



PORTADA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL**

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Tema:

**SISTEMA DE LOCALIZACIÓN EN TIEMPO REAL PARA LA SEGURIDAD
DE EXPLORADORES EN LAS ZONAS
MONTAÑOSAS DE TUNGURAHUA CON TECNOLOGÍA LORAWAN**

Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación, presentado previo a la
obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

ÁREA: Comunicaciones

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Electrónica, Telecomunicaciones y Sistemas de
control

AUTOR: Alex Marcelo Revelo Paredes

TUTOR: Ing. Edgar Freddy Robalino Peña, Mg.

Ambato - Ecuador

julio – 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación con el tema: SISTEMA DE LOCALIZACIÓN EN TIEMPO REAL PARA LA SEGURIDAD DE EXPLORADORES EN LAS ZONAS MONTAÑOSAS DE TUNGURAHUA CON TECNOLOGÍA LORAWAN, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por el señor Alex Marcelo Revelo Paredes, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que el estudiante ha sido tutorado durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 17 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.3 del instructivo del reglamento referido.

Ambato, julio 2025.

Ing. Edgar Freddy Robalino Peña, Mg.
TUTOR

AUTORÍA

El presente trabajo de titulación con el tema: SISTEMA DE LOCALIZACIÓN EN TIEMPO REAL PARA LA SEGURIDAD DE EXPLORADORES EN LAS ZONAS MONTAÑOSAS DE TUNGURAHUA CON TECNOLOGÍA LORAWAN es absolutamente original, auténtico y personal y ha observado los preceptos establecidos en la Disposición General Quinta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, julio 2025.



Alex Marcelo Revelo Paredes

C.C. 1805129788

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato para que reproduzca total o parcialmente este trabajo de titulación dentro de las regulaciones legales e institucionales correspondientes. Además, cedo todos mis derechos de autor a favor de la institución con el propósito de su difusión pública, por lo tanto, autorizo su publicación en el repositorio virtual institucional como un documento disponible para la lectura y uso con fines académicos e investigativos de acuerdo con la Disposición General Cuarta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, julio 2025.



Alex Marcelo Revelo Paredes

C.C. 1805129788

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del informe final del trabajo de titulación presentado por el señor Alex Marcelo Revelo Paredes, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado SISTEMA DE LOCALIZACIÓN EN TIEMPO REAL PARA LA SEGURIDAD DE EXPLORADORES EN LAS ZONAS MONTAÑOSAS DE TUNGURAHUA CON TECNOLOGÍA LORAWAN, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 19 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.4 del instructivo del reglamento referido. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con el señor Presidente del Tribunal.

Ambato, julio 2025.

Ing. Franklin Oswaldo Mayorga Mayorga, Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Jesús Israel Guamán Molina, Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

Ing. Ana Pamela Castro Martin, MSc.
PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

A ti hermanita, Macarena Revelo, quien desde el cielo me guía con su amor incondicional. Sé que siempre estas a mi lado en cada batalla que librada, y aunque ya no estés físicamente, tu presencia sigue siendo mi inspiración y mi motor. Este logro es un homenaje a tu sacrificio, valentía y amor. ¡Te extraño mi corazón de colibrí!

A ti madre, Fanny Paredes, quien siempre ha sido mi fortaleza, mi apoyo y mi ejemplo a seguir. Gracias por tu amor inquebrantable, por creer en mí aun en los momentos más difíciles y por estar siempre ahí con tus sabias palabras. Este logro es también tuyo, porque sin tu apoyo, nunca habría llegado hasta aquí. ¡Te amo profundamente, mamá!

A mi padre, Mario Revelo, que me observa con orgullo. Gracias por ser mi amigo fiel y compañero de vida, por siempre brindarme tu apoyo, tu cariño y tus enseñanzas. Gracias por estar a mi lado y por ser un ejemplo de lucha y valentía. Este logro es tan tuyo como mío.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, quien me ha dado la oportunidad de llegar hasta aquí, proporcionándome fuerza, sabiduría y salud. Gracias por escucharme en cada momento de angustia y por iluminar mi camino con su presencia. Gracias por bendecir a mi familia y darme el valor para seguir adelante.

Agradezco a mis profesores y mentores, especialmente a aquellos que me han brindado sus conocimientos y han guiado mis pasos durante este viaje académico. Sin su apoyo, este logro no hubiera sido posible.

Gracias a mis amigos, por su constante apoyo, por escucharme, por darme fuerzas y por ser mi refugio en los momentos de duda.

A todas las personas que han sido parte de mi vida y que, de alguna manera han contribuido a este momento, mi más sincero agradecimiento. Este logro es el reflejo de todos los que me han ayudado a llegar hasta aquí.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA.....	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS	xx
RESUMEN EJECUTIVO	xxi
ABSTRACT	xxii
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Tema de investigación.....	1
1.1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Antecedentes investigativos	2
1.3 Fundamentación teórica	5

1.3.1 Internet de las cosas IoT.....	5
1.3.2 Tecnologías de Comunicación Inalámbrica en IoT	8
1.3.3 Estadísticas de Turismo en la Provincia de Tungurahua	14
1.3.4 Bienestar Social.....	17
1.3.5 Clima y Geografía del Volcán Tungurahua	18
1.3.6 Rutas de ascenso al volcán Tungurahua.....	22
1.3.7 Equipos de monitoreo y comunicación en el volcán Tungurahua	29
1.3.8 Estado de los equipos de monitoreo y comunicación	32
1.4 Cobertura de señal móvil en el volcán Tungurahua	34
1.5 Tecnología para condiciones climáticas extremas.....	38
1.5.1 Sistema de posicionamiento global.....	38
1.5.2 Tecnología LoRA y LoRaWAN	40
1.6 Arquitectura IoT	41
1.7 Metodología para el desarrollo de proyectos IoT.....	42
1.7.1 Metodología TDDM4IoTS	42
1.8 Prueba estadística para validación de datos.....	43
1.8.1 Prueba Chi-Cuadrado	44
1.9 Objetivos	45

1.9.1 Objetivo general.....	45
1.9.2 Objetivos específicos	45
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	46
2.1 Materiales.....	46
2.2 Métodos	46
2.2.1 Modalidad de la investigación	46
2.2.2 Población y muestra	47
2.2.3 Recolección de información.....	47
2.2.4 Procesamiento y análisis de datos	48
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
3.1 Desarrollo del sistema	49
3.2 Análisis Preliminar.....	50
3.2.1 Encuesta	50
3.2.2 Interpretación de los resultados.....	50
3.1 Diseño tecnológico y Arquitectura.....	52
3.2 Análisis detallado de los requisitos del sistema	53
3.2.1 Etapa adquisición de datos	53
3.2.2 Etapa Almacenamiento y procesamiento de datos.....	58
3.3.3 Etapa plataforma de visualización	60
3.3 Cálculos y Simulación del prototipo propuesto.....	63

3.3.1 Cálculos de radioenlaces	63
3.3.2 Simulación	75
3.4 Configuración de equipos de comunicación para exploradores	77
3.4.1 Circuito de alimentación	77
3.4.1 3.4.2 Diagrama de adquisición y envío de datos.....	79
3.4.2 3.4.3 Diseño de contenedores.....	80
3.5 Diseño del Sistema de Rastreo con LoRaWAN	81
3.5.1 3.5.1 GPS Ublox NEO 6M.....	82
3.5.2 Transmisión de datos utilizando modulo LoRaWAN.....	84
3.6 Programación del sistema de rastreo con LoRaWAN	87
3.6.1 Programación módulos LoRaWAN	87
3.6.2 Configuración en Node Red.....	90
3.6.3 3.6.3 Creación de máquina virtual en Google cloud.....	93
3.6.4 Servidor LAMP.....	97
3.7 Despliegue he integración	98
3.7.1 Caso 1: Explorador en Movimiento (Luz verde)	99
3.7.2 Caso 2: Explorador Inactivo (Luz amarilla).....	100
3.7.3 Caso 3: Emergencia (Luz roja)	102
3.7.4 Propuesta de mejora del prototipo.....	104
3.8 Generación de pruebas de funcionamiento.....	106

3.8.1 Pruebas Universidad técnica de Ambato – Campus Huachi	107
3.8.2 Pruebas Área Urbana.....	5
3.8.3 Pruebas Parque de la Familia Ambato – Refinamiento del prototipo	11
3.8.4 Pruebas Volcán Tungurahua	22
3.9 Resultado de encuesta de satisfacción	35
3.10 Costos del prototipo y su implementación	35
3.11 Análisis final	36
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	37
4.1 Conclusiones	37
4.2 Recomendaciones	39
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXOS	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Evolución Tecnológica y Tendencias Emergentes del IoT.....	6
Tabla 2. Estadísticas desaparecidas/fallecidos Sierra centro de Ecuador	15
Tabla 3. Principales Factores de Riesgo para Alpinistas	16
Tabla 4. Ubicación Sistema de cámaras.....	30
Tabla 5. Requisitos para turismo de montaña	31
Tabla 6. Métodos de rastreo de alpinistas	38
Tabla 7. Características técnicas de la tecnología LoRaWAN	41
Tabla 8. Pasos de la metodología TDDM4IoTS	43
Tabla 9. Relación de aspectos clave para el diseño del prototipo.....	51
Tabla 10. Comparación de distintas tecnologías GPS	54
Tabla 11. Comparación de distintas tecnologías de microcontroladores	56
Tabla 12. Comparación de varios tipos de bases de datos	58
Tabla 13. Comparación de distintas tecnologías para el procesamiento de datos	60
Tabla 14. Comparación de distintas plataformas de visualización	61
Tabla 15 Comparación de tipos de servidores	62
Tabla 16. Coordenadas para cálculos de la Ruta Norte – volcán Tungurahua	63
Tabla 17. Ruta Sur – volcán Tungurahua.....	69
Tabla 18. Simulación en Radio Mobile de rutas con 1 retransmisor - volcán Tungurahua	76
Tabla 19. Consumo de corriente de nodo emisor.....	78

Tabla 20. Parámetros técnicos de la Ruta Pondoá con 1 y 2 repetidores.....	105
Tabla 21. Parámetros técnicos de la Ruta Puela con 1 y 2 repetidores.....	106
Tabla 22. Registro de datos de pruebas en la Ruta 1 – Campus Huachi.....	111
Tabla 23. Registro de datos de pruebas en la Ruta 1 – Parque Montalvo.....	8
Tabla 24. Registro de datos de pruebas en la Ruta Norte – Parque de la Familia	14
Tabla 25. Registro de datos de pruebas en la Ruta Sur – Parque de la Familia.....	19
Tabla 26. Registro de pruebas en la Ruta Norte – Volcán Tungurahua.....	25
Tabla 27. Despliegue del sistema Ruta Norte – Volcán Tungurahua	28
Tabla 28. Registro de pruebas en la Ruta Sur – Volcán Tungurahua	31
Tabla 29. Despliegue del sistema Ruta Sur – Volcán Tungurahua.....	34
Tabla 30. Costos del prototipo de geolocalización	35
Tabla 31. Costos de propuesta de mejora del prototipo de geolocalización	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Impacto Urbano y Datos Geoespaciales	7
Figura 2. Ciclo de Preparación y Análisis de Datos.....	8
Figura 3. Aplicaciones de la Tecnología NB-IoT	9
Figura 4. Arquitectura de la Tecnología Sigfox.....	10
Figura 5. Arquitectura de Comunicación LoRaWAN en IoT	11
Figura 6. Gráfico estadístico Desaparecidos/Fallecidos por Provincia.....	15
Figura 7. Ruta Baños – Volcán Tungurahua -Ruta E30.....	23
Figura 8. Ruta Montaña (Refugio - Cumbre).....	24
Figura 9 Sendero de ascenso al cráter (ruta sur del volcán).....	25
Figura 10. Puntos críticos de riesgo del volcán Tungurahua	26
Figura 11. Equipos de comunicación y monitoreo en el volcán Tungurahua.....	29
Figura 12. Nivel de cobertura 2G y 3G en el volcán Tungurahua	34
Figura 13. Nivel de cobertura 3G y 4G en el volcán Tungurahua	35
Figura 14. Nivel de cobertura 2G y 4G en el volcán Tungurahua	36
Figura 15. Arquitectura IoT y protocolos	42
Figura 16. Arquitectura del prototipo de geolocalización.....	53
Figura 17. Diseño Nodo Emisor	77
Figura 18. Diagrama de Sistema de Geolocalización y Comunicación LoRaWAN..	80
Figura 19. Diseño 3D contenedores	80
Figura 20. Vista frontal y posterior de contenedor	81

Figura 21. Diagrama de flujo del GPS 6M	82
Figura 22. Codificación para adquisición de coordenadas geográficas	83
Figura 23. Comparación de datos de Geolocalización.....	84
Figura 24. Diagrama de flujo para la transmisión de datos con LoRaWAN	84
Figura 25. Código de definición de variables en una trama.....	85
Figura 26. Diagrama de rastreo y localización.....	87
Figura 27. Librerías instaladas para los nodos móviles	88
Figura 28. Librerías instaladas en el nodo de retransmisión.....	89
Figura 29. Librerías utilizadas en el nodo Gateway.....	90
Figura 30. Diseño de bloques para comunicación con el servidor en Node Red.....	92
Figura 31. Levantamiento de máquina virtual en Google cloud.....	94
Figura 32. Configuración de puertos en la MV	94
Figura 33. Conexión SSH de la MV	96
Figura 34 Instalación de Ubuntu en MV	97
Figura 35. Plataforma de visualización.....	98
Figura 36. Caso 1 Explorador en movimiento	99
Figura 37. Registro de datos en phpMyAdmin del caso 1	99
Figura 38. Caso 2 Explorador inactivo	100
Figura 39. Registro de datos en phpMyAdmin del caso 2	101
Figura 40. Función de tiempo de espera en Node red para caso 2.....	101
Figura 41. Caso 3 Emergencia	102

Figura 42. Registro de datos en phpMyAdmin del caso 3	102
Figura 43. Mensaje de emergencia vía Telegram	103
Figura 44. Visualización de coordenadas en Google maps.....	103
Figura 45. Arquitectura mejorada del prototipo.....	104
Figura 46. Mapa de ubicaciones para pruebas de funcionamiento en Tungurahua .	107
Figura 47. Universidad Técnica de Ambato – Campus Huachi.....	108
Figura 48. Ruta 1 Campus Huachi	108
Figura 49. Ruta generada cada 30 segundos por Geo Tracker en el estadio de la Universidad	1
Figura 50. Comparativa de rutas del prototipo y Geo Tracker cada 30 segundos	2
Figura 51. Variación de distancia entre cada punto cada 30 segundos.....	2
Figura 52. Temperatura del prototipo de prueba cada 30 segundos	3
Figura 53. Consumo de batería del prototipo – Estadio UTA	4
Figura 54. Porcentaje de éxito del prototipo cada 30 segundos.....	4
Figura 55. Área del parque Montalvo	5
Figura 56. Ruta registrada con el prototipo.....	6
Figura 57. Comparación ruta prototipo vs Geo Tracker – Parque Montalvo.....	6
Figura 58. Gráfico estadístico del error de distancia en metros	9
Figura 59. Gráfico estadístico de la temperatura C°	9
Figura 60. Gráfico estadístico del consumo de batería	10
Figura 61. Gráfico estadístico del Éxito vs Error de las pruebas	10

Figura 62. Área del Parque de la familia - Ambato	11
Figura 63. Ruta 1 y Ruta 2 en el parque de la familia.....	11
Figura 64. Ruta Norte registrada por el prototipo – Parque de la familia.....	12
Figura 65. Comparación ruta norte prototipo vs GeoTracker – Parque de la Familia	13
Figura 66. Gráfico del error de distancia en metros – Ruta norte	15
Figura 67. Gráfico de la variación de la temperatura – Ruta norte	15
Figura 68. Gráfico del consumo de batería – Ruta norte	16
Figura 69. Gráfico del Éxito vs Error – Ruta norte Familia.....	16
Figura 70. Ruta Sur registrada por el prototipo – Parque de la familia	17
Figura 71. Comparación ruta Sur prototipo vs GeoTracker – Parque de la Familia..	18
Figura 72. Gráfico del error de distancia en metros – Ruta Sur.....	20
Figura 73. Gráfico de variación de Temperatura C°– Ruta Sur	20
Figura 74. Gráfico consumo de batería – Ruta Sur	21
Figura 75. Gráfico de Éxito vs Error – Ruta norte Parque de la familia.....	21
Figura 76. Área del volcán Tungurahua.....	22
Figura 77. Ruta Norte y Ruta Sur del volcán Tungurahua.....	23
Figura 78. Ruta Norte registrada por el prototipo – Pondoá	23
Figura 79. Comparación Ruta Norte prototipo vs GeoTracker – Pondoá.....	24
Figura 80. Gráfico del error de distancia en metros – Ruta Norte Pondoá	26
Figura 81. Gráfico de variación de temperatura C° – Ruta Norte Pondoá.....	26
Figura 82. Gráfico de variación del consumo de batería – Ruta Norte Pondoá.....	27

Figura 83. Gráfico del Éxito vs Error – Ruta Norte Pondoá.....	27
Figura 84. Ruta Sur registrada por el prototipo – Puela.....	29
Figura 85. Comparación Ruta Sur prototipo vs GeoTracker – Puela	30
Figura 86. Gráfico del error de distancia en metros – Ruta Sur Puela.....	32
Figura 87. Gráfico de variación de temperatura C° – Ruta Sur Puela.....	32
Figura 88. Gráfico de variación del consumo de batería – Ruta Sur Puela	33
Figura 89. Gráfico de Éxito vs Error – Ruta Sur Puela.....	33

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Encuesta de levantamiento de requerimiento para el prototipo.....	49
Anexo B. Codificación del nodo móvil	51
Anexo C. codificación nodo retransmisor.....	57
Anexo D. Codificación nodo Gateway	60
Anexo F. Simulación en Radio Mobile de rutas con 2 retransmisores - volcán Tungurahua	67
Anexo G. Encuesta de satisfacción del prototipo	68

RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto tiene como objetivo mejorar la seguridad de los exploradores en las zonas montañosas del volcán Tungurahua mediante la implementación de un sistema de localización en tiempo real basado en LoRaWAN y GPS NEO 6M. Para cubrir las necesidades de los exploradores, identificadas en la encuesta, se planteó una arquitectura IoT adecuada, seleccionando los módulos y componentes electrónicos más eficientes. Durante las pruebas de campo realizadas en las rutas Norte y Sur del volcán, el sistema mostró una tasa de éxito del 75% en la ruta Norte y del 70% en la ruta Sur, reflejando su efectividad en terrenos difíciles. El sistema alcanzó un 80% de cobertura en áreas con señal constante y un margen de error de 6.42 metros, aunque en zonas con vegetación densa y formaciones rocosas el margen de error aumentó a 7.37 metros, lo que resalta la necesidad de mejorar la cobertura en estas áreas críticas. Aunque el prototipo utiliza una batería de 8800mA, su autonomía se limitó a 4 horas, lo que representa un desafío para expediciones más largas. La implementación de baterías retráctiles extendió la autonomía a 8 horas, aunque se requiere optimización para expediciones prolongadas. La simulación de dos repetidores en las rutas Norte - Pondo y Sur - Puela mejoró significativamente la calidad de la señal, pasando el nivel de recepción (Rx) de -120.2 dBm a -75.6 dBm, asegurando una transmisión confiable en zonas remotas.

Palabras clave: Sistema de localización, LoRaWAN, exploradores, seguridad, monitoreo, geolocalización

ABSTRACT

The objective of this project is to enhance the safety of explorers in the mountainous areas of Mount Tungurahua through the implementation of a real-time localization system based on LoRaWAN and GPS NEO 6M. To address the needs of the explorers identified in the survey, an appropriate IoT architecture was developed, selecting the most efficient modules and electronic components. During field tests conducted on the North and South routes of the volcano, the system showed a success rate of 75% on the North route and 70% on the South route, demonstrating its effectiveness in challenging terrain. The system achieved 80% coverage in areas with constant signal and a margin of error of 6.42 meters, though in areas with dense vegetation and rocky formations, the margin of error increased to 7.37 meters, highlighting the need to improve coverage in these critical areas. Although the prototype uses an 8800mA battery, its autonomy was limited to 4 hours, which posed a challenge for longer expeditions. The implementation of retractable batteries extended the autonomy to 8 hours, though further optimization is needed for extended expeditions. The simulation of two repeaters on the North - Pondoá and South - Puela routes significantly improved signal quality, with the reception level (Rx) improving from -120.2 dBm to -75.6 dBm, ensuring reliable transmission in remote areas.

Keywords: Localization system, LoRaWAN, explorers, safety, monitoring, geolocation.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Tema de investigación

SISTEMA DE LOCALIZACIÓN EN TIEMPO REAL PARA LA SEGURIDAD DE EXPLORADORES EN LAS ZONAS MONTAÑOSAS DE TUNGURAHUA CON TECNOLOGÍA LORAWAN

1.1.1 Planteamiento del problema

El Monte Everest, conocido como la cumbre más alta del mundo, también es tristemente célebre por su peligrosidad. Según un análisis de BBC News, más de 280 personas han fallecido intentando alcanzar su cima. A pesar de que el número absoluto de muertes continúa aumentando, el porcentaje de víctimas en relación con el número de alpinistas que ascienden más allá del campamento base se ha reducido a menos del 1%. Estas cifras reflejan avances en las medidas de seguridad y en la experiencia de los excursionistas, aunque subrayan que los riesgos inherentes al montañismo siguen siendo elevados, incluso en los entornos más controlados [1].

En Ecuador, los retos del montañismo también se evidencian en eventos recientes. El 28 de agosto de 2021, un grupo de 10 turistas se extravió durante una excursión en el nevado El Altar, en Chimborazo. El operativo de búsqueda, liderado por el Grupo de Operaciones Especiales de la Policía Nacional y el Cuerpo de Bomberos de Penipe, duró más de 14 horas y logró rescatar con vida a los excursionistas. Este caso destaca no solo la importancia de la coordinación entre grupos especializados, sino también la necesidad de sistemas de rastreo más eficientes para evitar que los excursionistas enfrenten situaciones de alto riesgo en lugares inhóspitos [2].

En un suceso más devastador, Kevin Pazmiño, un joven excursionista, perdió la vida tras extraviarse en el volcán Tungurahua. Su cuerpo fue hallado después de cuatro días de intensa búsqueda, en un operativo que involucró a decenas de rescatistas de diversas ciudades, como Ambato, Quito y Baños, así como al Grupo de Operaciones

Especiales de la Policía Nacional (GOE). Este caso evidencia los peligros extremos que enfrentan los montañistas en condiciones adversas y resalta la necesidad urgente de implementar tecnologías avanzadas, como sistemas de rastreo en tiempo real, para prevenir tragedias similares y optimizar las respuestas ante emergencias en zonas remotas [3].

La ausencia de cobertura de redes de comunicación tradicionales en las zonas remotas de Ambato limita significativamente las posibilidades de localizar y monitorear a los alpinistas en tiempo real. Esto crea un vacío en la capacidad de responder de manera rápida y eficiente ante situaciones de emergencia, aumentando el riesgo de extravío y las probabilidades de incidentes graves. Sin herramientas tecnológicas adecuadas para suplir esta carencia, los equipos de rescate enfrentan grandes desafíos para coordinar y ejecutar sus operaciones, lo que pone en riesgo tanto a los alpinistas como a los rescatistas [4].

Las operaciones de búsqueda y rescate en áreas montañosas enfrentan desafíos significativos debido a la falta de infraestructura de comunicación. La ausencia de torres de telefonía móvil y redes de radio confiables en regiones remotas dificulta la coordinación efectiva entre los equipos de rescate, lo que puede retrasar las respuestas en situaciones críticas. Según un artículo de Critical Communication Solutions, la falta de infraestructura en áreas remotas es un obstáculo importante para los primeros auxilios, afectando negativamente la eficiencia de las operaciones de rescate [5].

1.2 Antecedentes investigativos

Diversas investigaciones han explorado el uso de tecnologías IoT y sistemas de comunicación inalámbricos para resolver problemas de rastreo y localización en áreas remotas, proporcionando un marco de referencia esencial para este proyecto.

En la Universidad Politécnica de Valencia, en 2019, Sánchez et al. desarrollaron un sistema de monitoreo ambiental basado en LoRaWAN, titulado “Environmental Monitoring in Mountain Áreas Using LoRaWAN Technology”. Este sistema fue implementado en regiones montañosas para recopilar datos en tiempo real sobre temperatura y humedad. Los resultados demostraron que LoRaWAN es eficiente en

áreas con cobertura limitada, manteniendo una comunicación estable hasta 15 km de distancia. Esta investigación valida la viabilidad técnica de LoRaWAN en entornos similares a Tungurahua [6].

En el estudio se demostró que LoRaWAN es eficaz para monitorear en áreas montañosas, manteniendo una comunicación estable hasta 15 km. Este hallazgo valida su uso en el proyecto de geolocalización de exploradores en el volcán Tungurahua, asegurando conectividad en terrenos remotos.

En la Universidad Técnica de Ambato, en 2023, Jeison Edwin, Manobanda Guachamboza realizaron un estudio titulado “Sistema Electrónico de Monitoreo de Signos Vitales y Geolocalización para Alpinistas del Parque Nacional Cotopaxi (PNC) mediante Tecnología IoT”. Este proyecto se centró en la monitorización de emergencias generadas por montañeros en el Parque Nacional Cotopaxi, utilizando una red LPWAN y tecnología Sigfox para alertar a las autoridades y coordinar la asistencia inmediata. El sistema recopila datos en tiempo real sobre signos vitales, como la saturación de oxígeno y la frecuencia cardíaca, así como la ubicación mediante GPS, utilizando un prototipo físico que se lleva en la muñeca del usuario. El sistema fue implementado en un servidor LAMP en Microsoft Azure y utiliza la infraestructura de la nube para procesar la información y presentarla en un panel de control. Este sistema demuestra cómo IoT y LPWAN pueden mejorar la seguridad en actividades de alto riesgo, como el montañismo en áreas remotas [7].

El estudio de Jeison Edwin, Manobanda Guachamboza (2023) desarrolló un sistema de monitoreo de signos vitales y geolocalización para alpinistas en el Parque Nacional Cotopaxi, utilizando LPWAN y Sigfox. Este sistema es relevante para el prototipo, ya que demuestra cómo la tecnología IoT y LPWAN puede mejorar la seguridad de exploradores en áreas remotas, como el volcán Tungurahua, proporcionando datos en tiempo real de salud y ubicación.

En la Universidad Técnica de Ambato, en 2024, Cando Toapanta y Edison Fernando realizaron una investigación titulada “Sistema de Comunicación IoT para el Rastreo y Localización de Niños con Tecnología Sigfox para la Ciudad de Ambato, Ecuador”. Desarrollaron un sistema de rastreo portátil que utiliza tecnología Sigfox para enviar información de ubicación en tiempo real. Las pruebas demostraron que el sistema es

efectivo en la transmisión de datos, con un intervalo de 15 segundos entre envíos, logrando un 95% de efectividad en condiciones adversas. Este trabajo resalta cómo la integración de tecnologías IoT puede mejorar la seguridad de los niños en áreas urbanas y rurales, proporcionando una herramienta confiable para situaciones de emergencia [8].

La investigación de Cando Toapanta y Edison Fernando (2024) desarrolló un sistema de rastreo para niños en Ambato utilizando tecnología Sigfox, logrando una efectividad del 95% en condiciones adversas. Este sistema de localización en tiempo real es relevante para nuestro proyecto, ya que demuestra cómo IoT y Sigfox pueden garantizar una comunicación confiable en áreas remotas, como el volcán Tungurahua, para el rastreo y seguridad de los exploradores.

En la Universidad Politécnica Salesiana, en 2023, Daniel Eduardo Almeida Correa realizó un estudio titulado “Diseño e Implementación de un Sistema de Localización y Rastreo GPS de Lanchas Pesqueras Utilizando Comunicación Inalámbrica”. El proyecto se centró en el desarrollo de un sistema para rastrear lanchas pesqueras en tiempo real, utilizando tecnología GPS y comunicaciones inalámbricas. El sistema consta de varios nodos, incluidos los módulos GPS y de transmisión de datos, que envían información a una red de monitoreo. Este sistema permitió mejorar el seguimiento de las lanchas, optimizando la seguridad en las actividades pesqueras en áreas marinas, con una precisión GPS adecuada para el rastreo y la visualización de la ubicación en tiempo real [9].

El estudio de Daniel Eduardo Almeida Correa (2023) desarrolló un sistema de localización y rastreo GPS para lanchas pesqueras, utilizando comunicaciones inalámbricas. Este sistema es relevante para el prototipo, ya que demuestra cómo la integración de GPS y comunicaciones inalámbricas puede mejorar el rastreo en tiempo real, optimizando la seguridad en actividades en áreas remotas, como el volcán Tungurahua, para la geolocalización de exploradores.

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en 2024, Asqui Llangarí y Silvio Jhony realizaron un estudio titulado “Diseño e Implementación de un Sistema con Tecnología LoRaWAN para Localización de Niños entre 0 y 11 Años en Ambientes Abiertos de Alta Concurrencia”. El prototipo desarrollado consta de tres nodos: un

nodo sensor que recoge datos de GPS mediante el módulo Neo-6M y datos de temperatura con el módulo Mlx 90614, transmitiendo esta información al nodo Gateway. Este último envía los datos a The Things Network (TTN), mientras que el nodo de procesamiento se encarga de controlar la geocerca y la temperatura del niño, integrando los datos en Node-RED. Además, el nodo de almacenamiento guarda los datos de GPS, fecha y temperatura en la base de datos Firebase, siendo crucial en casos de extravío. El sistema muestra los datos en tiempo real en un mapa, cubriendo distancias entre 389.46 a 1039.64 metros, con una autonomía de batería de 8 horas y una precisión GPS entre 5.1429 y 22.129 metros. Este sistema ha demostrado ser eficaz para el monitoreo y envío de alertas en tiempo real en situaciones de emergencia, como pérdidas o secuestros [10].

El estudio de Asqui Llangarí y Silvio Jhony (2024) desarrolló un sistema de localización para niños utilizando LoRaWAN, con nodos que recogen datos de GPS y temperatura, y envían información a través de The Things Network (TTN). Este sistema es relevante para nuestro proyecto, ya que demuestra cómo LoRaWAN puede ser utilizado para monitorear en tiempo real y enviar alertas en áreas remotas, garantizando la seguridad de los exploradores en el volcán Tungurahua.

1.3 Fundamentación teórica

1.3.1 Internet de las cosas IoT

Una de las nuevas estructuras dentro de la tecnología es el Internet de las cosas (IoT), algunas veces denominado «Internet de los objetos», es una gran herramienta para analizar las situaciones reales de los trabajos lo cual cambiará todo paradigma de procesos, incluso a nosotros mismos. Como se puede observar en la Tabla 1, especifica los aspectos importantes de la historia IoT. Si bien todo este proceso se puede parecer una declaración muy arriesgada de analizarla, hay que tomar en cuenta y recordar el impacto que Internet ha tenido sobre la educación en general, la comunicación colectiva de los negocios, las empresas, la ciencia, el gobierno y la humanidad [11].

Tabla 1. Evolución Tecnológica y Tendencias Emergentes del IoT [11]

Aspectos	Descripción
¿Qué es IoT?	El Internet de las Cosas (IoT) es una red de dispositivos físicos, vehículos, electrodomésticos, y otros objetos, que están conectados a internet y pueden recopilar, intercambiar y procesar datos sin intervención humana.
Aplicaciones principales	- Ciudades inteligentes: Gestión de tráfico, iluminación, y monitoreo ambiental. - Salud inteligente: Dispositivos de monitoreo de pacientes en tiempo real. - Agricultura inteligente: Sensores de humedad y temperatura en cultivos.
Beneficios	- Automatización: Mejora de la eficiencia operativa al automatizar tareas. - Monitoreo en tiempo real: Recopilación de datos para una toma de decisiones más rápida. - Optimización de recursos: Uso más eficiente de los recursos.
Desafíos	- Seguridad: Riesgos de ciberseguridad debido a la gran cantidad de dispositivos conectados. - Interoperabilidad: Dificultad para integrar dispositivos de diferentes fabricantes. - Consumo energético: Requiere soluciones eficientes para dispositivos con baterías.
Futuro de IoT	Se espera que IoT crezca exponencialmente, conectando miles de millones de dispositivos para mejorar la calidad de vida, optimizar industrias y permitir avances en áreas como la salud, la educación y la gestión ambiental.

La arquitectura de la información basada en Internet permite el intercambio de bienes y servicios entre todos los elementos, equipos y objetos conectados a la red. La IoT se refiere a la interconexión en red de todos los objetos cotidianos que a menudo están equipados con algún tipo de inteligencia. En este contexto, Internet puede ser también una plataforma para dispositivos que se comunican electrónicamente y comparten información y datos específicos con el mundo que les rodea [11].

a. Recolección y Transmisión de Datos Geoespaciales

Sólo cuando se tiene conocimiento de la ubicación de los datos, se pueden establecer estas conexiones. Pero el gran desafío al que se enfrentan las ciudades modernas para la gestión de esta información es la gran cantidad y complejidad de la información geoespacial que se recibe para analizar («Big Data»). Como se observa en la Figura 1, es una comparación gráfica entre el pasado y el presente de las ciudades con ayuda de esta tecnología. Todo tiene una ubicación, una forma y una función, desde una línea de costa, pasando por los edificios, calles o espacios verdes. Todos ellos interactúan

entre sí, afectan y son afectados. La propia naturaleza tridimensional de las ciudades complica la toma de datos, ya que en el mismo punto (x, y), pueden registrarse paradas de metro, oficinas, residencias y depósitos de agua en las azoteas. Y se complica aún más cuando interponemos la cuarta dimensión en la información, la dimensión temporal, por la que los datos tienen una historia que puede ser interesante analizar para comprender procesos y patrones de desarrollo que pueden llegar a ser muy útiles para la planificación territorial y la propia gestión urbanística [12].



Figura 1. Impacto Urbano y Datos Geoespaciales[12]

Para recolectar la información, se dispone de diversas tecnologías que permiten geolocalizarla sobre diferentes dinámicas sociales. Desde sensores urbanos diseñados para tomar mediciones ambientales hasta aplicaciones que miden actividades en tiempo real o que reconstruyen las dinámicas de flujo de los habitantes a partir del GPS de sus móviles. Es fascinante cómo la tecnología facilita la obtención de tanta información, pero también plantea un gran desafío en términos de gestión.

La inmensa cantidad de datos, conocida como «Big Data», puede resultar abrumadora, y la clave está en cómo gestionarla correctamente. La frecuencia temporal de la recolección de datos, la cantidad exacta que se necesita obtener, así como la distancia espacial, la resolución, la precisión y la incertidumbre asociada a la calidad de los datos, son factores cruciales. Todo esto debe manejarse con cuidado, y una base de datos centralizada y autorizada se vuelve esencial para asegurar que esta información se utilice de manera efectiva y precisa [12].

b. Almacenamiento y análisis de datos

Un almacenamiento de datos es un repositorio central de información que se puede analizar para tomar decisiones mejor informadas. Los datos fluyen hacia un almacenamiento de datos desde sistemas transaccionales, bases de datos relacionales y otros orígenes, por lo general a un ritmo regular. Como se observa en la Figura 2, las fases del tratamiento de los datos. Los analistas empresariales, los ingenieros de datos, los científicos de datos y los responsables de la toma de decisiones obtienen acceso a los datos mediante herramientas de business intelligence (BI, inteligencia empresarial), clientes SQL y otras aplicaciones de análisis [13].

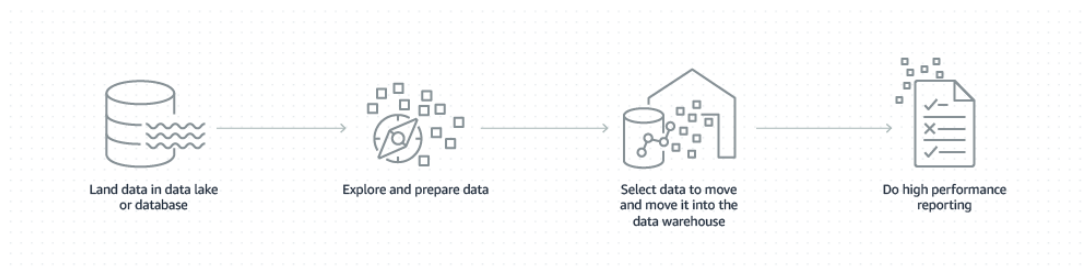


Figura 2. Ciclo de Preparación y Análisis de Datos [13]

Los datos y el análisis se han vuelto fundamentales para que las empresas mantengan la competitividad. Las empresas utilizan informes, paneles y herramientas de análisis para extraer información de los datos, monitorear el desempeño de la empresa y respaldar la toma de decisiones. Los almacenamientos de datos son fundamentales para estos informes, paneles y herramientas de análisis. Guardan los datos de manera eficaz para reducir las operaciones de entrada y salida (E/S) de datos y entregar resultados de consultas rápidamente a cientos y miles de usuarios de manera simultánea [13].

1.3.2 Tecnologías de Comunicación Inalámbrica en IoT

En informática y telecomunicaciones, se conoce como red inalámbrica a un tipo de conexión entre sistemas informáticos (o sea, entre computadoras que se lleva a cabo mediante diversas ondas del espectro electromagnético. Es decir, es una conexión de nodos que no requiere de ningún tipo de cableado o dispositivo alámbrico, ya que la transmisión y recepción de la información se produce mediante puertos especializados.

Este tipo de tecnología representa un enorme salto adelante respecto de los métodos tradicionales [14].

a. NB-IoT

Ofrece una ruta inalámbrica dedicada optimizada para IoT. Como el nombre sugiere, La IoT de banda estrecha utiliza un ancho de banda muy estrecho, lo que permite una excelente cobertura extendida al tiempo que maximiza la duración de la batería de los dispositivos. Como se puede observar en la Figura 3, NB-IoT puede utilizarse en varios sectores productivos. Los dispositivos NB-IoT pueden lograr más 10 años de duración de la batería [15].

La arquitectura NB-IoT consta de dispositivos finales. (sensores), estaciones base o puntos de acceso, La red central y los servidores/plataformas de aplicaciones. Se pueden utilizar componentes opcionales como puertas de enlace para conectar nodos dentro de edificios o bajo tierra cuando el acceso directo no es posible [15].

NB-IoT tiene tres modos de implementación distintos para maximizar la cobertura en diversas infraestructuras.:

- ✓ Dentro de banda – Utiliza bloques de recursos dentro de un operador LTE normal
- ✓ Banda de guarda – Utiliza bloques de recursos no utilizados dentro de un operador LTE normal
- ✓ Ser único – Utiliza portadora independiente en espectro dedicado.

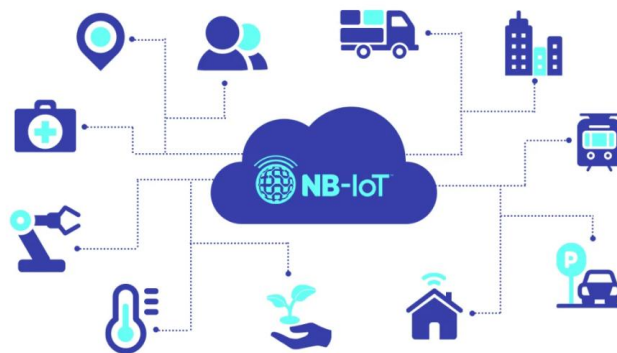


Figura 3. Aplicaciones de la Tecnología NB-IoT [15]

b. Sigfox

Sigfox es una red de IoT pensada para tener un bajo consumo y ser independiente de los despliegues de telefonía. En IoT (Internet of Things o Internet de las cosas) muchas veces redes específicas, dedicadas para esa función. Entre las soluciones y compañías que ofrecen soluciones de conectividad alternativas a las clásicas GSM/3G/4G, destaca SigFox.

Esta conexión entre equipos conectados es posible gracias a su tecnología de radio de banda ultra estrecha. Es energéticamente bastante eficiente y utiliza bandas de frecuencia libres de licencia, disponibles en todo el mundo, como las bandas ISM. Esto le obliga en parte a no poder ocupar el canal más de cierto porcentaje del tiempo conocido como duty cycle, imponiendo una de las limitaciones mas fuertes a mi entender, sobre Sigfox, que es el límite en el número de mensajes diarios por dispositivo a 140 [16].

Los dispositivos conectados de Sigfox están casi siempre en espera, lo que les permite consumir muy poca energía. Como se puede visualizar en la Figura 4, una topología de Sigfox. Esto es quizás la mayor ventaja, el bajo consumo le permite que no sea necesario ni estar conectado a la red eléctrica ni tener baterías grandes. Por ejemplo un dispositivo IoT bajo sigfox con una batería decente podría tener una vida útil de hasta 10 años [16].

