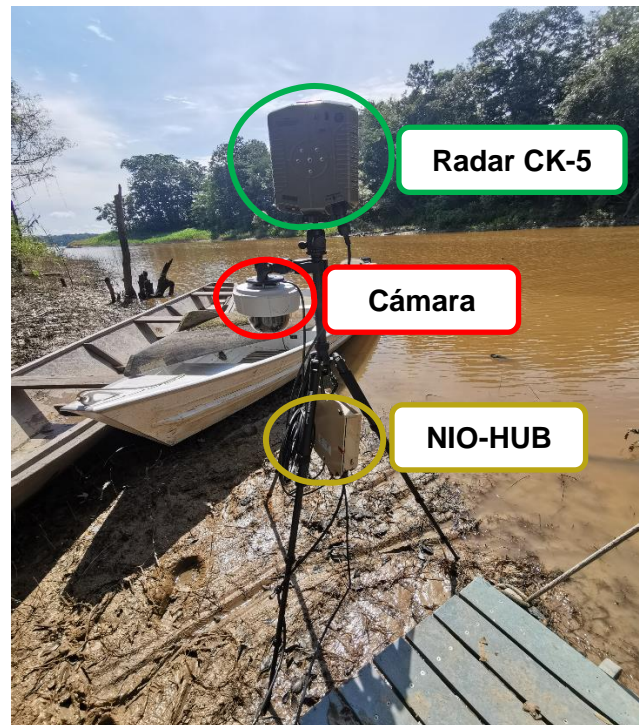


Figura 33. Montaje radar CK-5, cámara PTZ y NIO HUB, para el escenario de pruebas 2.

Durante estas pruebas, el radar fue utilizado para detectar embarcaciones como objetivos. Al igual que en el escenario anterior, en la *Figura 34* se muestra la interfaz gráfica del sistema de detección en las mismas condiciones (área, azimut, directrices, múltiples objetivos, cámara), pero ajustado para este nuevo escenario. En las pruebas realizadas en aguas bajas en diciembre de 2022, se utilizó un radar CK5 situado a nivel del río, en la cabecera del río Amacayacu, como se observa en la *Figura 33*.



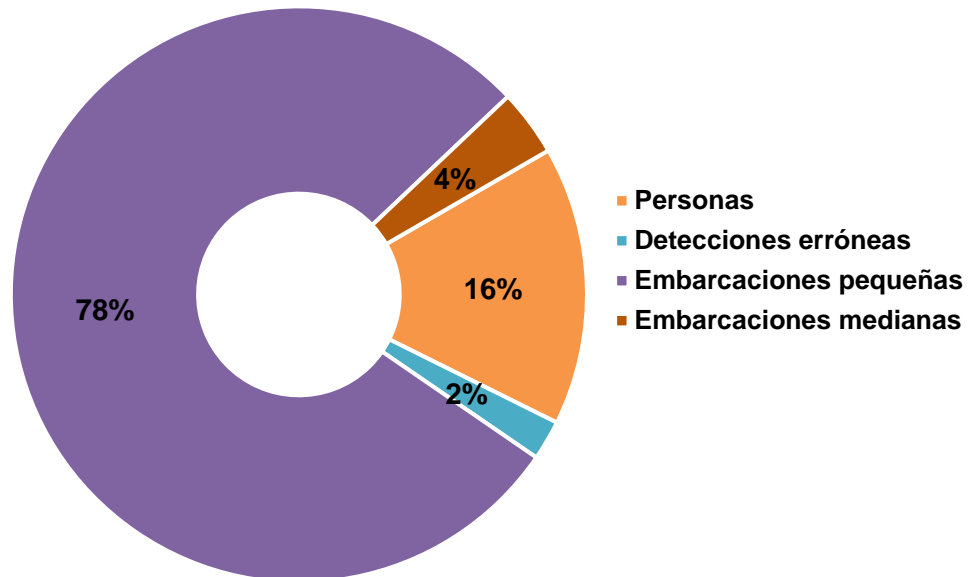
Figura 34. Interfaz gráfica sistema de radar CK-5 escenario de prueba 2.

En el siguiente link se comparte un video del montaje del prototipo en el escenario de pruebas 1 [Montaje prototipo Escenario 2](#). Además, se comparte registro fotográfico adicional de las pruebas realizadas en el siguiente enlace [Registro fotográfico pruebas Escenario 2](#).

Para estas pruebas se siguió el mismo procedimiento de entrenamiento, que consistió en confirmar visualmente cada objetivo detectado para capacitar a la inteligencia artificial. En esta ocasión, se entrenó la inteligencia artificial con 3 tipos de objetivos: personas, embarcaciones medianas (> a 6 m) y embarcaciones pequeñas (< a 6 m). Es importante destacar que se incluyó el objetivo de personas en el entrenamiento, ya que el filtrado de objetivos de la inteligencia artificial requiere disponer de diferentes tipos de objetivos.

Como se observa en la *Figura 35*, se lograron un total de 134 detecciones de objetivos, de los cuales el 16 % corresponden a personas detectadas (21 personas), el 78 % a embarcaciones pequeñas (105 embarcaciones), el 4 % embarcaciones medianas (5 embarcaciones) y se presentó un 2 % de detecciones erróneas (3 objetivos), que se refieren a casos en los que el sistema de radar no pudo clasificar el objetivo dentro de la categoría correspondiente. Por lo tanto, se puede concluir que después del entrenamiento de la AI del sistema de radar, esta prueba logró una clasificación de objetivos con un porcentaje de aciertos del 98 % y un porcentaje de errores del 2 %.

% de clasificación de objetivos
Pruebas escenario 2 - PNNA río Amacayacu



Objetivo	Cantidad de detecciones
Personas	21
Detecciones erróneas	3
Embarcaciones pequeñas	105
Embarcaciones medianas	5
Total general	134

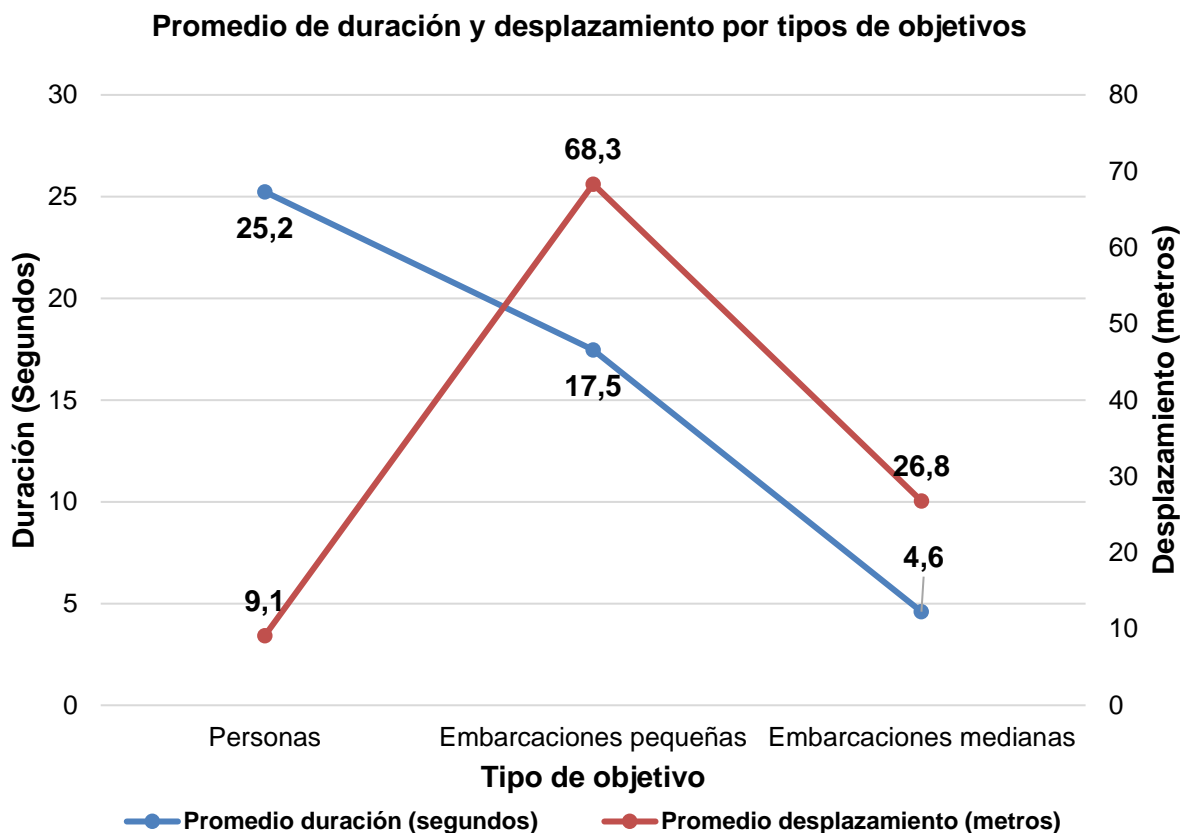
Figura 35. Porcentaje de clasificación de objetivos Pruebas escenario 2.

En la *Figura 36*, se presenta el promedio de desplazamiento en metros de los objetivos detectados por el radar, en relación con el tiempo en segundos que estos objetivos son detectados. Esta información es utilizada por el sistema de radar para realizar un seguimiento preciso de cada objetivo, permitiendo rastrear la trayectoria de los objetos detectados mientras permanecen dentro del alcance del radar.

Durante esta prueba, enfocada principalmente en detectar embarcaciones, se obtuvieron los siguientes resultados: Para las 105 embarcaciones pequeñas detectadas, en promedio se desplazaron 68,3 m dentro del rango del radar, con un tiempo promedio de desplazamiento de alrededor de 17,5 s. Por otro lado, en el caso de las 5 embarcaciones medianas detectadas, se desplazaron en promedio 26,8 m durante aproximadamente 4,6 s mientras permanecían dentro del rango del radar. En cuanto a las personas detectadas, se desplazaron en promedio 25,2 m durante aproximadamente 9,1 s mientras permanecían dentro del rango del radar.

Estos resultados son esenciales para comprender el comportamiento de los objetivos detectados y su velocidad de movimiento a lo largo del tiempo. La precisión y consistencia de esta información son fundamentales para optimizar el seguimiento y monitoreo de embarcaciones y personas en la zona de interés. Estos hallazgos proporcionan una base

sólida para futuros desarrollos y mejoras en el sistema de detección y seguimiento, garantizando así una mayor eficiencia y eficacia en aplicaciones de vigilancia y seguridad.