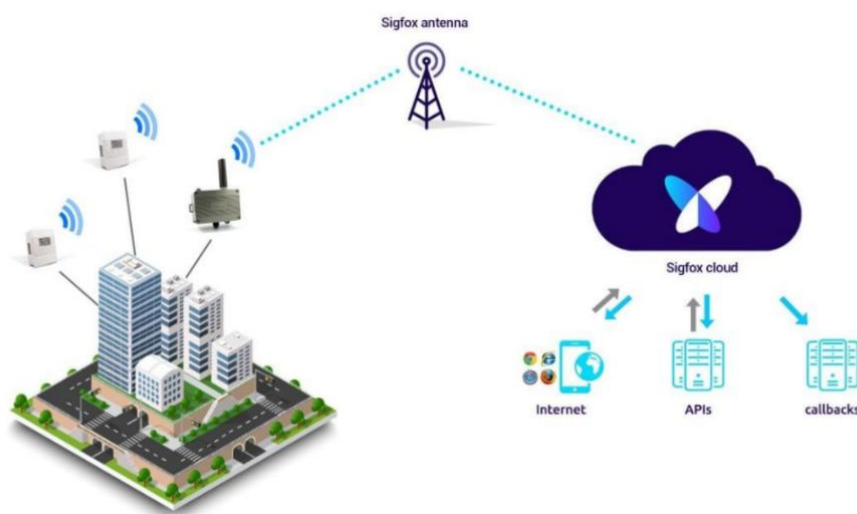


Figura 4. Arquitectura de la Tecnología Sigfox [16]

Como hemos visto, tiene como objetivo sobre todo facilitar la comunicación entre objetos inteligentes. La conectividad M2M le permite conocer los datos almacenados en un dispositivo a través de otro dispositivo central, como una computadora, para facilitar la toma de decisiones [16].

c. *LoRaWAN*

LoRaWAN significa Red de área amplia de largo alcance. Es un protocolo WAN de bajo consumo diseñado para objetos y activos inalámbricos que funcionan con baterías. Las redes LoRaWAN suelen utilizar espectro sin licencia, como bandas de 433 MHz o 900 MHz, para conectar dispositivos a Internet a través de largas distancias de forma inalámbrica. La tecnología se basa en una capa física llamada LoRa, que utiliza modulación de espectro ensanchado chirp. Este método distribuye la señal en un ancho de banda más amplio, haciéndolo resistente a las interferencias y dándole la característica de largo alcance. Semtech desarrolló originalmente la técnica de modulación LoRa y la mantiene [17].

LoRaWAN agrega un protocolo de capa de red para permitir la comunicación bidireccional entre dispositivos finales y puertas de enlace. Luego, las puertas de enlace se conectan a los servidores de la red central a través de IP. Esta arquitectura permite características como velocidades de datos adaptables., direccionamiento del dispositivo, seguridad, itinerancia, como se puede observar en la Figura 5. Haciendo posibles implementaciones a gran escala. La arquitectura LoRaWAN incluye dispositivos finales/nodos con sensores, pasarelas, servidor de red, y servidor de aplicaciones [17].

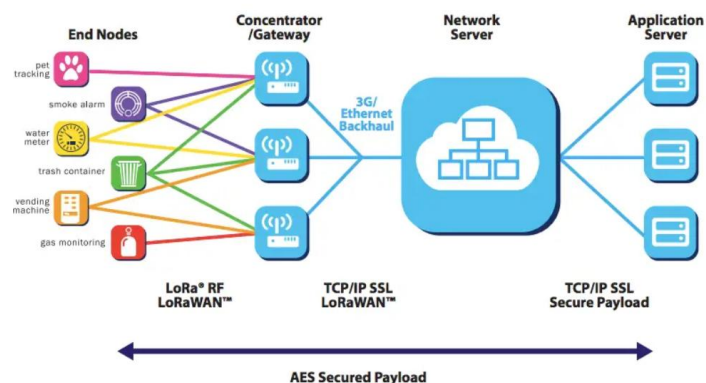


Figura 5. Arquitectura de Comunicación LoRaWAN en IoT [17]

Los puntos finales se conectan a través de enlaces LoRa con puertas de enlace implementadas en exteriores, como en edificios, torres, etc. Como se observa en la Figura 5, en las puertas de enlace interconectan conectividad de backhaul como WiFi, Ethernet o celular. Pueden cubrir kilómetros de largo alcance con velocidades de datos que se adaptan entre 0,3 kbps y 50 kbps. Las puertas de enlace reenvían mensajes desde potencialmente millones de dispositivos a un servidor de red central. Gestiona funciones esenciales como la seguridad, direccionamiento, perfiles de dispositivos, normas, adaptación de la velocidad de datos, etc. También elimina mensajes duplicados y controla la entrega confirmada entre aplicaciones y dispositivos [17].

Tabla 1. Características técnicas de tecnologías IoT [15] [16] [17]

Parámetros Técnicos	Sigfox	LoRa	NB-IoT
			
Modulación	BPSK	QPSK	CSS
Espectro	Banda ISM no licenciada	Banda ISM no licenciada	Bandas de frecuencias LTE
Frecuencia	Europa: 868 MHz, América: 915 MHz, Asia: 433 MHz	Europa: 868 MHz, América: 915 MHz, Asia: 433 MHz	Licenciado
Ancho de Banda	100 Hz	250 kHz y 125 kHz	200 kHz
Velocidad máxima de datos	100 bps	50 kbps	200 kbps
Bidireccional	Limitado/Half-duplex	Sí / semidúplex	Sí / semidúplex
Mensajes máximos/día	UL: 140, DL: 4	UL: Limitado, DL: Limitado	UL: Limitado, DL: Limitado
Longitud máxima de carga útil	UL: 12 bytes	UL: 243 bytes	UL: 1600 bytes
Rango	Urbano: 10 km, Rural: 40 km	Urbano: 5 km, Rural: 20 km	Urbano: 1 km, Rural: 10 km
Inmunidad a frecuencias	Muy alta	Muy alta	Baja
Atenuación y cifrado	No soportado	Sí (AES 128b)	Sí (cifrado LTE)
Red privada	No	Sí	No
Estandarización	Colaboración ETSI	LoRa-Alliance	3GPP

Ventajas de la tecnología LoRaWAN

Estos son algunos de los beneficios destacados que ofrece la tecnología LoRaWAN:

- **Energía ultra baja:** Los dispositivos LoRaWAN pueden funcionar en modo de bajo consumo y su batería puede durar varios años.
- **Gama excepcional:** Cobertura de largo alcance hasta 10 millas en zonas rurales y 1-3 millas en entornos urbanos
- **Penetración profunda en interiores:** Las redes LoRaWAN pueden ofrecer una cobertura profunda en interiores, y cubra fácilmente edificios de varios pisos.
- **Licencias de espectro gratuito:** La tecnología LoRaWAN funciona de forma gratuita (no licenciado) frecuencias, sin tarifas de licencia de espectro adicionales.
- **Alta capacidad:** Capacidad de red para admitir más de un millón de dispositivos por cobertura de puerta de enlace.
- **Despliegue público y privado:** Es fácil implementar redes LoRaWAN públicas y privadas con el mismo software y hardware (dispositivos finales, pasarelas, antenas).
- **Seguridad de extremo a extremo:** Fuerte 128 Cifrado AES de bits de extremo a extremo para una seguridad sólida.
- **Bajo costo:** Costo muy bajo para dispositivos y operación, lo que lo hace ideal para implementaciones de dispositivos grandes.
- **Ecosistema:** LoRaWAN tiene un ecosistema muy grande de fabricantes de dispositivos, desarrolladores de aplicaciones, proveedores de servicios de red, y proveedores de soluciones.[17]

1.3.3 Estadísticas de Turismo en la Provincia de Tungurahua

a. Desaparición de alpinistas en Ecuador

La desaparición y muerte de alpinistas en Ecuador, especialmente en la provincia de Tungurahua, es una tragedia recurrente que pone de relieve los peligros inherentes a las expediciones en los imponentes volcanes de la región. A lo largo de los años, casos como el accidente en el nevado Carihuairazo en 2022, que cobró la vida de tres personas, o la desaparición de la joven campeona de Trail Running, Mishell Anabel Sánchez, en 2024, demuestran la dificultad y el riesgo del montañismo en zonas de gran altitud. Además, otros incidentes trágicos, como la avalancha en el Chimborazo en 2021, siguen reflejando la necesidad urgente de medidas de seguridad más estrictas y una mejor preparación para quienes se aventuran en estos entornos. La Dirección Nacional de Delitos contra la Vida, Muertes Violentas, Desapariciones, Extorsión y Secuestros (Dinased) también ha reportado casos de desapariciones de montañistas en años anteriores, lo que resalta la importancia de la vigilancia y las labores de rescate en estas zonas. Estos trágicos eventos subrayan la vulnerabilidad de quienes buscan desafiar la naturaleza de los volcanes ecuatorianos y la necesidad de extremar precauciones para evitar más tragedias [18], [19], [20].

b. Estadísticas de desapariciones en zonas montañosas

Los incidentes de desapariciones y muertes de alpinistas en Ecuador durante el periodo de 2015 a 2025 siguen reflejando los riesgos inherentes al montañismo en el país, enfrentando condiciones climáticas impredecibles y terrenos extremadamente desafiantes. Las estadísticas de la Tabla 2, evidencian lo trágico de esta realidad.

Las cifras de muertes y desapariciones en el volcán Tungurahua, Chimborazo, Cotopaxi y sus alrededores son alarmantes, con causas que van desde avalanchas hasta malas condiciones climáticas. Como se muestra en la Figura 6, el tiempo de rescate varía, aunque en muchos casos no es suficiente para evitar tragedias. El sistema de geolocalización y monitoreo en tiempo real podría marcar la diferencia, permitiendo ubicar a los alpinistas cuando más lo necesitan.

Tabla 2. Estadísticas desaparecidas/fallecidos Sierra centro de Ecuador [18], [19], [20], [21], [22]

Estado	Provincia/Lugar	Fecha	Causa de Muerte	Tiempo rescate
Fallecido	Chimborazo (Nevado)	2021	Avalancha durante expedición	3 días
Fallecido	Carihuairazo (Volcán)	2022	Accidente en la montaña, caída, mal clima	2 días
Desaparecido	Tungurahua (Volcán Tungurahua)	2024	Desaparición durante entrenamiento (Trail running)	No localizado
Desaparecido	Tungurahua (Volcán)	2024	Ingreso a zona de difícil acceso sin equipo adecuado	No localizado
Fallecido	Chimborazo (Nevado)	2015	Caída, falta de preparación técnica	5 días
Fallecido	Chimborazo (Volcán)	2015	Desprendimiento de rocas	2 días
Fallecido	Tungurahua	2023	caída en zona difícil	1 día
Desaparecido	Chimborazo (Nevado)	2022	Desaparecido en ruta, mal clima	No localizado
Fallecido	Cotopaxi (Volcán)	2024	Despiste y caída durante	4 días
Fallecido	Cotopaxi (Ilinizas)	2025	Desaparecido en una competencia, mal clima	2 días

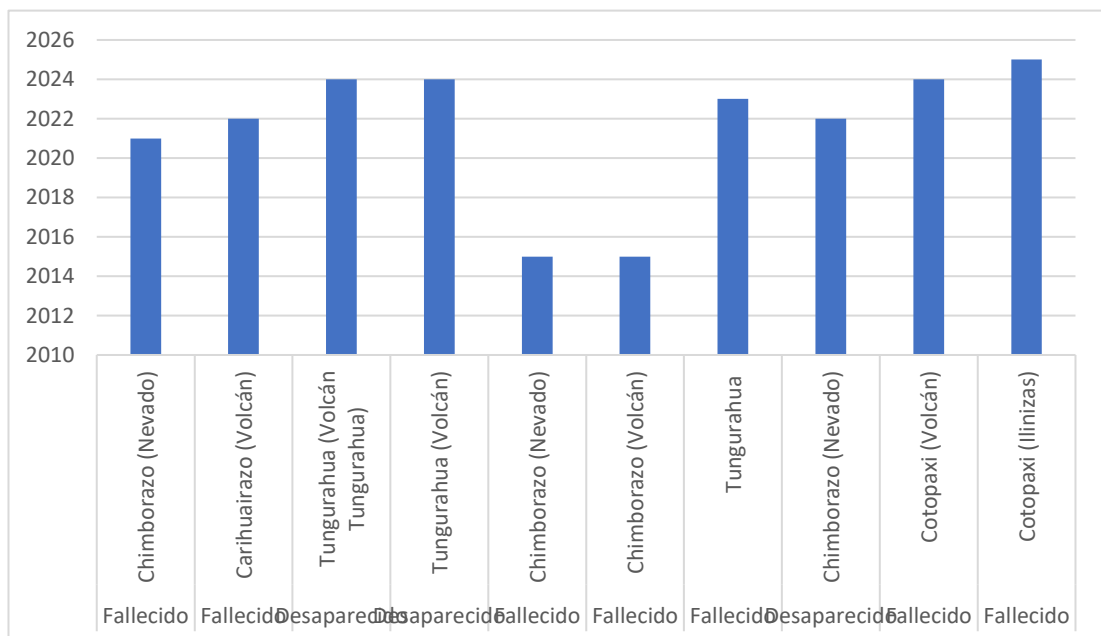


Figura 6. Gráfico estadístico Desaparecidos/Fallecidos por Provincia [18], [19], [20], [21]

c. Provincias con alta incidencia de desapariciones de alpinistas

La mayoría de los incidentes ocurren en áreas cercanas a los grandes volcanes del Ecuador, como el Chimborazo, Tungurahua, Cotopaxi y Carihuairazo. Quito y Guayaquil, aunque no son zonas de montañismo en sí, registran la mayor cantidad de denuncias relacionadas con la desaparición de montañistas debido a que son ciudades principales de origen de los expedicionarios. Las provincias de Tungurahua y Chimborazo son las más afectadas por estos incidentes debido a sus características geográficas, las cuales atraen a turistas y deportistas, pero también presentan un alto riesgo para los aventureros.

d. Factores de riesgo en las desapariciones y muertes de exploradores

Las causas principales de desaparición de andinistas incluyen accidentes debido a condiciones climáticas extremas, falta de experiencia o equipo adecuado, y avalanchas. La falta de visibilidad, la exposición al frío extremo y la inestabilidad del terreno pueden desencadenar tragedias. También se han dado casos donde los montañistas se extravían en las rutas debido a un mal cálculo de tiempo o a desorientación en condiciones adversas. En la región, las autoridades han identificado la necesidad de mejorar las condiciones de seguridad y el monitoreo de las rutas de expedición para reducir estos incidentes.

Tabla 3. Principales Factores de Riesgo para Alpinistas [23]

Factores de Riesgo	Razones
Falta de Preparación Técnica	La inexperiencia y el equipamiento inadecuado aumentan el riesgo de accidentes en terrenos difíciles.
Condiciones Climáticas Extremas	Tormentas y nieve complican la visibilidad y seguridad en las montañas.
Falta de Información sobre el Terreno	La desorientación por desconocer el terreno puede causar caídas y accidentes.
Accidentes por Falta de Prevención	La falta de precauciones frente a peligros naturales, como avalanchas, puede resultar fatal.
Jóvenes y Nuevos Andinistas	Los novatos y jóvenes, sin la preparación adecuada, tienen un mayor riesgo de accidentes.
Falta de Tecnología de Geolocalización y Botones de Emergencia	La ausencia de GPS y sistemas de emergencia aumenta el riesgo de no ser localizados a tiempo en caso de accidente.

e. Vulnerabilidad

Los andinistas en Ecuador son particularmente vulnerables debido a factores como la falta de formación técnica, el desinterés por las condiciones meteorológicas y la escasa preparación ante imprevistos. Además, los accidentes pueden verse exacerbados por la escasez de información en tiempo real sobre el clima y las rutas. Como se puede observar en la Tabla 3, los factores de riesgo a lo que están expuestos los alpinistas. Esto es especialmente peligroso en zonas como el Chimborazo y el Carihuairazo, donde las condiciones pueden cambiar rápidamente [23].

1.3.4 Bienestar Social

El bienestar social en este contexto también se vincula a la importancia de una gestión adecuada de los recursos naturales y el respeto por el medio ambiente, principios fundamentales para garantizar que las futuras generaciones puedan disfrutar de las montañas y los espacios naturales. Además, promover la educación en seguridad montañera y el uso de tecnologías de rescate e intervención rápida forma parte de una estrategia más amplia para mejorar la calidad de vida de las personas involucradas en actividades de montañismo, al tiempo que fomenta la igualdad de oportunidades en el acceso a este tipo de experiencias. En este sentido, la implementación de estas tecnologías no solo ayuda a reducir los riesgos, sino también a incrementar la participación ciudadana en la toma de decisiones relacionadas con la seguridad y el bienestar en las actividades de montaña [24].

La incorporación de tecnologías de geolocalización, como los sistemas GPS, ha revolucionado la seguridad de los senderistas en actividades al aire libre. Estos dispositivos permiten a los excursionistas conocer su ubicación exacta en todo momento, facilitando la navegación y reduciendo significativamente el riesgo de extravío [24].

a. Educación y desarrollo

En el proyecto, el uso de tecnologías avanzadas como GPS y botones de emergencia en actividades de montañismo mejora significativamente la educación y desarrollo de

los senderistas. La formación en el uso de estas herramientas permite a los montañistas estar mejor preparados para enfrentar los riesgos asociados con la actividad, aumentando su confianza y seguridad. Además, fomenta una cultura de prevención y responsabilidad, contribuyendo al bienestar de la comunidad montañista y al desarrollo de sociedades más seguras y conscientes [25].

La educación en seguridad montañera, que debe ir acompañada de una formación técnica sobre el uso de tecnología avanzada, se convierte en un eje transformador en las sociedades modernas que buscan reducir los accidentes en zonas de alta montaña. Fomentar la innovación tecnológica y la creatividad en el sector de la seguridad, utilizando GPS y dispositivos de alerta, podría transformar el enfoque tradicional de la educación en el montañismo [25].

b. Emocional y social

El bienestar emocional y social se ve favorecido al brindar a las senderistas herramientas que aumentan su seguridad, como los sistemas de geolocalización. Estas tecnologías reducen la ansiedad y el estrés, mejorando la experiencia del montañista. Además, facilitan las relaciones interpersonales dentro del grupo, promoviendo la cooperación y el apoyo mutuo en situaciones de emergencia. El uso de tecnología también fomenta la participación ciudadana, creando un entorno más inclusivo y colaborativo en la comunidad montañista [26].

Desde el punto de vista social, las herramientas tecnológicas también juegan un papel fundamental en la creación de una red de apoyo entre los miembros de la comunidad de montañistas. Los dispositivos de localización y botones de emergencia permiten establecer vínculos de cooperación y solidaridad entre los grupos de expedición, ya que todos los miembros del grupo se sienten respaldados por la tecnología [26].

1.3.5 Clima y Geografía del Volcán Tungurahua

El Volcán Tungurahua, situado en la provincia de Tungurahua en la Sierra Central del Ecuador, es una de las formaciones volcánicas más activas y emblemáticas de la región andina. Su altura de 5,023 metros sobre el nivel del mar y su proximidad a zonas pobladas como Baños, lo convierten en un foco de interés tanto desde el punto de vista

geográfico como climático. Los parámetros climáticos y geográficos específicos del Volcán Tungurahua durante todo el año, considerando su influencia sobre las condiciones meteorológicas locales y el impacto en las actividades humanas y la biodiversidad [27].

a. Contexto Geográfico del Volcán Tungurahua

El Tungurahua es un volcán activo situado en la Cordillera Real de los Andes, en la provincia de Tungurahua, Ecuador. La geografía del área circundante está marcada por una topografía montañosa con una importante variabilidad en altitudes, que va desde los 1,000 metros sobre el nivel del mar en las zonas cercanas hasta los 5,023 metros del volcán. Esta diversidad geográfica da lugar a diferentes microclimas dentro de la región, lo cual tiene un impacto directo sobre los parámetros climáticos observados en la zona [27].

El volcán se encuentra en una región susceptible a actividad sísmica y volcánica, lo que puede modificar temporalmente las condiciones climáticas locales, afectando tanto la visibilidad como las precipitaciones [27].

b. Parámetros Climáticos y Efectos del Volcán Tungurahua

El clima en las proximidades del volcán Tungurahua es altamente influenciado por su altitud, la topografía circundante y su actividad volcánica. A continuación, se describen los principales parámetros climáticos de la región.

- ***Temperatura***

La temperatura en el área del Volcán Tungurahua varía significativamente con la altitud. A medida que se asciende hacia la cima del volcán, las temperaturas tienden a disminuir, y las condiciones se vuelven más frías, especialmente durante la noche. Los patrones de temperatura son los siguientes:

Zona de baja altitud (1,000 a 2,000 metros sobre el nivel del mar): En los valles cercanos a Baños, las temperaturas diurnas oscilan entre 18°C y 24°C, mientras que las temperaturas nocturnas descienden a alrededor de 8°C. Durante la temporada seca,

las temperaturas pueden llegar a ser ligeramente más altas debido a la menor nubosidad [28].

Zona intermedia (2,000 a 3,500 metros sobre el nivel del mar): En las laderas del volcán y áreas circundantes, las temperaturas diurnas varían entre 12°C y 18°C, mientras que las noches pueden ser frescas, con temperaturas cercanas a los 5°C. Esta zona es más susceptible a las heladas en los meses más fríos [28].

Zona alta (3,500 a 5,023 metros sobre el nivel del mar): En la cima del volcán y sus alrededores, las temperaturas diurnas oscilan entre 0°C y 5°C, mientras que las temperaturas nocturnas suelen ser bajo cero, especialmente en invierno. La presencia de nieve es común en las cumbres más altas durante la temporada fría [28].

- ***Precipitación***

La precipitación en la zona del Volcán Tungurahua está fuertemente influenciada por el fenómeno orográfico, que ocurre cuando las masas de aire cargadas de humedad se encuentran con la cordillera y se ven forzadas a ascender, lo que genera precipitaciones.

Temporada de lluvias (diciembre a marzo): Durante estos meses, la región experimenta lluvias frecuentes, especialmente en las vertientes del volcán que se encuentran expuestas a los vientos húmedos del océano Pacífico. Las precipitaciones pueden superar los 300 mm mensuales en las zonas más bajas y las laderas del volcán, con picos en enero y febrero. En las zonas altas, las precipitaciones caen en forma de nieve, y en las áreas más bajas, la lluvia es predominantemente [28].

Temporada seca (junio a septiembre): En la temporada seca, la precipitación disminuye considerablemente. Las vertientes del volcán oriental reciben menos lluvia, con una caída de precipitaciones de alrededor de 50 mm mensuales. Las zonas más altas permanecen relativamente secas, pero las nubes y la humedad se pueden acumular en las cumbres, lo que puede generar lluvias esporádicas [27].

Promedio anual de precipitación: En las áreas circundantes al volcán, la precipitación anual varía entre 1,500 mm y 3,000 mm, con la mayor parte de la lluvia concentrada en los meses de la temporada de lluvias [27].

- ***Humedad Relativa***

La humedad relativa en el área del Volcán Tungurahua también sigue un patrón similar al de la precipitación, con valores más altos durante la temporada de lluvias. En las zonas bajas y las laderas orientadas hacia el oeste (expuestas al viento húmedo), la humedad puede superar el 80%, mientras que en las zonas altas la humedad relativa se mantiene alta durante todo el año debido a la presencia de nubes y niebla. En las zonas más secas y las laderas orientadas hacia el este, la humedad relativa disminuye [28].

- ***Vientos***

El régimen de vientos en el Volcán Tungurahua está determinado por su altura y ubicación en la Cordillera Real. Los vientos tienden a ser más fuertes en las cumbres y zonas altas del volcán, especialmente en los meses secos. Durante el día, los vientos soplan desde el este hacia el oeste, transportando aire cálido y seco de la Amazonía. Por la noche, los vientos son más moderados y cambian de dirección debido a la inversión térmica [28].

c. Estacionalidad y Variabilidad Climática

El clima del Volcán Tungurahua presenta una clara estacionalidad, con variaciones significativas entre la temporada de lluvias y la temporada seca:

Temporada de lluvias (diciembre-marzo): En esta época, la actividad volcánica puede influir en las condiciones climáticas, con la posibilidad de lluvias más intensas debido a la liberación de gases volcánicos y material particulado. Las lluvias también pueden estar acompañadas de neblina y bajas visibilidades en las zonas altas [29].

Temporada seca (junio-septiembre): Durante la temporada seca, las condiciones climáticas tienden a ser más estables, pero el viento y la baja precipitación pueden aumentar la acumulación de polvo y ceniza volcánica en el aire, lo que afecta la calidad del aire [29].

1.3.6 Rutas de ascenso al volcán Tungurahua

El Volcán Tungurahua, debido a su actividad volcánica continua y su ubicación en una región montañosa, presenta una serie de riesgos tanto para los exploradores como para las comunidades cercanas. Las zonas de exploración en sus alrededores son susceptibles a fenómenos volcánicos como flujos de lava, caída de cenizas, deslizamientos de tierra y flujos piroclásticos, lo que requiere una planificación adecuada de rutas y la identificación de puntos críticos de riesgo para mitigar posibles impactos. Este informe tiene como objetivo identificar las principales rutas de acceso a las zonas de exploración del volcán y señalar los puntos críticos de riesgo asociados.

a. Rutas principales de acceso al volcán Tungurahua

Las rutas principales para acceder al volcán y sus alrededores se encuentran principalmente en las zonas de los valles cercanos y las laderas. Sin embargo, estas rutas varían en función de la altitud, las condiciones geográficas y la actividad volcánica. Para su ingreso existen dos vías de acceso para ingresar al lugar, la primera se encuentra en el sector de Pondoá. La segunda vía de acceso comienza desde Puela sobre la carretera Baños - Riobamba, se puede acceder en automóvil hasta al sector de Palitahua

Ruta Pondoá–Volcán Tungurahua: Esta es la ruta más importante y transitada, ya que conecta la ciudad de Baños con las zonas cercanas al cráter. La comunidad está ubicada a 2.480 metros sobre el nivel del mar. Partiendo de ese punto después de 4 horas de caminata aproximadamente y con la ayuda de un guía del lugar se puede ascender al volcán, y es una vía vital para el acceso a zonas de exploración a altitudes medias del volcán. Como se observa en la Figura 7, el trayecto de esta ruta de manera grafica. Esta carretera tiene un tramo asfaltado, pero a medida que se asciende hacia el volcán, se convierte en un camino de tierra, lo que requiere vehículos 4x4 [29].

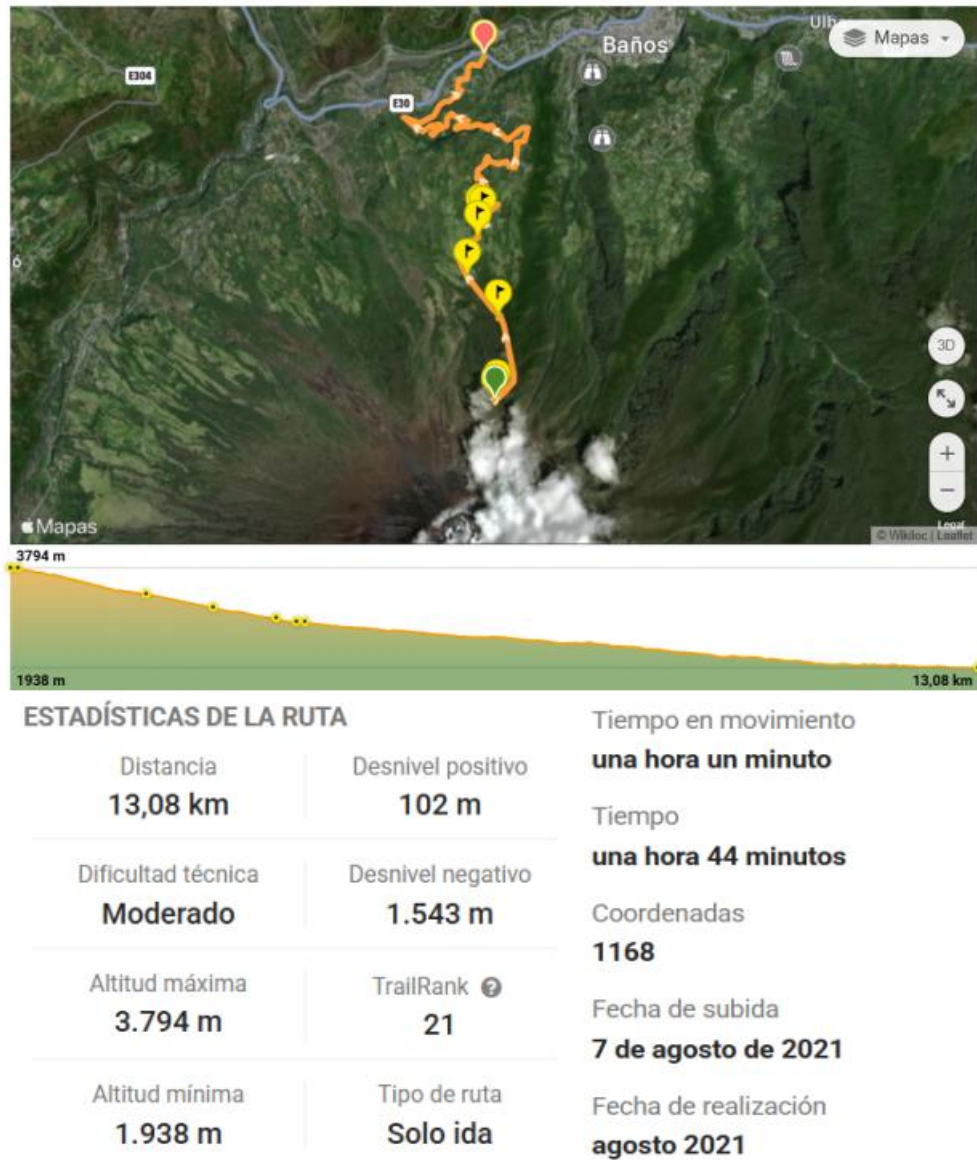


Figura 7. Ruta Baños – Volcán Tungurahua -Ruta E30 [29]

Ruta Refugio-Alta Montaña: A partir del refugio, situado a una altitud de alrededor de 3,000 metros, los exploradores pueden acceder a las zonas altas del volcán. Como se observa en la Figura 8, el trayecto de esta ruta de manera grafica. Esta ruta atraviesa bosques nubosos y páramos, ofreciendo vistas panorámicas, pero también presenta un terreno accidentado y condiciones meteorológicas cambiantes [29].



Figura 8. Ruta Montaña (Refugio - Cumbre) [29]

Ruta Puela – Volcán Tungurahua: La segunda vía de acceso, comienza desde Puela sobre la carretera panamericana 942, se puede acceder en automóvil hasta al sector de Puela en donde inicia un sendero que se divide en dos tramos: el primero conduce a las aguas termales de Palitahua que se encuentran situadas al pie del volcán Tungurahua y el segundo a los flancos suroccidentales del volcán donde hallaremos las lagunas de Minsas. El trayecto de esta ruta de manera gráfica. Aunque esta ruta es menos frecuentada, su terreno accidentado y los frecuentes deslizamientos de tierra en temporada de lluvias representan un desafío significativo [29].



Figura 9 Sendero de ascenso al cráter (ruta sur del volcán) [29]

c. Puntos críticos de riesgo en las zonas de exploración del volcán Tungurahua

Las zonas de exploración en el volcán Tungurahua son propensas a una variedad de fenómenos naturales que representan riesgos graves para la seguridad de los exploradores, guías y comunidades cercanas. A continuación, se identifican los puntos críticos de riesgo más relevantes:

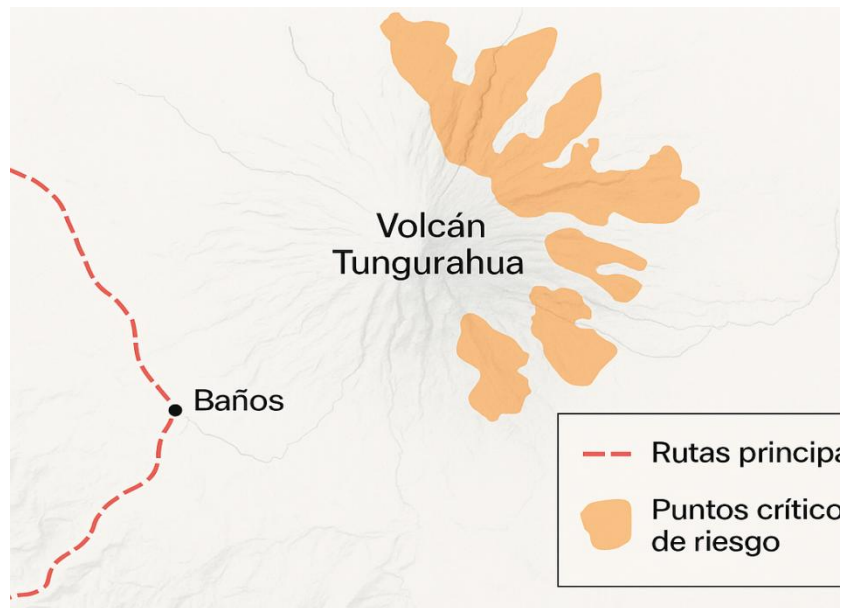


Figura 10. Puntos críticos de riesgo del volcán Tungurahua

- ***Puntos de riesgo por actividad volcánica***

Zona de Flujos Piroclásticos y Lava (Cráter y laderas cercanas): Los flujos piroclásticos, que incluyen gases calientes, cenizas y fragmentos volcánicos, representan un riesgo constante para los exploradores en las cercanías del cráter. Esta área es especialmente peligrosa durante las erupciones, aunque los riesgos permanecen latentes incluso fuera de los eventos eruptivos. Como se observa en la Figura 10, los puntos de riesgo están marcados de color naranja.

Zona de Caída de Ceniza (Laderas del volcán): La caída de ceniza volcánica, que puede ser muy densa durante una erupción, afecta la visibilidad, la calidad del aire y las condiciones de acceso. Las laderas del volcán, especialmente en las rutas hacia el refugio de alta montaña, son áreas de alto riesgo debido a la acumulación de cenizas, lo que puede dificultar el tránsito y dañar equipos [28].

- ***Deslizamientos de tierra y derrumbes***

Áreas de Terreno Inestable (Senderos en las laderas de alta pendiente): Las rutas de acceso, especialmente en la vertiente occidental y en la zona sur del volcán, atraviesan terrenos empinados y suelos inestables. Los deslizamientos de tierra son comunes,

especialmente durante la temporada de lluvias (diciembre a marzo), y pueden bloquear rutas o causar daños a los vehículos y equipos [27].

Causas de los Deslizamientos: La erosión del suelo, los flujos de agua derivados de lluvias intensas y la actividad volcánica pueden generar condiciones propensas a deslizamientos de tierra. El peligro aumenta en las rutas cercanas a las laderas más pronunciadas del volcán, especialmente en la zona de descenso hacia Baños [27].

- ***Inundaciones y flujos de lodo***

Áreas Vulnerables a Flujos de Lodo (Cercanías del volcán): Los flujos de lodo, también conocidos como lahares, son otro riesgo significativo en las zonas de exploración. Estos flujos, que combinan agua y ceniza volcánica, pueden ser devastadores. Las rutas cercanas a los ríos, como los que descienden de la vertiente oriental del volcán, son especialmente vulnerables. Los lahares son más frecuentes después de las lluvias fuertes, cuando el agua mezclada con ceniza volcánica arrastra material hacia los valles [28].

Ríos como el Pastaza y Chanchán: Estos ríos, ubicados en las cercanías del volcán, son propensos a inundaciones repentinas debido a la combinación de lluvias torrenciales y flujos volcánicos. Las rutas cercanas a estos ríos presentan un alto riesgo en caso de que se presenten lahares [28].

- ***Riesgos por condiciones meteorológicas adversas***

Niebla y Bajos Niveles de Visibilidad (Zonas altas del volcán): Las zonas altas del volcán, especialmente cerca del cráter, están frecuentemente envueltas en niebla y nubes densas. Esto reduce considerablemente la visibilidad y aumenta el riesgo de accidentes. Los vientos fuertes, acompañados de lluvia o nieve en las zonas más altas, pueden hacer que las rutas sean aún más peligrosas [26].

Heladas y Nevadas en Alturas (Cima y áreas cercanas): La presencia de hielo y nieve en las cumbres del volcán durante la temporada de invierno crea condiciones difíciles de exploración. Las heladas y nevadas pueden hacer que los senderos sean resbaladizos y peligrosos, especialmente para los exploradores sin la preparación adecuada [26].

- ***Seguridad y protección***

La seguridad y protección son fundamentales en cualquier proyecto que busque mejorar el bienestar social, especialmente en actividades de alto riesgo como el montañismo. En el contexto del proyecto, implica el uso de tecnologías de geolocalización y botones de emergencia para aumentar la seguridad de los andinistas, el objetivo principal es garantizar la protección física, emocional y social de los senderistas. Esto se logra mediante el uso de herramientas tecnológicas que permiten una rápida localización en caso de emergencia, proporcionando un nivel básico de seguridad y protección social, como si fuera una política de seguridad social aplicada al montañismo, que protege la integridad de los participantes durante sus expediciones [25].

d. Enfoques

Dentro de los enfoques para garantizar la seguridad de los andinistas, el uso de tecnologías preventivas es fundamental. En lugar de depender exclusivamente de rescates tradicionales, la implementación de dispositivos GPS y botones de emergencia permite la creación de un sistema preventivo que ofrece una protección integral a los senderistas, asegurando no solo su seguridad en tiempo real, sino también el acceso a servicios de emergencia más rápidos y eficaces. Este tipo de seguro social tecnológico forma parte de la estrategia de seguridad para mitigar riesgos inherentes a la actividad de montaña, tales como accidentes de caída, desorientación, o problemas de salud relacionados con la altitud.

Por otro lado, la asistencia social también puede integrarse al contexto del montañismo mediante el apoyo a comunidades vulnerables, ofreciendo acceso a tecnologías y recursos que mejoren la seguridad de los grupos de senderistas más desprotegidos, como aquellos sin acceso a equipos especializados o que se encuentran en condiciones de pobreza. El aseguramiento de que todos los miembros de la comunidad puedan participar en actividades de montañismo con los medios adecuados es una extensión de los principios de solidaridad y universalidad que sustentan los programas de seguridad social.

1.3.7 Equipos de monitoreo y comunicación en el volcán Tungurahua

El Observatorio del Volcán Tungurahua, OVT, es monitoreado por un científico senior y un asistente, se realizan turnos de ocho días de rotación (martes a martes). Ellos registran la actividad visual y audible, reciben y evalúan las señales de entrada de la red de monitoreo del volcán, prestan apoyo a los científicos, estudiantes nacionales y extranjeros que realizan trabajos de campo en el volcán, participan en reuniones a nivel local y provincial, dan entrevistas en estaciones de radio, televisión y prensa, y proporcionan actualizaciones verbales frecuentes acerca de la actividad volcánica en el sistema de radio UHF regional. También recolectan datos a partir de fuentes termales, mediciones de gas con DOAS móvil, recolectan muestras de cenizas y depósitos de lahares como se muestra en la Figura 11. Además reciben y registran las observaciones de los vigías de volcán [26].

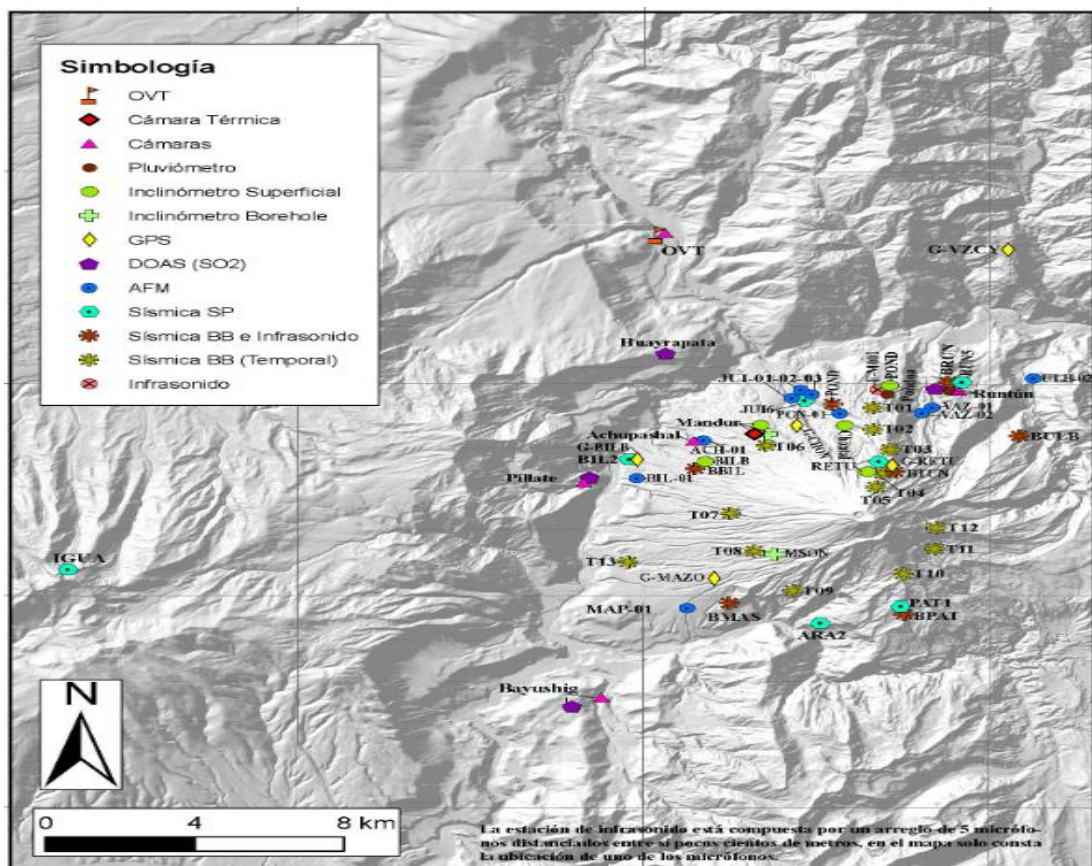


Figura 11. Equipos de comunicación y monitoreo en el volcán Tungurahua [26]

a. Sistema de cámaras

Existen un sistema de cámaras que monitorean el volcán Tungurahua, como se observa en la Tabla 4, se detalla su ubicación de cada una de las cámaras.

Tabla 4. Ubicación Sistema de cámaras [26]

Sector	Ubicación
Cámara OVT	Imagen del volcán visto desde el Observatorio del Volcán Tungurahua (OVT), ubicado en la zona de Guadalupe, a unos 13 Km al norte del cráter del volcán.
Cámara Pillate	Imagen obtenida por la cámara ubicada en las cercanías de la población de Pillate, a unos 7 km al occidente del volcán. Esta cámara vigila los flancos y drenajes occidentales del volcán.
Cámara Achupashal	Imagen obtenida de la cámara ubicada junto a la quebrada Achupashal, a unos 5.2 km al nor-oeste del cráter. Importantes flujos de lodo y flujos piroclásticos han descendido por esta quebrada, afectando a las poblaciones y destruyendo la vía Baños-Penipe.
Cámara Runtun	Imagen del volcán Tungurahua visto desde el sector de Runtún.

b. SIS Ecu 911

El SIS ECU 911 cuenta con la capacidad tecnológica para brindar apoyo con videovigilancia a los volcanes, a las zonas aledañas y a las zonas de posible afectación para evaluar la situación y aportar con información a las entidades de rescate y emergencia. En caso de presentarse alguna eventualidad con los volcanes Cotopaxi y Tungurahua, el SIS ECU 911 coordinará con las entidades articuladas el despacho de recursos para atender a la ciudadanía posiblemente afectada, con el apoyo de las cámaras de videovigilancia o las posibles alertas que se reporten a través de la línea única 9-1-1 o el aplicativo smartphone [30].

También se entregó 31 radios a vigías en la provincia, previo una capacitación, quienes diariamente reportan el comportamiento del coloso. Las radios se caracterizan por tener un mayor alcance, lo que permite llegar con información desde la Sala Operativa del ECU 911 a zonas alejadas, para conocimiento de la ciudadanía y a la vez, recibir informes de situación del coloso para complementar los análisis que realizan las entidades técnicas competentes [30].

Mediante la herramienta de georreferenciación ‘Mobile Locator’, con la que cuenta el Servicio Integrado de Seguridad ECU 911, se rescató a los turistas. Esta tecnología sirve para reducir el rango de búsqueda y facilita las labores para hallar personas en montañas u otros sitios de excursión [30].

c. Requisitos Para Turismo De Montaña En Ecuador

Para realizar actividades de exploración y alpinismo en los distintos volcanes y laderas de Ecuador se tienen que cumplir con los requisitos detallados en la Tabla 5.

Tabla 5. Requisitos para turismo de montaña [31]

Tipo de Sector	Requisitos
Para Clubes, Campamentos y Escuelas	Enviar listado de socios Solicitar autorización de ingreso Los visitantes deben entregar la hoja de descargo de responsabilidad (uno por cada visitante) Reserva de refugio o zona de camping
Para instituciones públicas (Bomberos, GOE, GIR, FAE, FFAA, etc.), y académicas	Oficio indicando la actividad a realizar. Solicitar autorización de ingreso (entregar nómina de visitantes). Se debe entregar la hoja de descargo (uno por cada visitante). Reserva de refugio o zona de camping
Para las operadoras de Turismo	Deberán reservar su ingreso con cinco (5) días de anticipación y entregar a través del guía de alta montaña autorizado en los puntos de control e ingreso de las áreas protegidas. Hoja del Sistema de Información de Biodiversidad – SIB Se debe entregar la hoja de descargo de los visitantes (uno por cada visitante)
Para visitantes independientes	Solicitar autorización de ingreso Se debe entregar la hoja de descargo (uno por visitante) Reserva de refugio o zona de camping

d. Seguridad ciudadana

En el ámbito del montañismo, la seguridad ciudadana también juega un papel esencial, ya que la seguridad de los senderistas influye directamente en la percepción de seguridad social. Las políticas de seguridad pública para garantizar el bienestar de los individuos deben abarcar la protección contra riesgos potenciales en actividades de recreación y aventura, como es el caso de los senderistas. La adopción de tecnologías de geolocalización y emergencia refuerza esta seguridad, ya que los participantes en

las actividades de montañismo pueden tener una mayor percepción de seguridad y reducir el miedo social asociado con los riesgos de extravío o accidentes [27].

e. Protección de los derechos humanos

En relación con los derechos humanos, el acceso a tecnologías de seguridad en el montañismo asegura que todos los andinistas, independientemente de su género, condición económica o social, puedan disfrutar de sus actividades de manera segura y libre de discriminación. El derecho a la seguridad de los senderistas se cumple mediante el uso de dispositivos de geolocalización y botones de emergencia, lo que respalda la protección de la vida y la integridad de las personas que participan en estas actividades. Además, garantizar que todos los participantes tengan acceso a tecnologías que les permitan sentirse protegidos y acompañados durante su expedición promueve una sociedad inclusiva y respetuosa de los derechos humanos, especialmente en zonas de alto riesgo [27].

1.3.8 Estado de los equipos de monitoreo y comunicación

El estado de los equipos es operativo y funcional, con tecnologías modernas tanto en el monitoreo remoto (videovigilancia y sensores) como en el acompañamiento físico a las rutas de exploración. La calidad es alta, especialmente considerando el respaldo del OVT y del ECU 911, lo cual fortalece la gestión del riesgo y la respuesta ante emergencias.

a. Cámaras de monitoreo

Estado: Operativas y ubicadas estratégicamente en varios sectores (OVT, Pillate, Achupashal, Runtún).

Calidad: Alta, ya que permiten obtener imágenes en tiempo real de los flancos del volcán y zonas críticas como drenajes y quebradas.

Utilidad: Son fundamentales para el análisis visual remoto y seguimiento de eventos eruptivos o flujos.

b. Radios entregadas a vigías

Estado: Nuevas (entregadas recientemente tras capacitación).

Calidad: Alta, con mayor alcance, lo cual es crucial para zonas de difícil acceso o comunicación interrumpida.

Utilidad: Permiten la comunicación bidireccional entre vigías y autoridades técnicas para un monitoreo constante.

c. Sistema ECU 911

Estado: Moderno, funcional, operativo.

Calidad: Alta tecnología, con capacidad de videovigilancia y localización.

Videovigilancia: Monitoreo de zonas aledañas en tiempo real.

Mobile Locator: Alta precisión para búsqueda y rescate en rutas de montaña o excursión.

c. Instrumentación científica en campo

Tipo de equipos: DOAS móvil para medición de gases, recolectores de muestras (ceniza, depósitos), termómetros y otros sensores.

Estado y calidad: Aunque no se detallan marcas ni modelos, se infiere que son equipos especializados y en uso regular por científicos y asistentes.

Soporte a investigadores: El personal del OVT colabora con estudiantes y científicos, lo que implica disponibilidad de herramientas técnicas adecuadas para exploración y muestreo [26].

1.4 Cobertura de señal móvil en el volcán Tungurahua

En este mapa de la Figura 12, la cobertura de señal está representada por diferentes niveles de intensidad de señal medida en dBm (decibelios milivoltios). Los colores indican las variaciones en la calidad de la señal:

Señal baja (< -140 dBm a -120 dBm) está representada en rojo. Esto indica áreas con mala cobertura, lo que puede generar dificultades en la comunicación móvil o en el monitoreo en tiempo real, lo cual es crucial en un área volcánica como el Tungurahua.

Señal media (-120 dBm a -100 dBm) está representada en naranja. Aquí, la cobertura es algo más estable, pero aún puede presentar interrupciones en ciertos puntos.

Señal alta (> -100 dBm) aparece en verde y azul. Esto sugiere que hay áreas con una buena calidad de señal, ideal para monitoreo y comunicación constante.

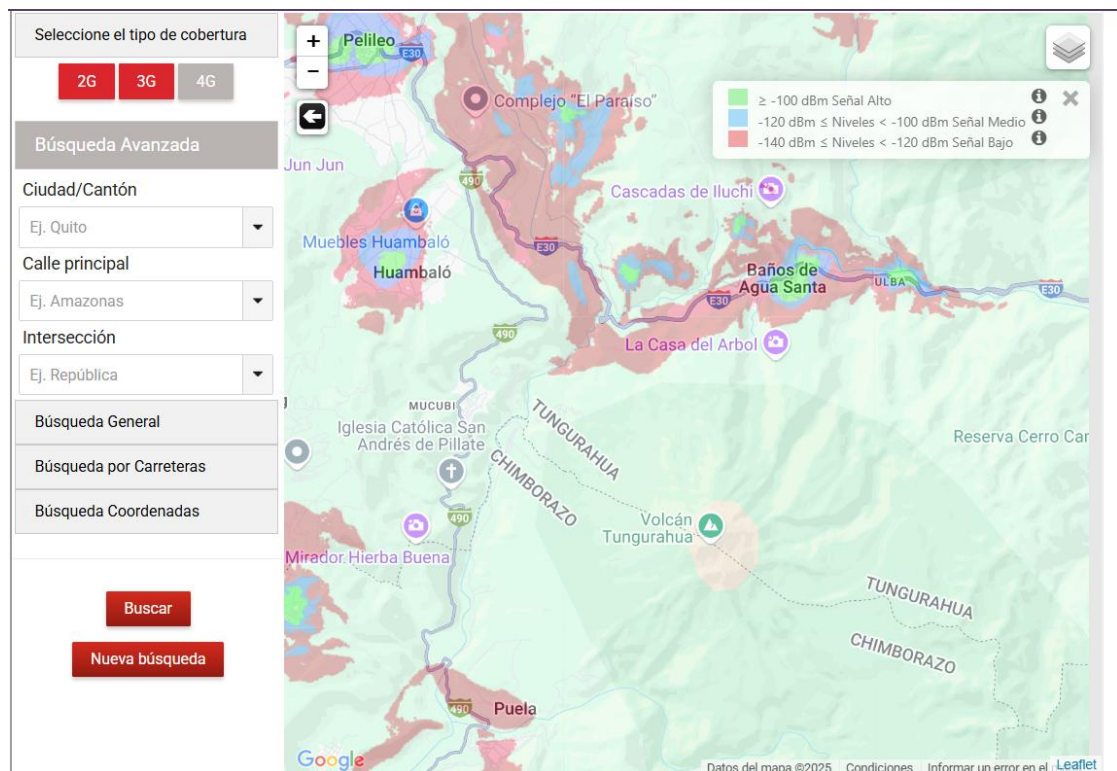


Figura 12. Nivel de cobertura 2G y 3G en el volcán Tungurahua [32]

Este mapa de la Figura 13, ilustra las mejoras en la cobertura 3G y 4G, destacando las áreas con distintas intensidades de señal

Señal alta (> -85 dBm) en verde claro y azul indica áreas con excelente cobertura. Esta es la zona más favorable para las comunicaciones, lo cual sería clave en situaciones de emergencia.

Señal media (-95 dBm a -85 dBm) representada por un verde intermedio, lo que también sugiere una cobertura aceptable para el monitoreo.

Señal baja (menos de -105 dBm) sigue destacándose en rojo. En estos lugares la cobertura sigue siendo insuficiente para una comunicación eficiente.

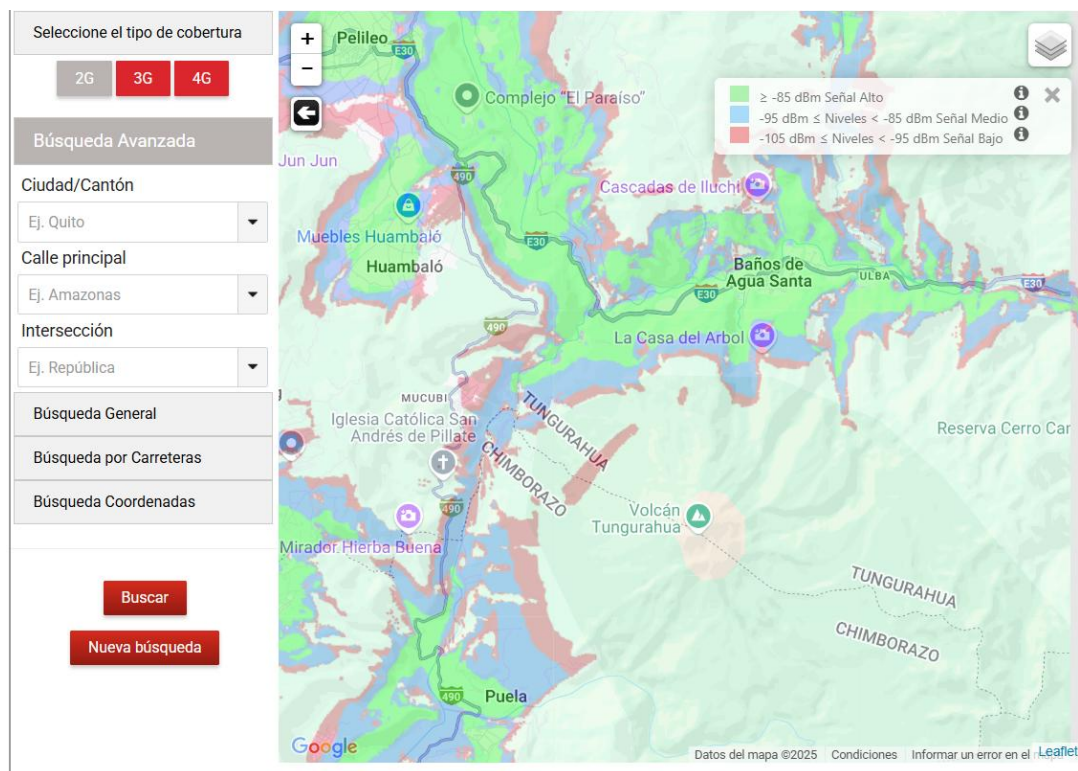


Figura 13. Nivel de cobertura 3G y 4G en el volcán Tungurahua [32]

En el mapa de la Figura 14, ilustra la variación en la cobertura 2G y 4G, destacando las áreas con distintas intensidades de señal

Señal baja sigue siendo una constante en rojo, abarcando áreas del volcán y de sus alrededores. Este rango podría generar dificultades para las tareas de monitoreo en tiempo real.

Señal media (-95 dBm a -105 dBm) está representada en tonos más suaves de naranja, lo que indica un nivel de cobertura aceptable, pero no ideal.

Señal alta de nuevo aparece en verde y azul, con áreas bien cubiertas para el monitoreo constante.

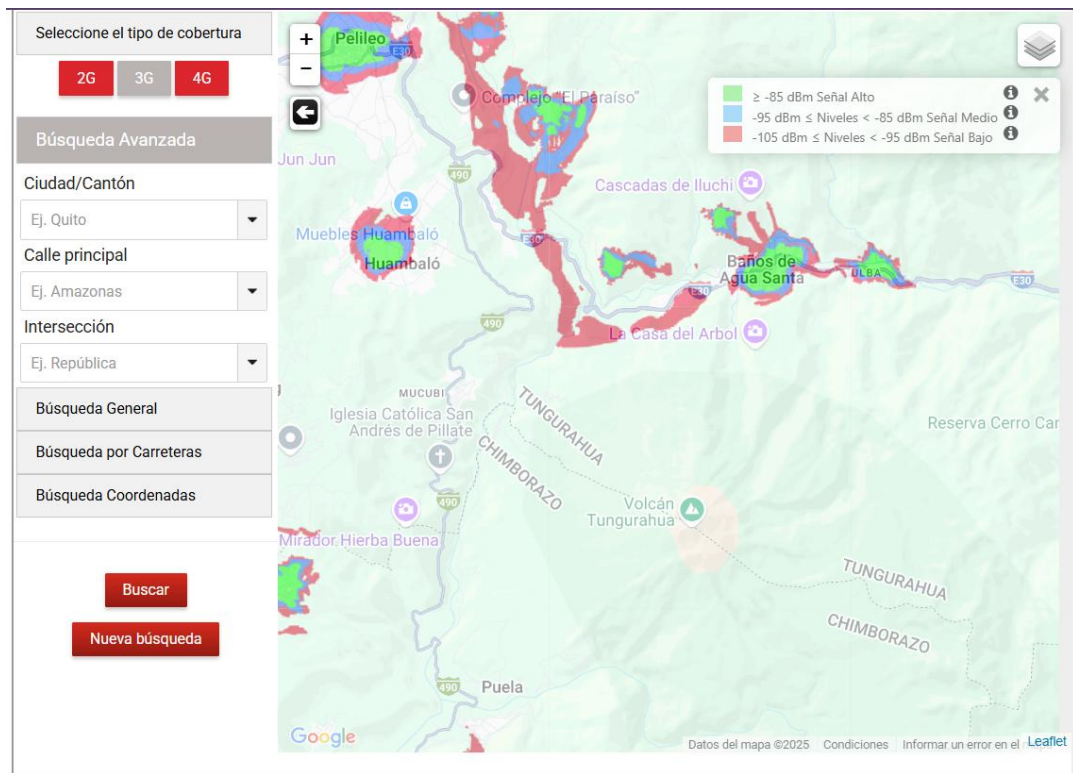


Figura 14. Nivel de cobertura 2G y 4G en el volcán Tungurahua [32]

En general, el área alrededor del volcán Tungurahua presenta una combinación de señales de cobertura baja y media, lo que podría interferir en la comunicación, especialmente en las áreas de mayor actividad volcánica. Las zonas con señal alta son más raras y se concentran principalmente en las zonas cercanas a las ciudades principales, como Baños de Agua Santa, mientras que las zonas cercanas al cráter volcánico y las áreas de difícil acceso tienen menor cobertura.

a. Desafíos

Uno de los principales desafíos en el rastreo de andinistas es equilibrar la seguridad con la privacidad. Mientras que la implementación de tecnologías como GPS y botones de emergencia mejora la seguridad al permitir la localización en tiempo real, es crucial respetar la autonomía y privacidad de los montañistas. La intrusión excesiva en su privacidad podría generar resistencia al uso de estas tecnologías [33].

La selección de tecnologías adecuadas es otro desafío significativo. Los dispositivos deben ser confiables, precisos y fáciles de usar en condiciones extremas. Además, la infraestructura de conectividad en áreas remotas es limitada, lo que puede afectar la eficacia del rastreo [33].

La concienciación sobre el uso responsable de estas tecnologías es esencial. Es necesario educar a los montañistas y sus familias sobre los beneficios y limitaciones de los sistemas de rastreo, garantizando su uso ético y efectivo. Además, es vital cumplir con las regulaciones legales relacionadas con el rastreo de personas, asegurando que las prácticas respeten los derechos individuales y las normativas vigentes [33].

El propósito del proyecto es asegurar que los familiares y equipos de rescate puedan conocer la ubicación y el estado de los andinistas en todo momento, incluso en situaciones de emergencia, sin comprometer su privacidad. Al integrar tecnologías de GPS y botones de emergencia, buscamos mejorar la seguridad y ofrecer tranquilidad emocional a las familias. Este enfoque promueve la innovación en rastreo y seguridad tecnológica, fortaleciendo la protección y el bienestar de los montañistas, reduciendo riesgos y creando una red de apoyo efectiva [33].

b. Métodos

En la Tabla 6, se sintetizan los métodos de rastreo más empleados por los dispositivos comerciales dirigidos a expediciones de montaña. Destacan, en primer lugar, los localizadores satelitales (inReach, SPOT Gen4), capaces de transmitir la posición a través de constelaciones GNSS y redes satelitales de mensajería, lo que garantiza cobertura incluso fuera del alcance celular. En segundo término, la mayoría de estos

equipos conserva un historial de ubicaciones: las coordenadas capturadas se almacenan y sincronizan con la nube para generar trazas y estadísticas que permiten reconstruir el trayecto en caso de extravío o para análisis posterior de la ruta. Finalmente, incorporan botones de pánico (SOS) que, al activarse, envían una alerta inmediata a servicios de rescate o contactos de emergencia junto con la posición exacta del alpinista, función crítica en entornos abruptos donde cada minuto cuenta.

Tabla 6. Métodos de rastreo de alpinistas [30], [31]

Métodos	Descripción
Rastreo en tiempo real	El rastreo en tiempo real permite monitorear constantemente la ubicación precisa de los andinistas. Utilizamos tecnologías como dispositivos GPS, sistemas de posicionamiento satelital y redes de comunicación inalámbrica para garantizar que los montañistas sean localizados rápidamente en caso de emergencia. Esto proporciona una mayor seguridad durante las expediciones.
Rastreo basado en historial	Este método permite almacenar y revisar la trayectoria pasada de los andinistas, registrando su ubicación en momentos previos. Esto facilita la comprensión de los recorridos realizados y mejora la capacidad de los equipos de rescate para actuar en situaciones de emergencia.
Alerta de ubicación	Las alertas se envían en tiempo real cuando un andinista se desvía de su ruta o entra en una zona de peligro. Estas notificaciones permiten a los equipos de rescate y a las familias estar al tanto de cualquier anomalía, asegurando una respuesta rápida y efectiva.
Alertar de No Movimiento	Este método ayudara a localizar al alpinista en caso de que haya tenido un percance y no haya podido pulsar el botón de emergencia, con ayuda de un temporizador el sistema dará una alerta en caso de que la persona no se haya detectado movimiento por más de 1 hora

1.5 Tecnología para condiciones climáticas extremas

1.5.1 Sistema de posicionamiento global

GPS (Sistema de Posicionamiento Global). El GPS no solo es útil para determinar la ubicación de una persona, sino que también ha sido crucial en diversas aplicaciones, como el monitoreo de vehículos, el rastreo de personas y la navegación de precisión en el montañismo. El Sistema de Posicionamiento Global funciona a través de una red de satélites que envían señales que los receptores en el suelo reciben para calcular su posición. En el contexto de montañismo, el GPS es una herramienta invaluable que permite a los andinistas y equipos de rescate conocer con precisión la ubicación de los

participantes durante sus expediciones, incluso en áreas remotas y de difícil acceso. Además, al utilizar un dispositivo GPS, se puede compartir la ubicación en tiempo real con familiares o equipos de rescate, lo que incrementa la seguridad y reduce el riesgo de accidentes. El uso de esta tecnología también es beneficioso para mejorar la gestión de rutas de senderismo, proporcionando datos valiosos para el mapeo y la creación de nuevas rutas seguras [34].

RFID (Identificación por Radiofrecuencia). La tecnología RFID es cada vez más utilizada en el ámbito de la logística, el seguimiento de activos y el rastreo de personas en áreas restringidas. En el contexto de actividades al aire libre y montañismo, los dispositivos RFID pueden ser especialmente útiles para gestionar el equipo de los andinistas, asegurando que cada persona tenga acceso a los recursos necesarios durante su expedición. Además, los sistemas RFID son ideales para controlar el acceso a áreas específicas, como campamentos base o zonas restringidas dentro de una ruta, ya que permiten verificar la presencia y ubicación de las personas sin necesidad de contacto físico, lo que aumenta la eficiencia y la seguridad en operaciones de rescate. La capacidad de leer múltiples etiquetas al mismo tiempo y a distancia también hace que esta tecnología sea adecuada para aplicaciones de rastreo en eventos masivos o en áreas donde muchos participantes necesitan ser monitoreados de forma simultánea [35].

a. Beneficios de un sistema de rastreo

La implementación de sistemas de rastreo en actividades de montañismo ofrece múltiples beneficios que incrementan la seguridad y mejoran la experiencia de los participantes. A continuación, se destacan algunos de los principales beneficios:

Seguridad y Tranquilidad para los Participantes y sus Familias. Los dispositivos GPS permiten a los montañistas compartir su ubicación en tiempo real con familiares y amigos, brindando una capa adicional de seguridad. Esta funcionalidad permite a los seres queridos monitorear el progreso y bienestar del excursionista, reduciendo la ansiedad y aumentando la confianza durante las expediciones.

Respuesta Rápida en Situaciones de Emergencia. En caso de incidentes o desviaciones inesperadas de la ruta, los dispositivos GPS con funciones de alerta de

emergencia facilitan una respuesta rápida. Al enviar señales de socorro con coordenadas precisas, se mejora la eficacia de las operaciones de rescate, especialmente en áreas remotas donde la comunicación es limitada [30].

Prevención de Accidentes y Gestión de Riesgos. La capacidad de planificar y seguir rutas predefinidas ayuda a los montañistas a evitar áreas peligrosas. Los dispositivos GPS permiten registrar puntos de referencia y monitorear en tiempo real, lo que facilita la identificación de posibles riesgos y la toma de decisiones informadas para mitigar accidentes [36].

Tranquilidad para los Participantes. Llevar un dispositivo GPS proporciona a los montañistas una sensación de seguridad adicional. Saber que pueden ser localizados en caso de emergencia y que sus seres queridos pueden seguir su progreso permite disfrutar de la actividad con mayor confianza, enfocándose en la experiencia sin preocupaciones excesivas [36].

1.5.2 Tecnología LoRA y LoRaWAN

La tecnología LoRa y su protocolo LoRaWAN se destacan por sus avanzados parámetros técnicos, lo que la convierte en una opción ideal para aplicaciones de geolocalización de exploradores en entornos remotos. Como se ilustra en la Tabla 7, se detallan las características técnicas que hacen de LoRa una herramienta potente para sistemas de monitoreo en tiempo real.

Uno de los elementos clave de LoRa es su modulación de espectro expandido (CSS, Chirp Spread Spectrum), que proporciona una notable inmunidad al ruido y una excelente capacidad de penetración en áreas difíciles, como zonas montañosas o boscosas. Esta modulación permite que LoRa alcance distancias de transmisión de hasta 15 km en áreas rurales y hasta 5 km en entornos urbanos densos. Este alcance es esencial para la geolocalización precisa de exploradores, permitiendo su rastreo continuo durante las expediciones en terrenos complejos, donde otras tecnologías de comunicación no serían viables. Además, LoRaWAN, al ser un protocolo optimizado para bajas tasas de transferencia y bajo consumo energético, asegura que los

dispositivos de rastreo puedan operar durante largos períodos sin comprometer la fiabilidad de la comunicación [37].

Tabla 7. Características técnicas de la tecnología LoRaWAN [37]

Parámetro Técnico	Descripción
Modulación	Chirp Spread Spectrum (CSS): Alta inmunidad al ruido, penetración en áreas difíciles, ideal para largo alcance.
Frecuencia	868 MHz (Europa), 915 MHz (América): Banda ISM no licenciada, libre de licencias costosas, adecuado para áreas remotas.
Alcance	Hasta 15 km en áreas rurales y 5 km en áreas urbanas: Ideal para geolocalización de exploradores en terrenos difíciles.
Ancho de Banda	125 kHz a 250 kHz: Flexibilidad para balancear velocidad de transmisión y alcance.
Velocidad de Datos	Baja velocidad de transmisión (hasta 50 kbps), adecuada para enviar pequeñas cantidades de datos (localización y sensores).
Consumo Energético	Bajo consumo: Dispositivos operan durante años con una sola batería, adecuado para aplicaciones de largo plazo.
Seguridad	Cifrado AES-128 de extremo a extremo, autenticación de dispositivos: Protección robusta de datos sensibles como la localización.
Topología de Red	Star-of-Stars: Los dispositivos finales se comunican con múltiples gateways, ofreciendo alta redundancia y fiabilidad.
Escalabilidad	Alta escalabilidad: Capacidad para conectar miles de dispositivos sin comprometer la calidad de la red.
Integración	Compatible con otras tecnologías (sensores ambientales, sistemas en la nube) para crear soluciones completas de monitoreo.
Cobertura	Múltiples gateways: Los dispositivos pueden conectarse a varios gateways, lo que mejora la fiabilidad de la red y la cobertura en áreas grandes.

1.6 Arquitectura IoT

La arquitectura IoT en el proyecto se compone de diversos componentes que incluyen tanto la infraestructura de red como las tecnologías de nube, las cuales operan conforme a los protocolos y estándares de seguridad establecidos para IoT. Este diseño se organiza en varias fases que aseguran que la tecnología sea funcional, escalable y sencilla de gestionar para los usuarios [38].

Estos elementos clave, que facilitan el rendimiento y mantenimiento del sistema, están representados en la Figura 15.

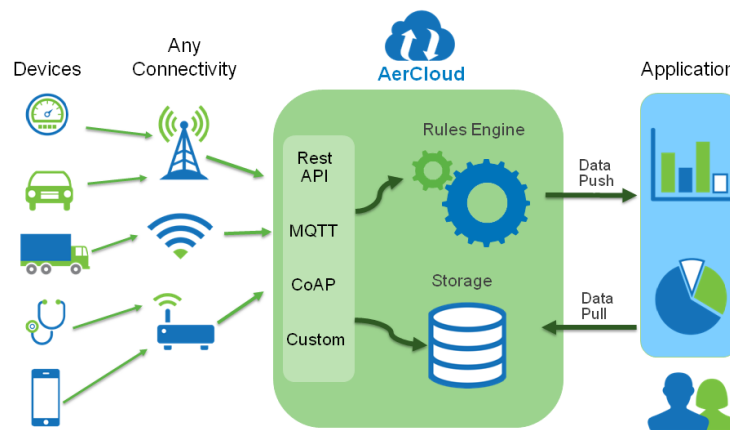


Figura 15. Arquitectura IoT y protocolos

1.7 Metodología para el desarrollo de proyectos IoT

El desarrollo de sistemas basados en el Internet de las Cosas (IoT) requiere la adopción de una metodología que asegure la eficiencia y la calidad del proyecto. A continuación, se presenta la metodología que más se relaciona al proyecto.

1.7.1 Metodología TDDM4IoTS

Esta metodología, propuesta por Gleiston Guerrero Ulloa en su tesis doctoral en la Universidad de Granada, se estructura en 11 etapas que van desde el análisis inicial hasta el mantenimiento del sistema IoT. Se fundamenta en la Ingeniería Dirigida por Modelos, lo que posibilita la creación automática de modelos, pruebas y componentes de software basados en especificaciones de requisitos definidas a través de casos de uso extendidos y modelos elaborados en fases previas. Además, dispone de una herramienta CASE llamada TDDT4IoTS, la cual simplifica el diseño de diagramas de clases UML y facilita la generación de firmware preliminar para dispositivos electrónicos personalizados, en la Tabla 8 se detallan los pasos para el desarrollo de la metodología TDDM4IoTS [39].

Tabla 8. Pasos de la metodología TDDM4IoTS [39]

Paso	Nombre	Descripción
1	Análisis Preliminar	Se realiza un estudio de viabilidad que abarca aspectos técnicos, económicos y ambientales, con el fin de determinar si el proyecto de IoT es factible antes de invertir recursos importantes en su desarrollo.
2	Diseño de la Capacidad Tecnológica	Se definen los componentes tecnológicos requeridos, incluyendo hardware, software y comunicaciones, asegurando que el sistema sea viable y adecuado para el entorno donde será implementado.
3	Análisis Detallado de Requisitos	Se especifican de manera precisa los requisitos funcionales y no funcionales, asegurando una interpretación clara y libre de ambigüedades.
4	Generación y Adaptación de Modelos	Se crean modelos conceptuales basados en los requisitos obtenidos, tales como diagramas UML, que sirven como base para la generación automática de pruebas y software.
5	Generación de Pruebas	A partir de los modelos generados, se diseñan pruebas automáticas que validan el cumplimiento de los requisitos del sistema, garantizando el desarrollo dirigido por pruebas (TDD).
6	Generación de Software	Se comienza el desarrollo del software basado en los modelos y pruebas generadas, asegurando que el código cumpla desde su inicio con los requisitos establecidos.
7	Refinamiento de Modelos	Se ajustan los modelos y el código conforme avanzan las pruebas, asegurando que todo el sistema se mantenga alineado con los requisitos y objetivos.
8	Despliegue de Software	Se realiza la implementación del software en el sistema, realizando las configuraciones necesarias para garantizar que el sistema sea funcional y eficiente.
9	Mantenimiento de Sistemas	Se asegura el mantenimiento continuo del sistema, corrigiendo errores y mejorando el rendimiento a medida que surjan nuevos requisitos.
10	Entregables	Se entregan los productos completos del sistema, asegurando que todos los componentes estén implementados y probados.
11	Mantenimiento	Se mantiene el sistema en funcionamiento mediante actualizaciones y mejoras continuas, adaptándose a cambios de requisitos y necesidades emergentes.

1.8 Prueba estadística para validación de datos

El objetivo principal de las pruebas estadísticas es determinar si los patrones observados en los datos indican una relación genuina o si son simplemente el resultado del azar. Al evaluar la significancia estadística, las pruebas proporcionan la certeza de que las asociaciones y correlaciones identificadas en los datos son auténticas. Esta validación es esencial para garantizar la solidez de la investigación.

1.8.1 Prueba Chi-Cuadrado

La prueba Chi-cuadrado es una prueba de hipótesis utilizada para variables categóricas con escala de medida nominal u ordinal. La prueba Chi-cuadrado comprueba si las frecuencias que se dan en la muestra difieren significativamente de las frecuencias que cabría esperar. Así, se comparan las frecuencias observadas con las esperadas y se examinan sus desviaciones como se observa en la Ecuación (1). Este tipo de prueba estadística es recomendable para pruebas de independencia, distribución y homogeneidad [40].

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^n \frac{(O_k - E_k)^2}{E_k} \quad (1)$$

Donde:

O_k =Frecuencia observada en la categoría k. Esta es la cantidad de veces que un evento ocurre en una categoría específica

E_k =Frecuencia esperada en la categoría k. Es el valor que se espera para una categoría bajo la hipótesis nula

n= Número total de categorías o clases que se están evaluando.

La fórmula general del cálculo de Chi-cuadrado es la suma de los cuadrados de las diferencias entre las frecuencias observadas (O^k) y las esperadas (E^k), dividida por las frecuencias esperadas (E^k) para todas las categorías, desde $k = 1$ hasta $k = n$.

1.9 Objetivos

1.9.1 Objetivo general

Implementar un sistema de localización y seguimiento en tiempo real para exploradores en las zonas montañosas de Tungurahua con tecnología LoRaWAN

1.9.2 Objetivos específicos

- Identificar la realidad actual del turismo y las actividades de exploración en las zonas montañosas de Tungurahua, identificando los principales riesgos asociados.
- Analizar el equipamiento disponible en los refugios y puntos estratégicos de las rutas de exploración en Tungurahua para evaluar su adecuación en términos de seguridad.
- Establecer las características de diseño del dispositivo electrónico basado en tecnología LoRaWAN para la localización y monitorización de exploradores en tiempo real.
- Desarrollar un sistema de localización y análisis de datos mediante un servidor web para mejorar la seguridad y el monitoreo de exploradores en las zonas montañosas de Tungurahua.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

El enfoque principal del proyecto es el desarrollo de un sistema avanzado de rastreo y localización diseñado específicamente para áreas montañosas de la provincia de Tungurahua, como el Volcán Tungurahua. El sistema utiliza módulos GPS y la tecnología LoRaWAN para asegurar una cobertura efectiva y de largo alcance en zonas remotas y de difícil acceso. Los módulos GPS se encargarán de proporcionar información precisa sobre la ubicación de los alpinistas o equipos de rescate, mientras que los dispositivos LoRaWAN, conocidos por su eficiencia en comunicaciones de largo alcance y bajo consumo de energía, facilitarán la transmisión de estos datos en tiempo real, incluso en áreas donde otras tecnologías de comunicación pueden fallar debido a la falta de cobertura o infraestructura.

El sistema está compuesto por un sensor GPS, microcontrolador y componentes electrónicos de bajo consumo energético, lo que permitirá un funcionamiento continuo durante largos períodos sin necesidad de recargar. Los datos de ubicación obtenidos por el GPS serán procesados y enviados a través de la red LoRaWAN hacia un servidor central, donde la información se podrá visualizar en una plataforma de monitoreo en tiempo real. Esta plataforma proporcionará a las autoridades de rescate, equipos de seguridad y familiares la posibilidad de seguir la ubicación exacta de los andinistas, ofreciendo tranquilidad y mejorando la seguridad durante las expediciones en el Volcán Tungurahua y otras áreas montañosas de la región. Además, el proyecto se aprovechará de la cobertura de LoRaWAN desplegada en la región, asegurando una comunicación confiable incluso en las zonas más remotas.

2.2 Métodos

2.2.1 Modalidad de la investigación

El presente proyecto se sustenta en una investigación aplicada, en la que se utilizan los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera para desarrollar un sistema de rastreo

y localización enfocado en zonas montañosas de Tungurahua, como el Volcán Tungurahua. El sistema emplea tecnologías avanzadas como módulos GPS y LoRaWAN, los cuales permiten garantizar un monitoreo eficaz incluso en áreas de difícil acceso. Para la ejecución del proyecto, se realizaron investigaciones que sustentan su desarrollo, tanto en las bases de datos académicas como en bibliotecas virtuales proporcionadas por la Universidad, las cuales brindaron información clave sobre las tecnologías utilizadas.

La investigación bibliográfica desempeñó un papel fundamental en este proyecto, ya que se centró en temas relacionados con el rastreo de personas en áreas remotas, el uso de tecnologías GPS y LoRaWAN y la seguridad en actividades de montañismo. Para ello, se revisaron estudios actuales como tesis, artículos científicos, revistas especializadas y publicaciones en línea, con el fin de obtener una visión completa de los avances y aplicaciones más recientes en el campo del rastreo y localización. Esta investigación tiene como objetivo no solo respaldar la viabilidad del proyecto, sino también explorar soluciones innovadoras que contribuyan a la seguridad de los andinistas en zonas de alto riesgo.

El proyecto también se basa en una investigación experimental, ya que se realizaron pruebas prácticas para evaluar si la cobertura de LoRaWAN es suficiente y adecuada para detectar correctamente la ubicación de los andinistas en áreas montañosas. Estas pruebas se llevaron a cabo en diferentes puntos de la provincia de Tungurahua, simulando situaciones de rastreo en condiciones adversas, con el fin de asegurar la eficacia del sistema y la precisión de los datos obtenidos.

2.2.2 Población y muestra

El estudio no requiere de una población ni muestra.

2.2.3 Recolección de información

La recolección de información para este proyecto se realizó utilizando diversas fuentes, incluyendo libros, revistas especializadas, fuentes online y proyectos previos relacionados con el rastreo y la geolocalización. Además, se tomará como referencia

la configuración actual del módulo GPS utilizado en tecnologías como LoRaWAN, que es esencial para el rastreo en tiempo real de los andinistas en las zonas montañosas de Tungurahua, como el Volcán Tungurahua. La tarjeta Ufox, que ya se utiliza en sistemas de geolocalización, servirá como base para la implementación en este proyecto, adaptando su configuración y características para garantizar la precisión y efectividad del rastreo en condiciones extremas de montaña.

2.2.4 Procesamiento y análisis de datos

Para el procesamiento y análisis de datos se llevará a cabo los siguientes ítems:

- Recopilación de investigaciones y proyectos previos: Se revisarán proyectos y estudios previos sobre rastreo y localización en zonas remotas utilizando GPS y LoRaWAN, para adaptar las mejores prácticas a las condiciones del Volcán Tungurahua.
- Estudio de soluciones existentes: Se analizarán las soluciones existentes en otros proyectos similares para identificar las más efectivas en términos de precisión y alcance del rastreo en áreas montañosas.
- Determinación de los elementos del sistema electrónico: Se definirán los componentes necesarios para el sistema, como los módulos GPS, LoRaWAN, y microcontroladores, asegurando su efectividad en el entorno montañoso.
- Planteamiento de la propuesta de solución: Se desarrollará un diseño detallado del sistema de rastreo, incluyendo el flujo de datos y la infraestructura necesaria para su funcionamiento.
- Pruebas y validación del sistema: Se realizarán pruebas prácticas en el terreno para validar el funcionamiento del sistema, asegurando que el rastreo sea preciso y confiable bajo condiciones adversas.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Desarrollo del sistema

Este capítulo se detalla el desarrollo del sistema inteligente utilizando la metodología TDDM4IoTS, la cual permitió estructurar y automatizar el diseño, desarrollo, validación e implementación de un sistema de geolocalización en el volcán Tungurahua. El sistema combina tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo en tiempo real y tecnología de LoRaWAN para disponer de una comunicación estable y brindar más seguridad al explorador mediante un dispositivo portable que lleve consigo en todo el trayecto.

Para el desarrollo del presente proyecto se adoptó una versión simplificada de la metodología TDDM4IoTS, estructurada en cuatro fases principales: análisis preliminar, diseño tecnológico y arquitectura, generación de pruebas, y finalmente, despliegue e integración. Esta elección respondió a la necesidad de adaptar el proceso metodológico a las características específicas del proyecto, aprovechando la flexibilidad inherente al enfoque original, que contempla once etapas. La reducción y reorganización de etapas dentro de TDDM4IoTS ha demostrado ser una estrategia viable, que permite optimizar tiempos y recursos sin comprometer la calidad ni la funcionalidad del sistema, especialmente en investigaciones con un alcance delimitado y objetivos claramente definidos.