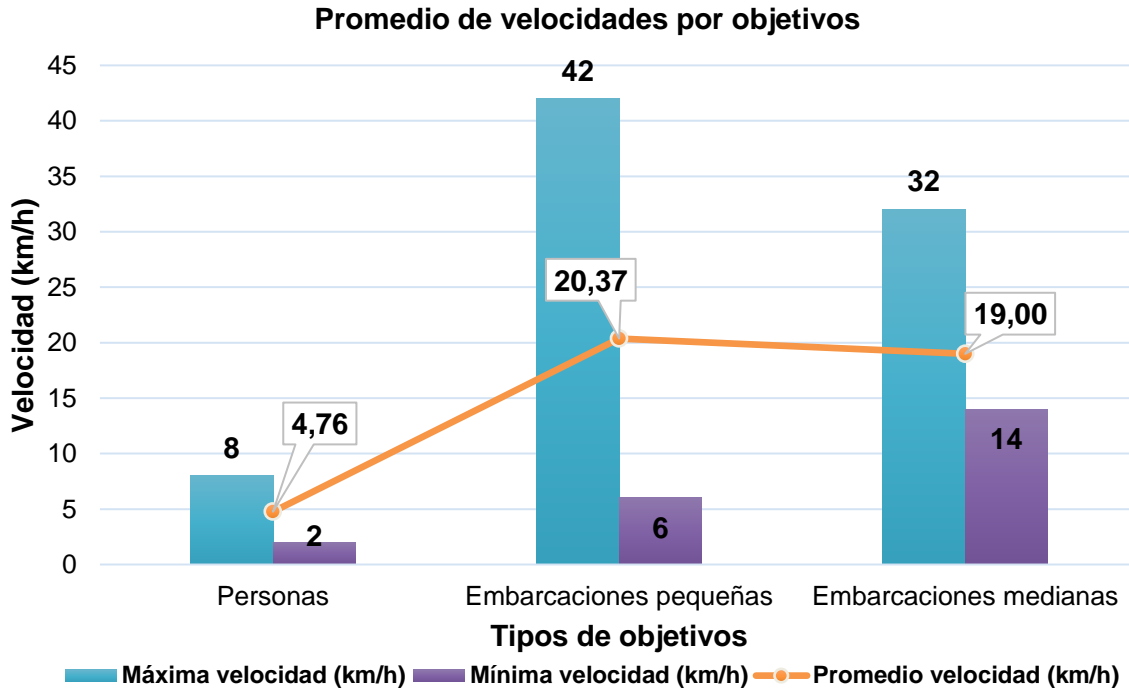


Objetivo	Promedio duración (segundos)	Promedio desplazamiento (metros)
Personas	25,238	9,140
Embarcaciones pequeñas	17,467	68,319
Embarcaciones medianas	4,600	26,768
Total general	18,221	57,247

Figura 36. Promedio de duración y desplazamiento por tipos de objetivos escenario de pruebas 2.

A continuación, en la *Figura 37*, se presentan las velocidades mínima, máxima y media para cada tipo de objetivo. En el caso de las embarcaciones pequeñas, el radar registró una velocidad máxima de 42 km/h, mientras que la mínima fue de 6 km/h. La velocidad promedio de las 105 embarcaciones pequeñas detectados se estableció en 20,37 km/h. Por otro lado, en cuanto a las embarcaciones medianas, se observó una velocidad máxima de 32 km/h y una mínima de 14 km/h, con una velocidad promedio de 19 km/h para las 5 embarcaciones detectadas. Respecto a las personas, la velocidad máxima registrada por el radar fue de 8 km/h, mientras que la mínima fue de 2 km/h. La velocidad promedio de todas las personas detectadas se estimó en 4,76 km/h. Estos datos proporcionan una perspectiva detallada de

las velocidades de movimiento de cada tipo de objetivo en el área de detección del radar. Entender las velocidades mínimas, máximas y promedio es fundamental para evaluar el comportamiento y las dinámicas de los objetos detectados, y contribuye al diseño de estrategias de seguimiento y monitoreo más eficientes.



Objetivo	Promedio velocidad (km/h)	Máxima velocidad (km/h)	Mínima velocidad (km/h)
Personas	4,76	8	2
Embarcaciones pequeñas	20,37	42	6
Embarcaciones medianas	19,00	32	14
Total general	17,82	42	2

Figura 37. Promedio de velocidades, velocidades máximas y mínimas por objetivos en el escenario de pruebas 2.

3.2.2. Escenario de pruebas 3 en la Cabaña del PNNA – Río Matamatá -mayo de 2023

Un tercer conjunto de pruebas se realizó en mayo de 2023 (aguas altas – estación invierno). Dichas pruebas fueron realizadas en las siguientes localizaciones: Cabaña PNNA – Río Matamatá, en las siguientes coordenadas: -3,821594 latitud, -70,260444 longitud, como se muestra en la *Figura 38*.



Figura 38. Escenario de pruebas 3. Cabaña PNNA – Río Matamatá.

En la *Figura 39*, se presenta una imagen del sistema de radar Spotter CK-5, utilizado para este set de pruebas.

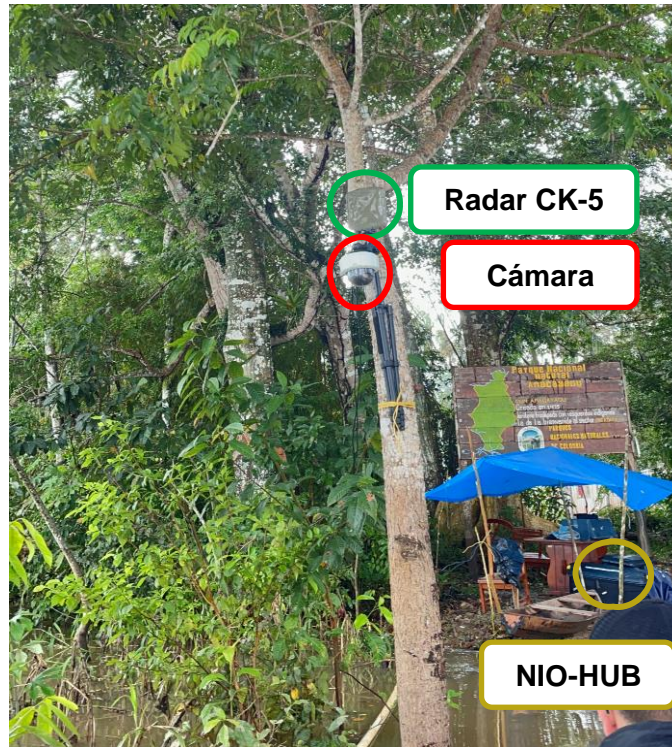


Figura 39. Montaje radar CK-5, cámara PTZ y NIO HUB, para el escenario de pruebas 3.

Durante estas pruebas, el radar fue utilizado para detectar embarcaciones como objetivos. La *Figura 40*, muestra la interfaz gráfica del sistema de detección en las mismas condiciones que el escenario anterior, con la misma área, azimut, directrices, múltiples objetivos y cámara, pero ajustada para este nuevo escenario de detección de embarcaciones. Sin embargo, es importante mencionar que en las pruebas realizadas en aguas altas se contó con dos radares CK5 ubicados a una altura de aproximadamente 3 metros en la cabecera del río Matamatá, como se ve en la *Figura 39*.

Esta configuración y ajuste del radar CK5 permitieron llevar a cabo las pruebas con éxito y obtener valiosos datos sobre la detección de embarcaciones en el entorno acuático. Estas pruebas son fundamentales para evaluar la efectividad y precisión del sistema de detección en diferentes condiciones y escenarios, lo que es crucial para su posterior implementación y aplicación en aplicaciones prácticas de monitoreo y seguridad en áreas acuáticas.

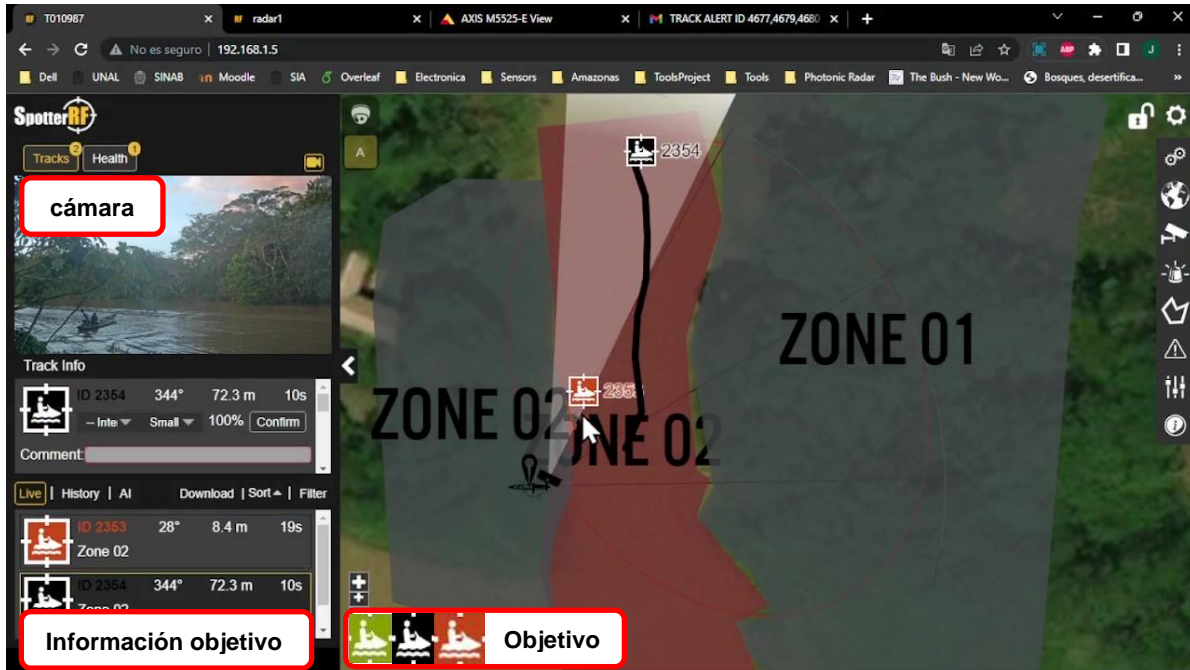


Figura 40. Interfaz gráfica sistema de radar CK-5 escenario de prueba 3.

En el siguiente link se comparte un video del montaje del prototipo en el escenario de pruebas 1 [Montaje prototipo Escenario 3](#). Además, se comparte registro fotográfico adicional de las pruebas realizadas en el siguiente enlace [Registro fotográfico pruebas Escenario 3](#).

El procedimiento de entrenamiento siguió el mismo enfoque que en el escenario 2, donde se confirmó visualmente cada objetivo detectado para capacitar a la inteligencia artificial. En esta ocasión, la inteligencia artificial fue entrenada con tres tipos de objetivos: personas, embarcaciones medianas (mayores a 6 m) y embarcaciones pequeñas (menores a 6 m). La inclusión del objetivo de personas en el entrenamiento fue esencial, ya que la inteligencia artificial necesita ser capaz de identificar diferentes tipos de objetivos para un filtrado más preciso.

Una vez finalizado el entrenamiento del sistema de radar, se llevaron a cabo pruebas en el escenario propuesto: aguas altas con dos radares en funcionamiento. Los resultados generales obtenidos se presentan en la *Figura 41*, donde, se lograron un total de 188 detecciones de objetivos, distribuidas de la siguiente manera: el 20 % corresponden a personas detectadas (38 personas), el 74 % a embarcaciones pequeñas (138 embarcaciones pequeñas), y se registró un 6 % de detecciones erróneas (12 objetivos). Cabe destacar que este último porcentaje representa la tasa de falsas alarmas, que fueron generadas por troncos, enramadas y estelas de agua producidas por el paso de embarcaciones.

Estos resultados indican un rendimiento satisfactorio del sistema de radar en la detección y clasificación de diferentes tipos de objetivos en el escenario de aguas altas. La presencia de falsas alarmas, aunque presente, puede atribuirse a factores naturales y no afecta

significativamente la efectividad general del sistema en su capacidad para detectar y distinguir entre personas y embarcaciones pequeñas en el área de interés. Estos avances en la precisión y eficiencia del sistema son valiosos para mejorar la seguridad y el monitoreo en entornos acuáticos y respaldan su potencial aplicación en aplicaciones prácticas y proyectos futuros.

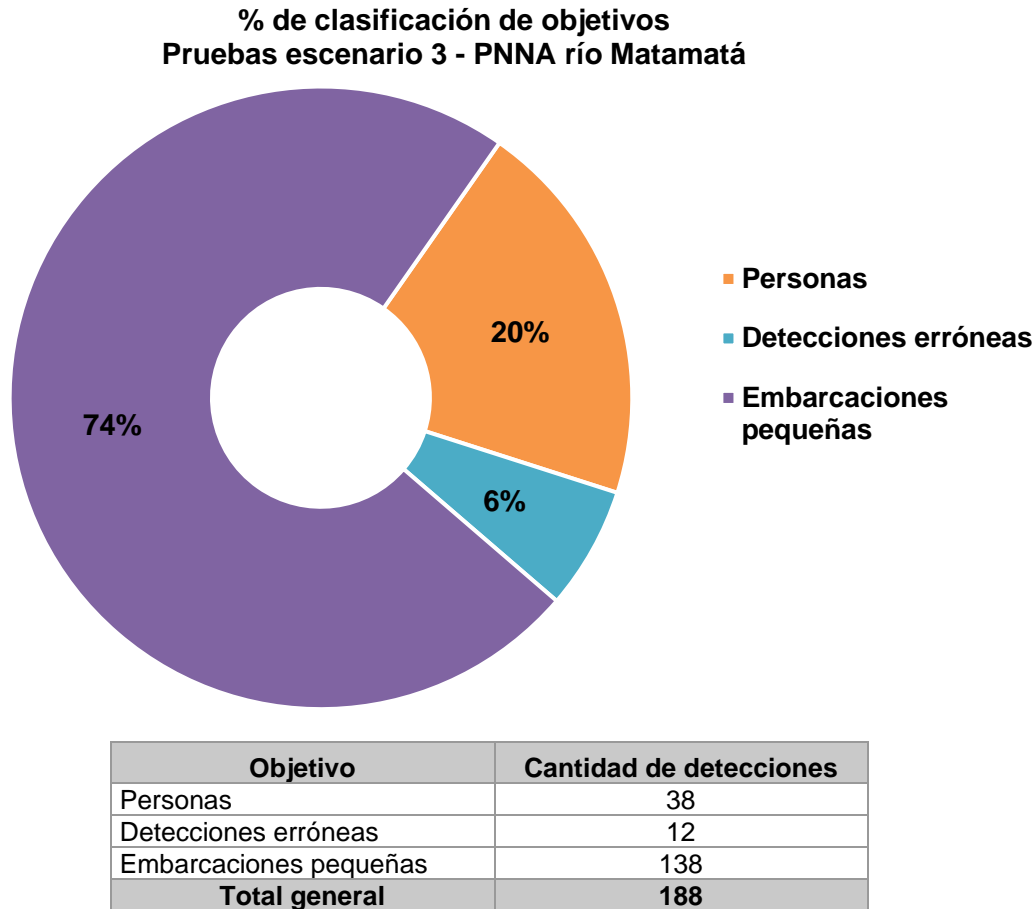
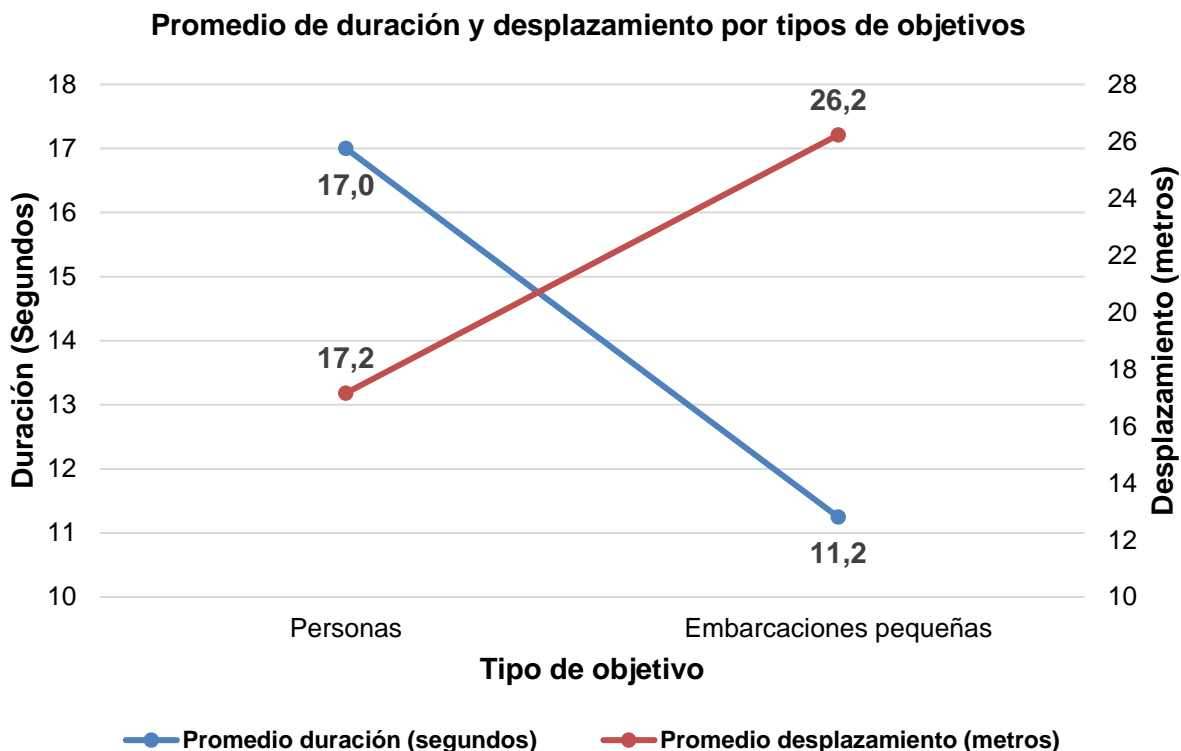


Figura 41. Porcentaje de clasificación de objetivos Pruebas escenario 3.

En la *Figura 42*, se presenta el promedio de desplazamiento en metros de los objetivos detectados por el radar, en relación con el tiempo en segundos que estos objetivos son detectados. Durante esta prueba, centrado principalmente en la detección de embarcaciones, se obtuvieron los siguientes resultados: las 138 embarcaciones pequeñas detectadas, en promedio se desplazaron 26,2 m dentro del rango del radar, con un tiempo promedio de desplazamiento de alrededor de 11,2 s. En cuanto a las personas detectadas, se desplazaron en promedio 17 m durante aproximadamente 17,2 s mientras permanecían dentro del rango del radar.

La evaluación detallada de estos datos es crucial para mejorar el rendimiento y la capacidad de respuesta del radar, asegurando su aplicabilidad en situaciones reales de monitoreo y protección en entornos acuáticos. Estos avances en la precisión y análisis de movimiento

son valiosos para respaldar la toma de decisiones informadas y mejorar la seguridad y el control en áreas acuáticas.