Además, esta adaptación está en consonancia con las mejores prácticas en la optimización y simplificación de procesos tanto tecnológicos como administrativos, enfocándose en la priorización de las fases críticas para lograr eficiencia y resultados tangibles. La literatura especializada en la simplificación de trámites y proyectos tecnológicos destaca que la reducción y reestructuración de fases facilita la gestión del proyecto, mejora la comunicación entre los actores involucrados y posibilita una implementación más ágil y escalable, factores clave para el éxito en entornos con recursos limitados o específicos. En consecuencia, la metodología adaptada asegura un desarrollo bien estructurado y eficiente, manteniendo el rigor técnico y la innovación necesarios para el sistema de geolocalización en el volcán Tungurahua.

3.2 Análisis Preliminar

La problemática en la provincia de Tungurahua, especialmente en áreas cercanas al Volcán Tungurahua, se centra en los riesgos que enfrentan los andinistas durante sus expediciones en zonas remotas. La falta de un sistema adecuado de rastreo en tiempo real hace que los montañistas estén expuestos a peligros como la desorientación, caídas o accidentes graves, sin la capacidad de ser localizados rápidamente en caso de emergencia. Las condiciones extremas del terreno dificultan las labores de rescate, lo que hace urgente la implementación de tecnologías de localización fiables y accesibles. A pesar de las soluciones existentes, es necesario desarrollar un sistema económico y confiable, utilizando GPS y LoRaWAN, para garantizar la seguridad de los montañistas y proporcionar tranquilidad a sus familias y equipos de rescate.

3.2.1 Encuesta

Se llevó a cabo una encuesta a 15 exploradores experimentados que han alcanzado la cumbre del volcán Tungurahua, con el propósito de obtener información sobre los parámetros esenciales para el ascenso. La encuesta del Anexo A, abarcó aspectos como las condiciones del terreno, las dificultades encontradas durante la ruta y la fiabilidad de los equipos utilizados, lo que permitió una comprensión más profunda de los desafíos a los que se enfrentan los exploradores en este entorno volcánico.

Los resultados obtenidos no solo ofrecieron datos técnicos relevantes, sino que también reflejaron las experiencias emocionales de los participantes, quienes expresaron su respeto y admiración por el volcán. Con base en sus respuestas, se identificaron áreas de mejora para futuros ascensos, incluyendo recomendaciones para optimizar tanto el rendimiento del equipo como la seguridad y la experiencia general de los exploradores en este entorno de alta montaña.

3.2.2 Interpretación de los resultados

Como se puede observar en la Tabla 9, se realizó una prueba estadística adecuada Chi-cuadrado de independencia. Esta prueba te permitirá analizar si hay una relación significativa entre las variables categóricas, como la ruta de exploración, el género, y

las dificultades de comunicación reportadas por los encuestados. detallada de todas las preguntas más relevantes para el diseño del prototipo, basándose en las necesidades de geolocalización y monitoreo de alpinistas. Estas preguntas fueron cuidadosamente seleccionadas para abordar los aspectos más críticos en la planificación del sistema, considerando las rutas más frecuentes y los problemas comunes de comunicación y seguridad [40].

Tabla 9. Relación de aspectos clave para el diseño del prototipo

Aspectos Relevantes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Uso de rutas más frecuentes (Pondoa-Baños)			X			X	X	X							
Problemas de comunicación o señal				X					X		X				
Duración promedio de las expediciones (8 a 10 horas)				X											
Tipo de personas que realizan el recorrido (jóvenes y adultos)	X				X				X						
Incidentes durante el recorrido (caídas, accidentes)				X		X	X			X	X				
Actuación en caso de emergencia (comunicación y ayuda)	X	X			X			X		X		X	X		
Problemas de comunicación durante el recorrido				X		X	X	X							
Rutas con problemas de señal (Pondoa-Baños y Palitahua)				X	X	X			X		X				
Uso de medio tecnológico para la comunicación				X			X					X		X	
Aplicaciones utilizadas para emergencias (WhatsApp, llamadas)	X	X			X			X				X		X	

Las preguntas de la encuesta se relacionan directamente con las características clave que justifican el uso del sistema de geolocalización para alpinistas. Las respuestas sobre las rutas más frecuentes, como Pondoa-Baños, destacan la necesidad de monitorear estas rutas críticas para garantizar la seguridad de los exploradores. También se resalta la falta de señal en áreas remotas, lo que hace esencial el uso de LoRaWAN para asegurar la cobertura en zonas difíciles de acceder. La duración

promedio de las expediciones (de 8 a 10 horas) justifica un sistema con bajo consumo de batería y conectividad continua.

La diversidad de los usuarios, que incluyen tanto jóvenes como adultos, subraya la importancia de un sistema accesible para todos. La alta incidencia de accidentes y caídas, sumada a la necesidad de comunicación rápida en emergencias, valida el uso de plataformas de comunicación como WhatsApp o llamadas telefónicas. Además, la recurrente falta de señal refuerza la necesidad de integrar tecnologías confiables que aseguren la conectividad durante todo el recorrido. Todos estos resultados fueron validados con la prueba estadística chi-cuadrado detallado en la ecuación (1).

3.1 Diseño tecnológico y Arquitectura

En el proyecto de geolocalización, la arquitectura IoT está compuesta por dos nodos móviles, un nodo intermedio (repetidor) y un nodo Gateway. Como se observa en la Figura 16, los nodos móviles capturan las coordenadas GPS de los exploradores y las envían a través del protocolo LoRaWAN. Este protocolo se elige debido a su capacidad de ofrecer largo alcance y bajo consumo de energía, lo cual es ideal para operar en áreas amplias y de difícil acceso, como las que se presentan en el monitoreo de los exploradores. El nodo intermedio (repetidor) amplifica la señal de los nodos móviles y la transmite al nodo Gateway, lo que asegura que la comunicación sea continua y eficiente.

El nodo Gateway recibe los datos de los nodos móviles y los transmite a la nube utilizando el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), el cual facilita la transmisión de datos de manera ligera, eficiente y confiable. MQTT se emplea para asegurar una comunicación robusta y de bajo ancho de banda, lo que es esencial para sistemas IoT, donde los dispositivos tienen recursos limitados. Los datos enviados por el nodo Gateway son almacenados y procesados en la nube en tiempo real utilizando Google Cloud, lo que permite la visualización y análisis de los datos a través de una interfaz web o móvil, a través del protocolo HTTPS, garantizando una conexión segura y confiable entre el servidor y los dispositivos finales.

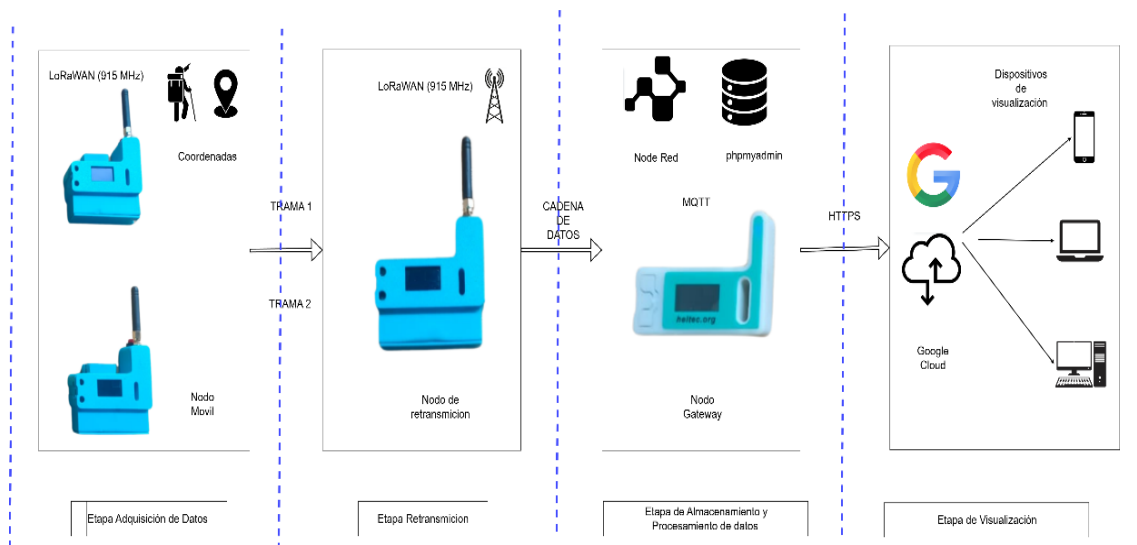


Figura 16. Arquitectura del prototipo de geolocalización

3.2 Análisis detallado de los requisitos del sistema

3.2.1 Etapa adquisición de datos

El sistema de localización de los exploradores en Tungurahua utiliza un módulo GPS (NEO-6M) para obtener coordenadas geográficas, altitud y temperatura en tiempo real. Este módulo, integrado en un dispositivo portátil y ligero, facilita su transporte durante las expediciones. Los datos se almacenan en un microcontrolador, que los procesa y valida antes de transmitirlos a través del mismo equipo LoRaWAN. Este equipo, configurado también como Gateway, actúa como intermediario, enviando los datos a largas distancias con bajo consumo energético, ideal para áreas remotas.

El Gateway LoRaWAN retransmite los datos hacia la siguiente etapa del sistema para su almacenamiento y procesamiento en la nube. Este flujo de datos permite monitorear la posición de los exploradores en tiempo real, identificar condiciones de peligro y detectar desviaciones, mejorando la seguridad durante las expediciones.

a. Selección de modulo GPS

La Tabla 10, presenta una comparación de las características técnicas de tres módulos GPS, considerando los aspectos más relevantes en función del objetivo del proyecto de investigación.

Tabla 10. Comparación de distintas tecnologías GPS [44], [45], [46]

Parámetros Técnicos			
Sensibilidad	Seguimiento: -161 dBm	Seguimiento: -167 dBm	Seguimiento: -161 dBm
	Adquisición: -160 dBm	Adquisición: -160 dBm	Adquisición: -160 dBm
Precisión	Posición: 3.5 m	Posición: 2 m	Posición: 2.5 m
	Velocidad: 0.1 m/s	Velocidad: 0.1 u/s	Velocidad: 0.1 m/s
	Tiempo (PPS): 30 ns	Tiempo (PPS): N/A	Tiempo (PPS): 30 ns
Tiempo de adquisición	Arranque en frío: 26 s	Arranque en frío: 26 s	Arranque en frío: 30 s
	Arranque caliente: 26 s	Arranque caliente: 25 s	Arranque caliente: 28 s
	Readquisición: 5 s	Readquisición: N/A	Readquisición: 5 s
Consumo de energía	Sistema de seguimiento corriente: N/A	Sistema de seguimiento corriente: N/A	Sistema de seguimiento corriente: N/A
	Sistema de seguimiento voltaje: N/A	Sistema de seguimiento voltaje: N/A	Sistema de seguimiento voltaje: N/A
	Sistema de adquisición de voltaje: 3.6 V	Sistema de adquisición de voltaje: 5.5 V	Sistema de adquisición de voltaje: 3.6 V
	Sistema de adquisición de corriente: 45 mA	Sistema de adquisición de corriente: 50 mA	Sistema de adquisición de corriente: 40 mA
Tipo de Receptor	Banda de frecuencia: GPS L1	Banda de frecuencia: L1, Glonass	Banda de frecuencia: GPS L1
	Canales de búsqueda: 50	Canales de búsqueda: 72	Canales de búsqueda: 56
Temperatura	-40 °C a +85 °C	-40 °C a +85 °C	-40 °C a +85 °C
Frecuencia central	1575.42 MHz	L1: 1575.42 MHz	1575.42 MHz
Banda ancha	±10 MHz	±10 MHz	±10 MHz
Polarización	RHCP	RHCP	RHCP
Relación Axial	< 3dB	< 3dB	< 3dB máx
Impedancia	50 Ω	50 Ω	50 Ω

En este proyecto se ha decidido utilizar el módulo GPS NEO 6M, este dispositivo destaca por sus características. Su alta precisión en la obtención de datos de ubicación (con una resolución de unos impresionantes 2,5 metros) y la velocidad con la que adquiere la señal lo hacen perfecto para aplicaciones en tiempo real. Lo mejor es que, gracias a su capacidad para rastrear hasta 22 satélites al mismo tiempo, el sistema

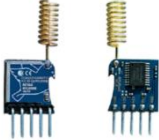
puede mantener una gran estabilidad y fiabilidad, algo que es esencial cuando se está operando en entornos tan dinámicos como el de un alpinista en zonas montañosas. Además, el NEO-6M es conocido por su bajo consumo energético, lo que es una ventaja a la hora de trabajar con dispositivos portátiles con batería limitada, haciendo de él la opción ideal para este tipo de proyectos.

b. Selección del microcontrolador

La selección del microcontrolador es un paso crucial en el diseño del sistema. La obtención de datos de los exploradores, como las coordenadas de ubicación, es fundamental para la operación eficiente del sistema de localización. Estos datos, obtenidos mediante el módulo GPS, son el corazón del proyecto, ya que permiten rastrear en tiempo real la ubicación de los alpinistas durante su recorrido. El microcontrolador no solo captura esta información, sino que también se encarga de procesarla de manera eficaz para que pueda ser visualizada y utilizada para la toma de decisiones rápidas, como alertas de emergencia o reconfiguración de rutas.

Es importante destacar que, en la Tabla 11, se presenta una comparación detallada de las tecnologías utilizadas, entre las cuales se destacan las capacidades de los módulos de comunicación inalámbrica LoRaWAN. Estos módulos fueron seleccionados por su eficiencia en términos de cobertura y bajo consumo energético, dos factores críticos para aplicaciones en zonas montañosas. La elección del microcontrolador se basa no solo en la compatibilidad con estas tecnologías, sino también en su capacidad para optimizar el uso de energía, algo esencial en dispositivos portátiles con batería limitada. Al comparar las opciones disponibles, se buscó una tecnología que no solo cumpliera con los requisitos de comunicación, sino que también fuera capaz de mantener el sistema operando de manera continua durante largos períodos en terrenos desafiantes.

Tabla 11. Comparación de distintas tecnologías de microcontroladores [47], [48], [49]

Parámetros Técnicos	TinyFox 	LoRa 	Heltec LoRaWAN 	NB-IoT 
Microcontrolador	ATmega328p	ATmega32U4, STM32, etc.	ATmega328p, STM32, etc.	ATmega328p, Quectel, etc.
Módulo de comunicación	WISOL SFM10R4	Semtech SX1276, RFM95, etc.	Semtech SX1276, RFM95, etc.	Quectel BG96, uBlox SARA-R4, etc.
Conector de antena	UFL	UFL	UFL	UFL
Región de radiofrecuencia	RC4	Europa: 868 MHz, América: 915 MHz, Asia: 433 MHz	LoRaWAN: 868 MHz (Europa), 915 MHz (América)	Licenciado
Frecuencia Uplink	920.8 MHz	868 MHz, 915 MHz, 433 MHz	868 MHz (Europa), 915 MHz (América)	1800 MHz, 2100 MHz, y otras bandas LTE
Frecuencia Downlink	922.3 MHz	868 MHz, 915 MHz, 433 MHz	868 MHz (Europa), 915 MHz (América)	1800 MHz, 2100 MHz, y otras bandas LTE
Potencia Tx	23 dBm	22.4 dBm, 23 dBm	22 dBm (máx)	15 dBm
Sensibilidad Rx	-129 dBm	-129 dBm	-137 dBm	-144 dBm
Antena integrada	helicoidal 3 dBi	Helicoidal 3 dBi	Helicoidal 3 dBi	No
Temperatura	-30 °C a +85 °C	-30 °C a +85 °C	-40 °C a +85 °C	-40 °C a +85 °C
Dimensiones (mm)	24.31 x 14.97	24.31 x 14.97	24.31 x 14.97	25 x 25 x 8 mm
Serial UART	Rx, Tx	Rx, Tx	Rx, Tx	Rx, Tx
Velocidad	9600 baudios	50 kbps	5.5 kbps (hasta 27 kbps en nuevas)	200 kbps
Voltaje de operación	3.3 V	3.3 V	3.3 V	3.3 V
Voltaje de entrada	2.5 - 3.9 V	2.5 - 3.9 V	2.5 - 3.9 V	3.3 V
Consumo de corriente Tx	30 mA	30 mA	30 mA	65 mA
Consumo de corriente Rx	30 mA	30 mA	30 mA	15 mA

Se compararon tres módulos LoRaWAN, pero el Heltec LoRaWAN se eligió por su excelente rendimiento en el procesamiento de datos y su eficiencia energética. Su compatibilidad con la banda RC4 (920-922 MHz), ideal para América Latina, incluida Ecuador, y su bajo consumo lo hacen perfecto para aplicaciones de largo alcance, como la geolocalización de exploradores en terrenos remotos. A diferencia del Sigfox Node, que opera en la banda RC1 (868-878 MHz) más adecuada para Europa y Asia, el Heltec garantiza una mayor cobertura en regiones como Ambato, Ecuador, donde la banda RC4 es la más apropiada. Además, la fiabilidad y la capacidad de este módulo para funcionar en condiciones difíciles lo hacen especialmente adecuado para el seguimiento en tiempo real durante las expediciones de montaña, lo que lo convierte en la opción ideal para este proyecto.

c. Gateway

El Gateway LoRaWAN desempeña un papel crucial en el proyecto, actuando como un intermediario entre los dispositivos de localización y la plataforma en la nube. Cuando el equipo LoRaWAN adquiere y procesa los datos de ubicación, el Gateway LoRaWAN los recibe a través de la red y los transmite al servidor en la nube para su almacenamiento y procesamiento. Lo que realmente hace que este módulo destaque es su capacidad para optimizar el proceso de transmisión, reduciendo la cantidad de equipos necesarios y asegurando que los datos se envíen de manera eficiente y confiable. Esto no solo mejora la experiencia, sino que también garantiza una transmisión continua y segura, algo fundamental para el éxito del monitoreo en tiempo real.

Además, el Gateway LoRaWAN no solo facilita la comunicación entre los dispositivos y la nube, sino que también asegura que los datos se almacenen de manera segura en una base de datos SQL. Esto permite análisis y visualización en tiempo real, lo que brinda la tranquilidad de poder monitorear desde cualquier dispositivo con internet. Esta arquitectura integral no solo optimiza el rendimiento, sino que también permite detectar rápidamente cualquier anomalía, como desvíos en la ubicación o cambios de trayectoria inesperados, lo cual es vital para la seguridad de los exploradores. Gracias a esto, podemos confiar en que el sistema alertará sobre cualquier riesgo en el camino, lo que refuerza la protección de quienes se aventuran en los terrenos más difíciles.

3.2.2 Etapa Almacenamiento y procesamiento de datos

a. Base de Datos

El almacenamiento de datos se realiza utilizando MySQL, una base de datos relacional que permite gestionar y almacenar eficientemente los datos de ubicación provenientes de los módulos GPS conectados a la red LoRaWAN. Este sistema fue elegido por su alta escalabilidad y capacidad para manejar grandes volúmenes de datos de manera estable, lo cual es esencial en aplicaciones de geolocalización a largo plazo. MySQL facilita consultas rápidas y eficientes sobre grandes volúmenes de datos históricos, garantizando un rendimiento sólido y la disponibilidad de la información para su análisis y visualización en tiempo real. Además, su flexibilidad y robustez lo hacen ideal para proyectos que requieren un almacenamiento confiable y continuo, asegurando que todos los datos puedan ser accesibles cuando se necesiten. Como se puede observar en la Tabla 12, que detalla los parámetros técnicos de diferentes opciones de bases de datos, MySQL se destaca por su eficiencia y facilidad.

Tabla 12. Comparación de varios tipos de bases de datos [50], [51], [52], [53]

Característica	MySQL 	phpMyAdmin 	MongoDB 	SQLite 
Tipo de base de datos	Relacional	Relacional (Interfaz de MySQL)	No Relacional (Documentos)	Relacional
Escalabilidad	Alta, con particiones y réplicas	Depende de MySQL (gestión de base de datos)	Alta, horizontalmente escalable	Baja (ideal para bases de datos pequeñas)
Facilidad de uso	Muy fácil de usar con soporte completo	Interfaz fácil de usar para gestionar MySQL	Flexible, pero puede ser complejo	Muy fácil de usar, ideal para pequeños proyectos
Consistencia de datos	Alta (ACID)	Alta (ACID, gestionado por MySQL)	Baja (consistencia eventual)	Alta (ACID)
Desempeño en consultas complejas	Muy alto, especialmente en consultas JOIN	Depende de MySQL, alto en consultas JOIN	Bajo en operaciones JOIN, mejor para consultas simples	Muy alto para operaciones simples
Casos de uso	Aplicaciones empresariales, alta integridad de datos	Gestión de bases de datos MySQL	Big Data, análisis de documentos JSON	Aplicaciones ligeras, prototipos

Se eligió phpMyAdmin como la interfaz de administración para MySQL debido a su facilidad de uso y a su increíble capacidad para gestionar de manera eficiente bases de datos MySQL. Aunque MySQL es el motor que se encarga del manejo de grandes volúmenes de datos, con una consistencia altamente fiable y soporte ACID, phpMyAdmin hace que la administración sea aún más sencilla. ¿Cómo? A través de una interfaz gráfica amigable, perfecta para aquellos que no desean escribir comandos complejos para gestionar sus bases de datos. Esta combinación entre MySQL y phpMyAdmin no solo optimiza la administración de la base de datos, sino que también asegura la integridad de los datos, permitiendo consultas rápidas y una disponibilidad constante. Es como tener la garantía de un proceso fluido y sin interrupciones. Esta solución se adapta perfectamente al proyecto, donde la eficiencia y la integridad de los datos son fundamentales para garantizar el éxito

b. Procesamiento de Datos

Elegir la herramienta adecuada para el procesamiento de datos es un paso crucial en el desarrollo de sistemas IoT, ya que la eficiencia en la gestión y transmisión de datos impacta directamente en el rendimiento y éxito del proyecto. La herramienta seleccionada debe ser capaz de manejar grandes volúmenes de datos, procesarlos en tiempo real, y ser escalable para adaptarse a los futuros requerimientos del sistema. Además, la capacidad de integración con diversas plataformas y bases de datos es esencial para garantizar que el sistema sea flexible y se pueda modificar conforme evolucione. Con estos factores en mente, se compararán tres tecnologías clave que destacan en el ámbito de IoT: Node-RED, Apache Kafka y Apache Flink.

La comparación de la Tabla 13, es esencial para determinar cuál de estas tecnologías se adapta mejor a las necesidades del proyecto, especialmente cuando se busca optimizar la transmisión de datos, almacenamiento y procesamiento en tiempo real. Al comprender las fortalezas y limitaciones de cada opción, se podrá tomar una decisión informada que garantice la eficiencia operativa y robustez en el manejo de datos dentro del sistema IoT en desarrollo

Tabla 13. Comparación de distintas tecnologías para el procesamiento de datos [54], [55], [56]

Característica	Node-RED 	Apache Kafka 	Apache Flink 
Facilidad de uso	Muy fácil, visual y basado en flujo	Requiere conocimiento en Kafka, pero es poderoso	Complejo, diseñado para procesamientos en tiempo real
Escalabilidad	Moderada, se puede escalar con servicios adicionales	Alta, especialmente para sistemas distribuidos	Muy alta, diseñado para procesamiento en tiempo real
Procesamiento en tiempo real	Moderado, no es ideal para procesamiento masivo	Alto, procesamiento en tiempo real es su fortaleza	Muy alto, excelente para procesamiento en tiempo real
Integración con bases de datos	Alta, soporta varios nodos para bases de datos	Moderada, se requieren adaptadores personalizados	Alta, soporta integración con varias bases de datos
Casos de uso	Proyectos IoT, automatización de flujos de datos	Procesamiento de grandes volúmenes de datos en tiempo real	Procesamiento de flujos de datos en tiempo real

Se ha optado por Node-RED para el procesamiento de datos debido a su simplicidad, flexibilidad y la facilidad con la que se integra con otros servicios esenciales como LoRaWAN y MySQL. Esta plataforma visual permite diseñar flujos de datos de forma sencilla, eliminando la necesidad de codificación extensa. Esto es clave, ya que permite una implementación rápida y una modificación ágil en los flujos, adaptándose fácilmente a los cambios del sistema sin mayores complicaciones. Además, al ser tan accesible y fácil de usar, se puede gestionar eficazmente la información en tiempo real, manteniendo la fluidez y eficiencia del sistema sin sacrificar rendimiento. Node-RED no solo es intuitivo y rápido, sino que también ofrece una integración impecable con las herramientas esenciales para el proyecto, haciéndolo una opción muy acertada para nuestra solución.

3.3.3 Etapa plataforma de visualización

a. Máquina Virtual

La creación de una máquina virtual (VM) en una plataforma en la nube es un aspecto clave para el éxito del proyecto. Esta elección garantiza que el sistema sea flexible y escalable, permitiendo que la infraestructura se adapte conforme aumente el número

de dispositivos y el volumen de datos. La VM se utiliza para alojar las herramientas necesarias para la visualización de los datos, como la base de datos MySQL y el servidor LAMP, asegurando que el sistema de monitoreo esté disponible en todo momento y se mantenga eficiente.

Para determinar cuál de las plataformas de nube sería la más adecuada para este propósito, se realizó una comparativa, tal como se observa en la Tabla 14. En ella se destacan las características más relevantes de las principales plataformas de visualización. Esta comparación permite elegir la opción que mejor se adapta a las necesidades del proyecto.

Tabla 14. Comparación de distintas plataformas de visualización [57], [58], [59]

Característica	Google Cloud  Google Cloud	Amazon Web Services (AWS)  aws	Microsoft Azure  Azure	IBM Cloud  IBM Cloud
Facilidad de uso	Interfaz fácil de usar, buena documentación	Interfaz compleja, pero bien documentada	Buena integración con Windows	Interfaz amigable, buena documentación
Escalabilidad	Muy alta, fácil de expandir	Muy alta, autoscaling integrado	Alta, fácil de expandir	Moderada, requiere ajustes manuales
Costo	Pago por uso, opción de cuotas gratuitas	Pago por uso, precios variados	Pago por uso, opciones de ahorro	Pago por uso, tarifas flexibles
Sistemas operativos soportados	Linux, Windows, contenedores	Linux, Windows, contenedores	Linux, Windows, contenedores	Linux, Windows, contenedores
Redundancia y confiabilidad	Alta, múltiples centros de datos	Alta, múltiples centros de datos	Alta, múltiples centros de datos	Alta, múltiples centros de datos
Opciones de red	Red privada global, VPCs, balanceo de carga	VPCs, balanceo de carga, red privada global	VPCs, balanceo de carga, red privada	VPCs, balanceo de carga, red privada
Soporte de contenedores	GKE, Kubernetes Engine	EKS, Elastic Kubernetes Service	AKS, Azure Kubernetes Service	Kubernetes en IBM Cloud

Se eligió Google Cloud, una plataforma que, con su integración directa con herramientas como Google Kubernetes Engine (GKE), facilita enormemente la administración de instancias de máquinas virtuales. Su capacidad de escalabilidad es impresionante, lo que hace que la infraestructura crezca sin problemas a medida que se suman más dispositivos o aumentan los datos. Además, la fiabilidad de Google

Cloud es algo que no pasa desapercibido; su robustez asegura que el monitoreo de los dispositivos GPS en tiempo real se mantenga eficiente y sin interrupciones. Cloud no solo cumple con las expectativas, sino que supera muchas de las limitaciones de otras.

b. Servidor Web

La elección de un servidor web adecuado es crucial para garantizar la correcta visualización de la ubicación de los exploradores en tiempo real. Para determinar cuál se adapta mejor al proyecto, se realiza una comparativa detallada considerando rendimiento, facilidad de uso y escalabilidad. En la Tabla 15, se presentan las características clave de varios tipos de servidores, lo que permitirá elegir el más adecuado para el sistema de monitoreo.

Tabla 15 Comparación de tipos de servidores [60], [61], [62], [63]

Característica	Apache MySQL + PHP (LAMP) 	Node.js+MongoDB +Express.js (MEAN) 	Nginx PostgreSQL Python (Django) 	IIS + MS SQL Server ASP.NET 
Facilidad de uso	Relativamente fácil de usar, ampliamente soportado	Requiere conocimientos avanzados en JavaScript	Requiere conocimientos en Python y Django	Requiere conocimientos en Windows Server y ASP.NET
Rendimiento	Bueno para sitios con tráfico moderado	Muy alto, especialmente para aplicaciones en tiempo real	Alto, ideal para aplicaciones web escalables	Alto, ideal para aplicaciones empresariales
Escalabilidad	Moderada, depende de la configuración	Alta, especialmente con aplicaciones distribuidas	Alta, adecuado para aplicaciones complejas	Alta, adecuado para empresas grandes
Seguridad	Muy buena, con soporte extendido de seguridad	Excelente, puede integrarse con medidas de seguridad avanzadas	Muy buena, con configuraciones fáciles para seguridad	Alta, pero requiere una gestión adecuada
Popularidad y soporte	Muy popular, ampliamente utilizado	Popular entre desarrolladores de JavaScript	Popular en el entorno Python, con buen soporte	Popular en entornos empresariales
Integración con bases de datos	Alta, con MySQL y PHP ampliamente soportados	Alta, con MongoDB y Express.js	Alta, con PostgreSQL y Django fácil de configurar	Alta, con MS SQL Server
Costo de implementación	Bajo, debido a su naturaleza de código abierto	Bajo, pero puede requerir más desarrollo	Bajo, pero puede requerir configuración avanzada	Alto, debido a las licencias y el entorno Windows

Se ha optado por el stack LAMP (Linux, Apache, MySQL, PHP) debido a su robustez y facilidad de implementación, además de su bajo costo. Este conjunto de tecnologías ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones web tradicionales, lo que garantiza una gran disponibilidad de documentación y soporte técnico. Su flexibilidad y estabilidad lo convierten en una excelente opción para gestionar tanto el servidor web como la base de datos que almacenará las ubicaciones de los exploradores en el proyecto de geolocalización, asegurando así su efectividad y facilidad de manejo.

3.3 Cálculos y Simulación del prototipo propuesto

3.3.1 Cálculos de radioenlaces

Para realizar los diferentes cálculos en la ruta Norte – Pondo Baños, también es necesario conocer la distancia que existen entre los diferentes nodos a comunicación, se detallan en la Tabla 16.

Tabla 16. Coordenadas para cálculos de la Ruta Norte – volcán Tungurahua

Ruta Norte – Pondo Baños			
Nodo	Coordenadas		Distancia
Nodo móvil	Latitud	-1,467784	Nodo móvil - Nodo Retransmisor 2.43 Km
	Longitud	-78,446086	
Nodo Retransmisor	Latitud	-1.446858	Nodo Retransmisor – Nodo Gateway 2.62 Km
	Longitud	-78.439911	
Nodo Gateway	Latitud	-1,424750	
	Longitud	-78,444238	

Para el diseño de la red inalámbrica es necesario calcular diferentes parámetros tales como: Frecuencia (2), Zona de Fresnel (3), Pérdidas del espacio libre (4), Margen de desvanecimiento (5), Potencia de recepción disponible (6), Margen de umbral (7).

A continuación, se detallan los cálculos para que la comunicación LoRa sea posible.

Enlace: Nodo Móvil – Nodo Retransmisor

Frecuencia

$$f = \frac{f_{min} + f_{max}}{2} \quad (2)$$

Donde:

f_{min} = Frecuencia mínima (MHz)

f_{max} = Frecuencia máxima (MHz)

$$f = \frac{902 \text{ MHz} + 928 \text{ MHz}}{2}$$

$$f = 915 \text{ MHz}$$

Zona de Fresnel

$$r = 17.32 \sqrt{\frac{D}{4f}} \quad (3)$$

Donde:

D = distancia (km)

f = frecuencia (GHz)

$$r = 17.32 \sqrt{\frac{2.43 \text{ km}}{4 * 0.915 \text{ GHz}}}$$

$$r = 14.113 \text{ m}$$

$$r_1 = 0.6 * r$$

$$r_1 = 0.6 * 14.113 \text{ m}$$

$$r_1 = 8.467 \text{ m}$$

Perdidas por espacio libre

$$F_{SL}(dB) = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 32.4 \quad (4)$$

Donde:

d = distancia (km)

f = frecuencia (MHz)

$$F_{SL}(dB) = 20 \log(2.43 \text{ km}) + 20 \log(915 \text{ MHz}) + 32.4$$

$$F_{SL}(dB) = 99.34 \text{ dB}$$

Margen de desvanecimiento

$$FM = 30 \log(d) + 10 \log(6 * a * b * f) - 10 \log(1 - R) - 70 \quad (5)$$

Donde:

d : distancia (km) f : frecuencia (GHz)

R : confiabilidad del sistema la cual normalmente es del 99.99%, por tanto, el valor de R es 0.9999.

a : factor de rugosidad de la trayectoria en este caso vale 1.

b : factor para convertir la probabilidad del peor de los meses en probabilidad, en este caso vale 0.25.

$$FM = 30 \log(2.43 \text{ m}) + 10 \log(6 * 1 * 0.25 * 0.915 \text{ GHz}) - 10 \log(1 - 0.9999) - 70$$

$$FM = -17.056 \text{ dB}$$

Potencia de recepción disponible

$$P_{Rx} = P_{Tx} - AL_{Tx} + G_{Tx} - F_{SL} + G_{Rx} - AL_{Rx} \quad (6)$$

Donde:

P_{Tx} : potencia de la antena transmisora.

AL_{Tx} : pérdidas por cables y conectores en el transmisor

G_{Tx} : ganancia en el transmisor

F_{SL} : pérdidas del espacio libre

G_{Rx} : ganancia en el receptor

AL_{Rx} : pérdidas por cables y conectores en el receptor

$$P_{Rx} = 20 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} + 2 \text{ dB} - 99.34 \text{ dB} + 2 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB}$$

$$P_{Rx} = -76.34 \text{ dB}$$

Margen de umbral

$$MU = P_{Rx} - S_r \quad (7)$$

Donde:

S_r : sensibilidad del receptor

P_{Rx} : Potencia de recepción disponible

$$MU = -76.34 \text{ dB} - (-138 \text{ dB})$$

$$MU = 61.66 \text{ dB}$$

Nota: Para que la señal llegue del transmisor al receptor se debe cumplir que el margen de umbral debe ser mayor o igual al margen de desvanecimiento.

$$MU \geq FM$$

Para este caso si se cumple puesto que: $61.66 \text{ dB} \geq -17.056 \text{ dB}$ Por tanto, la transmisión de señal se realizará correctamente.

Enlace: Nodo Retransmisor – Nodo Gateway

Frecuencia

$$f = \frac{f_{min} + f_{max}}{2} \quad (8)$$

Donde:

f_{min} = Frecuencia mínima (MHz)

f_{max} = Frecuencia máxima (MHz)

$$f = \frac{902 \text{ MHz} + 928 \text{ MHz}}{2}$$

$$f = 915 \text{ MHz}$$

Zona de Fresnel

$$r = 17.32 \sqrt{\frac{D}{4f}} \quad (9)$$

Donde:

D = distancia (km)

f = frecuencia (GHz)

$$r = 17.32 \sqrt{\frac{2.62 \text{ km}}{4 * 0.915 \text{ GHz}}}$$

$$r = 14.654 \text{ m}$$

$$r_1 = 0.6 * r$$

$$r_1 = 0.6 * 14.654 \text{ m}$$

$$r_1 = 8.792 \text{ m}$$

Perdidas por espacio libre

$$F_{SL}(dB) = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 32.4 \quad (10)$$

Donde:

d = distancia (km)

f = frecuencia (MHz)

$$F_{SL}(dB) = 20 \log(2.62 \text{ km}) + 20 \log(915 \text{ MHz}) + 32.4$$

$$F_{SL}(dB) = 99.94 \text{ dB}$$

Margen de desvanecimiento

$$FM = 30 \log(d) + 10 \log(6 * a * b * f) - 10 \log(1 - R) - 70 \quad (11)$$

Donde:

d : distancia (km) f : frecuencia (GHz)

R : confiabilidad del sistema la cual normalmente es del 99.99%, por tanto, el valor de R es 0.9999.

a : factor de rugosidad de la trayectoria en este caso vale 1.

b : factor para convertir la probabilidad del peor de los meses en probabilidad, en este caso vale 0.25.

$$FM = 30 \log(2.62 \text{ km}) + 10 \log(6 * 1 * 0.25 * 0.915 \text{ GHz}) - 10 \log(1 - 0.9999) - 70$$

$$FM = -16.076 \text{ dB}$$

Potencia de recepción disponible

$$P_{Rx} = P_{Tx} - AL_{Tx} + G_{Tx} - F_{SL} + G_{Rx} - AL_{Rx} \quad (12)$$

Donde:

P_{Tx} : potencia de la antena transmisora.

AL_{Tx} : pérdidas por cables y conectores en el transmisor

G_{Tx} : ganancia en el transmisor

F_{SL} : pérdidas del espacio libre

G_{Rx} : ganancia en el receptor

AL_{Rx} : pérdidas por cables y conectores en el receptor

$$P_{Rx} = 20 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} + 2 \text{ dB} - 74.102 \text{ dB} + 2 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB}$$

$$P_{Rx} = -76.94 \text{ dB}$$

Margen de umbral

$$MU = P_{Rx} - S_r \quad (13)$$

Donde:

S_r : sensibilidad del receptor

P_{Rx} : Potencia de recepción disponible

$$MU = -76.94 \text{ dB} - (-138 \text{ dB})$$

$$MU = 61.06 \text{ dB}$$

Nota: Para que la señal llegue del transmisor al receptor se debe cumplir que el margen de umbral debe ser mayor o igual al margen de desvanecimiento.

$$MU \geq FM$$

Para este caso si se cumple puesto que: $61.06 \text{ dB} \geq -16.076 \text{ dB}$ Por tanto, la transmisión de señal se realizará correctamente.

Para realizar los diferentes cálculos en la ruta Sur – Puela Riobamba, también es necesario conocer la distancia que existen entre los diferentes nodos a comunicación, se detallan en la Tabla 17. Para el diseño se calculó diferentes parámetros tales como: Frecuencia (14), Zona de Fresnel (15), Pérdidas del espacio libre (16), Margen de desvanecimiento (17), Potencia de recepción disponible (18), Margen de umbral (19).

Tabla 17. Ruta Sur – volcán Tungurahua

Ruta Sur – Puela Riobamba			
Nodo	Coordenadas		Distancia
Nodo móvil	Latitud	-1,467784	Nodo Móvil - Nodo Retransmisor 2.26 Km
	Longitud	-78,446086	
Nodo Retransmisor	Latitud	-1.446858	Nodo Retransmisor – Nodo Gateway 2.58 Km
	Longitud	-78.439911	
Nodo Gateway	Latitud	-1,424750	
	Longitud	-78,444238	

Enlace: Nodo Móvil – Nodo Retransmisor

Frecuencia

$$f = \frac{f_{min} + f_{max}}{2} \quad (14)$$

Donde:

f_{min} = Frecuencia mínima (MHz)

f_{max} = Frecuencia máxima (MHz)

$$f = \frac{902 \text{ MHz} + 928 \text{ MHz}}{2}$$

$$f = 915 \text{ MHz}$$

Zona de Fresnel

$$r = 17.32 \sqrt{\frac{D}{4f}} \quad (15)$$

Donde:

D = distancia (km)

f = frecuencia (GHz)

$$r = 17.32 \sqrt{\frac{2.26 \text{ km}}{4 * 0.915 \text{ GHz}}}$$

$$r = 13.61 \text{ m}$$

$$r_1 = 0.6 * r$$

$$r_1 = 0.6 * 13.61 \text{ m}$$

$$r_1 = 8.16 \text{ m}$$

Perdidas por espacio libre

$$F_{SL}(dB) = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 32.4 \quad (16)$$

Donde:

d = distancia (km)

f = frecuencia (MHz)

$$F_{SL}(dB) = 20 \log(2.26 \text{ km}) + 20 \log(915 \text{ MHz}) + 32.4$$

$$F_{SL}(dB) = 98.71 \text{ dB}$$

Margen de desvanecimiento

$$FM = 30 \log(d) + 10 \log(6 * a * b * f) - 10 \log(1 - R) - 70 \quad (17)$$

Donde:

d : distancia (km) f : frecuencia (GHz)

R : confiabilidad del sistema la cual normalmente es del 99.99%, por tanto, el valor de R es 0.9999.

a : factor de rugosidad de la trayectoria en este caso vale 1.

b : factor para convertir la probabilidad del peor de los meses en probabilidad, en este caso vale 0.25.

$$FM = 30 \log(2.26 \text{ m}) + 10 \log(6 * 1 * 0.25 * 0.915 \text{ GHz}) - 10 \log(1 - 0.9999) - 70$$

$$FM = -18.002 \text{ dB}$$

Potencia de recepción disponible

$$P_{Rx} = P_{Tx} - AL_{Tx} + G_{Tx} - F_{SL} + G_{Rx} - AL_{Rx} \quad (18)$$

Donde:

P_{Tx} : potencia de la antena transmisora.

AL_{Tx} : pérdidas por cables y conectores en el transmisor

G_{Tx} : ganancia en el transmisor

F_{SL} : pérdidas del espacio libre

G_{Rx} : ganancia en el receptor

AL_{Rx} : pérdidas por cables y conectores en el receptor

$$P_{Rx} = 20 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} + 2 \text{ dB} - 98.71 \text{ dB} + 2 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB}$$

$$P_{Rx} = -75.71 \text{ dB}$$

Margen de umbral

$$MU = P_{Rx} - S_r \quad (19)$$

Donde:

S_r : sensibilidad del receptor

P_{Rx} : Potencia de recepción disponible

$$MU = -76.34 \text{ dB} - (-138 \text{ dB})$$

$$MU = 61.66 \text{ dB}$$

Nota: Para que la señal llegue del transmisor al receptor se debe cumplir que el margen de umbral debe ser mayor o igual al margen de desvanecimiento.

$$MU \geq FM$$

Para este caso si se cumple puesto que: $61.66 \text{ dB} \geq -18.002 \text{ dB}$ Por tanto, la transmisión de señal se realizará correctamente.

Enlace: Nodo Retransmisor – Nodo Gateway

Frecuencia

$$f = \frac{f_{min} + f_{max}}{2} \quad (20)$$

Donde:

f_{min} = Frecuencia mínima (MHz)

f_{max} = Frecuencia máxima (MHz)

$$f = \frac{902 \text{ MHz} + 928 \text{ MHz}}{2}$$

$$f = 915 \text{ MHz}$$

Zona de Fresnel

$$r = 17.32 \sqrt{\frac{D}{4f}} \quad (21)$$

Donde:

D = distancia (km)

f = frecuencia (GHz)

$$r = 17.32 \sqrt{\frac{2.58 \text{ km}}{4 * 0.915 \text{ GHz}}}$$

$$r = 14.541 \text{ m}$$

$$r_1 = 0.6 * r$$

$$r_1 = 0.6 * 14.541 \text{ m}$$

$$r_1 = 8.725 \text{ m}$$

Perdidas por espacio libre

$$F_{SL}(dB) = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 32.4 \quad (22)$$

Donde:

d = distancia (km)

f = frecuencia (MHz)

$$F_{SL}(dB) = 20 \log(2.58 \text{ km}) + 20 \log(915 \text{ MHz}) + 32.4$$

$$F_{SL}(dB) = 99.86 \text{ dB}$$

Margen de desvanecimiento

$$FM = 30 \log(d) + 10 \log(6 * a * b * f) - 10 \log(1 - R) - 70 \quad (23)$$

Donde:

d : distancia (km) f : frecuencia (GHz)

R : confiabilidad del sistema la cual normalmente es del 99.99%, por tanto, el valor de R es 0.9999.

a : factor de rugosidad de la trayectoria en este caso vale 1.

b : factor para convertir la probabilidad del peor de los meses en probabilidad, en este caso vale 0.25.

$$FM = 30 \log(2.58 \text{ km}) + 10 \log(6 * 1 * 0.25 * 0.915 \text{ GHz}) - 10 \log(1 - 0.9999) - 70$$

$$FM = -16.276 \text{ dB}$$

Potencia de recepción disponible

$$P_{Rx} = P_{Tx} - AL_{Tx} + G_{Tx} - F_{SL} + G_{Rx} - AL_{Rx} \quad (24)$$

Donde:

P_{Tx} : potencia de la antena transmisora.

AL_{Tx} : pérdidas por cables y conectores en el transmisor

G_{Tx} : ganancia en el transmisor

F_{SL} : pérdidas del espacio libre

G_{Rx} : ganancia en el receptor

AL_{Rx} : pérdidas por cables y conectores en el receptor

$$P_{Rx} = 20 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} + 2 \text{ dB} - 99.86 \text{ dB} + 2 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB}$$

$$P_{Rx} = -76.86 \text{ dB}$$

Margen de umbral

$$MU = P_{Rx} - S_r \quad (25)$$

Donde:

S_r : sensibilidad del receptor

P_{Rx} : Potencia de recepción disponible

$$MU = -76.86 \text{ dB} - (-138 \text{ dB})$$

$$MU = 61.14 \text{ dB}$$

Nota: Para que la señal llegue del transmisor al receptor se debe cumplir que el margen de umbral debe ser mayor o igual al margen de desvanecimiento.

$$MU \geq FM$$

Para este caso si se cumple puesto que: $61.14 \text{ dB} \geq -16.276 \text{ dB}$ Por tanto, la transmisión de señal se realizará correctamente.

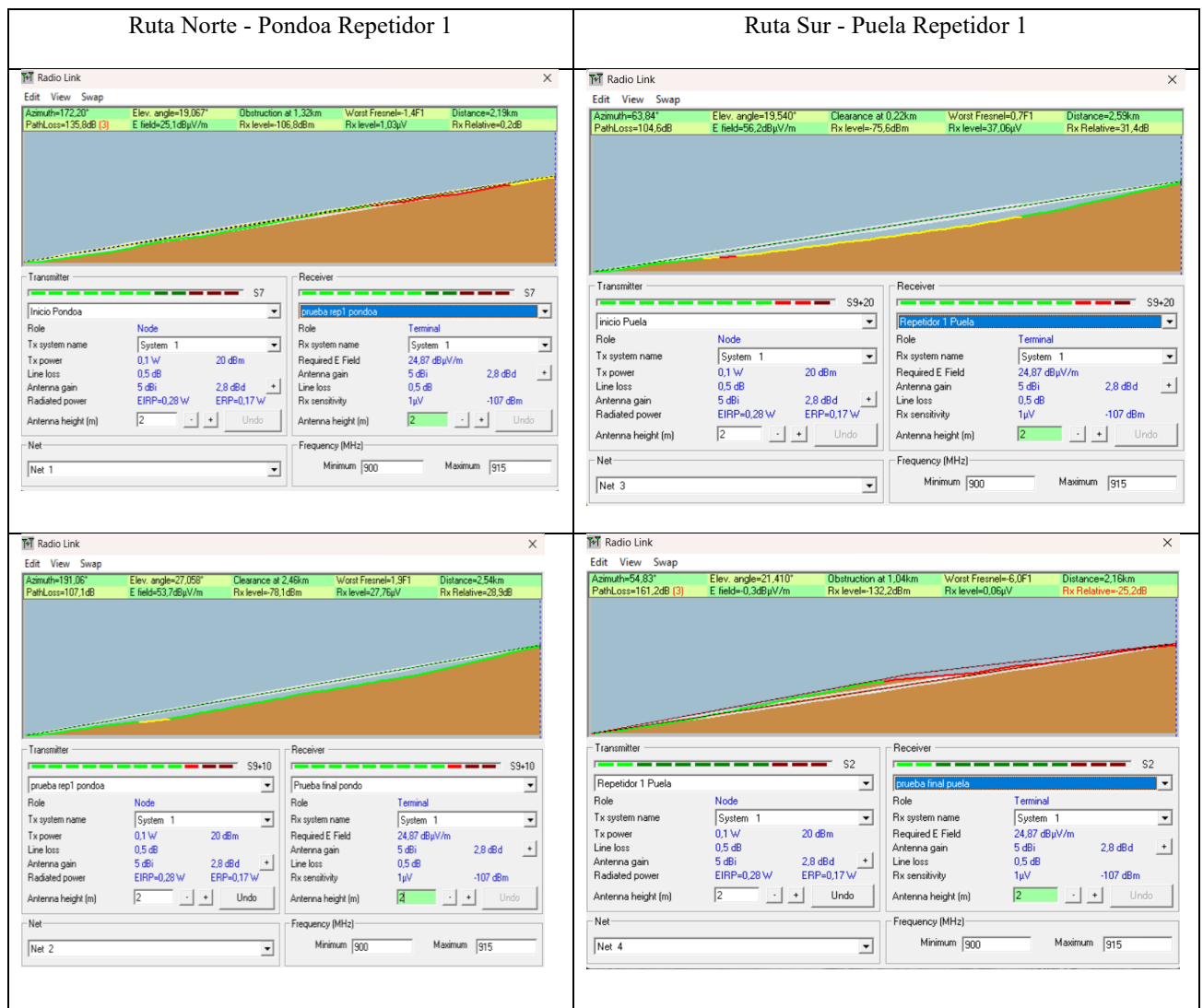
3.3.2 Simulación

A partir de los datos obtenidos tanto de la simulación en radio móvil como de los cálculos realizados, se puede decir con confianza que la transmisión en ambas rutas es más que viable. Los resultados nos muestran que, incluso con las pérdidas por espacio libre y los márgenes de desvanecimiento, la señal llega con suficiente fuerza. Para el enlace Nodo Móvil – Nodo Retransmisor, la potencia de recepción disponible fue de -76.34 dB, mientras que el margen de umbral alcanzó 61.66 dB, claramente superior al margen de desvanecimiento de -17.056 dB. Lo mismo ocurre en el enlace Nodo Retransmisor – Nodo Gateway, donde la potencia de recepción fue de -76.86 dB, y el margen de umbral de 61.14 dB superó ampliamente el margen de desvanecimiento de -16.276 dB. Esto no deja lugar a dudas: la señal se transmitirá sin problemas, lo que garantiza la fiabilidad y estabilidad de la comunicación en ambos enlaces.

Lo más impresionante de todo es cómo los cálculos teóricos y los resultados de la simulación coinciden perfectamente, lo que refuerza la confiabilidad de todo el sistema

como se observa en la Tabla 18. Por ejemplo, la zona de Fresnel para el enlace Nodo Móvil – Nodo Retransmisor se calculó en 14.113 m, y el radio crítico fue de 8.467 m, lo cual indica una adecuada propagación de la señal. En el caso del Nodo Retransmisor – Nodo Gateway, la zona de Fresnel fue de 14.541 m y el radio crítico 8.725 m, lo que también cumple con los estándares necesarios. Las pérdidas por espacio libre fueron de 99.34 dB y 99.86 dB, cifras que, aunque altas, no afectan la efectividad de la transmisión. En general los cálculos y simulaciones demuestran que el sistema está perfectamente diseñado, garantizando comunicaciones robustas y eficientes en las rutas simuladas.

Tabla 18. Simulación en Radio Mobile de rutas con 1 retransmisor - volcán Tungurahua



3.4 Configuración de equipos de comunicación para exploradores

Para llevar a cabo el diseño del circuito electrónico, se necesitan dos componentes clave que se complementan perfectamente: un circuito responsable de la recolección y transmisión de datos, y un sistema de alimentación y carga esencial para garantizar que el prototipo sea autónomo y portátil, permitiendo que pueda ser transportado fácilmente en la mochila de un alpinista. El diseño busca asegurar que el dispositivo pueda funcionar sin problemas en terrenos difíciles y en condiciones extremas, donde la interacción con los datos de ubicación es crucial. Este enfoque se ha pensado cuidadosamente para satisfacer las necesidades de los exploradores en sus expediciones. En la Figura 17, se puede ver el diseño detallado del circuito del prototipo.

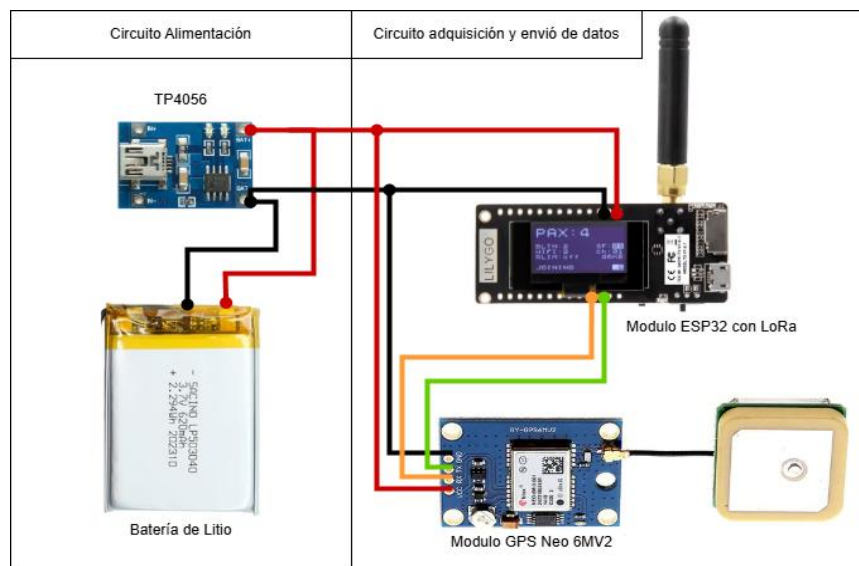


Figura 17. Diseño Nodo Emisor

3.4.1 Circuito de alimentación

El circuito de alimentación y carga no es solo una parte esencial del prototipo, sino que también está pensado para garantizar que el dispositivo funcione de manera eficiente durante un tiempo determinado, adaptándose a las necesidades del alpinista. Este sistema cuenta con un switch que facilita el encendido y apagado del dispositivo, lo que hace todo mucho más sencillo. La batería utilizada es de tipo 18650, conocida por su capacidad de almacenar una gran cantidad de energía (8800 mA), lo que le

permite funcionar por más tiempo. Y claro, cuando la batería se agota, el circuito se recarga fácilmente utilizando el módulo TP4056, un controlador de carga eficiente que asegura que la batería se mantenga en óptimas condiciones durante su uso.

El prototipo también incluye un regulador de voltaje capaz de manejar de manera segura la salida de 6 a 20 voltios, conectándose a través de un conector Jack para mayor practicidad. Además, como se muestra en la Tabla 19, al determinarse el consumo de voltaje y corriente de cada componente del prototipo, es posible calcular con mayor precisión el tiempo de duración del dispositivo encendido, lo que permite hacer ajustes según las necesidades específicas de los usuarios en el terreno.

Tabla 19. Consumo de corriente de nodo emisor

Elemento	Consumo de voltaje	Consumo de corriente
LoRaWAN	3,6 V	1000 mA
GPS NEO 6M	5 V	400 mA
Pantalla	3,7 V	800 mA
Otros	3.3 V	0.8 A
Total		2.2 A

Para poder determinar la duración de la batería se calculó con de la ecuación (26)

$$H = \frac{W_b}{W_c} = \frac{V_b * I_b}{V_c * I_c} \quad (26)$$

$$H = \frac{3.7 \text{ v} * 8.800 \text{ A}}{3.7 * 2.2 \text{ A}} = 4 \text{ horas}$$

Donde:

H = Horas de duración de la batería

W_b =Potencia de la batería

W_c =Potencia consumida

V_b = Voltaje de batería

I_c = Corriente del sistema

El trayecto que recorren los exploradores está estrechamente ligado a la ubicación de las zonas montañosas y a las rutas que eligen durante sus expediciones. No existe un

tiempo exacto, pues todo depende del tipo de terreno, del clima y de las condiciones inesperadas que puedan surgir. A menudo, el retorno toma entre 4 y 5 horas, influenciado por la distancia, el nivel de esfuerzo, los descansos necesarios y la complejidad del terreno.

Por esta razón, la duración mínima que debe ofrecer la batería del dispositivo de localización debe garantizar al menos 4 horas de operación continua. Para alcanzar ese objetivo, se ha optado por una batería tipo 18650 de iones de litio, con una capacidad de 8800 mAh. Esta elección no es casual: permite alcanzar un consumo energético optimizado que brinda hasta 4 horas de funcionamiento efectivo. Aunque no llega a las 8 horas ideales, esta autonomía resulta más que suficiente para cubrir toda la jornada de ascenso en zonas de difícil acceso, asegurando así la ubicación precisa de los exploradores en todo momento.

3.4.1 3.4.2 Diagrama de adquisición y envío de datos

El diagrama que describe la adquisición y envío de datos, representado en la Figura 18, se basa en una combinación eficiente entre un módulo LoRaWAN y un dispositivo GPS NEO 6M. Este diseño ha sido pensado cuidadosamente para capturar la ubicación geográfica de los exploradores que recorren las zonas montañosas de Tungurahua, entregando datos precisos de latitud y longitud. La conexión entre el GPS y el LoRaWAN se realiza a través de una interfaz serial sencilla pero confiable, que utiliza los pines TX, RX y de alimentación para mantener una comunicación constante. Una vez obtenida la información, los datos de ubicación son transmitidos a un servidor en Google Cloud mediante la red LoRaWAN. Todo ocurre en tiempo real, con seguridad y fluidez, lo que permite que la información esté disponible para su visualización y análisis al instante. Gracias a las características del módulo LoRaWAN, el consumo de batería es mínimo, ideal para dispositivos que deben operar durante largas horas en lugares de difícil acceso. Y si el terreno lo exige, siempre existe la posibilidad de añadir una antena externa con cable UFL para mejorar la cobertura. Todo esto se traduce en un sistema confiable, ágil y listo para funcionar incluso en los entornos más retadores.

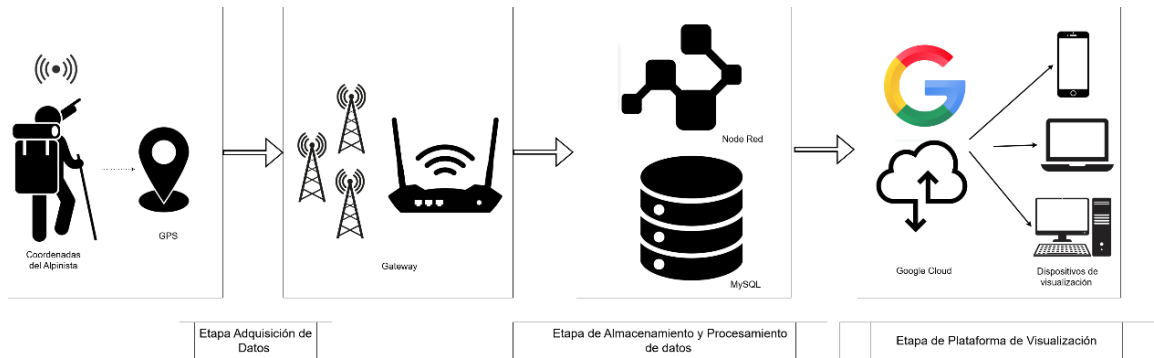


Figura 18. Diagrama de Sistema de Geolocalización y Comunicación LoRaWAN

3.4.2 3.4.3 Diseño de contenedores

El diseño de la carcasa del prototipo, que alberga con precisión al microcontrolador, el módulo LoRaWAN, el GPS, la batería tipo 18650 y la antena, fue desarrollado utilizando la plataforma Fusion 360. Esta herramienta no solo facilita la creación de modelos personalizados y detallados, sino que también permite visualizar cada componente con claridad antes de llevarlo a producción, tal como se observa en la Figura 19, que tiene 7.5cm de alto, 7.5cm de ancho y 3cm de profundidad. Con su interfaz intuitiva y sus múltiples funcionalidades, Fusion 360 acompaña todo el proceso: desde la idea inicial hasta el diseño final, todo desde la nube. El modelo tridimensional se exporta en formato DXF, lo que facilita la impresión y garantiza que cada pieza incluida la batería y la antena se integre perfectamente en el interior del dispositivo.

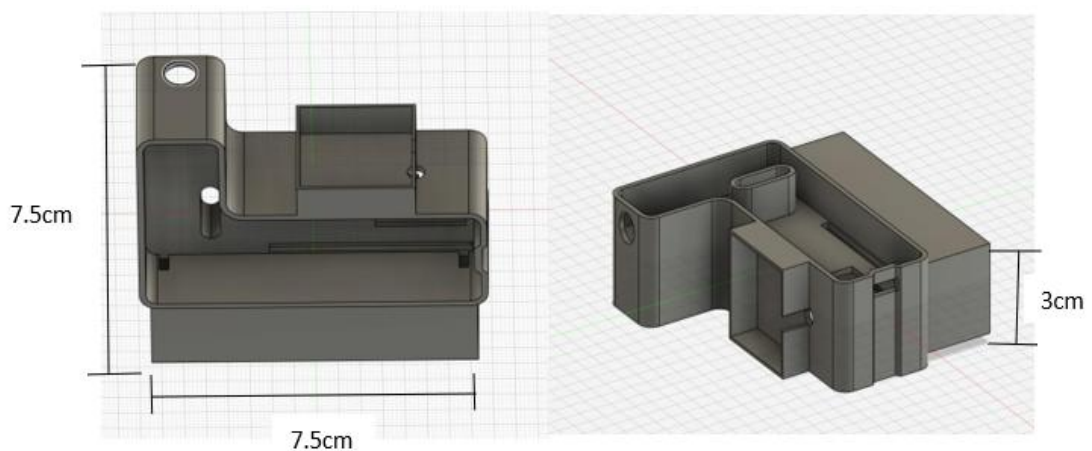


Figura 19. Diseño 3D contenedores

La implementación final del prototipo, tal como se muestra en la Figura 20, refleja el cuidado con el que fueron ensamblados los componentes dentro de la carcasa contenedora. Se resalta especialmente la ubicación externa de la antena del módulo LoRaWAN, una elección estratégica y bien justificada. Esta disposición garantiza una mejor conexión con los satélites, lo que se traduce en una recepción precisa y estable de los datos de ubicación. Colocar la antena en el exterior no fue una simple decisión técnica: fue una solución efectiva para maximizar la captación de señal, especialmente en terrenos difíciles como las zonas montañosas de Tungurahua. Gracias a ello, se logra una adquisición fluida y confiable de las coordenadas de latitud y longitud, optimizando así el rendimiento del sistema de localización en tiempo real y asegurando que el seguimiento de los exploradores sea lo más preciso posible.

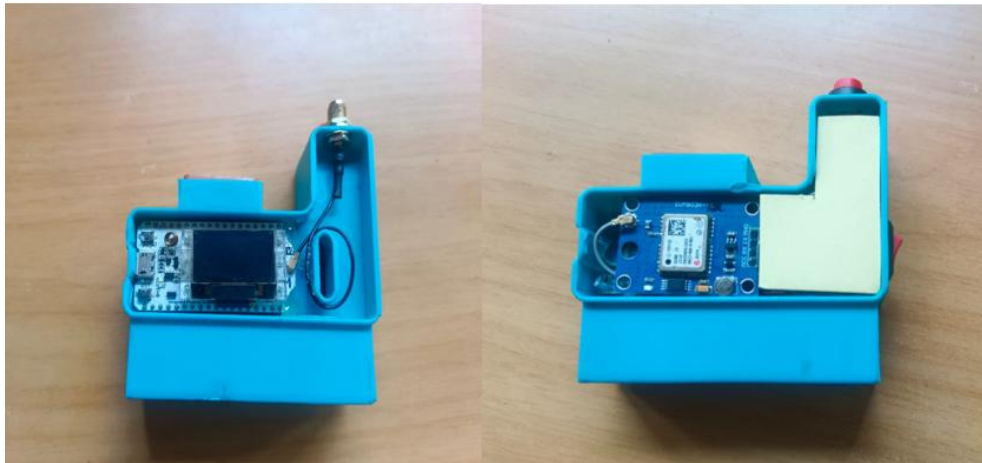


Figura 20. Vista frontal y posterior de contenedor

3.5 Diseño del Sistema de Rastreo con LoRaWAN

La programación del módulo Heltec basado en el ESP32, junto con el módulo GPS, se realiza utilizando C/C++ en el entorno Arduino IDE. Esta plataforma ofrece una interfaz fácil de usar para escribir, compilar y cargar el código eficientemente mediante una conexión serial entre el microcontrolador y el ordenador. Arduino IDE proporciona herramientas y librerías que facilitan la integración de los componentes, permitiendo un desarrollo ágil del sistema de localización en tiempo real para los exploradores en Tungurahua.

3.5.1 3.5.1 GPS Ublox NEO 6M

El módulo GPS NEO-6M es esencial en el sistema de geolocalización, proporcionando datos precisos de ubicación y sincronización con los satélites en tiempo real. Además, ofrece la hora en GMT, lo que es crucial para la sincronización de datos en zonas con diferentes husos horarios, como Ecuador (GMT-5). Su fiabilidad y capacidad para entregar coordenadas y hora de forma exacta lo hacen ideal para el proyecto. En la Figura 21, se presenta el diagrama de flujo del código de programación utilizado para gestionar estos datos.

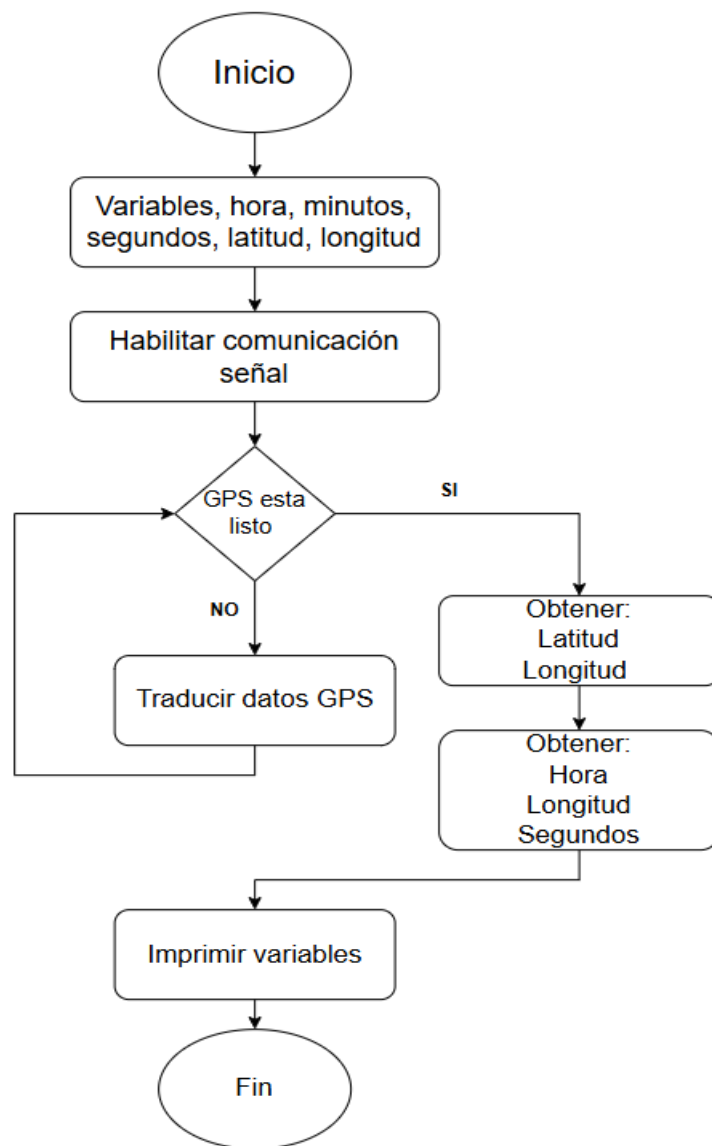


Figura 21. Diagrama de flujo del GPS 6M

En la Figura 22 se muestra el código utilizado para la adquisición de las coordenadas. Este proceso comienza con un bucle que se activa cada segundo, esperando la llegada de los datos del módulo GPS. Durante este intervalo, el sistema intenta leer los datos disponibles desde el puerto serial del módulo. Si la señal se valida correctamente, la información se procesa y se actualiza en un conjunto de datos llamado "newData". En caso de que se reciban nuevos datos y la ubicación haya sido actualizada, se muestran en pantalla la latitud, longitud, número de satélites y la precisión obtenida. Todo esto es fundamental para asegurar que el sistema mantenga un seguimiento preciso en tiempo real. El código utilizado para la adquisición de coordenadas se detalla en el Anexo 2.

```
while (gpsSerial.available() > 0) {  
  gps.encode(gpsSerial.read());  
}  
if (gps.location.isUpdated() ) {  
  
  Serial.print("LAT: ");  
  Serial.println(gps.location.lat(), 6);  
  Serial.print("LONG: ");  
  Serial.println(gps.location.lng(), 6);  
  Serial.print("SPEED (km/h) = ");  
  Serial.println(gps.speed.kmph());  
  Serial.print("ALT (min)= ");  
  Serial.println(gps.altitude.meters());  
  Serial.print("HDOP = ");  
  Serial.println(gps.hdop.value() / 100.0);  
  Serial.print("Satellites = ");  
  Serial.println(gps.satellites.value());  
  
  //Serial.println(gps.satellites.value());  
  
  // Ajusta la hora y corrige la fecha si es necesario  
  day = gps.date.day();  
  month = gps.date.month();  
  year = gps.date.year();  
  localHour = adjustHourToTimeZone(gps.time.hour(), day, month, year);  
}
```

Figura 22. Codificación para adquisición de coordenadas geográficas

El módulo GPS NEO-6M emplea un sistema de posicionamiento global (GPS) desarrollado por los Estados Unidos, ofreciendo una precisión de ubicación de entre 5 y 7 metros. Sin embargo, esta precisión no es fija y puede variar en función de diversos factores como la cantidad de satélites disponibles y las posibles obstrucciones en el entorno, como edificios o árboles. En la Figura 23, se presenta una comparación interesante entre la ubicación obtenida con el módulo GPS NEO-6M y la generada por un teléfono Vivo, lo que permite visualizar de manera clara las diferencias en la exactitud de las mediciones. Esto resalta la fiabilidad del GPS NEO-6M en entornos difíciles, comparado con dispositivos más comunes como los smartphones.

```

04:47:45.771 -> Latitud=-0.874860 Longitud=-78.644950 Satelites=10 Precision=0.77
04:47:46.798 -> Latitud=-0.874860 Longitud=-78.644950 Satelites=10 Precision=0.77
04:47:47.777 -> Latitud=-0.874861 Longitud=-78.644950 Satelites=10 Precision=0.77
04:47:48.762 -> Latitud=-0.874861 Longitud=-78.644950 Satelites=10 Precision=0.77

```



Figura 23. Comparación de datos de Geolocalización

3.5.2 Transmisión de datos utilizando modulo LoRaWAN

La transmisión de datos a través de la comunicación LoRaWAN se lleva a cabo mediante la creación de una función que se ejecuta periódicamente desde el programa principal. Esta función se encarga de recopilar y transmitir los datos del módulo GPS al servidor en tiempo real. En la Figura 24, se presenta el diagrama de flujo correspondiente para la transmisión de datos mediante LoRaWAN.

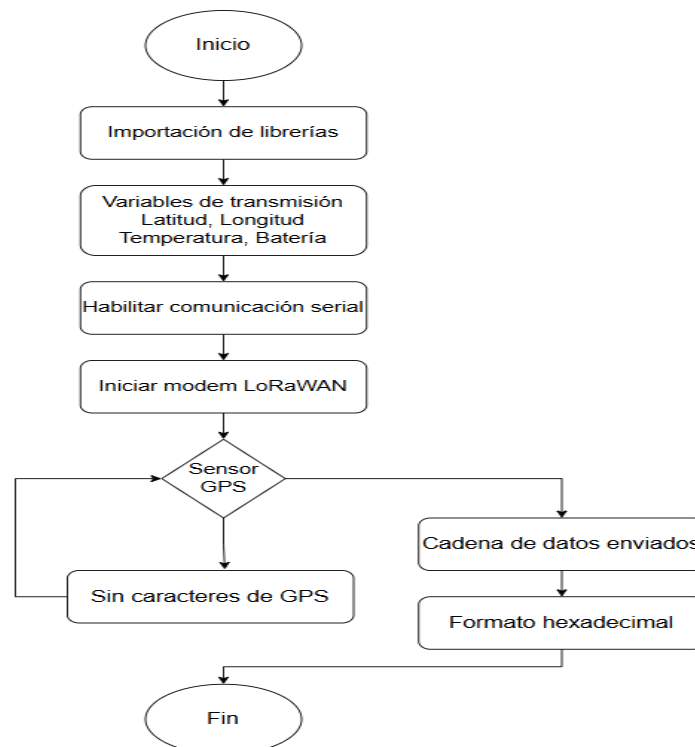


Figura 24. Diagrama de flujo para la transmisión de datos con LoRaWAN

El microcontrolador Ufox, que opera con LoRaWAN, tiene la capacidad de enviar tramas de datos con un tamaño específico en formato hexadecimal. Por esta razón, se definió la cantidad de información que cada variable del módulo GPS puede almacenar antes de ser enviada, asegurando que los datos de localización se transmitan de manera eficiente y dentro de las limitaciones de la red LoRaWAN.

a. Latitud y longitud

Este sistema utiliza el formato decimal para las coordenadas geográficas, destinado a obtener las coordenadas de cualquier ubicación. Aunque se emplea un sistema decimal para las coordenadas, los datos se almacenan como una variable de 4 bytes, que incluye un bit de signo, un exponente binario de 8 bits con exceso de 127 y una mantisa de 23 bits, lo que asegura precisión en la ubicación.

La transmisión de datos a través del microcontrolador Ufox, que utiliza tecnología LoRaWAN, se realiza mediante el envío de una trama de 12 bytes, que contiene toda la información de las variables involucradas, como la latitud y longitud. En la Figura 25, se muestra el tipo de cada variable, que puede variar según la cantidad de datos que se envíen a la nube a través de LoRaWAN. La codificación de este proceso está detallada en el Anexo 3.

```
// Definiciones para los pines de la pantalla OLED
#define OLED_SDA 4 // Pin SDA de la pantalla OLED
#define OLED_SCL 15 // Pin SCL de la pantalla OLED
#define OLED_RST 16 // Pin de reset de la pantalla OLED
#define SCREEN_WIDTH 128 // Ancho de la pantalla OLED, en píxeles
#define SCREEN_HEIGHT 64 // Altura de la pantalla OLED, en píxeles

// Crea una instancia para la pantalla OLED
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RST);

// Define the RX and TX pins for Serial 2
#define RXD2 21
#define TXD2 22
#define GPS_BAUD 9600
int day, month, year, localHour;
//-----

//----- LoRa Pin / GPIO configuration.
#define ss 18
#define rst 14
#define dio0 26
```

Figura 25. Código de definición de variables en una trama

Una vez determinada la cantidad de información que cada variable debe transmitir, se genera una cadena de caracteres llamada "buff" para el envío de los datos. Esta cadena tiene un tamaño de 30 caracteres, que corresponde al límite máximo de codificación hexadecimal para el mensaje. Los datos en formato hexadecimal se presentan de la siguiente manera:

- **%01x**: Para imprimir 4 bytes en hexadecimal, se requieren 8 caracteres. Si es necesario, se añaden ceros al inicio del número para completar los 8 dígitos. La "x" indica que se está utilizando el formato hexadecimal.
- **%04x**: Para imprimir 2 bytes en hexadecimal, se requieren 4 caracteres. Al igual que antes, se añaden ceros al inicio si es necesario para completar los 4 dígitos.
- **%02x**: Para imprimir 1 byte en hexadecimal, se requieren 2 caracteres, con ceros al inicio si es necesario.

La librería de **Ufox** devuelve la latitud y longitud como números flotantes de 32 bits (4 bytes cada uno). Al incluir la latitud y longitud, los primeros 8 bytes de la trama se ocupan, por lo que es necesario convertir estos valores a formato hexadecimal. La Figura 29 muestra cómo se realiza esta codificación. La codificación completa está detallada en el Anexo 3.

El tiempo de transmisión de datos está determinado por el límite de mensajes diarios permitidos para la tecnología LoRaWAN, que en este caso debe ser ajustado según las necesidades del sistema. Aunque LoRaWAN permite un número mayor de mensajes, la programación presentada en el Anexo 3 permite variar el intervalo entre las transmisiones de datos para optimizar el uso de la red y ajustarla a las condiciones del entorno y los requerimientos específicos del proyecto.

3.6 Programación del sistema de rastreo con LoRaWAN

3.6.1 Programación módulos LoRaWAN

El diseño e implementación del sistema de seguimiento y localización, como se muestra en el diagrama de la Figura 26, consta de varias etapas clave. Los módulos GPS de los nodos móviles capturan las coordenadas de los exploradores y, a través de la red LoRaWAN, transmiten los datos al nodo repetidor, que amplifica la señal y la envía al nodo Gateway. Este último redirige los datos hacia el servidor en Google Cloud, donde se almacenan en tiempo real en una base de datos MySQL. Finalmente, la información se procesa y se visualiza en una plataforma web, permitiendo monitorear la ubicación de los exploradores en tiempo real para garantizar su seguridad.



Figura 26. Diagrama de rastreo y localización

El sistema LoRaWAN juega un papel fundamental al capturar las coordenadas GPS de los exploradores y enviarlas al Gateway, que luego las procesa y las envía al servidor. Cada dispositivo LoRaWAN está equipado con un identificador único (ID), lo que asegura que cada transmisión se asocie correctamente con el explorador correspondiente. Además, el uso del PAC (Código de Autenticación de Paquete) garantiza que la transmisión de datos sea segura y fiable, protegiendo la integridad de la información durante todo el proceso.

Una vez que los datos son recibidos por la base de datos, pueden ser consultados y visualizados en la plataforma de Google Cloud, lo que permite a los operadores monitorear en tiempo real la ubicación de los exploradores, mejorando la seguridad y el control durante sus expediciones. Este flujo de datos, optimizado mediante el uso de LoRaWAN y otras tecnologías, asegura que la comunicación se mantenga constante y eficiente en zonas remotas y de difícil acceso.

1. Nodo 1 (Móvil):

El Nodo 1, que consta de dos nodos móviles, es el encargado de obtener la ubicación precisa de los exploradores en tiempo real utilizando el módulo GPS NEO-6M y la tecnología LoRaWAN. Cada uno de los nodos móviles envía sus tramas de datos de latitud, longitud y otros parámetros de geolocalización hacia el Nodo de Retransmisión. Este Nodo de Retransmisión se encarga de recibir las tramas de ambos nodos, unirlos en una sola trama y luego enviarlas al Nodo Gateway a través de la red LoRaWAN. Este proceso asegura que la información de los exploradores se agrupe de manera eficiente antes de ser transmitida al servidor central para su posterior análisis.

Los datos se envían en paquetes de manera regular a través de LoRaWAN, asegurando que la información de los exploradores esté siempre disponible en tiempo real. La programación del microcontrolador, como el ESP32, garantiza que esta transmisión ocurra sin interrupciones, ofreciendo un rastreo eficiente. En la Figura 27, se muestra las librerías instaladas para los nodos móviles, que permiten que este proceso se realice con total precisión y confiabilidad. En el Anexo B, se detalla el código completo del nodo móvil.

```
//----- Include Library.
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <TinyGPS++.h>
#include <Wire.h> // Biblioteca para la comunicación I2C
#include <Adafruit_GFX.h> // Biblioteca gráfica de Adafruit
#include <Adafruit_SSD1306.h> // Biblioteca para la pantalla OLED
```

Figura 27. Librerías instaladas para los nodos móviles

2. Nodo 2 (Retransmisor):

El Nodo 2, también conocido como Nodo de Retransmisión, juega un papel fundamental en la cadena de comunicación de nuestro proyecto. Este nodo actúa como intermediario entre los dos nodos móviles (Nodo 1) y la nube (Google Cloud). El proceso comienza cuando los nodos móviles envían sus datos de ubicación a través de LoRaWAN, los cuales son recibidos por este Nodo de Retransmisión.

Una vez que el Nodo 2 recibe las tramas de datos de los nodos móviles, el siguiente paso es crucial: fusiona los datos de ambos nodos en una sola trama. Esta consolidación permite una transmisión eficiente y libre de complicaciones. A continuación, la trama combinada se envía al Nodo Gateway, desde donde los datos se transmiten hacia Google Cloud. Es aquí donde entra en juego Node-RED, que no solo asegura una correcta integración de la información, sino que también organiza y distribuye los datos para ser procesados y visualizados de manera eficiente en tiempo real.

Las librerías utilizadas se visualizan para la programación de este nodo se visualizan en la Figura 28, incluyen SPI.h, LoRa.h (para la gestión de la comunicación LoRa), y otras como Adafruit_GFX.h para la integración con las pantallas gráficas y Adafruit_SSD1306.h para la visualización en pantallas OLED. Estas librerías permiten una correcta ejecución de la transmisión de datos y su posterior procesamiento. En el Anexo C, se detalla el código completo del nodo retransmisor.

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
//-----

//----- LoRa Pin / GPIO configuration.
#define ss 18
#define rst 14
#define dio0 26
```

Figura 28. Librerías instaladas en el nodo de retransmisión

3. Nodo 3 (Gateway):

El Nodo 3, o Estación Base, es esencial para el sistema de geolocalización de exploradores en el proyecto. Su principal función es recibir los datos de los nodos móviles y redirigir la señal hacia la nube para su procesamiento. Gracias a la tecnología LoRaWAN, se asegura una transmisión eficiente y de bajo consumo energético, lo que lo convierte en la mejor opción para entornos remotos. Además, tiene la capacidad de ajustar configuraciones y activar alarmas en los nodos móviles según sea necesario, adaptándose así a diferentes escenarios durante las expediciones.

Además de gestionar la recepción de datos, el Nodo 3 es capaz de realizar ajustes en tiempo real, como modificar el intervalo de tiempo entre transmisiones o activar alertas de emergencia. Esto lo convierte en un nodo flexible y esencial para monitorear constantemente a los exploradores, asegurando que la información sobre su ubicación esté siempre actualizada. Node-RED juega un papel fundamental en este proceso, ya que gestiona el flujo de los datos, transmitiéndolos a través de MQTT y almacenándolos en la nube para su visualización en tiempo real.

El Nodo 3 utiliza diversas librerías que permiten la correcta integración de los componentes, como SPI.h, LoRa.h, y Adafruit_GFX.h para la pantalla OLED, entre otras. Estas librerías facilitan la comunicación y el procesamiento de los datos, lo que optimiza el rendimiento del sistema. De este modo, el Nodo 3 no solo asegura la transmisión de los datos en tiempo real, sino que también ofrece una plataforma confiable para el monitoreo constante de los exploradores, mejorando su seguridad durante las expediciones. En el Anexo D, se detalla el código completo del nodo Gateway.

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
//-----
//----- OLED Display
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <ArduinoJson.h>
//----- LoRa Pin / GPIO configuration
#define ss 18
#define rst 14
#define dio0 26
```

Figura 29. Librerías utilizadas en el nodo Gateway

3.6.2 Configuración en Node Red

El sistema de rastreo está diseñado para asegurar respuestas rápidas ante emergencias. Utiliza Node-RED para monitorear la ubicación de los exploradores y activar alertas si ocurre algún imprevisto. Una característica clave es el registro de la hora y fecha de las emergencias, lo que facilita rastrear la situación en tiempo real y localizar al explorador. Además, el sistema detecta inactividad prolongada, generando una alerta amarilla si el explorador no se mueve por más de una hora. En casos críticos, el

explorador puede presionar un botón de emergencia, activando una alerta roja. Si todo está normal, el sistema mostrará una alerta verde. Este conjunto de alertas visuales garantiza que se pueda actuar rápidamente ante cualquier incidente, asegurando la seguridad de los exploradores y manteniendo informados a los operadores en todo momento.