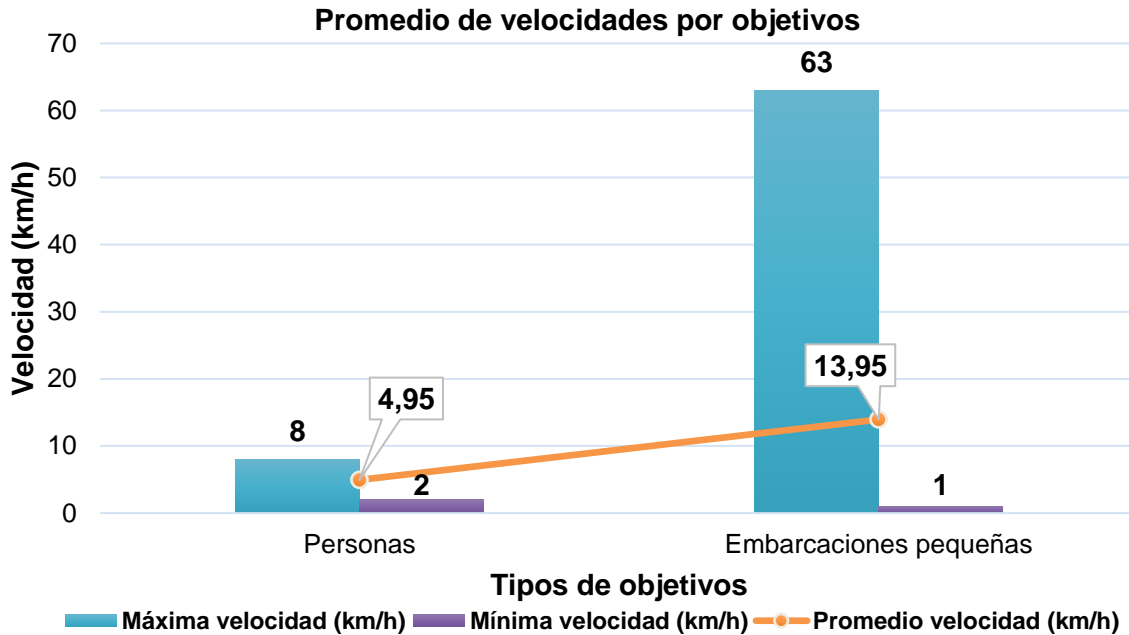
Objetivo	Promedio duración (segundos)	Promedio desplazamiento (metros)
Personas	17,000	17,161
Embarcaciones pequeñas	11,246	26,227
Total general	12,489	24,270

Figura 42. Promedio de duración y desplazamiento por tipos de objetivos escenario de pruebas 3.

A continuación, en la *Figura 43*, se presentan las velocidades mínima, máxima y media para cada tipo de objetivo detectado. En el caso de las embarcaciones pequeñas, el radar registró una velocidad máxima de 63 km/h, mientras que la velocidad mínima fue de 1 km/h. La velocidad promedio de las 138 embarcaciones pequeñas detectados se estableció en 13,95 km/h. En cuanto a las personas, la velocidad máxima registrada por el radar fue de 8 km/h, mientras que la velocidad mínima fue de 2 km/h. La velocidad promedio de todas las personas detectadas se estimó en 4,95 km/h.

Estos datos proporcionan una perspectiva detallada de las velocidades de movimiento de cada tipo de objetivo en el área de detección del radar. La comprensión de las velocidades mínimas, máximas y promedio es fundamental para evaluar el comportamiento y las dinámicas de los objetos detectados, lo que a su vez contribuye al diseño de estrategias más

eficientes para el seguimiento y monitoreo. Estos resultados permiten tener una visión completa de la velocidad de desplazamiento de las embarcaciones y personas detectados.



Objetivo	Promedio velocidad (km/h)	Máxima velocidad (km/h)	Mínima velocidad (km/h)
Personas	4,95	8	2
Embarcaciones pequeñas	13,95	63	1
Total general	12,01	63	1

Figura 43. Promedio de velocidades, velocidades máximas y mínimas por objetivos en el escenario de pruebas 3.

En la Figura 44 (a), (b), (c), (d) se muestra un ejemplo de imágenes recibidas por correo electrónico enviado por el sistema SMTP activado con el sistema de radar.

Para esta prueba, se definió un seguimiento activo por cámara para cualquier tipo de objetivo que ingrese a la zona de interés. En este caso particular, la información recibida en el correo fue la siguiente: Track ID: 727, Duración: 20 segundos, Latitud: -3,8073, Longitud: -70,3069, Rumbo: 293.2 ° y Velocidad: 19,3 km/h.

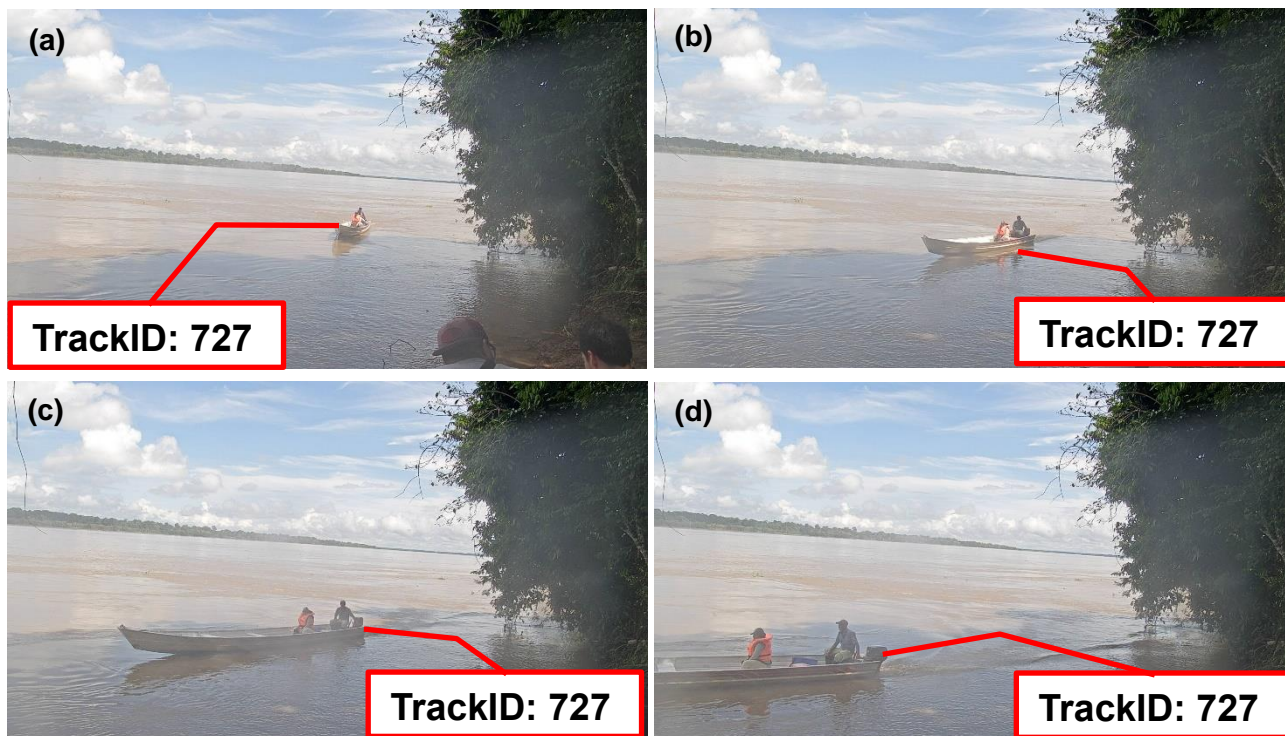


Figura 44. Ejemplo fotografías de seguimiento Track ID:727 mediante email usando el protocolo SMTP escenario de pruebas 3.

Estos datos proporcionados en el correo electrónico son fundamentales para realizar un seguimiento preciso y efectivo de cada objetivo detectado. El envío automático de información detallada, incluyendo las fotos y los datos específicos de cada objetivo, permite a los usuarios obtener una visión clara y rápida de las actividades y movimientos dentro de la zona de interés. Esta capacidad de monitoreo en tiempo real es esencial para aplicaciones de seguridad y control, asegurando una respuesta oportuna ante cualquier situación de interés.

3.2.2.1. Pruebas Starlink - Escenario de pruebas 3 en la Cabaña del PNNA – Río Matamatá -mayo de 2023

Para el caso de las pruebas en el PNNA – Río Matamatá realizadas en mayo de 2023, se contaba con el sistema de comunicaciones satelitales tipo Starlink en campo el cual se usó para la transmisión del sistema de alertas SMTP del prototipo de monitoreo *Figura 45*.



Figura 45. sistema Starlink ubicado en la cabaña del PNNA río Matamatá.

Al igual que las pruebas realizadas de Starlink en el escenario Bogotá se utilizó la herramienta Speedtest, para medir y evaluar la velocidad de conexión a Internet. A través de esta herramienta, se obtienen tres métricas: velocidad de descarga, velocidad de subida y latencia.

En la *Tabla 24*, se presenta las mediciones realizadas en el sistema de Starlink, durante el periodo de pruebas realizados en el escenario 3.

Fecha	Hora	Latencia (ms)	Uplink (Mbps)	Downlink (Mbps)
21/05/2023	12:03:00	212,871	10,50997	23,40552
21/05/2023	16:04:00	26,157	11,5602	50,46994
21/05/2023	16:13:00	170,881	14,7153	13,6768
22/05/2023	10:37:00	78,71	20,79741	13,19542
23/05/2023	21:11:00	139,185	3,887328	7,1952
23/05/2023	21:12:00	183,507	15,7571	10,61403
23/05/2023	21:13:00	79,371	9,181856	94,74866
24/05/2023	22:24:00	245,696	1,934544	65,97964
24/05/2023	22:26:00	91,541	9,821736	3,187544
24/05/2023	22:38:00	75,516	11,16362	46,94233
24/05/2023	22:52:00	81,672	14,49069	12,5749

Tabla 24. Resultados test velocidad internet Starlink en el escenario 3.

En la *Figura 46*, se puede observar como la latencia varía significativamente en diferentes momentos, desde valores tan bajos como 26,157 ms hasta picos de 245,696 ms. La latencia es un factor importante para aplicaciones en tiempo real, ya que los valores altos pueden causar retrasos notables en la comunicación.

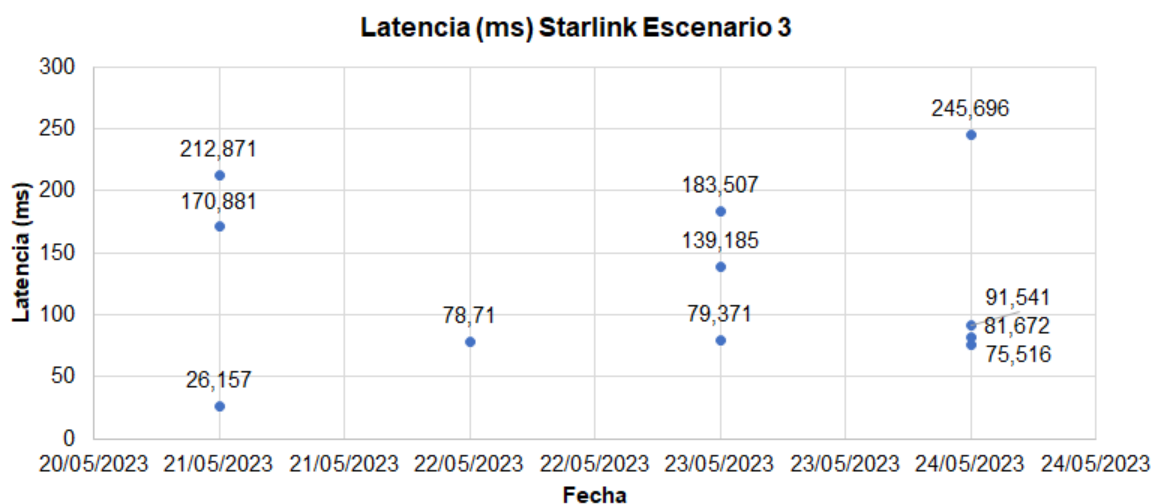


Figura 46. Latencia (ms) Starlink Escenario 3.

En la *Figura 47*, se observa que la velocidad de subida del sistema Starlink oscila entre 1,93 Mbps y 20,79 Mbps. Una velocidad de subida más alta es beneficiosa para tareas que implican cargar datos a la nube, para nuestro caso en particular el envío de los correos de alerta SMTP.

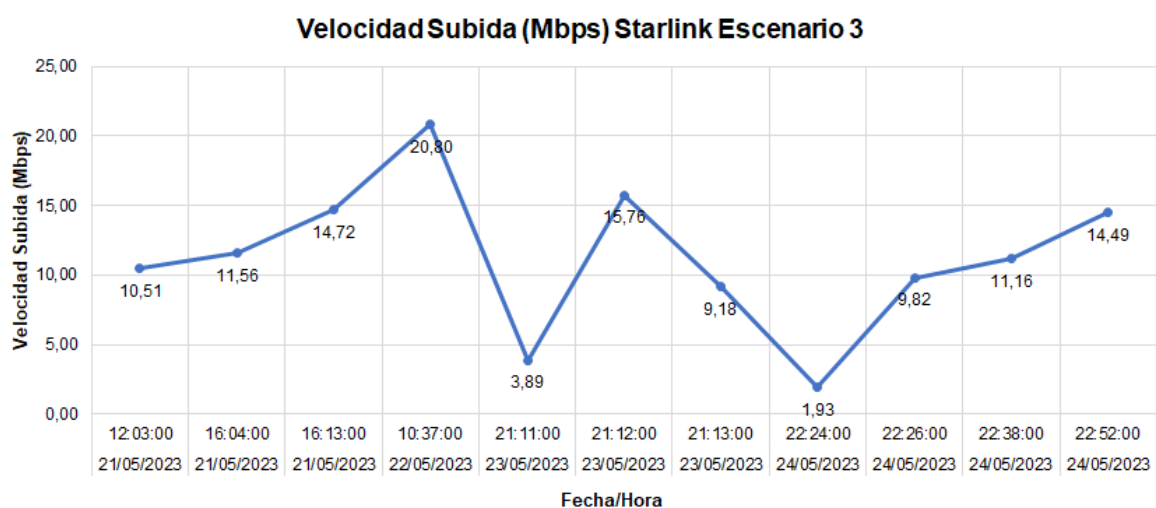


Figura 47. Velocidad subida (Mbps) Starlink escenario 3.

En la *Figura 48*, se presenta la velocidad de bajada del sistema Starlink, la cual varía desde 3,18 Mbps hasta 94,74 Mbps.

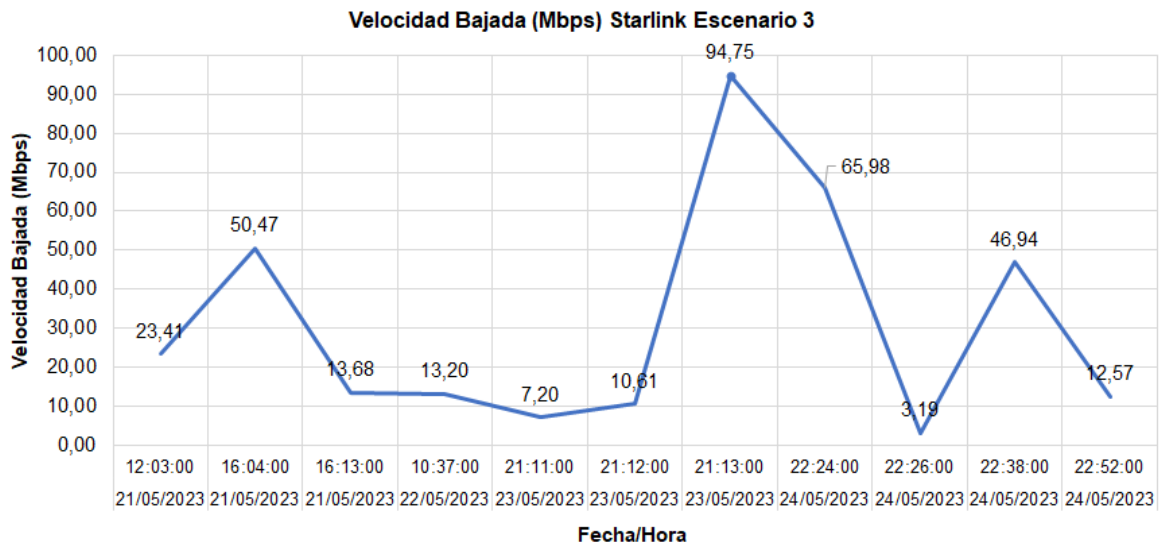


Figura 48. Velocidad bajada (Mbps) Starlink Escenario 3.

En resumen, los datos recopilados muestran que el rendimiento de la conexión de Starlink puede variar considerablemente de un día a otro y dentro de un mismo día. Esto sugiere que la calidad de la conexión puede depender de varios factores, como la congestión de la red, las condiciones climáticas y otros factores ambientales.

Con base en los resultados obtenidos durante las pruebas presentadas, se presentó la ponencia *Anexo: Paper "Radar based monitoring system to protect the Colombian Amazon Rainforest"*, IEEE IHTC 2023, en el marco de la IEEE International Humanitarian Technology Conference (IEEE IHTC 2023).

Conclusiones

La selva amazónica colombiana se enfrenta a múltiples presiones y amenazas, como la explotación de la fauna salvaje, la minería ilegal, la deforestación para la agricultura y la ganadería entre otros. Este trabajo propone el diseño, desarrollo e implementación de un prototipo de sistema de monitoreo para la selva amazónica colombiana. Este sistema utiliza un sistema de radar compacto, cámaras PTZ, comunicaciones por satélite y algoritmos de inteligencia artificial para detectar, rastrear e identificar objetivos en movimiento. También proporciona datos en tiempo real sobre posibles intrusiones o perturbaciones en la zona y envía alertas tempranas por correo electrónico con información detallada sobre los objetivos detectados.

Durante la implementación de las pruebas del sistema de monitoreo en el escenario 1- Escenario de pruebas 1 – Campus de la Universidad Nacional Sede Bogotá. Se demostró que, tras el corto entrenamiento de la inteligencia artificial, el sistema de radar demostró un rendimiento satisfactorio en la clasificación de objetivos, logrando una tasa de aciertos del 92 % y un porcentaje de errores del 8 %. Estos resultados sugieren que la implementación de en conjunto del sistema de radar, la confirmación visual mediante el uso de la cámara PTZ y el entrenamiento en conjunto mediante IA permite al prototipo detectar y clasificar diferentes tipos de objetivos.

Seguido de ello, ante la imposibilidad de realizar pruebas en el PNNRP, se organizaron y realizaron pruebas en el PNNA, cuyas características permiten recrear las condiciones similares a las del entorno geográfico y climatológico propios del noroeste amazónico, donde se encuentra ubicado el PNNRP.

En primera medida se planteó el escenario de Pruebas 2 en la Cabaña PNNA – Río Amacayacu - diciembre de 2022, cuyas condiciones particulares climatológicas corresponde a la estación de verano o denominado “*aguas bajas*”, debido al periodo de sequía, baja pluviosidad y disminución de caudales y profundidad en las cabeceras de los ríos. El objetivo de esta prueba era someter el prototipo por primera vez a las condiciones adversas propias de un bosque tropical húmedo, verificar el la capacidad y desempeño de detección de objetivos en este caso en particular embarcaciones sobre un espejo de agua. Donde, la tasa de aciertos alcanzó el sistema fue del 98 %, mientras que los errores se limitaron al 2 %. Esto demuestra que el entrenamiento adicional de la IA ha aumentado la precisión y eficacia del sistema de radar en la detección y clasificación de diferentes tipos de objetivos.

De forma complementaria a las pruebas realizadas en el escenario 2, el Escenario de pruebas 3 en la Cabaña del PNNA – Río Matamatá -mayo de 2023, provee las características contrarias al anterior contexto. En el mes de mayo se presentan las características propias de la estación de invierno, donde aumentan considerablemente las precipitaciones, por ende, aumenta el caudal y la profundidad de los ríos, incluso zonas que anteriormente eran secas, en estas condiciones se encuentran completamente inundadas. Esto es comúnmente

denominado “*aguas altas*”. Las pruebas realizadas en el escenario de aguas altas con dos radares en funcionamiento demostraron un rendimiento satisfactorio del sistema de radar. Se logró una tasa de aciertos del 94 % en la clasificación de objetivos, con un 6 % de detecciones erróneas atribuidas principalmente a falsas alarmas generadas por elementos naturales como troncos, enramadas y estelas de agua. Estos resultados indican que el sistema es eficiente en la detección y clasificación de personas y embarcaciones pequeñas en entornos acuáticos desafiantes.

Los resultados de la evaluación de rendimiento de los sistemas de telecomunicaciones de enlace satelital tipo VSAT y Starlink se demostró que este último ofrece un mejor rendimiento en términos de velocidad y latencia. Donde, Starlink, tiene velocidades de subida y bajada de 16,99 Mbps y 209,16 Mbps, respectivamente, en comparación con las velocidades de VSAT de 0,22 Mbps y 0,39 Mbps. Esta diferencia coloca a Starlink como una opción hasta 100 veces más rápida que VSAT. En términos de latencia, Starlink también supera con creces a VSAT, con una latencia de 105 ms en comparación con la alta latencia de VSAT de 593 ms. Esto significa que Starlink logra una latencia casi seis veces menor que VSAT. Sin embargo, es importante destacar que en los escenarios 2 y 3 en el PNNA, se observa una variabilidad significativa en las mediciones de Starlink, con cambios en la latencia y las velocidades de subida y bajada a lo largo del tiempo. Esto sugiere que el rendimiento de Starlink puede verse afectado por las condiciones ambientales.