Descripción General de la Estructura:

El sistema de rastreo con Node-RED se organiza en varios bloques clave que gestionan la adquisición, procesamiento y transmisión de datos de los nodos móviles. Cada nodo de geolocalización (Nodos 1 y 2) transmite la información a través de LoRaWAN hacia el Nodo de retransmisión (Gateway). Este nodo combina los datos provenientes de los dos nodos y los envía hacia el servidor en la nube para su posterior visualización como se observa en la Figura 30.

a. Adquisición de Datos:

Los nodos de GPS 1 y GPS 2 están encargados de recibir los datos de latitud, longitud, altitud, velocidad y otros parámetros relevantes de los módulos GPS. Estos datos se combinan en un solo paquete que será transmitido a través de la red LoRaWAN.

b. Procesamiento de Datos:

Los datos recibidos son enviados a través de LoRaWAN al Nodo de retransmisión, donde se unen mediante la función "join". Estos datos se procesan y validan para asegurarse de que la información esté completa y dentro de los rangos esperados. Si se detecta que el explorador ha dejado de moverse durante un tiempo prolongado o si hay un evento de emergencia, se activa la alarma correspondiente.

c. Alertas y Emergencias:

Si se detecta una emergencia, el sistema envía automáticamente alertas a través de Telegram para notificar a los operadores sobre la situación del explorador. Además, las alertas visuales indican si todo está normal (verde), si hay un problema con el explorador (amarillo) o si es una emergencia grave (rojo).

d. Visualización y Monitoreo:

Los datos se visualizan en una plataforma en tiempo real, permitiendo a los operadores monitorear la ubicación del explorador y detectar posibles emergencias de manera oportuna. Esto asegura una gestión rápida y efectiva en caso de incidentes.

e. Conexión y Comunicación:

Los datos procesados se combinan y se envían al nodo Gateway, que los transmite hacia Google Cloud utilizando MQTT para su almacenamiento y visualización en la nube. Esto permite a los operadores tener acceso a los datos desde cualquier dispositivo conectado a la red, mejorando así la capacidad de respuesta ante cualquier situación crítica.

Este sistema robusto asegura que, sin importar las condiciones del entorno, los exploradores siempre estén localizados y monitoreados en tiempo real.

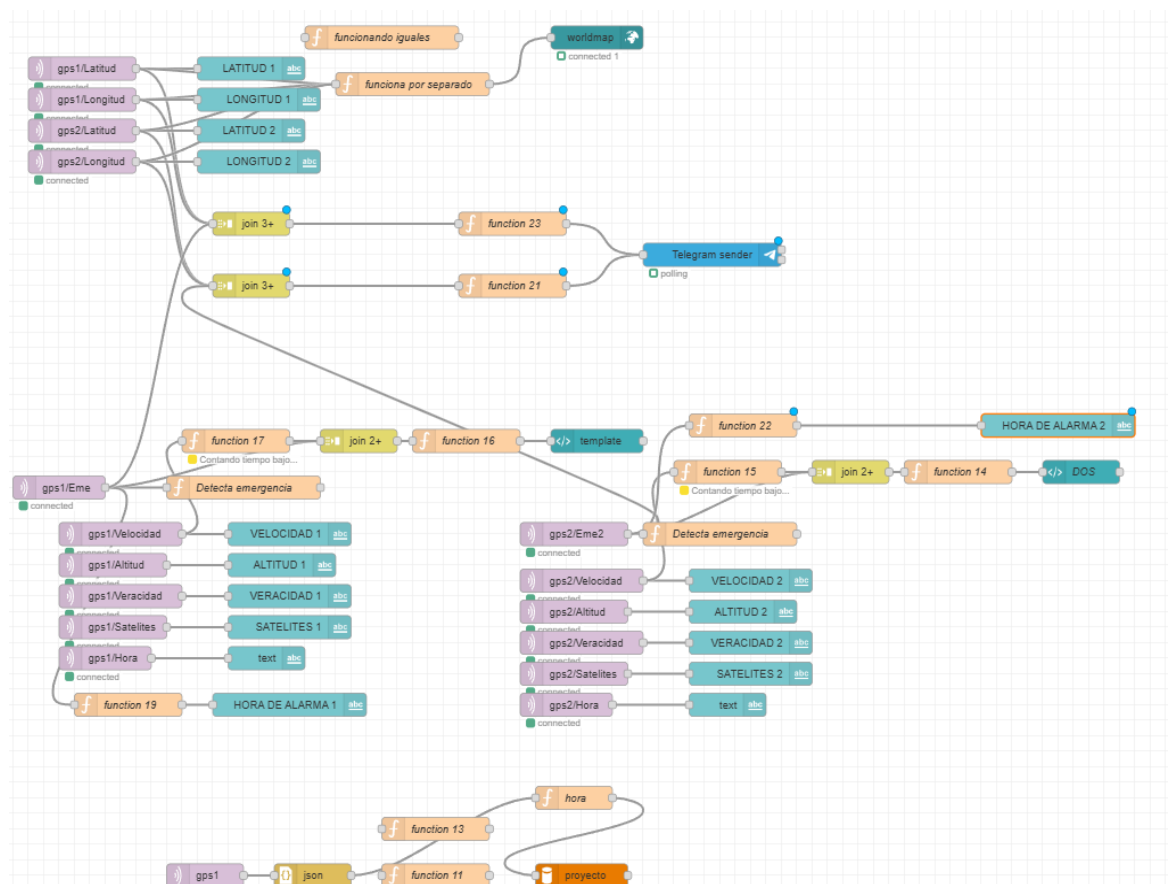


Figura 30. Diseño de bloques para comunicación con el servidor en Node Red

3.6.3 Creación de máquina virtual en Google cloud

Para empezar con Google Cloud, es necesario seguir algunos pasos clave para crear una máquina virtual (VM) y configurar el entorno adecuado. Primero, se debe crear una cuenta en Google Cloud. Si ya tienes una cuenta, solo inicia sesión y asegúrate de aprovechar los créditos gratuitos que Google proporciona para nuevos usuarios. Esto facilitará la configuración sin incurrir en gastos adicionales.

a. Pasos para Crear la Máquina Virtual e Instalar Ubuntu en Google Cloud

1. Crear una cuenta en Google Cloud: Al no disponer de una cuenta en Google Cloud, se debe ingresar a la página oficial de Google Cloud y registrarse. Es importante habilitar la facturación y utilizar las cuotas gratuitas si es necesario.
2. Acceder a Google Cloud Console: Inicia sesión en la cuenta y acceder a la consola de Google Cloud. Selecciona el proyecto en el que deseas trabajar o crea uno nuevo como se observa en la Figura 31.
3. Crear una nueva máquina virtual:
 - En el panel de Google Cloud Console, ve a la sección Compute Engine.
 - Click en Crear para configurar una nueva máquina virtual.
 - Selecciona Ubuntu como sistema operativo en la opción Imagen.
 - Elige una zona geográfica para la máquina virtual.
 - Selecciona el tipo de máquina adecuado, como e2-medium para tareas generales.
 - Configura el acceso a la red para permitir conexiones a través de SSH y HTTP/HTTPS.

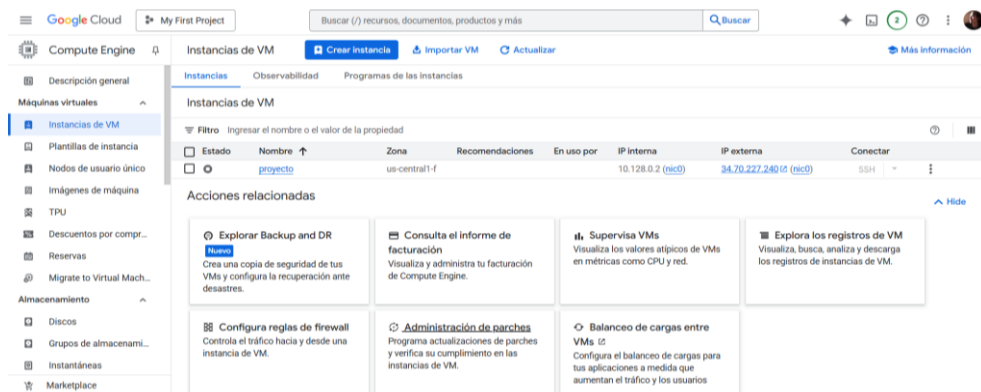


Figura 31. Levantamiento de máquina virtual en Google cloud

4. Configurar la red y puertos

- Configura la red:

Dentro de los detalles de la máquina virtual, ubica el campo “Detalles de la red seleccionada”. Asegúrate de tener configurada la red predeterminada para la VM.

- Abrir puertos necesarios:

Los puertos necesarios como 80 (HTTP) y 443 (HTTPS), para permitir el tráfico web. Para esto, ve a “Firewall” en la configuración de la VM y selecciona las opciones de abrir puertos HTTP y HTTPS, como en la Figura 32.

- Asignar una IP estática:

Ve a la sección de “Detalles de la interfaz de red”. Asegúrate de que la IP externa sea estática, para evitar que la dirección IP cambie durante el uso. Si no es estática, haz clic en “Editar” y selecciona "IP externa estática" en la configuración de IP.

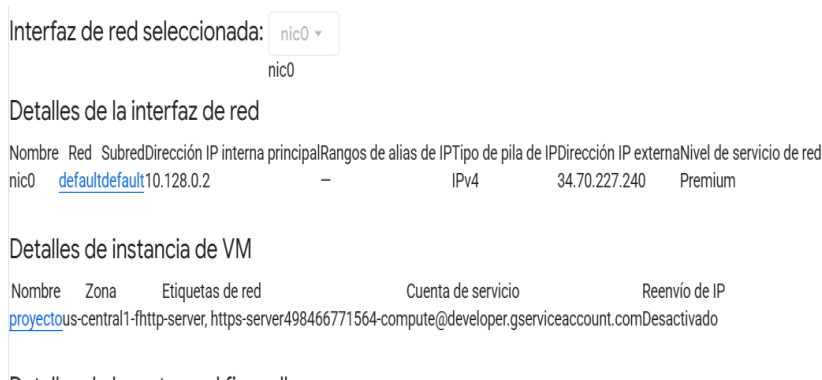


Figura 32. Configuración de puertos en la MV

5. Conectarse a través de SSH

Para conectarse a la máquina virtual de Google Cloud mediante SSH, se debe seguir un proceso simple y directo:

- Acceder a la Consola de Google Cloud:

Abre tu consola de Google Cloud y ve a la sección de "Compute Engine" para ver las instancias de VM. En la lista de instancias, selecciona la máquina virtual a la que deseas conectarte.

- Asegurar que el puerto 22 esté abierto:

Antes de realizar la conexión, asegúrate de que el puerto 22 (el puerto predeterminado para SSH) esté habilitado en la configuración del firewall. Ve a "Red" > "Políticas de firewall" y verifica que el puerto esté abierto para permitir el acceso SSH.

- Conexión SSH desde Google Cloud:

En la consola de Google Cloud, dentro de la página de la VM seleccionada, verás un botón que dice "Conectar". Al hacer clic en este botón, se abrirá automáticamente una ventana de terminal donde podrás acceder directamente a tu máquina virtual a través de SSH, se puede verificar como en la Figura 33.

- Uso de un cliente SSH:

Si prefieres usar un cliente SSH desde tu terminal local, asegúrate de tener configurada una clave privada (archivo .pem o .ppk dependiendo de tu cliente SSH) para autenticarte. Luego, conéctate a la máquina utilizando el comando:

```
ssh -i /path/to/your-key-file username@YOUR_VM_PUBLIC_IP
```

Este comando te permitirá acceder de manera segura al terminal de la VM para realizar las configuraciones necesarias

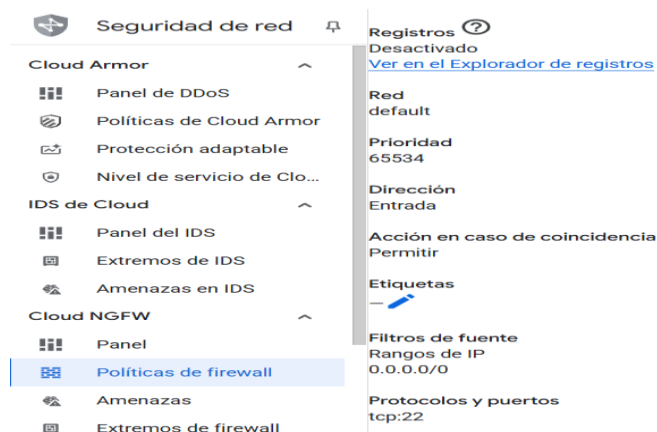


Figura 33. Conexión SSH de la MV

6. Instalación de Ubuntu

Una vez creada la máquina virtual, el siguiente paso es instalar Ubuntu en ella. Sigue estos pasos para realizar la instalación correctamente:

- Selecciona la máquina virtual:

Dirígete a Compute Engine y selecciona la instancia de la máquina virtual donde quieres instalar Ubuntu. Si aún no has creado una, selecciona la opción "Crear una nueva instancia" y escoge Ubuntu como el sistema operativo, como se puede visualizar en la Figura 34.

- Configura la máquina virtual:

En el panel de configuración, asegúrate de asignar los recursos necesarios (memoria, disco, etc.) y selecciona la imagen de Ubuntu en la sección de "Imagen del sistema operativo". No olvides configurar un nombre y asignar una IP estática para evitar cambios en la dirección durante el uso.

- Conectar a la máquina virtual:

Una vez que la máquina esté en funcionamiento, conecta a ella utilizando SSH desde la consola de Google Cloud.

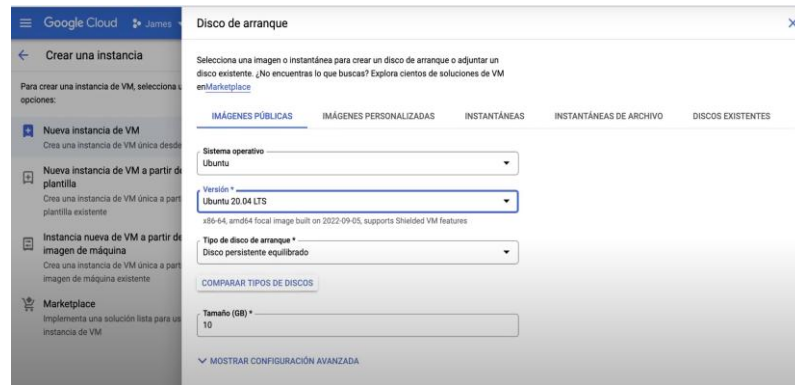


Figura 34 Instalación de Ubuntu en MV

- Una vez conectado, actualiza los paquetes del sistema

sudo apt update && sudo apt upgrade -y

7. Instalar los paquetes necesarios para el servidor LAMP:

Para instalar los paquetes necesarios para la plataforma de visualización, como servidores web y bases de datos, ejecuta el siguiente comando:

sudo apt install apache2 mysql-server php libapache2-mod-php php-mysql -y

Esto instalará Apache2 (el servidor web), MySQL (la base de datos), y PHP (para la ejecución de scripts dinámicos), que son fundamentales para la plataforma de visualización que se integrará en el proyecto

3.6.4 Servidor LAMP

Una vez completada la instalación de Apache2, MySQL y PHP en el servidor, se configura el entorno LAMP (Linux, Apache, MySQL, PHP) que es esencial para el sistema de visualización del proyecto. Este entorno permite gestionar la base de datos, procesar los datos de los dispositivos GPS y mostrar la información en una interfaz web interactiva en tiempo real, lo cual es crucial para monitorear a los exploradores en las zonas montañosas.

La integración de Node-RED en este entorno permite la visualización eficiente de los datos recolectados. Utilizando protocolos como MQTT y HTTP, Node-RED conecta los nodos LoRaWAN con la base de datos, garantizando que los datos se transmitan

de manera continua y segura hacia la nube. A través de la plataforma Google Cloud, los datos son visualizados en un mapa interactivo que muestra la ubicación exacta de los exploradores y las alertas en tiempo real.

El sistema también proporciona información valiosa como la velocidad, altitud y el número de satélites, complementando el monitoreo con datos actualizados constantemente como se observa en la Figura 35. Además, si el explorador no se mueve durante un periodo prolongado, el sistema activa alertas visuales para indicar una posible situación de riesgo. Este diseño garantiza un monitoreo constante y eficiente de los exploradores, asegurando su seguridad durante sus expediciones.

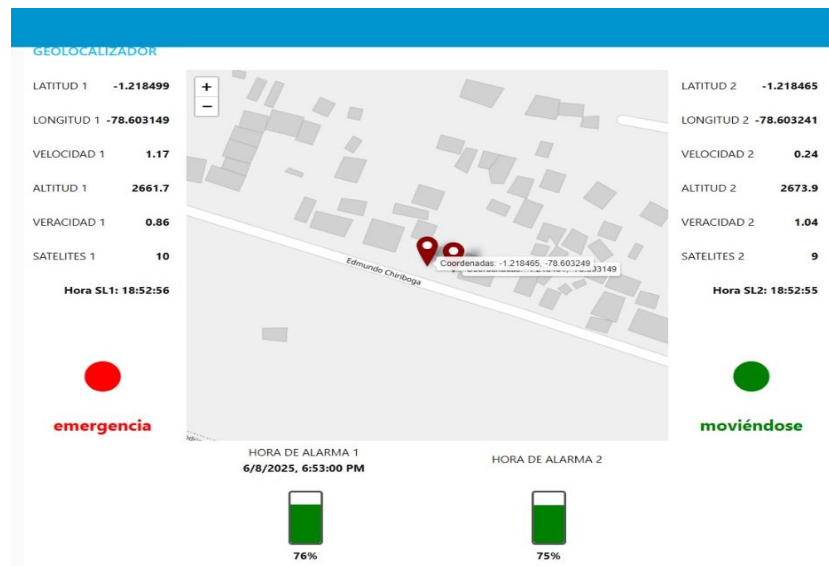


Figura 35. Plataforma de visualización

3.7 Despliegue he integración

El sistema de geolocalización para exploradores en Tungurahua transmite datos de localización desde el nodo móvil del explorador a través de LoRaWAN hacia un retransmisor, luego al Gateway y a la base de datos en la nube. Utilizando Node-RED, los datos se procesan y visualizan en tiempo real. Además, Node-RED envía alertas automáticas a través de Telegram si se detectan eventos críticos. Todo el sistema está alojado en Google Cloud, garantizando disponibilidad, escalabilidad y seguridad para el monitoreo continuo y respuestas rápidas en emergencias.

3.7.1 Caso 1: Explorador en Movimiento (Luz verde)

Cuando el explorador se encuentra en movimiento, el sistema monitorea continuamente su ubicación y muestra la luz de aviso en color verde. En este caso, no se generan alertas, solo se visualiza la ubicación actual del explorador para asegurar que esté dentro de las rutas seguras y establecidas, permitiendo un seguimiento sin intervención adicional.

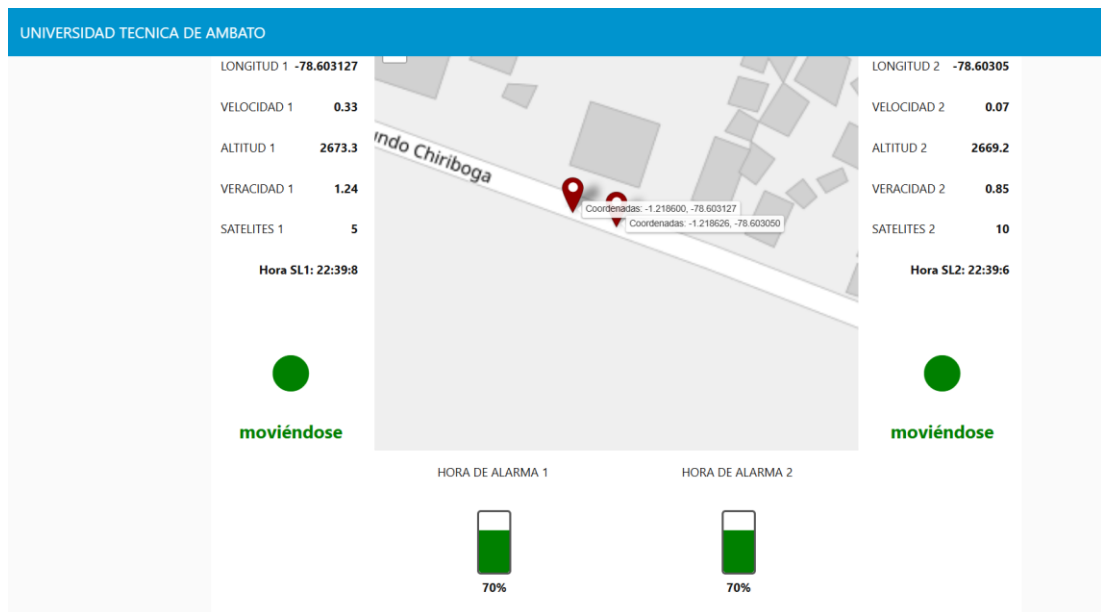


Figura 36. Caso 1 Explorador en movimiento

The screenshot shows the phpMyAdmin interface with a SQL query executed on the 'gps' table. The query is 'SELECT * FROM `gps` ORDER BY `id` DESC'. The results show a list of GPS records with columns: id, idVuelos, fecha, dispositivo, latitud, and longitud. The records are ordered by id in descending order, starting from 33475 down to 33467.

id	idVuelos	fecha	dispositivo	latitud	longitud
33475	undefined	2025-06-08 17:30:08	gps1	-1.218615	-78.603149
33474	undefined	2025-06-08 17:30:07	gps2	-1.218556	-78.603142
33473	undefined	2025-06-08 17:30:07	gps1	-1.218621	-78.603157
33472	undefined	2025-06-08 17:30:06	gps2	-1.218556	-78.603142
33471	undefined	2025-06-08 17:30:06	gps1	-1.218621	-78.603157
33470	undefined	2025-06-08 17:30:05	gps2	-1.218556	-78.603142
33469	undefined	2025-06-08 17:30:05	gps1	-1.218626	-78.603157
33468	undefined	2025-06-08 17:30:04	gps2	-1.218556	-78.603142
33467	undefined	2025-06-08 17:30:04	gps1	-1.218626	-78.603157

Figura 37. Registro de datos en phpMyAdmin del caso 1

Como se puede ver en la Figura 36, la interfaz del sistema muestra una escena tranquila, donde todo funciona con normalidad. El explorador está en movimiento, avanzando por su ruta, y el sistema lo sigue de cerca, monitoreando cada paso que da. La luz de aviso brilla en un verde, lo que significa que no hay ninguna eventualidad que requiera atención inmediata. En la parte inferior de la pantalla, se despliega un dato crucial: el nivel de batería del dispositivo, una información vital para determinar cuánto tiempo más el sistema puede operar antes de necesitar recarga.

En la Figura 37, se muestran los datos que han sido cuidadosamente registrados en la base del sistema, dejando claro que cada movimiento ha sido registrado y que la información está siendo almacenada de manera segura.

3.7.2 Caso 2: Explorador Inactivo (Luz amarilla)

Si el explorador no se ha movido durante un tiempo determinado, el sistema cambia la luz a color amarillo y activa un aviso de "sin movimiento". Esto alerta al responsable del monitoreo para que esté preparado ante cualquier eventualidad. Esta alerta permite identificar rápidamente si el explorador pudiese estar en una situación de riesgo, aunque aún no haya solicitado ayuda.

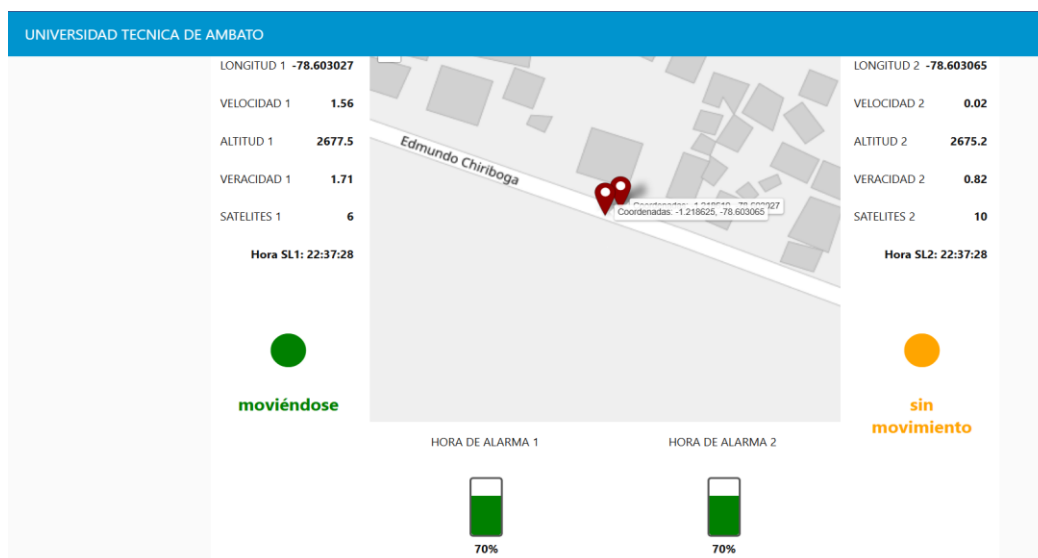


Figura 38. Caso 2 Explorador inactivo

Mostrando filas 0 - 24 (total de 52922, La consulta tardó 0.0009 segundos.) [id: 53079... - 53055...]

SELECT * FROM `gps` ORDER BY `id` DESC

Número de filas: 25 Filtrar filas: Buscar en esta tabla Ordenar según la clave: PRI

	id	idVuelos	fecha	dispositivo	latitud	longitud
☐	53079	undefined	2025-07-07 22:28:25	gps2	-1.218562	-78.603104
☐	53078	undefined	2025-07-07 22:28:25	gps1	0.000000	0.000000
☐	53077	undefined	2025-07-07 22:28:24	gps2	-1.218564	-78.603104
☐	53076	undefined	2025-07-07 22:28:24	gps1	0.000000	0.000000
☐	53075	undefined	2025-07-07 22:28:23	gps2	-1.218564	-78.603104
☐	53074	undefined	2025-07-07 22:28:23	gps1	0.000000	0.000000
☐	53073	undefined	2025-07-07 22:28:22	gps2	-1.218565	-78.603104
☐	53072	undefined	2025-07-07 22:28:22	gps1	0.000000	0.000000
☐	53071	undefined	2025-07-07 22:28:21	gps2	-1.218565	-78.603104

Figura 39. Registro de datos en phpMyAdmin del caso 2

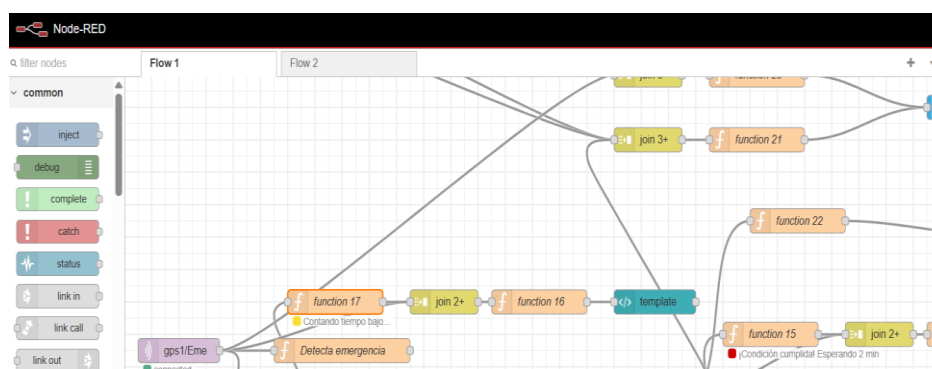


Figura 40. Función de tiempo de espera en Node red para caso 2

Como se puede ver en la Figura 38, la interfaz del sistema muestra una escena especial, donde no se ha pulsado el botón de emergencia. El explorador no está en movimiento por más de una hora, lo cual crea la sospecha de que tuvo algún accidente y no pudo pulsar el botón de emergencia, el sistema sigue monitoreando su ubicación. La luz de aviso brilla en un amarillo, lo que significa que existe una eventualidad que requiera atención inmediata. En la parte inferior de la pantalla, se despliega un dato crucial: el nivel de batería del dispositivo, una información vital para determinar cuánto tiempo más el sistema puede operar antes de necesitar recarga.

En la Figura 39, se muestran los datos que han sido cuidadosamente registrados en la base del sistema, dejando claro que cada movimiento ha sido registrado y que la información está siendo almacenada de manera segura. Es como tener un guardián digital que cuida cada paso. Finalmente, en la Figura 40, se muestra la función en Node red que temporiza este estado, la cual se basa en la velocidad del explorador.

3.7.3 Caso 3: Emergencia (Luz roja)

En caso de emergencia, el explorador puede presionar un botón de alerta, lo que provoca que la luz se ponga en color rojo. En este momento, el sistema registra la hora exacta de la solicitud de ayuda, y simultáneamente, envía un mensaje a Telegram informando sobre la emergencia con las coordenadas exactas del explorador. Esto permite que el equipo de monitoreo actúe de inmediato y con información precisa, acelerando el tiempo de respuesta ante situaciones críticas.

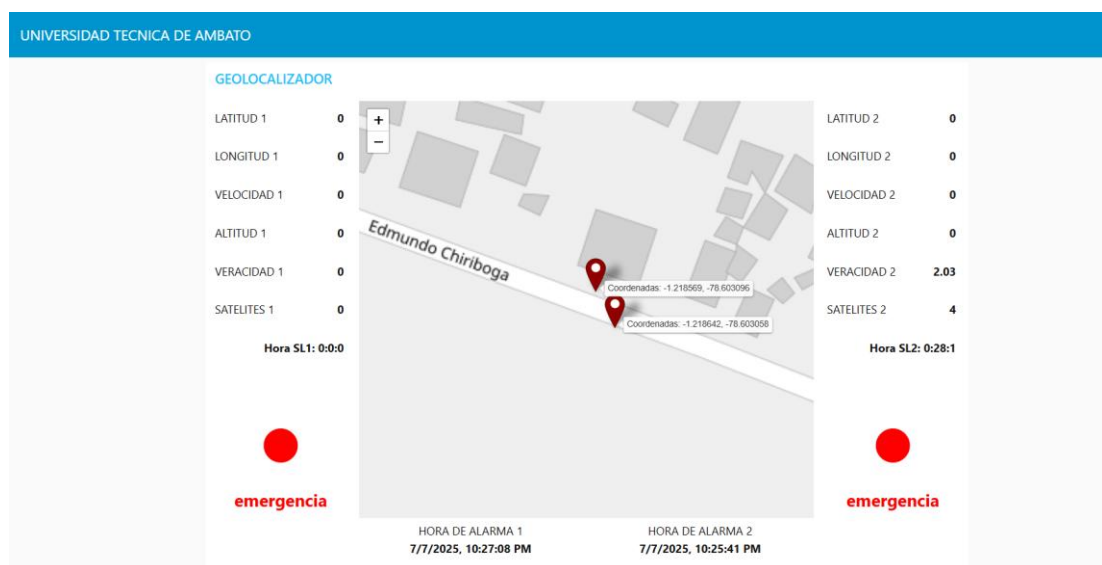


Figura 41. Caso 3 Emergencia

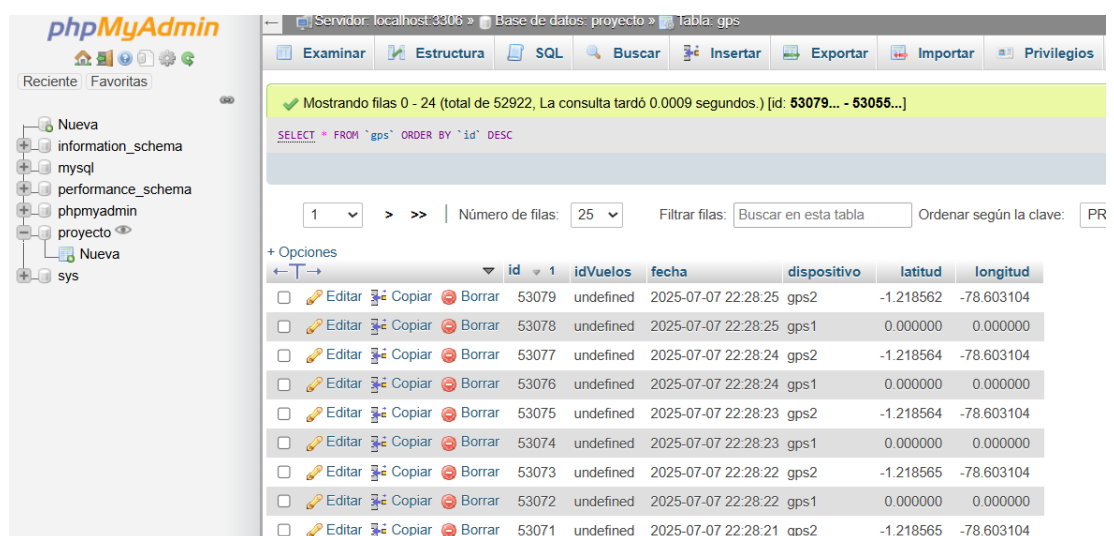


Figura 42. Registro de datos en phpMyAdmin del caso 3

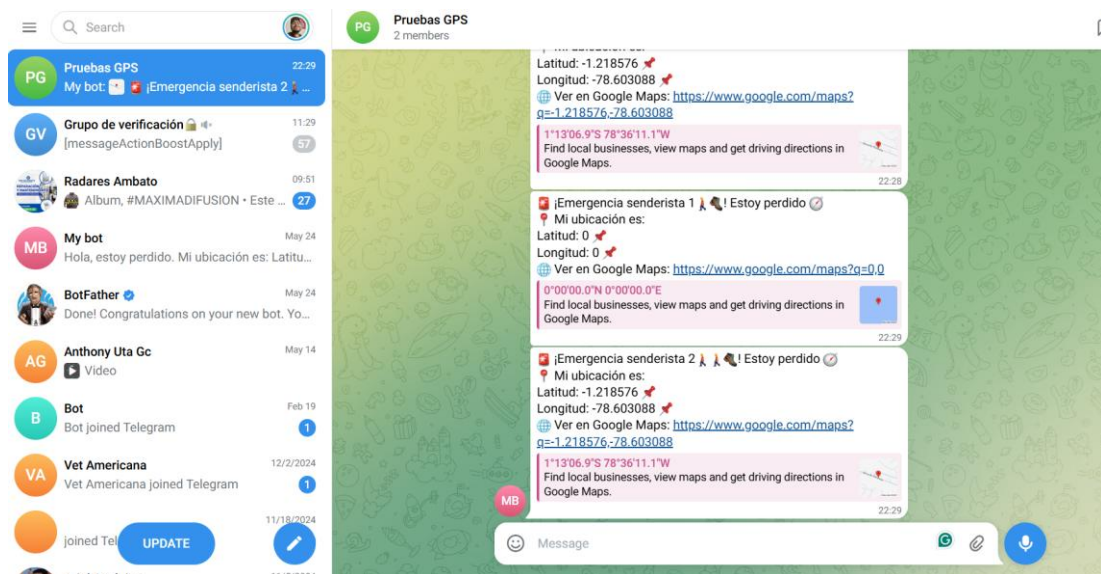


Figura 43. Mensaje de emergencia vía Telegram



Figura 44. Visualización de coordenadas en Google maps

Como se puede ver en la Figura 41, la interfaz del sistema muestra una escena de emergencia, donde todo se ha pulsado el botón de emergencia y se han registrado la hora de la solicitud. Al mismo tiempo se envía un mensaje a Telegram avisando que explorador tiene una emergencia y las coordenadas de su ubicación como se observa en la Figura 43, este mensaje se repite cada minuto hasta de alguien responda ande la emergencia. En la Figura 44, se muestra la visualización de las coordenadas en Google maps enviada por Telegram. El sistema lo sigue de cerca, monitoreando cada paso que da. La luz de aviso brilla en un rojo, lo que significa que hay una eventualidad que requiere atención inmediata. En la parte inferior de la pantalla, se despliega un dato

crucial: el nivel de batería del dispositivo, una información vital para determinar cuánto tiempo más el sistema puede operar antes de necesitar recarga.

En la Figura 42, se muestran los datos que han sido cuidadosamente registrados en la base del sistema, dejando claro que cada movimiento ha sido registrado y que la información está siendo almacenada de manera segura.

3.7.4 Propuesta de mejora del prototipo

Para mejorar la arquitectura del prototipo de geolocalización, se ha decidido agregar un retransmisor adicional para extender la cobertura y garantizar una transmisión continua, especialmente en áreas de difícil acceso como se puede observar en la Figura 45. Originalmente, los nodos móviles enviaban las coordenadas GPS a través de LoRaWAN (915 MHz), con un alcance de hasta 15 km, pero las pruebas de campo demostraron que la señal solo era estable hasta los 3 km en zonas complejas como bosques o montañas. Con el nuevo retransmisor, se asegura que los nodos móviles permanezcan conectados a un retransmisor cercano, optimizando la señal a distancias de hasta 2 km. Los datos se envían a la nube mediante MQTT, con un ancho de banda de 10 KB por mensaje, y se procesan en tiempo real en Google Cloud, garantizando la confiabilidad y fluidez en la visualización y análisis de los datos, sin pérdida de señal.

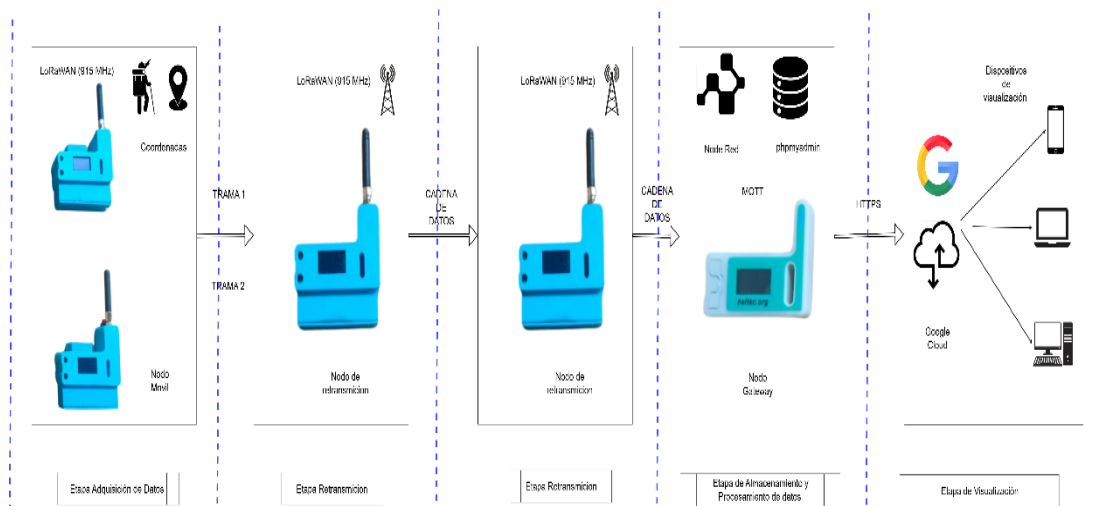


Figura 45. Arquitectura mejorada del prototipo

Se llevó a cabo una simulación en Radio Mobile para analizar las dos rutas de ascenso al volcán Tungurahua, primero utilizando un único repetidor y luego con dos nodos

repetidores. Esta simulación no solo permitió obtener datos técnicos precisos, sino también visualizar cómo se comporta la señal en condiciones extremas, como el terreno irregular y las obstrucciones naturales. Comparando ambas configuraciones, se apreció una notable mejora en la propagación de la señal con dos repetidores, lo que optimiza la cobertura y fiabilidad en todo el trayecto. Los resultados, presentados en la Tabla 20, ofrecen una visión clara de cómo la configuración con dos nodos repetidores puede potenciar significativamente la conectividad, reduciendo interferencias y mejorando el rendimiento de la comunicación, incluso en las zonas más difíciles del volcán.