El prototipo diseñado e implementado durante este trabajo, demostró condiciones de funcionamiento eficientes, a pesar de las condiciones propias del bosque tropical húmedo del noroeste amazónico colombiano. El sistema de radar funcionó correctamente y proporcionó información precisa sobre los objetivos detectados. Esto sugiere que esta solución propuesta, puede convertirse en una herramienta valiosa para complementar las estrategias de seguridad y vigilancia en zonas protegidas. Su implementación puede ayudar a controlar y eventualmente reducir las presiones y amenazas que enfrenta la selva amazónica.

Trabajo Futuro

Este proyecto, fue financiado por la Universidad Nacional de Colombia, mediante la Convocatoria de Extensión Solidaria 2018: Regiones Y Comunidades sostenibles, Modalidad 1. Nuevos proyectos de Extensión Solidaria con enfoque de innovación social. Sin embargo, a medida que este fue avanzando, quedó en evidencia que la solución que se estaba planteando tenía un alto potencial de desarrollo y que realmente abordaba la problemática desde el planteamiento de una solución mediante una herramienta tecnológica. Es por ello, que la propuesta aquí presentada, derivó en un proyecto de inversión del sistema General Regalías, viabilizado y aprobado por el Ministerio de Ciencia Tecnología de la República de Colombia denominado “*Desarrollo de un sistema de monitoreo remoto para identificar presiones y amenazas a los pueblos indígenas en aislamiento y la biodiversidad del Parque Nacional Natural Río Puré en el Amazonas*”, identificado con el BPIN 2020000100431.

Esta iniciativa se ha convertido en un trabajo interdisciplinario en colaboración entre la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad El Bosque, el Amazon Conservation Team y Parques Nacionales Naturales de Colombia, el cual se encuentra en ejecución y se prevé su finalización para el año 2026.

Los resultados obtenidos durante la ejecución de este trabajo evidencian el potencial que representa el prototipo del sistema propuesto, sin embargo, los datos obtenidos sugieren que el sistema aún puede tener un mejor rendimiento, siempre y cuando se aumenten y se realicen entrenamientos de la inteligencia artificial del sistema radar más prolongados. En paralelo, se realizarán pruebas de consumo energético en diferentes escenarios y de larga duración (7 días x 24 horas). Estas pruebas permitirán evaluar el desempeño del prototipo.

Asimismo, se continuará evaluando el desempeño del sistema de comunicación Starlink, el cual ha mostrado un gran potencial. Sin embargo, al igual que el sistema de alimentación, se debe evaluar en una prueba de larga duración en campo. Esta prueba también proporcionará un análisis de duración y las rutinas de mantenimiento del prototipo.

También se están realizando ajustes físicos al diseño del prototipo para su montaje en el campo. El prototipo se instalará en el Parque Nacional Natural Río Puré, donde se optimizará su tamaño y diseño. Además, se trabajará en el diseño del camuflaje y la instalación.

A. Anexo: Análisis de la demanda energética y las condiciones de la ubicación geográfica para el diseño del SFV

El primer paso en el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico off-grid es evaluar la demanda energética del lugar o instalación que se busca alimentar. Esto implica calcular cuánta energía se consume en promedio diaria y mensualmente. Es importante tener en cuenta tanto la demanda actual como futura, ya que esto influirá en la capacidad del sistema.

En la *Tabla 25*, se presenta en la información de las necesidades de carga y consumo en W por día para cada uno de los equipos.

Equipo Hora del día	Radars CK5	NIO HUB4	Cámara Axis	Starlink	Sistema de control	Consumo Potencia (W)
1:00	8	7	0	0	17	32
2:00	8	7	0	0	17	32
3:00	8	7	0	0	17	32
4:00	8	7	13	0	17	45
5:00	8	7	13	0	17	45
6:00	8	7	13	0	17	45
7:00	8	7	13	0	17	45
8:00	8	7	13	75	17	120
9:00	8	7	13	75	17	120
10:00	8	7	13	75	17	120
11:00	8	7	13	75	17	120
12:00	8	7	13	75	17	120
13:00	8	7	13	75	17	120
14:00	8	7	13	75	17	120
15:00	8	7	13	75	17	120
16:00	8	7	13	75	17	120
17:00	8	7	13	75	17	120
18:00	8	7	13	75	17	120
19:00	8	7	13	75	17	120
20:00	8	7	13	0	17	45
21:00	8	7	13	0	17	45
22:00	8	7	13	0	17	45
23:00	8	7	13	0	17	45
0:00	8	7	0	0	17	32

Tabla 25. Estudio de las necesidades de carga y consumo en W por día para cada uno de los equipos.

La gráfica de demanda diaria de potencia se muestra en la *Figura 49*, en esta se muestra el consumo de potencia para las distintas horas del día.

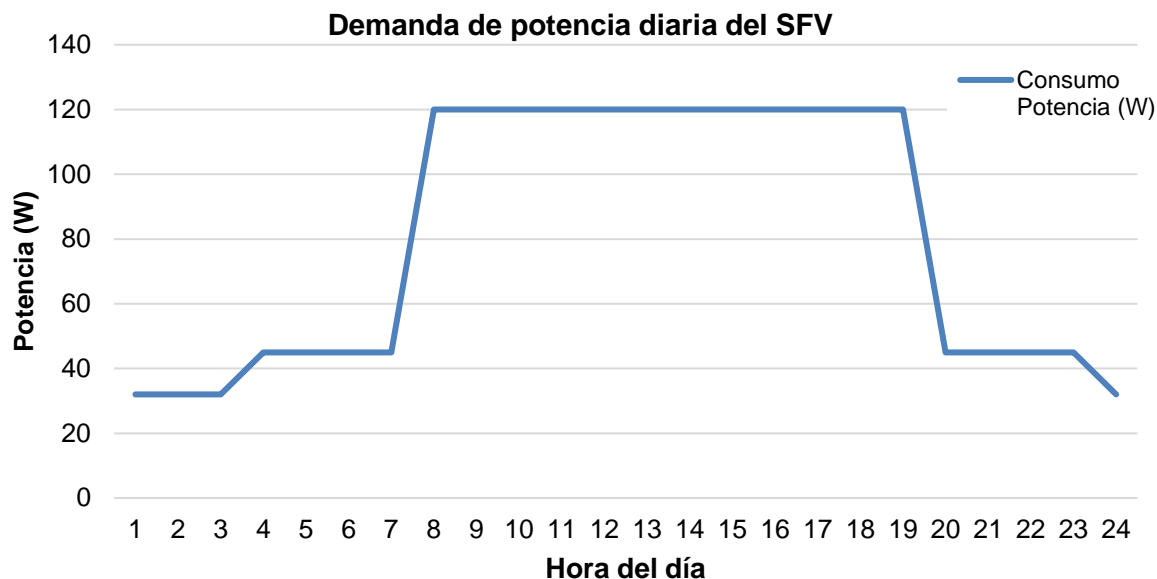


Figura 49. Demanda de potencia diaria del SFV.

Para el estudio de dimensionado del sistema de energía fotovoltaico off-grid, es necesario definir inicialmente la potencia total que se debe demandar para alimentar las cargas de corriente alterna (AC) con base en las necesidades asociadas al proyecto, como se observa en la *Tabla 26*.

Equipos	Número de Equipos N	Potencia P(W)	Potencia Total (W)	Tiempo (h)	Energía en AC (Wh/día)
Radar CK5	1	8	8	24	192
NIO HUB4	1	7	7	24	168
Cámara Axis (17W)	1	13	13	20	260
Starlink alto rendimiento	1	75	75	12	900
Sistema de control	1	17	17	24	408
TOTALES		Potencia Total (W)	120	Total AC (W/h)	1928
		Potencia Total (kW)	0,12	Total AC (kW/h)	1,928

Tabla 26. Estudio de las necesidades de carga y consumo AC en kW/h.

Después, La ubicación geográfica es un factor crucial para determinar la cantidad de radiación solar disponible a lo largo del año. La latitud, la altitud y las condiciones climáticas locales influyen en la producción de energía solar. Se debe realizar un estudio solar para estimar la cantidad de luz solar que se puede captar en la ubicación específica.

El sitio de instalación de este proyecto fotovoltaico es el PNNRP, Amazonas, Colombia y tiene las siguientes coordenadas geográficas 1°30´S – 2°45´S de latitud y 71°40´W 69°30´W de longitud. Para el cálculo de los paneles solares que se requieren para esta aplicación se requiere la información suministrada por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y

Estudios Ambientales) del cual se extrajeron las irradiancias promedio interanuales mes - mes del punto. Los datos de irradiancia del lugar se calcularon consultando tres fuentes: Atlas del IDEAM, NASA y Meteonorm, cuyos datos se presentan en la *Tabla 27*. Se toma como referencia la ciudad de Leticia, obteniendo los datos que se observan en la *Figura 50*.

Irradiancia (kWh/m ² -día)			
Mes	IDEAM	METEONORM	NASA
Enero	3,75	5,33	4,23
Febrero	3,75	5,2	4,48
Marzo	3,75	5,5	4,29
Abril	3,75	5,33	4,04
Mayo	3,75	5,23	4,1
Junio	3,25	5,14	4,12
Julio	3,75	5,3	4,62
Agosto	4,25	5,25	5,18
Septiembre	4,25	5,16	4,97
Octubre	4,25	5,11	4,84
Noviembre	4,25	4,39	4,63
Diciembre	3,75	5,04	4,5

Tabla 27. Datos de irradiancia solar (kWh/m²-día) en las coordenadas geográficas del PNNRP.

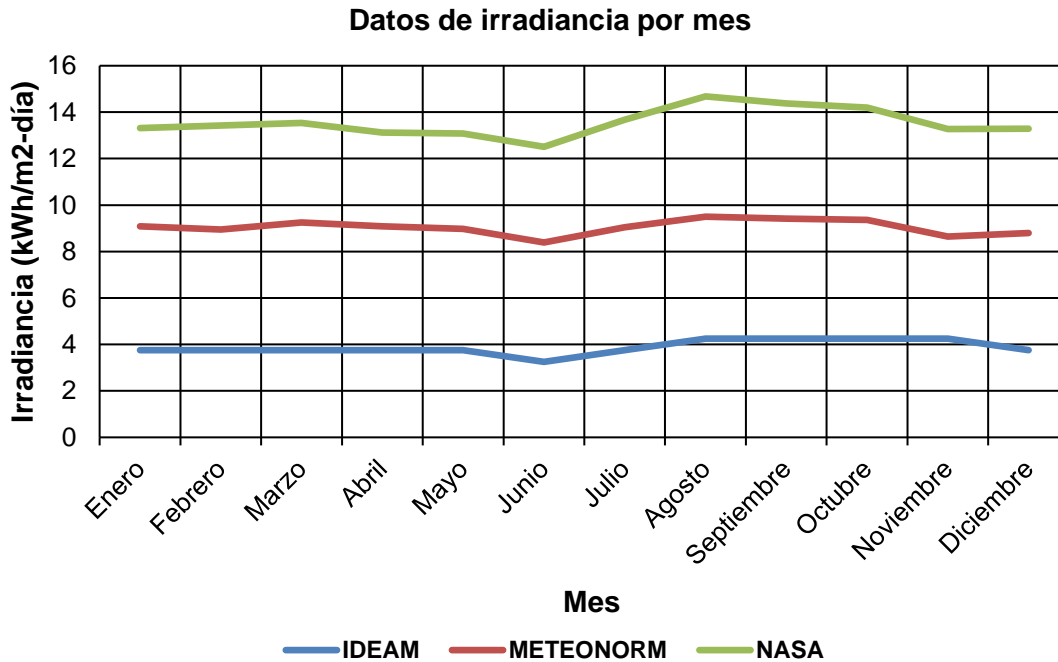


Figura 50. Comparación datos irradiancia solar (kWh/m²-día) en las coordenadas geográficas del PNNRP, según las fuentes del IDEAM, NASA y METEONORM.

Teniendo en cuenta que la diferencia porcentual entre las mediciones de la NASA y METEONORM son superiores al 5 %, se toman como referencia los datos del IDEAM, ya que, estos datos son tomados por medio de estaciones meteorológicas instaladas en diferentes sitios alrededor del país. Los datos de la irradiancia por mes se muestran en la *Tabla 28*. Adicional a esto, los datos de horas brillo por mes son los mostrados en la *Figura 51*.

Mes	R0 (kWh/m ² -día)	R0 (kWh/m ² -mes)	HBS (h)
Enero	3,5-4,0	108,5	5,5
Febrero	3,5-4,0	98	4,5
Marzo	3,5-4,0	108,5	3,5
Abril	3,5-4,0	105	3,5
Mayo	3,5-4,0	108,5	3,5
Junio	3,0-3,5	90	3,25
Julio	3,5-4,0	108,5	4,5
Agosto	3,5-4,0	108,5	4,5
Septiembre	4,0-4,5	120	5,5
Octubre	4,0-4,5	124	5,5
Noviembre	4,0-4,5	120	5,5
Diciembre	3,5-4,0	108,5	5,5

Tabla 28. irradiancia solar por mes de acuerdo con el atlas del IDEAM.

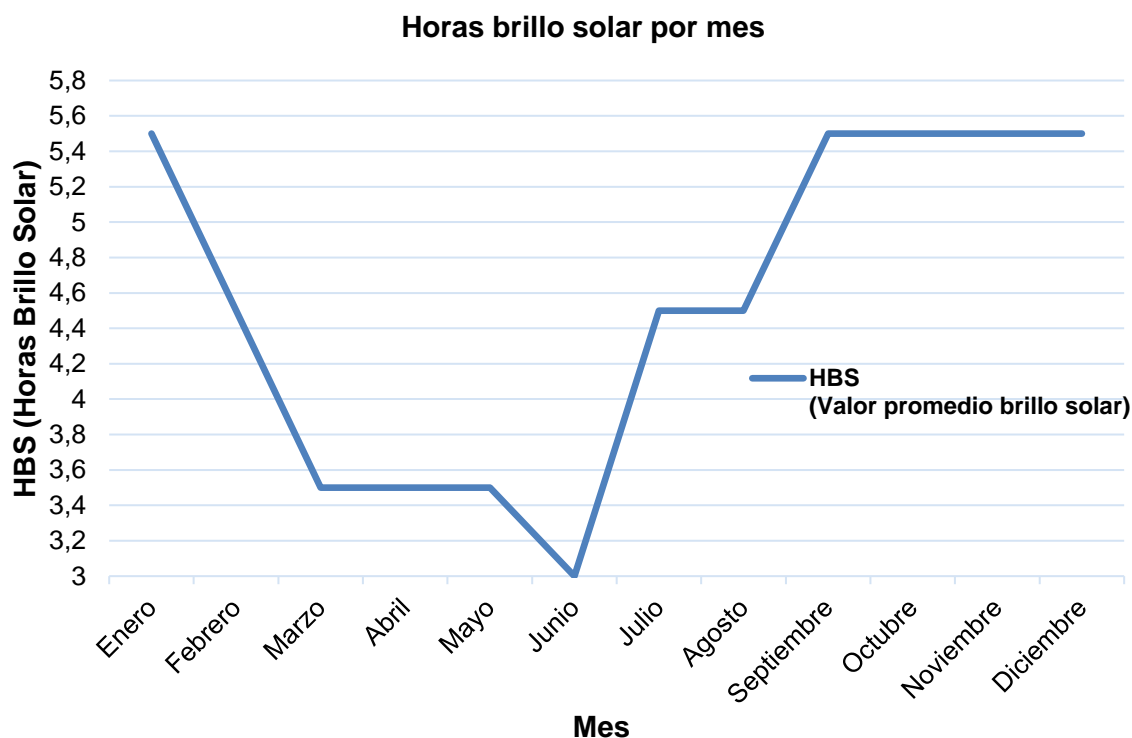


Figura 51. irradiancia solar por mes de acuerdo con el atlas del IDEAM.

B. Anexo: Paper "Radar based monitoring system to protect the Colombian Amazon Rainforest", IEEE IHTC 2023



IEEE IHTC

IEEE International Humanitarian
Technologies Conference

Colombia, February 2024

Certification of Authors at IEEE IHTC 2023

On behalf of the organizing committee of the IEEE International Humanitarian Technology Conference (IHTC) 2023, I would like to sincerely thank you for your valuable contribution to the conference.

It is with great pleasure that I certify that the paper titled "**Radar based monitoring system to protect the Colombian Amazon Rainforest**", written by Jorge Andres Torres Cepeda, Diana Patricia Cortes Nava, Danny Esteban Portela Robayo, Christian Camilo Cano Vasquez, Cristian Andres Triana Infante and Gloria Margarita Varon Duran, was presented at the IEEE IHTC 2023 held in Cartagena, Colombia, from November 1 to November 3, 2023. Your presentation provided valuable insights and enriched the conference discussions on humanitarian technology and its applications.

Your active participation and scholarly contribution have significantly contributed to the conference's success. Once again, thank you for your commitment and dedication to advancing humanitarian technology through your research and participation in our conference.

Best regards,

Carlos Lozano-Garzon
IEEE IHTC 2023 General Chair

Bibliografía

- [1] A. Oliveira and N. Figueira, “An Application of Command, Control, Computing, Communication, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance Systems in the Protection of the Amazon Rainforest,” in *2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICECET52533.2021.9698538.
- [2] Gobernación de Amazonas, “Plan de Desarrollo Departamental. Amazonas Progresando con Equidad 2020-2023,” *Gob. Amaz.*, pp. 1–470, 2020, [Online]. Available: <https://www.obsgestioneducativa.com/download/plan-de-desarrollo-departamental-amazonas-2020-2023/>
- [3] M. J. Plotkin, *The Amazon: what everyone needs to know*. Oxford University Press, USA, 2020.
- [4] D. V Spracklen and L. Garcia-Carreras, “The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 42, no. 21, pp. 9546–9552, 2015.
- [5] L. Painter *et al.*, “Capítulo 26: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la Amazonía,” *Inf. evaluación Amaz. 2021*, 2022, doi: 10.55161/yikx6472.
- [6] W. Collen, “The Amazon and Agenda 2030,” *UNDP. United Nations Dev. Program.*, p. 40, 2016, [Online]. Available: [http://www.undp.org/content/dam/rblac/docs/Research and Publications/Energy and Environment/UNDP-RBLAC-AmazonAgenda2030EN.pdf](http://www.undp.org/content/dam/rblac/docs/Research%20and%20Publications/Energy%20and%20Environment/UNDP-RBLAC-AmazonAgenda2030EN.pdf)
- [7] United Nations, Regional knowledge management Platform, and 2030 Agenda in Latin America and the Caribbean, “Goal 13: Take urgent action to combat climate change and its impacts.”
- [8] United Nations, “Goal 13: Take urgent action to combat climate change and its impacts (Sustainable Development Goals).” Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/climate-change/>
- [9] United Nations, “Goal 14: Conserve and sustainably use the oceans, seas and marine resources (Sustainable Development Goals).” Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/oceans/>
- [10] United Nations, Regional knowledge management Platform, and 2030 Agenda in Latin America and the Caribbean, “Goal 14: Conserve and sustainably use the oceans, seas and marine resources.” [Online]. Available: <https://agenda2030lac.org/en/sdg/14-life-below-water>
- [11] United Nations, Regional knowledge management Platform, and 2030 Agenda in Latin America and the Caribbean, “Goal 15: Sustainably manage forests, combat desertification, halt and reverse land degradation, halt biodiversity loss.” Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <https://agenda2030lac.org/en/sdg/15-life-land>
- [12] United Nations, “Goal 15: Sustainably manage forests, combat desertification, halt and