Tabla 20. Parámetros técnicos de la Ruta Pondoá con 1 y 2 repetidores

Ruta Norte - Pondoá 1 Repetidor			Ruta Norte - Pondoá 2 Repetidores			
Parámetros	Tx-Repetidor	Repetidor-Rx	Parámetro	TX a Repetidor 1	Repetidor 1 a Repetidor 2	Repetidor 2 a RX
Azimut (°)	172.20°	191.06°	Azimut (°)	177,93°	173.19°	190.60°
Ángulo de Elevación (°)	19.06°	26.91°	Ángulo de Elevación (°)	20,16°	19,35 °	29.44°
Obstrucción (km)	135.8 dB	107.6 dB	Obstrucción (km)	0,43 km	1,54 km	0.22 km
Pérdida de Camino (dB)	1.32 km	2.46 km	Pérdida de Camino (dB)	114,0 dB	136,1 dB	109.2 dB
Peor Fresnel (F1)	-1.5 F1	-1.9 F1	Peor Fresnel (F1)	ˆ-0,4 F1	ˆ-0.8 F1	2.0 F1
Distancia (km)	2.59 km	2.54 km	Distancia (km)	0,94 km	1,76 km	1.76 km
Campo Eléctrico (dBμV/m)	25.1 dBμV/m	53.3 dBμV/m	Campo Eléctrico (dBμV/m)	114,0 dBμV/m	24.8 dBμV/m	51.6 dBμV/m
Nivel Rx (dBm)	-106.8 dBm	-78.6 dBm	Nivel Rx (dBm)	ˆ-85.0 dBm	ˆ-107,1 dBm	-80.2 dBm
Nivel Rx Relativo (dB)	-13.2 dB	-28.4 dB	Nivel Rx Relativo (dB)	22,0 dB	ˆ-0,1 dB	-26.8 dB

El uso de dos repetidores en la Ruta Norte - Pondoá mejora significativamente varios parámetros clave de la transmisión de señal. La obstrucción disminuye, lo que permite una mejor propagación de la señal, y la pérdida de camino se reduce, optimizando la eficiencia de la comunicación. La zona de Fresnel también se ve beneficiada, mejorando la calidad de la señal, especialmente en áreas de difícil acceso. La distancia de transmisión se reduce, lo que mejora la recepción de la señal y el campo eléctrico aumenta, fortaleciendo la señal en todo el trayecto. Además, el nivel de recepción (Rx) mejora, con un nivel de -85 dBm en la configuración con dos repetidores, lo que asegura una transmisión más estable y confiable. Los repetidores, simulados a 10 metros de altura, permiten evitar que obstáculos naturales interfieran con la señal, manteniendo su rendimiento constante.

Tabla 21. Parámetros técnicos de la Ruta Puela con 1 y 2 repetidores

Ruta Sur - Puela 1 Repetidor			Ruta Sur - Puela 2 Repetidores			
Parametros	Tx-Repetidor	Repetidor-Rx	Parámetro	TX a Repetidor 1	Repetidor 1 a Repetidor 2	Repetidor 2 a RX
Azimet (°)	63.84°	54.83°	Azimet (°)	70,98°	61,58°	53,59°
Ángulo de Elevación (°)	19.19°	21.41°	Ángulo de Elevación (°)	16,16°	22,92°	18,90°
Obstrucción (km)	2.51 km	1.04 km	Obstrucción (km)	0,15 km	1,50 km	0,38 km
Pérdida de Camino (dB)	149.2 dB	161.2 dB	Pérdida de Camino (dB)	102,4 dB	104,0 dB	134,3 dB
Peor Fresnel (F1)	-2.2 F1	-6.0 F1	Peor Fresnel (F1)	0,2 F1	3,5 F1	-1,7 F1
Distancia (km)	2.59 km	2.16 km	Distancia (km)	0,98 km	2.39 km	1,30 km
Campo Eléctrico (dBμV/m)	56.2 dBμV/m	56.2 dBμV/m	Campo Eléctrico (dBμV/m)	58.4 dBμV/m	56,8 dBμV/m	26,6 dBμV/m
Nivel Rx (dBm)	-120.2 dBm	-75.6 dBm	Nivel Rx (dBm)	-73,4 dBm	-75,0 dBm	-105,3 dBm
Nivel Rx Relativo (dB)	-13.2 dB	-25.2 dB	Nivel Rx Relativo (dB)	33,6 dB	32,0 dB	1,7 dB

El uso de dos repetidores en la Ruta Sur - Puela mejora significativamente varios parámetros clave de la transmisión de señal. La obstrucción se reduce, permitiendo una mejor propagación de la señal, y la pérdida de camino disminuye, optimizando la eficiencia de la comunicación. La cobertura y el campo eléctrico aumentan, lo que refuerza la intensidad de la señal, especialmente en áreas remotas. Además, el nivel de recepción (Rx) mejora, pasando de -120.2 dBm a -75.6 dBm, lo que asegura una transmisión más estable y confiable, y la distancia de transmisión se reduce, facilitando la recepción continua de datos. Estos cambios evidencian una mejora notable en la calidad de la señal y la fiabilidad del sistema. Los repetidores, simulados a 10 metros de altura, garantizan que la señal no se vea afectada por obstáculos naturales, como montañas o árboles, y mantengan su fiabilidad.

3.8 Generación de pruebas de funcionamiento

Las pruebas iniciales del sistema de geolocalización para alpinistas en el volcán Tungurahua comenzaron en la Universidad Técnica de Ambato, donde se realizó la evaluación básica del equipo y la comunicación LoRaWAN. Estas primeras pruebas sirvieron para comprobar la funcionalidad del sistema en condiciones controladas y ajustar los parámetros iniciales de transmisión de datos. Después de esta fase, se realizaron ensayos en terrenos más complejos como el Parque Montalvo y el Parque de la Familia en Ambato, lo que permitió poner a prueba el sistema bajo condiciones más realistas de movilidad y señal. Además, el sistema se afinó para garantizar la

precisión en el rastreo de los alpinistas, asegurando que los datos de ubicación fueran confiables y precisos en tiempo real. Este proceso de ajustes continuos fue clave para la mejora del sistema.

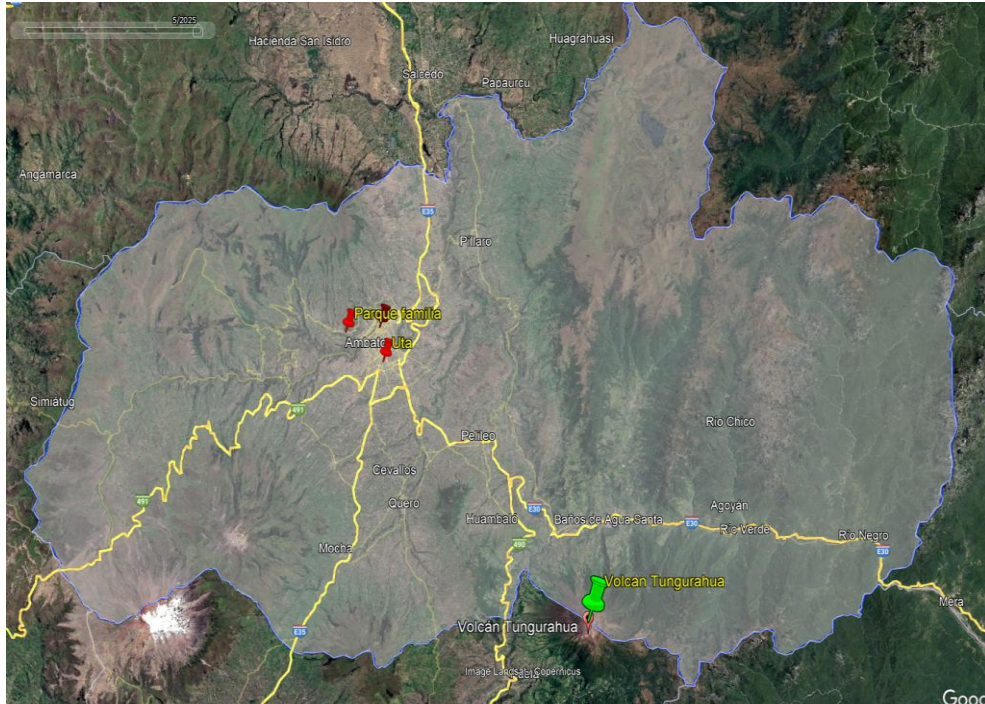


Figura 46. Mapa de ubicaciones para pruebas de funcionamiento en Tungurahua

Como se aprecia en la Figura 46, las ubicaciones en color rojo fueron los lugares donde se llevó a cabo las pruebas de funcionamiento para afinar el equipo y la ubicación de color verde es donde se realizó las pruebas en condiciones reales para evaluar su funcionamiento

3.8.1 Pruebas Universidad técnica de Ambato – Campus Huachi

Como se observa en la Figura 47, el mapa de cobertura muestra cómo la tecnología LoRaWAN abarca toda el área de la Universidad Técnica de Ambato, ofreciendo una cobertura sólida. Sin embargo, existen ciertas zonas dentro del campus donde la cobertura alcanza su límite debido a obstáculos como edificios y árboles, que interfieren con la señal. Aunque la cobertura general es confiable, estas áreas muestran cómo el entorno físico puede afectar la calidad de la señal, algo a tener en cuenta al evaluar el sistema en diferentes escenarios.



Figura 47. Universidad Técnica de Ambato – Campus Huachi

Además, en la Figura 47 se visualiza que se realizó una ruta en el contorno del estadio de la Universidad. En la cual se realizaron varias pruebas de funcionamiento variando la velocidad en 3 categorías: Baja (>3 m/s), Media (3-5 m/s), Alta (<5 m/s)



Figura 48. Ruta 1 Campus Huachi

Como se observa en la Figura 48, se realizaron 20 mediciones a lo largo de la ruta de aproximadamente 500 metros, en la cual se realizaron 3 pruebas variando la velocidad (baja, media, alta) y también se registró algunos parámetros importantes para evaluar el rendimiento del equipo y veracidad de los datos. Se inicio la ruta a pie con una hora de inicio a las 11:17 am luego de aproximadamente 10 minutos se logró cumplir la ruta en el campus Huachi de la Universidad Técnica de Ambato. La información recopilada por el prototipo durante su desplazamiento varía según su movimiento y sobre todo por el nivel de cobertura en el cual se encuentra. Una vez que se establece la zona de rastreo y el prototipo comienza a operar, se recopilan datos como latitud, longitud, temperatura y estado de la batería. Estos datos se transmiten aproximadamente cada 3 segundos.

a. Cálculo de error de distancia

Para obtener el error de distancia de cada punto de prueba, entre el prototipo y la app Geo Tracker del teléfono Samsung se aplica la Ecuación(27), la cual da un resultado en grados.

$$E = \sqrt{(LatLora - LatGeo)^2 + (LonLora - LonGeo)^2} \quad (27)$$

Donde:

E = Error de distancia

$LatLora$ = Latitud de LoraWAN

$LonLora$ = Longitud de LoraWAN

$LatGeo$ = Latitud de Geo Tracker (Samsung)

$LonGeo$ = Longitud de Geo Tracker (Samsung)

Se realiza la conversión de unidades ya que el resultado de la Ecuación (28), da como unidad los grados, mediante la siguiente Ecuación(29), se obtiene de grados a metros.

$$1^\circ \text{ Latitud, longitud} \rightarrow 111320 \text{ metros} \quad (29)$$

b. Cálculo de promedio de error (Exactitud)

Se suma todos los errores de distancia y se divide entre el número total de puntos para obtener el error promedio. Este error promedio representa la medida de la exactitud del prototipo mediante la siguiente Ecuación (30) lo calculamos.

$$E_p = \frac{P_1 + P_n}{P_{total}} \quad (30)$$

Donde:

E_p = Error promedio

P_1 = Punto inicial

P_n = Cantidad de puntos

P_{total} = Número de puntos totales

c. Porcentaje de éxito (Efectividad) y porcentaje de error

Para obtener el porcentaje de éxito se debe tener en cuenta el margen de error (promedio de error), con el cual se podrá analizar y saber si el punto está dentro o fuera del rango. Para ello mediante la siguiente condición aplicada en la ecuación (31).

$$\left\{ \begin{array}{l} P_n \leq M_e \rightarrow \text{Dentro: } 100\% \\ P_n \geq M_e \rightarrow \text{Fuera: } 0\% \end{array} \right\} \quad (31)$$

Donde:

P_n = Punto a analizar

M_e = Margen de error

En la Tabla 22, se registran las coordenadas correspondientes a la prueba realizada el 8 de mayo del 2025, en un recorrido de aproximadamente 500 metros y a una altura promedio de 2741.19 metros. Así como la obtención de los resultados de error y efectividad del prototipo.

Tabla 22. Registro de datos de pruebas en la Ruta 1 – Campus Huachi

N°	Hora	Tiempo envío seg	Coordenadas Lora Latitud	Coordenadas lora Longitud	Coordenadas geo Latitud	Coordenadas geo Longitud	Temperatura °C	# Satelites	Velocidad km/h	Altitud m	Veracidad %	Batería mV	Error de distancia Grados	Error de distancia Metros	Dentro o Fuera de Rango	Exito %
1	11:17:30	20	-1,269348	-78,625931	-1,269382	-78,625905	25,7	11	1,11	2739,9	0,8	355	0,000043	4,76	0%	100%
2	11:17:59	31	-1,269406	-78,625946	-1,269468	-78,625918	28,5	11	1,2	2739,6	0,8	354	0,000068	7,57	0%	100%
3	11:18:27	30	-1,269593	-78,625992	-1,269645	-78,625968	25,2	11	1,72	2741,3	0,84	354	0,000057	6,38	0%	100%
4	11:18:49	20	-1,269727	-78,626015	-1,269788	-78,626005	25,5	11	2,02	2736,3	0,84	355	0,000062	6,88	0%	100%
5	11:19:19	20	-1,269829	-78,626053	-1,269903	-78,626027	26,2	10	2,57	2737,6	0,84	354	0,000078	8,73	100%	0%
6	11:19:45	20	-1,269903	-78,626068	-1,270011	-78,626068	26	10	2,7	2739,5	0,84	357	0,000108	12,02	100%	0%
7	11:20:12	20	-1,270119	-78,62603	-1,27013	-78,625985	31,1	11	3,13	2744,3	0,8	357	0,000046	5,16	0%	100%
8	11:20:50	30	-1,270288	-78,625877	-1,270248	-78,625868	25,9	11	3,59	2743,8	0,8	355	0,000041	4,56	0%	100%
9	11:21:27	20	-1,270312	-78,625793	-1,270292	-78,625788	26,7	11	3,52	2744,4	0,8	355	0,000021	2,29	0%	100%
10	11:21:40	30	-1,270235	-78,625443	-1,270252	-78,62545	30,1	11	3,43	2744,5	0,8	355	0,000018	2,05	0%	100%
11	11:22:15	20	-1,27012	-78,625359	-1,27004	-78,625375	26,2	11	4,22	2743,9	0,8	355	0,000082	9,08	100%	0%
12	11:22:49	30	-1,270038	-78,625343	-1,269932	-78,62536	26,7	10	4,54	2743,4	0,82	356	0,000107	11,95	100%	0%
13	11:23:23	31	-1,269994	-78,62532	-1,269992	-78,625341	30,4	10	4,81	2742,9	0,84	354	0,000021	2,35	0%	100%
14	11:24:01	31	-1,2699913	-78,625305	-1,269897	-78,625317	29,3	11	5,1	2743,2	0,8	354	0,000095	10,58	100%	0%
15	11:24:46	30	-1,269853	-78,62529	-1,26978	-78,6253	26,8	10	6,2	2743,3	0,8	354	0,000074	8,20	100%	0%
16	11:24:55	21	-1,269709	-78,625259	-1,269728	-78,625303	30,4	11	6,9	2742,9	0,86	354	0,000048	5,34	0%	100%
17	11:25:05	31	-1,26966	-78,625252	-1,26968	-78,6253	26,7	11	7,5	2743	0,8	356	0,000052	5,79	0%	100%
18	11:25:25	28	-1,269647	-78,625244	-1,26965	-78,625345	26,2	10	7,3	2743,5	0,94	354	0,000101	11,25	100%	0%
19	11:25:48	30	-1,26965	-78,625252	-1,26968	-78,625152	27	10	7,1	2743,3	0,84	354	0,000104	11,62	100%	0%
20	11:26:01	20	-1,269709	-78,625257	-1,269728	-78,625303	27,8	11	4,5	2743,2	0,8	355	0,000050	5,54	0%	100%
Total		25,65					27,42	10,65	4,16	2742,19	0,82	354,85	0,000064	7,11		60%

Un parámetro a tener consideración es el lapso necesario de tiempo que se necesita para enviar las coordenadas por LoraWAN, el cual varía significativamente según la cobertura en la que el prototipo se encuentra ubicado para el trazo de la ruta. En la Tabla 22, se evidencia un tiempo mínimo de 20 segundos y un máximo de 31 segundos para la transmisión de datos. En el panel de administración de Geo Tracker, se puede visualizar la ruta completa que ha recorrido, con la herramienta de visualización. Esta representación en el mapa traza el recorrido del rastreo y la ubicación utilizando las coordenadas detalladas en la Tabla 22. Se puede observar claramente la ruta trazada en la Figura 49.

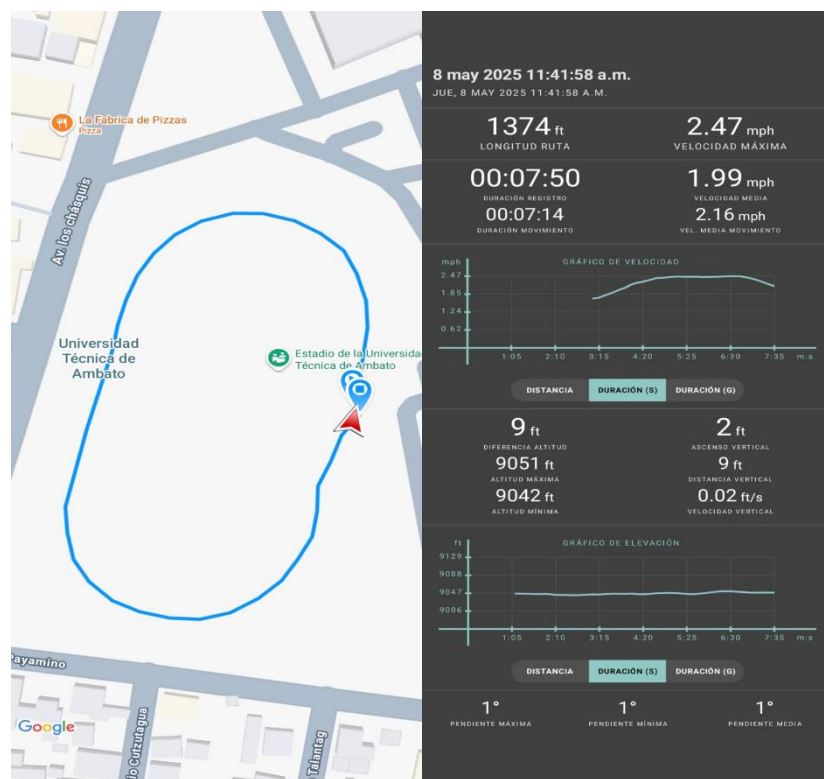


Figura 49. Ruta generada cada 30 segundos por Geo Tracker en el estadio de la Universidad

Durante el trayecto en la zona designada de la Universidad Técnica de Ambato, en la Figura 50, se muestra las dos rutas, en la que se compararon los datos de ubicación entre Geo Tracker y el prototipo diseñado, mediante los cálculos realizados para la obtención del margen de error, se logra revelar un error mínima de 2.05 metros y una máxima de 12.02 metros, esta diferencia entre cada punto se muestra en la Tabla 22.



Figura 50. Comparativa de rutas del prototipo y Geo Tracker cada 30 segundos

La Figura 51, proporciona una visión clara de cómo varía la distancia a lo largo del trayecto teniendo puntos mínimos y máximos siendo el error mínimo 2.05 y máximo de 12.02 metros y un error promedio de 7.11 metros.

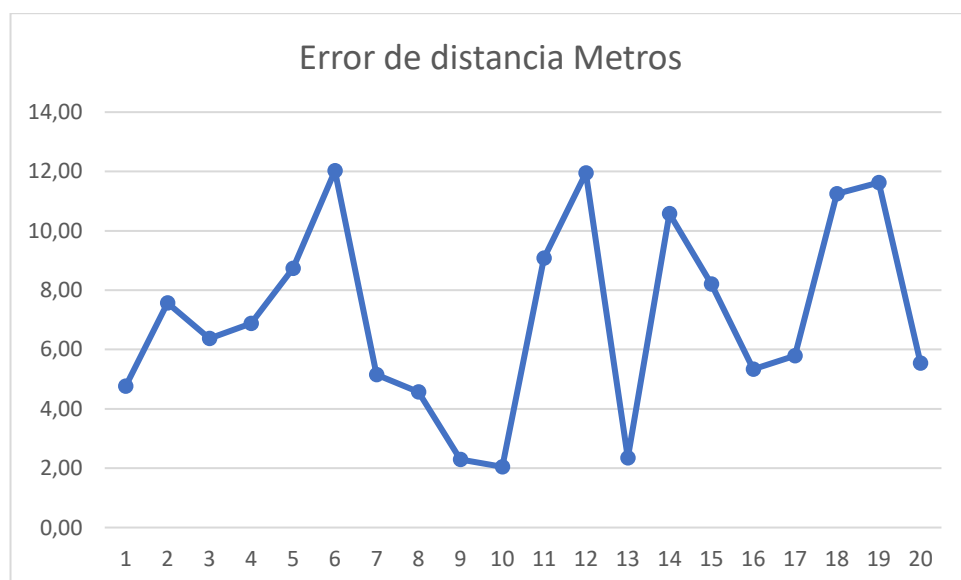


Figura 51. Variación de distancia entre cada punto cada 30 segundos

En el prototipo, uno de los factores que se evalúan es la temperatura. La Figura 52 presenta el estado térmico del dispositivo a lo largo del tiempo, desde su encendido

hasta su apagado. Las variaciones de temperatura registradas se atribuyen a las condiciones ambientales a las que estuvo expuesto el prototipo durante su funcionamiento. Se registro datos en la Tabla 22, desde el punto de inicio con 25.7 °C, el punto intermedio alcanza los 30.1°C, y el punto final registra 27.8 °C.

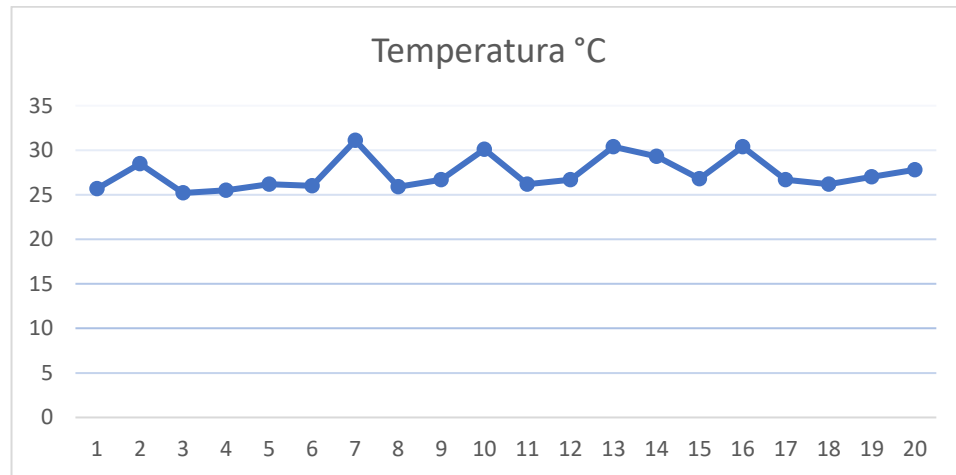


Figura 52. Temperatura del prototipo de prueba cada 30 segundos

El nivel de la batería es de suma importancia en el funcionamiento del prototipo, ya que indica cuándo es necesario cargarlo. La Figura 53 se muestra el nivel de batería de los dispositivos en cada medición se mantuvo entre 354 mV y 357 mV, con una leve variación a lo largo del tiempo. El valor más bajo registrado fue 354 mV en varios puntos, mientras que el valor más alto fue 357 mV, alcanzado en las mediciones de las horas 11:18:27 y 11:19:19. La batería se mantuvo constante, lo que indica una eficiencia continua del sistema de energía a lo largo del período de tiempo medido.

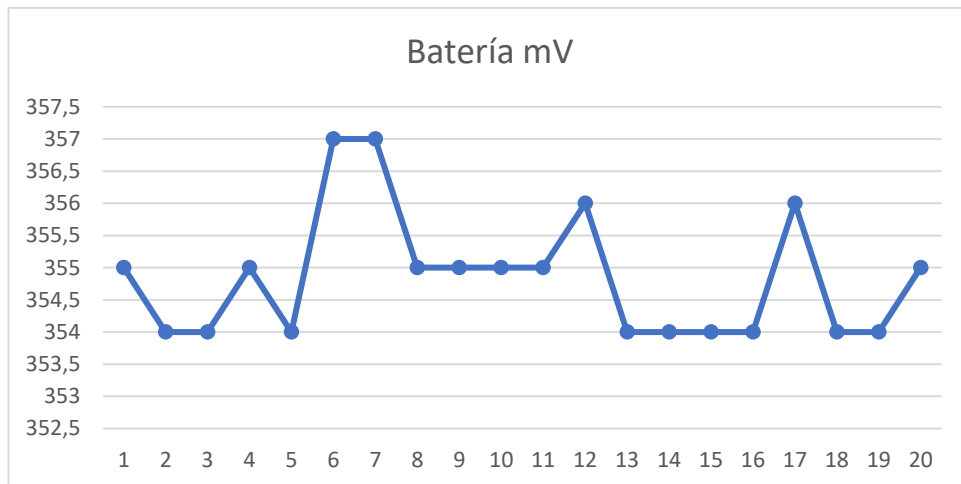


Figura 53. Consumo de batería del prototipo – Estadio UTA

Como se observa en la Figura 54, se evidencia que el prototipo ha logrado un éxito que representa dos tercios del total, mientras que el error alcanza un poco más de una tercera parte del cien por ciento.

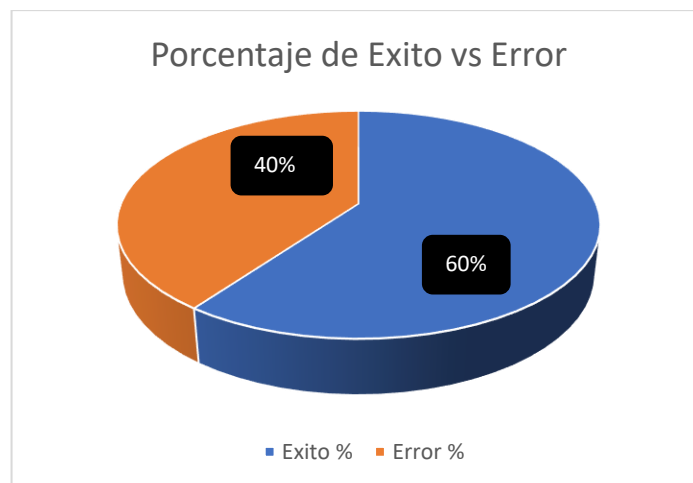


Figura 54. Porcentaje de éxito del prototipo cada 30 segundos

Los resultados presentados en la Tabla 22, corresponden a un análisis consolidado de tres pruebas realizadas a diferentes rangos de velocidad: baja (0-3 km/h), media (3-5 km/h) y alta (>5 km/h), diferenciadas visualmente por colores para facilitar su interpretación. La velocidad promedio registrada fue de 4.16 km/h, con una temperatura estable alrededor de 27.42 °C, lo que indica condiciones ambientales constantes durante las pruebas. El número de satélites detectados promedió 10.65, asegurando una adecuada cobertura para la geolocalización. La altitud media fue de 2742.19 metros, compatible con la topografía de la zona de pruebas. La veracidad,

indicador de la precisión de la señal GPS, se mantuvo en un 82%, reflejando buena calidad de los datos recibidos. La batería del dispositivo presentó un promedio de 354.85 mV, suficiente para garantizar un funcionamiento continuo durante las pruebas. Finalmente, el error promedio de distancia fue de 7.11 metros, mostrando cómo la precisión se ve afectada por las distintas velocidades, siendo generalmente mayor a velocidades altas, lo que confirma la importancia de adaptar el sistema para un desempeño óptimo en condiciones variables de movimiento.

3.8.2 Pruebas Área Urbana

Se realizaron pruebas el Parque Montalvo de la ciudad de Ambato para observar cómo se comporta el equipo en un entorno urbano ubicado en el centro de la ciudad rodeado de edificios y a una altura de 2582 metros sobre el nivel del mar.



Figura 55. Área del parque Montalvo

Como se puede observar en la Figura 56 se realizó una ruta de 250 metros con una duración de 5 minutos aproximadamente por los contornos del parque Montalvo, ubicando el nodo repetidor en el centro del parque a una altura de 2585 metros sobre el nivel del mar y se realizó 20 censos a una velocidad promedio de 3.14 km/h. Iniciando a las 14:30:10 hasta las 14:36:11



Figura 56. Ruta registrada con el prototipo

Durante el trayecto de la ruta elegida del parque Montalvo de 250 metros con una duración de 5 minutos aproximadamente, como se observa en la Figura 57 se muestra las dos rutas, en las que se compararon los datos de ubicación entre Geo Tracker (color rojo) y el prototipo diseñado (color verde), mediante los cálculos realizados para la obtención del margen de error, se logra revelar un error mínima de 1.15 metros y una máxima de 12.63 metros, esta diferencia entre cada punto se muestra en la Tabla 23.



Figura 57. Comparación ruta prototipo vs Geo Tracker – Parque Montalvo

En la ruta de prueba en el Parque Montalvo, con un recorrido de 250 metros, el sistema basado en nodo móvil, repetidor central y nodo Gateway mostró una tasa de recepción aceptable. La velocidad promedio fue de 3.14 Km/h, la temperatura ambiente

promedio fue de 27.23°C, y la batería se mantuvo estable alrededor de 358.55 mV durante toda la prueba. La altitud promedio medida fue de 2583 metros con una veracidad media de 0.75, y se registraron en promedio 7 satélites, garantizando una buena calidad de posicionamiento en la mayor parte del recorrido como se observa en la Tabla 23.

No obstante, se identificaron puntos críticos donde el error de distancia superó los 10 metros, coincidiendo con caídas en el número de satélites (hasta 5) y una reducción significativa en la veracidad (por debajo de 0.7). Estas zonas, afectadas probablemente por obstáculos como árboles o estructuras, causaron que la precisión espacial disminuyera, aunque la comunicación LoRa se mantuvo sin interrupciones.

Tabla 23. Registro de datos de pruebas en la Ruta 1 – Parque Montalvo

N°	Hora	Tiempo envío seg	Coordenadas Lora Latitud	Coordenadas lora Longitud	Coordenadas geo Latitud	Coordenadas geo Longitud	Temperatura °C	# Satelites	Velocidad km/h	Altitud m	Veracidad %	Batería mV	Error de distancia Grados	Error de distancia Metros	Dentro o Fuera de Rango	Exito %
1	14:30:10	20	-1,241849	-78,629379	-1,241859	-78,629492	25,7	10	2,25	2582,3	0,8	356	0,000113	12,63	100%	0%
2	14:30:02	51	-1,241953	-78,629489	-1,241964	-78,629502	26,5	9	2,6	2583,2	0,82	355	0,000017	1,90	0%	100%
3	14:30:55	30	-1,242029	-78,629576	-1,242042	-78,629583	25,2	10	3,1	2584,5	0,85	362	0,000015	1,64	0%	100%
4	14:31:11	20	-1,242129	-78,629682	-1,242137	-78,629795	25,4	10	3,22	2583,3	0,84	356	0,000113	12,61	100%	0%
5	14:31:29	20	-1,242231	-78,629676	-1,242244	-78,629682	26,2	9	3,5	2581,1	0,82	355	0,000014	1,59	0%	100%
6	14:31:57	20	-1,242314	-78,629624	-1,242323	-78,629629	26	8	4,1	2585	0,8	360	0,000010	1,15	0%	100%
7	14:32:17	20	-1,242391	-78,629556	-1,242405	-78,629569	31,1	7	3,9	2582,6	0,75	359	0,000019	2,13	0%	100%
8	14:32:35	30	-1,242503	-78,629458	-1,242508	-78,62947	25,9	6	3,21	2580,8	0,7	356	0,000013	1,45	0%	100%
9	14:32:58	20	-1,242586	-78,629380	-1,242588	-78,629395	26,7	6	3,3	2586,2	0,7	367	0,000015	1,68	0%	100%
10	14:33:14	30	-1,242578	-78,629300	-1,242582	-78,629409	30,1	5	3,72	2583,3	0,65	355	0,000109	12,14	100%	0%
11	14:33:25	20	-1,242509	-78,629222	-1,242516	-78,629257	26,2	6	3,81	2581,1	0,7	362	0,000036	3,97	0%	100%
12	14:33:49	30	-1,242410	-78,629120	-1,242414	-78,629201	26,7	7	3,55	2585,2	0,75	357	0,000081	9,03	100%	0%
13	14:34:13	51	-1,242336	-78,629034	-1,242339	-78,629071	30,4	7	3,64	2580	0,75	355	0,000037	4,13	0%	100%
14	14:34:28	31	-1,242270	-78,628971	-1,242273	-78,628998	29,3	6	3,14	2581,5	0,7	354	0,000027	3,02	0%	100%
15	14:34:55	30	-1,242175	-78,628980	-1,242181	-78,628999	26,8	5	3,25	2584,8	0,65	362	0,000020	2,22	0%	100%
16	14:35:05	21	-1,242092	-78,629052	-1,242097	-78,629159	30,4	7	2,91	2582,9	0,75	364	0,000107	11,92	100%	0%
17	14:35:25	31	-1,242003	-78,629129	-1,242005	-78,629159	26,7	7	3,1	2583,2	0,75	357	0,000030	3,35	0%	100%
18	14:35:46	28	-1,241922	-78,629197	-1,241926	-78,6292884	26,2	8	2,43	2585,4	0,8	356	0,000091	10,18	100%	0%
19	14:35:58	30	-1,241854	-78,629267	-1,24186	-78,629277	27	7	2,22	2580,5	0,75	365	0,000012	1,30	0%	100%
20	14:36:11	22	-1,241840	-78,629318	-1,241845	-78,629392	26,1	6	1,81	2583,2	0,7	358	0,000074	8,26	100%	0%
Total		27,75					27,23	7,30	3,14	2583,01	0,75	358,55	0,000048	5,32		65%

El error de distancia varió entre 1.15 y 12.63 metros como se observa en la Figura 58, lo que indica que, en algunas ediciones la precisión del sistema de localización disminuye, con variaciones más grandes observadas en ciertas horas. Esto puede estar relacionado con factores como la calidad de la señal LoRaWAN, interferencias o la ubicación geográfica que afecten la exactitud de los datos obtenidos, aunque el error en la mayoría de los casos permanece dentro de un rango aceptable.

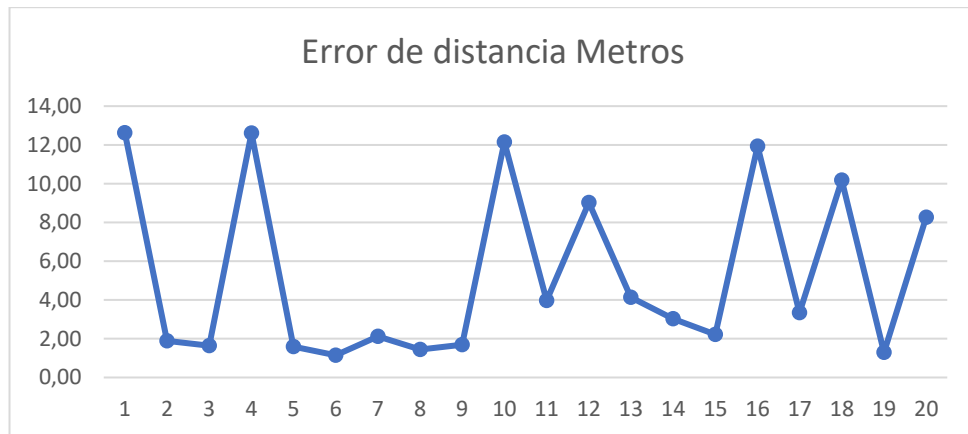


Figura 58. Gráfico estadístico del error de distancia en metros

En el prototipo, uno de los factores que se evalúan es la temperatura. La Figura 59, presenta el estado térmico del dispositivo a lo largo del tiempo, desde su encendido hasta su apagado. Las variaciones de temperatura registradas se atribuyen a las condiciones ambientales a las que estuvo expuesto el prototipo durante su funcionamiento. Se registro datos en la Tabla 22, desde el punto de inicio con 25.7 °C, el punto intermedio alcanza los 30.1°C, y el punto final registra 26.1°C.

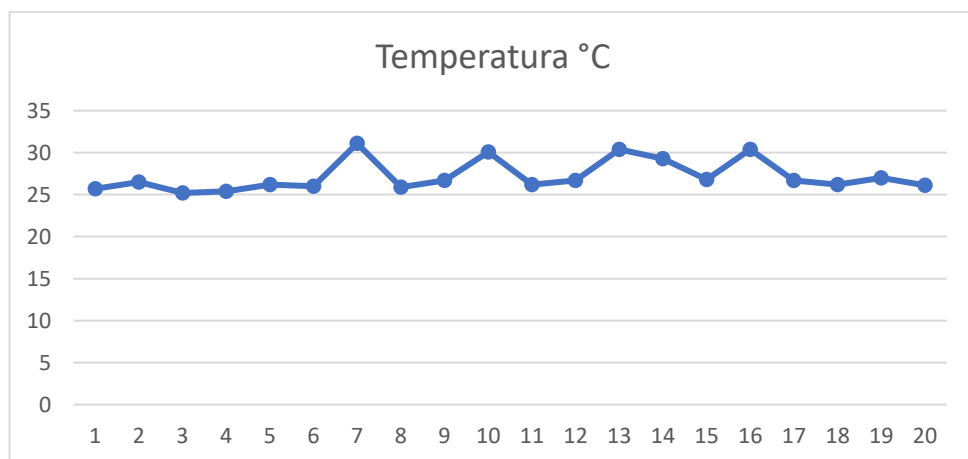


Figura 59. Gráfico estadístico de la temperatura C°

El nivel de batería del dispositivo se mantuvo estable entre 354 mV y 365 mV durante todo el periodo como se observa en la Figura 60, lo que indica un bajo consumo de energía por parte del sistema de localización. Esta estabilidad en la batería con un consumo promedio de 358.55 mV, muestra que el sistema está optimizado para un uso prolongado, con la capacidad de operar durante largos períodos sin una caída significativa en la carga.

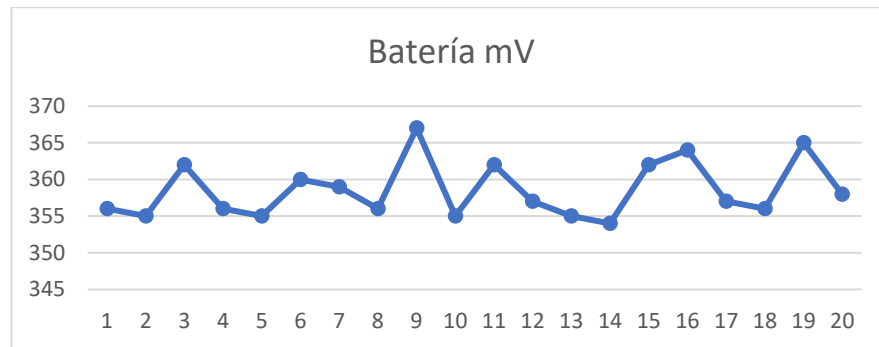


Figura 60. Gráfico estadístico del consumo de batería

La velocidad promedio registrada durante las pruebas fue de 3.14 Km/h, lo que sugiere un desplazamiento moderado. La temperatura promedio fue de 27.23°C, y la precisión se mantuvo alta con un promedio de 7 satélites detectados. La altitud promedio de 2583 metros es consistente con la geografía local, y la veracidad de los datos GPS fue alta, con un valor medio de 0.75. La batería se mantuvo estable a 358.55 mV, lo que permitió un buen rendimiento durante las pruebas. El error de distancia promedio fue de 5.32 metros, reflejando una excelente precisión, considerando las condiciones del parque Montalvo en Ambato, con árboles y edificaciones cercanas. El porcentaje de éxito promedio se observa en la Figura 61, lo que indica un buen desempeño general

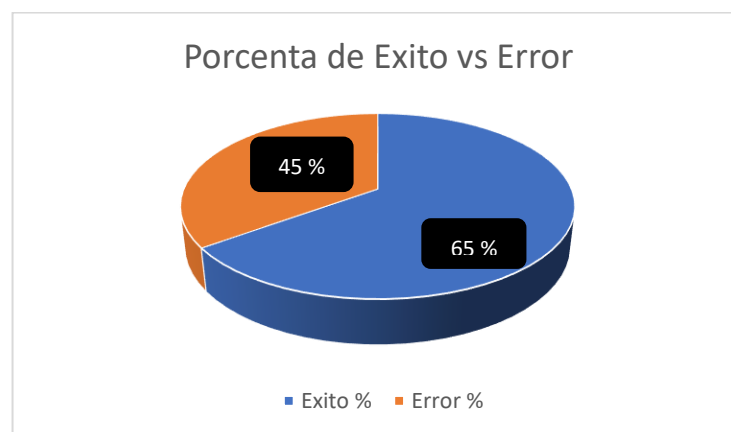


Figura 61. Gráfico estadístico del Éxito vs Error de las pruebas

3.8.3 Pruebas Parque de la Familia Ambato – Refinamiento del prototipo

Se realizaron pruebas el Parque de la Familia de la ciudad de Ambato para observar cómo se comporta el equipo en un entorno abierto ubicado en la parroquia Ambatillo que tiene un área de 570.000 metros cuadrados y está ubicado a una altura de 3050 metros sobre el nivel del mar, se puede apreciar su área en la Figura 62.