- reverse land degradation, halt biodiversity loss (Sustainable Development Goals).” Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/biodiversity/>
- [13] United Nations, Regional knowledge management Platform, and 2030 Agenda in Latin America and the Caribbean, “Goal 16: Promote peaceful and inclusive societies for sustainable development, provide access to justice for all and build effective, accountable and inclusive institutions at all levels.” Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <https://agenda2030lac.org/en/sdg/16-peace-justice-and-strong-institutions>
- [14] United Nations, “Goal 16: Promote just, peaceful and inclusive societies (Sustainable Development Goals).” Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/peace-justice/>
- [15] Parques Nacionales Naturales de Colombia - Dirección Territorial Amazonia, Ministerio de Ambiente, and República de Colombia, *Plan de Manejo Parque Nacional Natural Río Puré*.
- [16] Presidencia de la República de Colombia, Gabinete Ministerial República de Colombia, and Departamento Nacional de Planeación, *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 “Colombia, potencia mundial de la vida.”* 2023.
- [17] Asamblea Departamental del Amazonas, “Plan de Desarrollo Departamental Amazonas ‘Progresando con Equidad’ 2020-2023,” 2019.
- [18] M. de M. A. y D. Sostenible, *Resolución 035 de 2007 Plan de Manejo del PNNRP*. Colombia, 2007. [Online]. Available: <http://intranet.parquesnacionales.gov.co/wp-content/uploads/2016/05/Resoluci%03n-de-Adopci%03n-No.-035-R%03o-Pur%03-PDF-Por-medio-de-la-cual-se-adopta-el-Plan-de-Manejo-del-Parque-Nacional-Natural-Pur%03.pdf>
- [19] Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Parques Nacionales Naturales de Colombia, and República de Colombia, *Plan de Manejo Parque Nacional Natural Río Puré 2021-2026*. 2021.
- [20] Ministerio del Medio Ambiente, República de Colombia, “Resolución 0764 de 2002 ‘Por la cual se reserva, alindera y declara el Parque Nacional Natural Río Puré’,.” 2002.
- [21] Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible and República de Colombia, *Resolución 1277 de 2014 “Por la cual se adopta la zonificación y el ordenamiento territorial de la Reserva Forestal de la Amazonía, establecida en la Ley 2da de 1959, en los departamentos de Amazonas, Cauca, Guainía, Putumayo y Vaupés y se toman otras determinaciones.”* Colombia, 2014.
- [22] G. Maps, “Ubicación del Parque Nacional Natural Río Puré.”
- [23] Departamento Nacional de Planeación and Rep, *Decreto Número 1232 De 2018 “Por el cual se adiciona el Capítulo 2, del Título 2, de la Parte 5, del Libro 2 del Decreto 1066 de 2015, Único Reglamentario del Sector Administrativo del Interior, para establecer medidas especiales de prevención y protección”*. 2018.
- [24] D. Aristizábal and V. Cardona, “Informe de la Necesidad de Avanzar con la

Formulación de la Política Pública para Protección a Pueblos Indígenas en Aislamiento de Colombia,” *Amaz. Conserv. Team - Colomb.*, p. 12, 2021.

- [25] R. Pallás Areny, *Sensores y acondicionadores de señal*. in ACCESO RÁPIDO. Marcombo, 2004. [Online]. Available: https://books.google.com.co/books?id=Eevyk28_fVkC
- [26] K. Iniewski, *Optical, Acoustic, Magnetic, and Mechanical Sensor Technologies*. in Devices, Circuits, and Systems. CRC Press, 2017. [Online]. Available: https://books.google.com.co/books?id=oi_OBQAAQBAJ
- [27] J. G. Webster, *The Measurement, Instrumentation, and Sensors: Handbook*. in Electrical engineering handbook series. CRC Press, 1999. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=b7UuZzf9ivIC>
- [28] J. Kamminga, E. Ayele, N. Meratnia, and P. Havinga, “Poaching detection technologies-A survey,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 5, 2018, doi: 10.3390/s18051474.
- [29] E. V Kameswararao, M. Jaya Shankar, T. V Sai Lokesh, and E. Terence, “IoT Based Anti Poaching of Trees and Protection of Forest,” in *Intelligent Cyber Physical Systems and Internet of Things*, J. Hemanth, D. Pelusi, and J. I.-Z. Chen, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 45–55.
- [30] Rainforest Connection, “Guardian Platform.” Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://rfcx.org/guardian>
- [31] HUAWEI, “Saving the rainforest by listening.” Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.huawei.com/en/huaweitech/cases/rainforest-connection>
- [32] Laboratorio de Aplicaciones Bioacústicas and Universidad Politécnica de Cataluña, “The Sense of Silence - Project Providence.” Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://thesenseofsilence.com/>
- [33] Y. Sierra Praeli, “Proyecto Providence: monitoreo en tiempo real que integra imágenes y sonidos de la Amazonía.” [Online]. Available: <https://es.mongabay.com/2018/05/proyecto-providence-monitoreo-amazonia/>
- [34] Project Providence, “sitio web la organización Project Providence.” [Online]. Available: <http://www.projectprovidence.org/>
- [35] J. G. Webster and H. Eren, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement*. CRC Press, 2017. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=sKnMBQAAQBAJ>
- [36] T. J. Maloney, *Electrónica industrial moderna*. Pearson Educación, 2006. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=H-irtU49BokC>
- [37] M.C.Hingane, V. D. Ingale, S. Choudhari, and S. Awachare, “Anti-poaching Alarm System For Tree in Forest,” *Int. J. Eng. Dev. Res.*, vol. 7, no. 4, pp. 592–595, 2019, [Online]. Available: <http://www.ijedr.org/papers/IJEDR1904101.pdf>
- [38] Y. Deshpande, K. Savla, C. Lobo, S. Bhattacharjee, and J. Patel, “Forest Monitoring System Using Sensors, Wireless Communication and Image Processing,” in 2018

Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCUBEA.2018.8697708.

- [39] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*. in Electrical engineering series. McGraw-Hill, 2001. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=Y6-APwAACAAJ>
- [40] M. I. Skolnik, *Radar Handbook, Third Edition*. McGraw-Hill Education, 2008. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=QzPHwAEACAAJ>
- [41] OmniPreSense, “OPS242-A Doppler Short Range Radar Sensor.” Accessed: Aug. 01, 2023. [Online]. Available: <https://omnipresense.com/product/ops242-short-range-radar-sensor/>
- [42] G. Santhanamari, M. J. P. S, D. B, K. S, and A. R, “Radar Based Target Detection and Classification,” in *2023 International Conference on Intelligent Systems for Communication, IoT and Security (ICISCoIS)*, 2023, pp. 412–416. doi: 10.1109/ICISCoIS56541.2023.10100358.
- [43] Reutech Radar Systems, “Reutech’s RSR 904 radar system used in anti-poaching initiatives in the Kruger Park.” [Online]. Available: <http://www.reutechradar.com/news-events/latest-news/96-reutech-s-rsr-904-radar-system-used-in-anti-poaching-initiatives-in-the-kruger-park>
- [44] South Africa’s Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), “Launch of postcode meerkat surveillance system in Kruger National Park.” 2016. [Online]. Available: <https://www.csir.co.za/launch-postcode-meerkat-surveillance-system-kruger-national-park-0>
- [45] Foundation Peace Parks, “A safe space for rhinos.” [Online]. Available: <https://www.peaceparks.org/a-safe-space-for-rhinos/>
- [46] T. Mahlakoana, “Radar thwarts rhino poachers,” *Cape Times (South Africa)*, 2017.
- [47] T. Pratt and J. E. Allnutt, *Satellite Communications*. Wiley, 2019. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?id=dgi1DwAAQBAJ>
- [48] “BGAN Voice and Broadband Service | Inmarsat.” Accessed: Nov. 14, 2019. [Online]. Available: <https://www.inmarsat.com/service/bgan/>
- [49] Axxess Networks, “Conozca qué es la tecnología satelital BGAN y cuáles son sus aplicaciones.” Accessed: Nov. 14, 2019. [Online]. Available: <https://axesat.com/tecnologia-satelital-bgan/>
- [50] Inmarsat, “BGAN Voice and Broadband Service.” Accessed: Nov. 14, 2019. [Online]. Available: <https://www.inmarsat.com/service/bgan/>
- [51] Globalsat USA, “Inmarsat BGAN.” Accessed: Nov. 14, 2019. [Online]. Available: <https://www.globalsat.us/collections/inmarsat-bgan>
- [52] Starlink and SpaceX, “Starlink.” Accessed: Aug. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.starlink.com/>
- [53] B. I. de D. Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética

- (UPME), *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. 2015.
- [54] J. Antonio, C. González, C. Pérez, C. Santos, C. Gil, and M. Alonso, *Centrales de Energías Renovables*, Pearson Prentice-Hall, 2009: *Centrales de Energías Renovables*. in *Centrales de Energías Renovables*. Pearson Educación, 2009. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=zQI7DwAAQBAJ>
- [55] D. G. für Sonnenenergie, *Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers*. in *Planning and Installing Series*. Earthscan, 2008. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?id=fMo3jJZDkpUC>
- [56] S. White, *Solar Photovoltaic Basics: A Study Guide for the NABCEP Associate Exam*. Taylor & Francis, 2018. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?id=NJFoDwAAQBAJ>
- [57] TrinaSolar, “Vertex 580W TSM-DE19R.” Accessed: Jul. 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.trinasolar.com/lac/product/VERTEX-DE19R>
- [58] Victron Energy, “SmartSolar MPPT 150/35 & 150/45.” Accessed: Jun. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.victronenergy.com.es/solar-charge-controllers/smartsolar-150-35#downloads>
- [59] Victron Energy, “Inversor Phoenix VE.Direct.” Accessed: Jun. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.victronenergy.com.es/inverters/phoenix-inverter-vedirect-250va-800va>
- [60] Pylontech, “Pylontech US5000 BESS solution.” Accessed: Jun. 01, 2023. [Online]. Available: <https://en.pylontech.com.cn/products/c23/134.html>
- [61] Victron Energy, “Cerbo GX.” Accessed: Jun. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.victronenergy.com.es/panel-systems-remote-monitoring/cerbo-gx>
- [62] ACNUDH (Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos) and United Nations - Human Rights, “Directrices de protección para los pueblos indígenas en aislamiento y en contacto inicial de la región Amazónica. el Gran Chaco y la región oriental de Paraguay.” p. 42, 2012.
- [63] Comisión Interamericana de Derechos Humanos -CIDH-, *Pueblos Indígenas en Aislamiento Voluntario y Contacto Inicial*. 2013. [Online]. Available: <http://www.oas.org/es/cidh/indigenas/docs/pdf/Informe-Pueblos-Indigenas-Aislamiento-Voluntario.pdf>
- [64] Paques Nacionales Naturales de Colombia, “Resolución Interna 156 de 2018.” Accessed: Aug. 09, 2023. [Online]. Available: https://www.redjurista.com/Documents/resolucion_156_de_2018_parques_nacionales_naturales_de_colombia.aspx#/