Figura 62. Área del Parque de la familia - Ambato

Como se puede observar en la Figura 63, se realizó dos recorridos simultáneamente con el uso de los 2 nodos móviles, uno en el lado norte y el otro en el lado sur del parque; el nodo repetidor ubicado casi en el centro del parque a una altura de 3015 metros sobre el nivel del mar y el Gateway en el ingreso al parque, los recorridos duraron un máximo de 45 minutos.

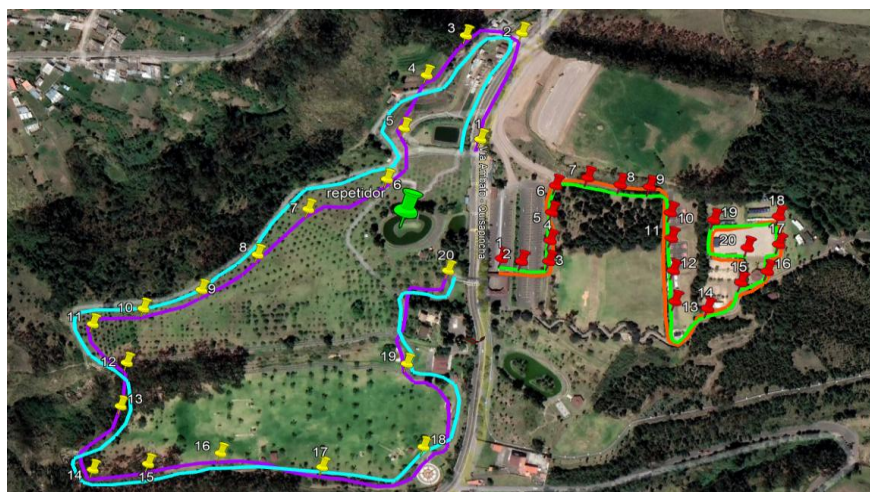


Figura 63. Ruta 1 y Ruta 2 en el parque de la familia

a. Ruta 1 – Lado Norte del parque de la familia Ambato

Como se puede observar en la Figura 64, se realizó un recorrido de 750 metros en la parte norte del parque a una velocidad moderada de 3.24 km/h. El inicio del recorrido fue a las 13:30:10 desde la puerta de ingreso, pasando por un área con abundante naturaleza y finalizó en las canchas deportivas a las 14:45:15 de la tarde con un estimado de 15 minutos de recorrido.



Figura 64. Ruta Norte registrada por el prototipo – Parque de la familia

Durante el recorrido de 750 metros en el Parque de la Familia, con una duración de 15 minutos, se realizó una comparación detallada entre los datos obtenidos del prototipo (marcados en verde) y la ruta proporcionada por el GPS (en rojo) como se observa en la Figura 65. A lo largo de todo el trayecto, se registraron las ubicaciones, permitiendo calcular el margen de error. Los resultados revelaron que el error máximo de distancia fue de 12,44 metros, mientras que el mínimo fue de 1,50 metros. Estos datos, complementados con información clave como la velocidad, la altitud y la calidad de la señal, fueron cuidadosamente registrados en la tabla, lo que facilitó una evaluación precisa de la fiabilidad y exactitud del sistema de geolocalización durante el recorrido. Esto demuestra el potencial del prototipo para rastrear exploradores con confianza, incluso en entornos con posibles obstáculos.



Figura 65. Comparación ruta norte prototipo vs GeoTracker – Parque de la Familia

Durante la ruta 1 de prueba en el Parque de la Familia, con un recorrido de 750 metros y una duración aproximada de 15 minutos, el sistema compuesto por el nodo móvil, el repetidor central y el nodo Gateway, demostró un rendimiento notable con una tasa de recepción aceptable. La velocidad promedio registrada fue de 3.24 m/s, la temperatura ambiente se mantuvo en 26.88 °C, y el consumo de batería permaneció estable en 357 mV a lo largo de toda la prueba. En cuanto a la altitud promedio, se registraron 3037.48 metros con una veracidad media de 0.77, y la cantidad promedio de satélites fue de 9, lo que garantizó un buen nivel de precisión durante la mayor parte del recorrido.

Sin embargo, se identificaron algunos puntos críticos donde el error de distancia superó los 10 metros, coincidiendo con caídas en el número de satélites (hasta 7) y una leve disminución en la veracidad (hasta 0.7) como se puede observar en la Tabla 24. Estos problemas fueron probablemente causados por obstáculos como árboles o estructuras, los cuales redujeron la precisión espacial del sistema. A pesar de esto, la comunicación LoRa se mantuvo estable, demostrando la robustez de la red, lo que permitió que el sistema siguiera funcionando sin interrupciones.

Tabla 24. Registro de datos de pruebas en la Ruta Norte – Parque de la Familia

N°	Hora	Tiempo envío seg	Coordenadas Lora Latitud	Coordenadas lora Longitud	Coordenadas geo Latitud	Coordenadas geo Longitud	Temperatura °C	# Satelites	Velocidad km/h	Altitud m	Veracidad %	Batería mV	Error de distancia Grados	Error de distancia Metros	Dentro o Fuera de Rango	Exito %
1	13:30:10	20	-1,246158	-78,658013	-1,24617	-78,658081	24,8	11	2,1	3019,1	0,8	356	0,000069	7,69	0%	100%
2	13:30:45	42	-1,245969	-78,658010	-1,245987	-78,658022	23,7	10	2,22	3020,5	0,8	354	0,000022	2,41	0%	100%
3	13:31:20	30	-1,245718	-78,658780	-1,245733	-78,658815	29,8	9	2,67	3023,2	0,75	360	0,000038	4,19	0%	100%
4	13:31:55	20	-1,245739	-78,658267	-1,245752	-78,658356	21	7	2,84	3025	0,7	355	0,000090	10,01	100%	0%
5	13:32:30	21	-1,245768	-78,658565	-1,245781	-78,658595	22,5	10	3,16	3027,1	0,84	354	0,000033	3,64	0%	100%
6	13:32:55	20	-1,245775	-78,658849	-1,245788	-78,658896	28,1	7	3,27	3030,3	0,7	370	0,000112	12,44	100%	0%
7	13:33:14	22	-1,245498	-78,658971	-1,245511	-78,658989	30,5	11	3,41	3034,5	0,8	359	0,000022	2,47	0%	100%
8	13:33:45	30	-1,245194	-78,658935	-1,245208	-78,658985	25,3	9	3,26	3039	0,8	356	0,000052	5,78	0%	100%
9	13:34:16	20	-1,244929	-78,658946	-1,244943	-78,658987	26,7	8	3,5	3042,4	0,5	367	0,000043	4,82	0%	100%
10	13:35:25	31	-1,244705	-78,658704	-1,244717	-78,658791	30,1	7	3,64	3043,8	0,7	355	0,000088	9,78	100%	0%
11	13:36:00	19	-1,244656	-78,658443	-1,244669	-78,658473	26,2	9	3,82	3041,2	0,8	360	0,000033	3,64	0%	100%
12	13:37:35	30	-1,244589	-78,658111	-1,244601	-78,658151	27,5	10	4,15	3039,1	0,82	356	0,000042	4,65	0%	100%
13	13:38:10	41	-1,244522	-78,657794	-1,244536	-78,657808	28,8	10	3,88	3035,6	0,84	354	0,000020	2,20	0%	100%
14	14:39:45	22	-1,244222	-78,657765	-1,244233	-78,657838	29,3	7	3,7	3038,3	0,7	354	0,000074	8,22	100%	0%
15	14:40:20	30	-1,243967	-78,658075	-1,243984	-78,658086	26,8	9	3,32	3042,2	0,75	361	0,000020	2,25	0%	100%
16	14:41:55	21	-1,243751	-78,658225	-1,243764	-78,658322	30,4	7	3,19	3046	0,7	354	0,000098	10,89	100%	0%
17	14:42:30	31	-1,243699	-78,658515	-1,243713	-78,658526	26,7	11	3,45	3050,1	0,8	356	0,000018	1,98	0%	100%
18	14:43:05	28	-1,243750	-78,658797	-1,24376	-78,658805	26,2	10	3,23	3055,2	0,94	354	0,000013	1,43	0%	100%
19	14:44:40	30	-1,244312	-78,658682	-1,244323	-78,658692	27	9	3,16	3048,7	0,75	362	0,000015	1,65	0%	100%
20	14:45:15	22	-1,243971	-78,658440	-1,243981	-78,658449	26,1	10	2,8	3048,3	0,84	356	0,000013	1,50	0%	100%
Total		26,50					26,88	9,05	3,24	3037,48	0,77	357,65	0,000046	5,08		75%

En la se observa en la Figura 66, que el error promedio en metros es de 5,08 metros, con un rango de 1,98 metros a 12,44 metros en las distintas mediciones. Este error es considerablemente alto en comparación con los estándares esperados para sistemas de geolocalización, lo que puede estar relacionado con la ubicación de las pruebas. Dado que estas mediciones se realizaron en el Parque de la Familia en Ambato, que está lleno de edificaciones y árboles, la señal de GPS pudo haber sido obstruida o reflejada por la vegetación, lo que genera imprecisiones en los valores de localización.

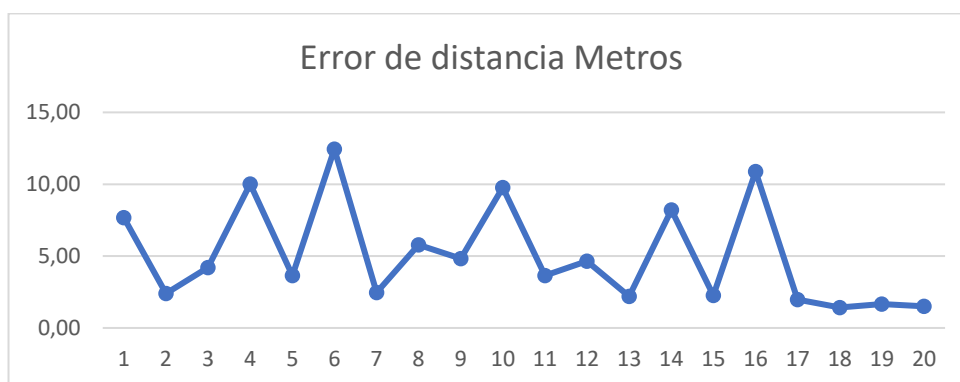


Figura 66. Gráfico del error de distancia en metros – Ruta norte

Los valores de temperatura de la Figura 67 mostraron estabilidad, con una media cercana a los 22-30 °C, lo cual es esperado en un entorno urbano y en el periodo de pruebas realizado. La temperatura no afectó de manera significativa el funcionamiento del sistema de localización, ya que no se observaron fluctuaciones extremas. Sin embargo, es importante notar que la temperatura también puede influir en el rendimiento de la batería y otros sensores en sistemas portátiles, especialmente en entornos más extremos, como zonas montañosas o con variabilidad climática.

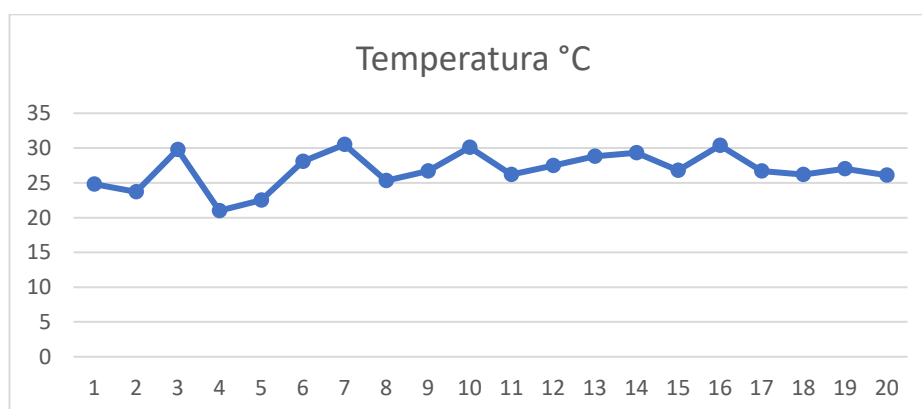


Figura 67. Gráfico de la variación de la temperatura – Ruta norte

El promedio de consumo de la batería fue de 357,65 mV como se observa en la Figura 68, lo que reflejado en el un consumo moderado de energía en las pruebas realizadas. Este valor indica que el sistema es eficiente en cuanto al uso de la energía durante el proceso de transmisión de datos. Sin embargo, el rendimiento de la batería también podría haberse visto afectado por la densidad de flora y la interferencia en el Parque de la Familia, lo que podría haber influido en la frecuencia de transmisión y, en consecuencia, en el consumo energético.

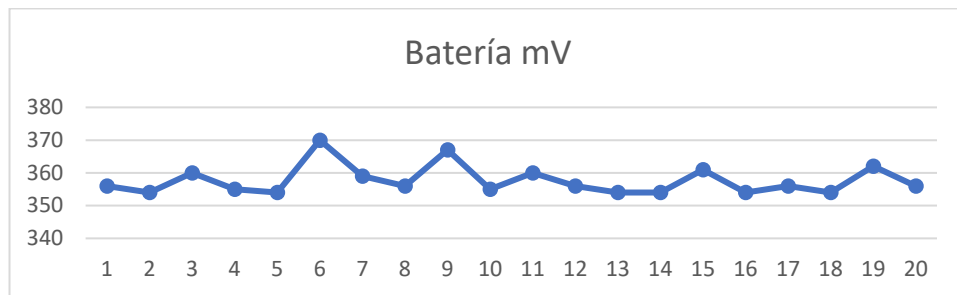


Figura 68. Gráfico del consumo de batería – Ruta norte

La velocidad promedio fue de 3.24 km/h, con una temperatura promedio de 26.88°C, lo que refleja condiciones ambientales estables durante las pruebas. Se detectaron en promedio 9 satélites, asegurando buena cobertura para la localización. La altitud promedio fue de 3037.65 metros. La veracidad con un promedio de 0.77, lo que refleja una precisión adecuada en la medición. El consumo de batería se mantuvo estable a 357.65 mV, permitiendo un rendimiento continuo durante las pruebas. El error de distancia promedio fue de 5.08 metros, lo que indica una excelente precisión. Sin embargo, el porcentaje de éxito alcanzó un 75%, como se observa en la Figura 69.

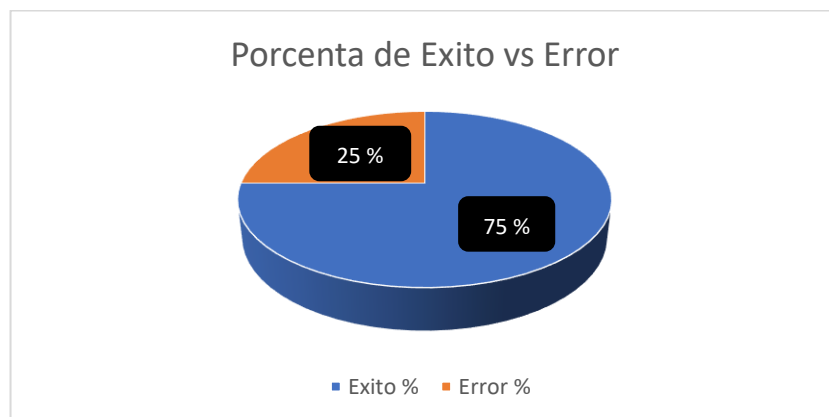


Figura 69. Gráfico del Éxito vs Error – Ruta norte Familia

b. Ruta 2 – Lado Sur del parque de la familia Ambato

Como se puede observar en la Figura 70, se realizó un recorrido de 1680 metros a una velocidad promedio de 2.37 Km/h. El inicio del recorrido fue a las 13:30:12 desde la puerta de ingreso y finalizo en las canchas deportivas a las 14:19:17 de la tarde con un estimado de 45 minutos de recorrido a una temperatura promedio de 27.58 grados centígrados.

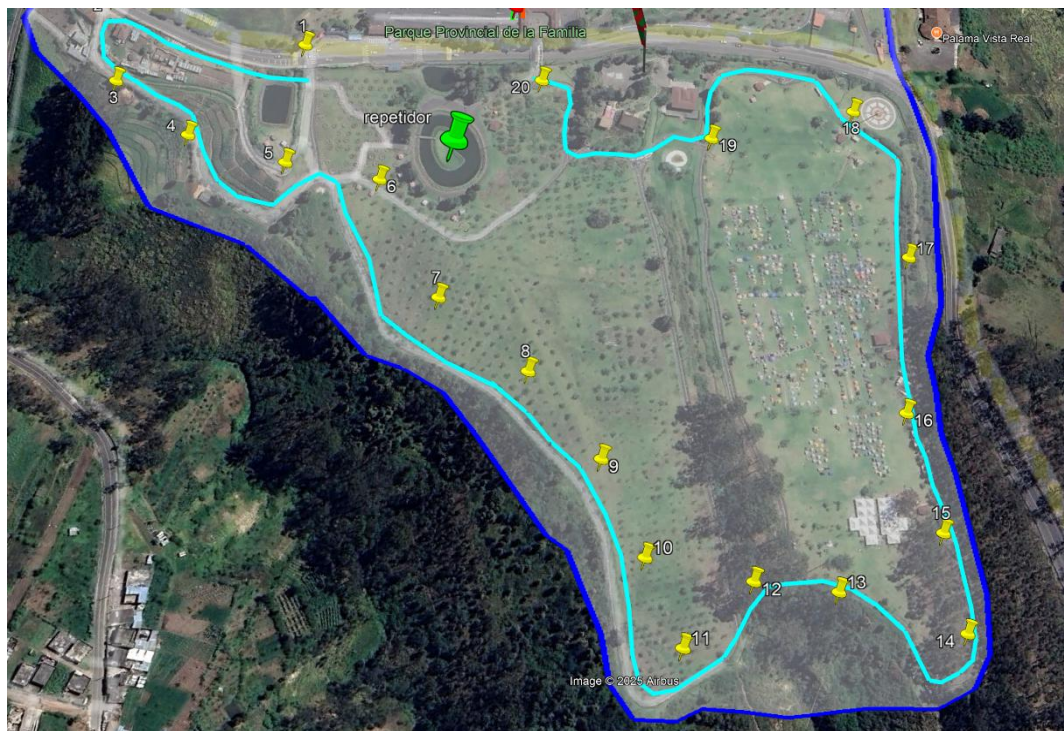


Figura 70. Ruta Sur registrada por el prototipo – Parque de la familia

Durante el recorrido de 1680 metros realizado en el Parque Provincial de la Familia, con una duración de 45 minutos, se compararon los datos obtenidos con el prototipo diseñado (en celeste) y la ruta proporcionada por Geo Tracker (en morado). Como se observa en la Figura 71, los valores de ubicación fueron recolectados durante todo el trayecto y se calculó el margen de error. Los resultados muestran que la distancia máxima de error fue de 9.96 metros, mientras que el error mínimo fue de 2.36 metros. Estos datos, junto con la información de velocidad, altitud y la calidad de la señal, fueron registrados en la Tabla 25. Registro de datos de pruebas en la Ruta Sur – Parque de la Familia . Además, se logró obtener una alta precisión en la ubicación con una veracidad de 0.81, lo que demuestra que el sistema es confiable para la medición de distancias y ubicación en rutas de largo alcance.

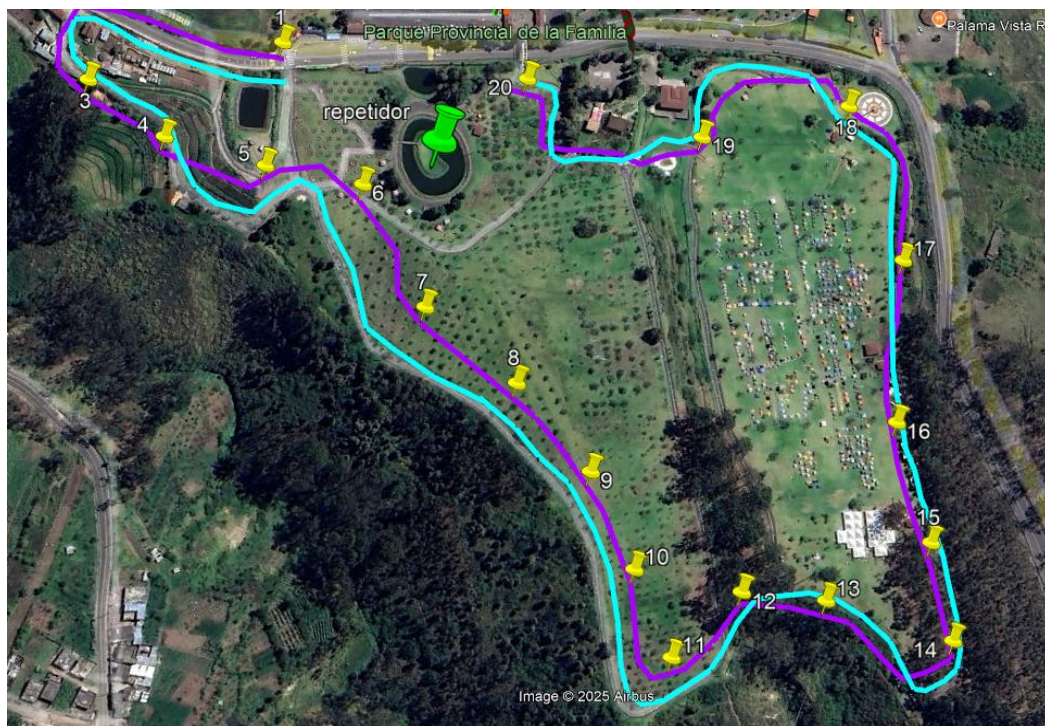


Figura 71. Comparación ruta Sur prototipo vs GeoTracker – Parque de la Familia

En la ruta Sur del Parque de la Familia, con un recorrido de 1680 metros y una duración de 45 minutos, el sistema, compuesto por el nodo móvil, el repetidor central y el nodo Gateway como se muestra en la Figura 71, mostró una tasa de recepción satisfactoria. La velocidad promedio fue de 2.37 km/h y la temperatura ambiente de 27.58 °C. El consumo de batería se mantuvo estable en 357 mV durante toda la prueba, mientras que la altitud promedio fue de 3.037 metros, con una veracidad media de 0.81 y un promedio de 9 satélites, lo que garantizó una buena precisión en la mayoría del recorrido.

No obstante, se identificaron algunos puntos críticos donde el error de distancia superó los 9.96 metros, coincidiendo con caídas en el número de satélites (hasta 8) y una ligera reducción en la veracidad (de 0.7) como se observa en la Tabla 25. Esto se debió probablemente a obstáculos como árboles o estructuras, que afectaron la señal GPS, reduciendo la precisión espacial. A pesar de ello, la comunicación LoRa se mantuvo estable y sin interrupciones, asegurando la continuidad del sistema.

Para mejorar la precisión del sistema, se ajustó el envío de datos a cada 3 segundos. Este cambio permitió optimizar la fiabilidad y exactitud de las próximas mediciones.

Tabla 25. Registro de datos de pruebas en la Ruta Sur – Parque de la Familia

N°	Hora	Tiempo envío seg	Coordenadas Lora Latitud	Coordenadas lora Longitud	Coordenadas geo Latitud	Coordenadas geo Longitud	Temperatura °C	# Satelites	Velocidad km/h	Altitud m	Veracidad %	Batería mV	Error de distancia Grados	Error de distancia Metros	Dentro o Fuera de Rango	Exito %
1	13:30:12	30	-1,246539	-78,659248	-1,246482	-78,659211	25,7	11	2,82	3023,1	0,9	357	0,000068	7,56	0%	100%
2	13:32:47	22	-1,246319	-78,660448	-1,246298	-78,660451	28,5	10	2,54	3022,5	0,84	355	0,000021	2,36	0%	100%
3	13:35:22	29	-1,246839	-78,660369	-1,246806	-78,660339	25,2	9	2,9	3015	0,8	361	0,000045	4,96	0%	100%
4	13:37:55	21	-1,247147	-78,659890	-1,247118	-78,65985	26,6	11	2,91	3010,6	0,9	354	0,000049	5,50	0%	100%
5	13:40:33	19	-1,247274	-78,659288	-1,247239	-78,659245	26,2	10	2,78	3007,8	0,84	356	0,000055	6,17	0%	100%
6	13:43:08	22	-1,247351	-78,658707	-1,247323	-78,658721	27,2	10	2,52	3009,2	0,84	359	0,000031	3,48	0%	100%
7	13:45:40	30	-1,248050	-78,658271	-1,247981	-78,658261	30,1	9	2,61	2998,1	0,8	357	0,000070	7,76	0%	100%
8	13:48:16	25	-1,248455	-78,657720	-1,248494	-78,65774	25,9	9	2,25	2999,5	0,8	358	0,000044	4,88	0%	100%
9	13:50:55	21	-1,248931	-78,657263	-1,248874	-78,657206	26,7	8	2,35	2995,8	0,7	357	0,000081	8,97	100%	0%
10	13:53:26	30	-1,249463	-78,656977	-1,249414	-78,656921	28,2	8	2,43	2990	0,7	358	0,000074	8,28	100%	0%
11	13:56:02	20	-1,249938	-78,656734	-1,249896	-78,656691	26,5	10	2,45	2981,9	0,84	358	0,000060	6,69	0%	100%
12	13:58:35	25	-1,249543	-78,656365	-1,249509	-78,656301	29,3	8	2,55	2984,2	0,7	356	0,000072	8,07	100%	0%
13	14:01:15	30	-1,249555	-78,655873	-1,249503	-78,655845	30,4	10	2,42	2971,4	0,84	354	0,000059	6,57	0%	100%
14	14:03:45	31	-1,249729	-78,655130	-1,249676	-78,655083	29,8	11	2,37	2963,9	0,9	358	0,000071	7,89	0%	100%
15	14:06:26	22	-1,249177	-78,655298	-1,249135	-78,655219	28,1	8	2,26	2975,5	0,75	356	0,000089	9,96	100%	0%
16	14:08:58	21	-1,248494	-78,655528	-1,248439	-78,655499	30,2	9	2,2	2980,3	0,86	358	0,000062	6,92	0%	100%
17	14:11:32	29	-1,247507	-78,655522	-1,247474	-78,655542	27,4	9	1,95	2981,8	0,8	356	0,000039	4,30	0%	100%
18	14:14:08	28	-1,246526	-78,655840	-1,246497	-78,655799	26,3	10	1,81	2991,9	0,84	355	0,000050	5,59	0%	100%
19	14:16:44	30	-1,246870	-78,656763	-1,246831	-78,656726	27,2	9	1,74	2999,5	0,8	361	0,000054	5,98	0%	100%
20	14:19:17	22	-1,246633	-78,657812	-1,246594	-78,657754	26,1	10	1,51	3015,2	0,84	358	0,000070	7,78	0%	100%
Total		25,35					27,58	9,45	2,37	2995,86	0,81	357,10	0,000058	6,48		80%

El error en metros en la Figura 72, esta varía entre 2.36 metros y 9,96 metros, con un promedio de 6,48 metros. Este error puede estar relacionado con la interferencia de edificios y vegetación en el área de prueba, ya que se realizó en un entorno urbano y montañoso en el parque de la familia en Ambato. Las obstrucciones pueden causar una desviación en las mediciones de GPS debido a la falta de línea de visión directa con los satélites.

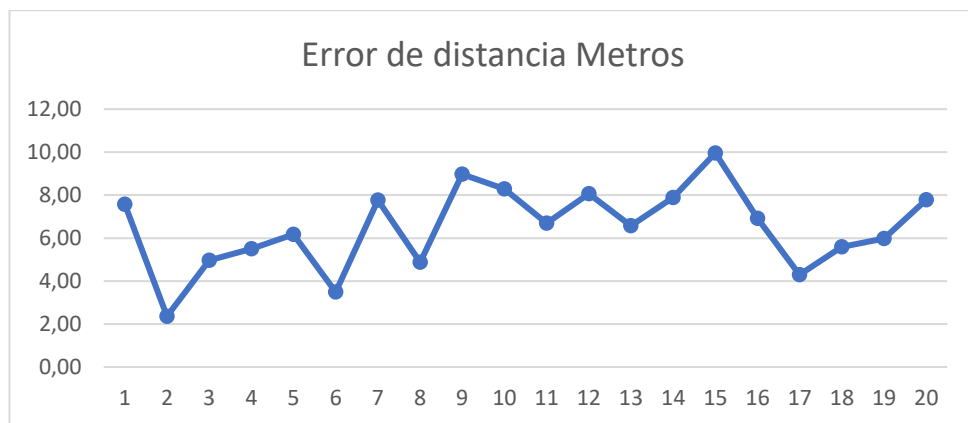


Figura 72. Gráfico del error de distancia en metros – Ruta Sur

La temperatura registrada durante las pruebas varió entre 25°C y 30°C, con una media de 27.58°C como se observa en la Figura 73. Este rango de temperatura es esperado en el área del parque de la familia de Ambato y no parece haber influido significativamente en el funcionamiento del sistema. Sin embargo, la temperatura puede afectar la duración de la batería y la precisión de los sensores en sistemas portátiles, aunque no se reportaron anomalías al respecto.

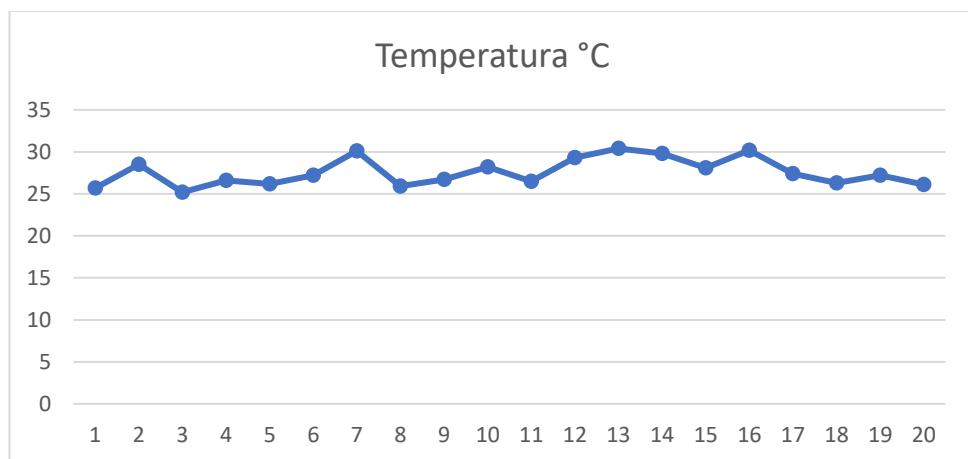


Figura 73. Gráfico de variación de Temperatura C°– Ruta Sur

El consumo de batería mostró un rendimiento consistente, con un promedio de 357,10 mV en todas las mediciones como observa en la Figura 74. Esto indica que el sistema de geolocalización tiene un bajo consumo energético y es adecuado para realizar transmisiones de datos a largo plazo sin agotarse rápidamente

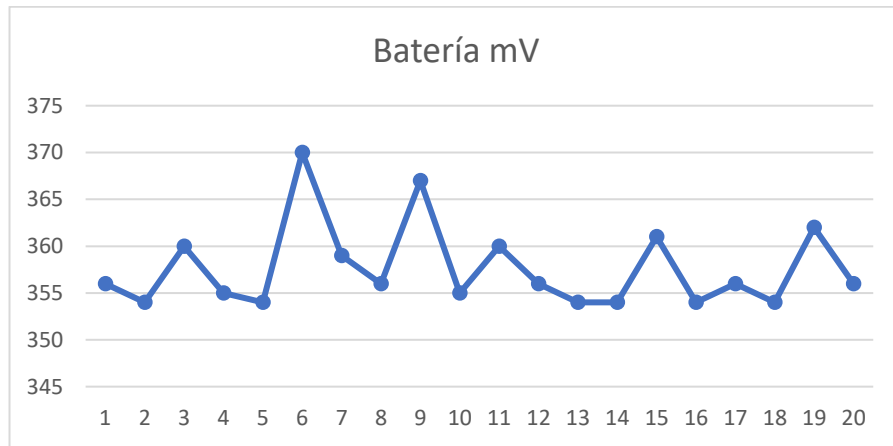


Figura 74. Gráfico consumo de batería – Ruta Sur

Los resultados muestran que la velocidad promedio durante las pruebas fue de 2.37 km/h, con una temperatura de 27.58°C. La precisión de la localización fue adecuada, con un promedio de 9.45 satélites detectados, y un error de distancia promedio de 6.48 metros. La altitud promedio fue de 2995.86 metros, y la veracidad de los datos fue alta, con un promedio de 0.81. La batería se mantuvo estable a 357.10 mV, permitiendo un buen desempeño del sistema. El porcentaje de éxito alcanzó un 80%. Como se muestra en la Figura 75.

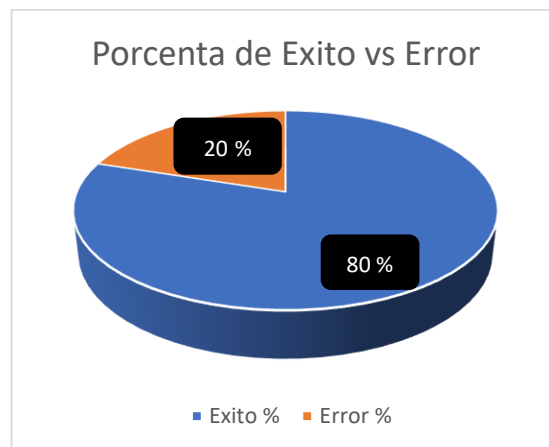


Figura 75. Gráfico de Éxito vs Error – Ruta norte Parque de la familia

3.8.4 Pruebas Volcán Tungurahua

Se llevaron a cabo pruebas en el imponente volcán Tungurahua para evaluar el desempeño del sistema en un entorno real, específicamente en el Parque Sangay. Este parque, con una vasta extensión de 1.000 kilómetros cuadrados, se encuentra a una altitud desafiante de 5.023 metros sobre el nivel del mar como se puede visualizar en la Figura 76. En este escenario de difícil acceso, se buscó poner a prueba la fiabilidad y la precisión del sistema de geolocalización,

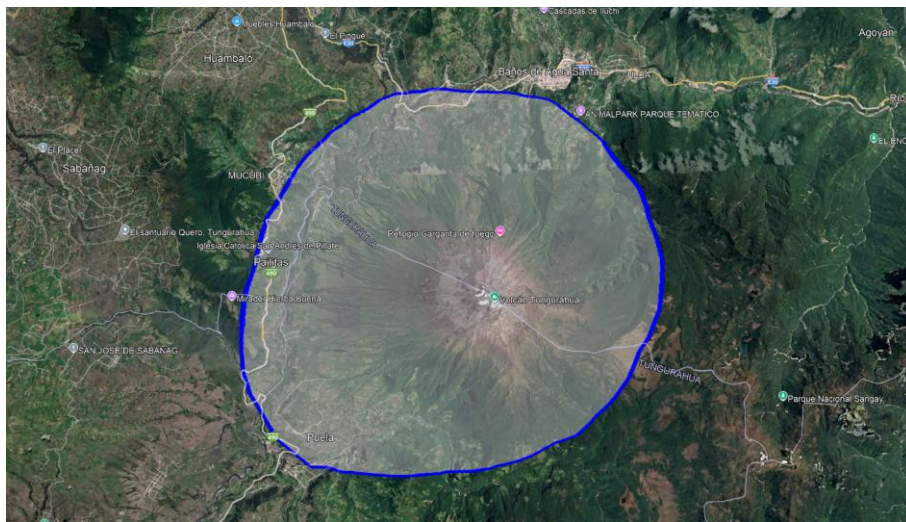


Figura 76. Área del volcán Tungurahua

Como se observa en la Figura 77, se dispone de 2 rutas principales la primera se ingresa por Pondo-Baños y la segunda por Puela-Riobamba.

En la ruta por Pondo previamente se tiene que recorrer 5 km en auto hasta llegar a la edificación del ministerio de ambiente ubicado a 2975 metros sobre el nivel del mar, desde este punto inicia la ruta de ascenso la cual tiene una distancia aproximada de 6 km hasta la cumbre, pero en un punto intermedio está ubicado el refugio garganta de fuego a 3807 metros sobre el nivel del mar.

En la ruta por Puela previo a llegar al inicio de la ruta de ascenso al volcán, se tiene que recorrer 5km en carro desde la vía panamericana 490, hasta la entrada que está ubicada a 2925 metros sobre el nivel del mar, desde este punto se tiene que recorrer una ruta de aproximadamente 6 km.

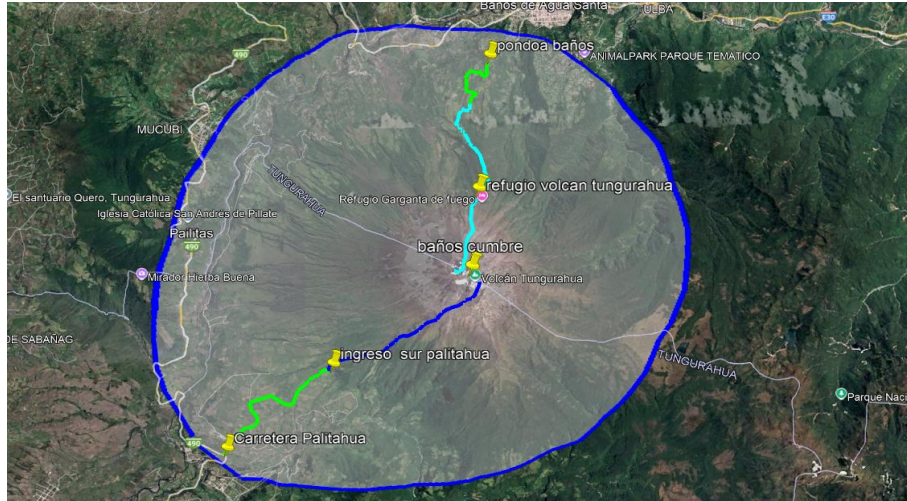


Figura 77. Ruta Norte y Ruta Sur del volcán Tungurahua

a. Ruta Norte Volcán Tungurahua Pondo – Baños

Como se puede observar la Figura 78, se inició la ruta desde el ministerio de ambiente ubicado a 2975 y desde este punto se hizo un recorrido de 8.23 km hasta la cumbre, debido a las características del equipo se ubicó el nodo repetidor cerca del refugio garganta de fuego a unos 3650 metros sobre el nivel del mar. De este modo la distancia máxima entre cada nodo es menos a 3 km garantizando la comunicación.

Se inicio el recorrido a las 9:30:10 am y se logró llegar a la cumbre a las 13:20:12, con una velocidad promedio de 2.03 km/h y a una temperatura promedio de 10.68 grados centígrados, la duración de la batería de 3800 miliamperios duro hasta la posición 11 en donde se procedió a cambiar la batería para seguir con la ruta y coronarla con éxito

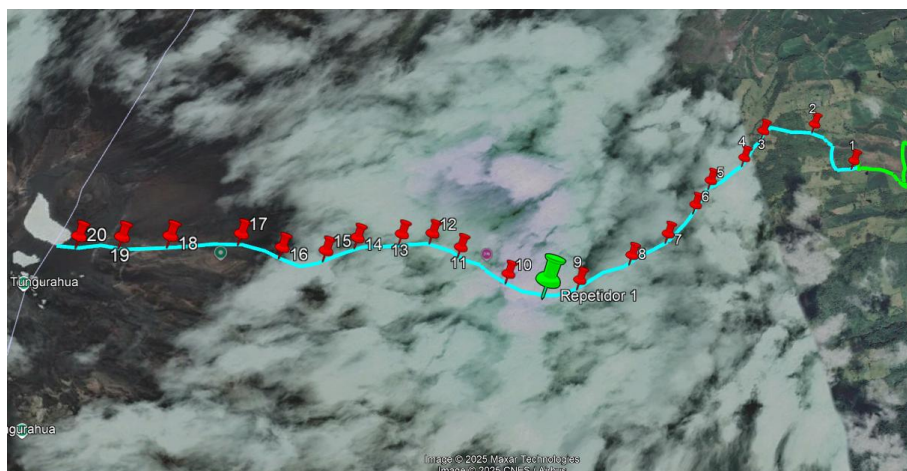


Figura 78. Ruta Norte registrada por el prototipo – Pondo

Durante el recorrido de 8.23 km realizado por la ruta de Pondoá, con una duración de 4 horas, se compararon los datos obtenidos con el prototipo diseñado (color celeste) y la ruta proporcionada por Geo Tracker (color naranja). Como se observa en la Figura 79, los valores de ubicación fueron recolectados durante todo el trayecto y se calculó el margen de error. Los resultados muestran que la distancia máxima de error fue de 9.22 metros, mientras que el error mínimo fue de 4.68 metros. Estos datos, junto con la información de velocidad, altitud y la calidad de la señal, fueron registrados en la Tabla 26. Se logró obtener una precisión en la ubicación con una veracidad de 0.74 lo que demuestra que el sistema es confiable ubicación en rutas de largo alcance.

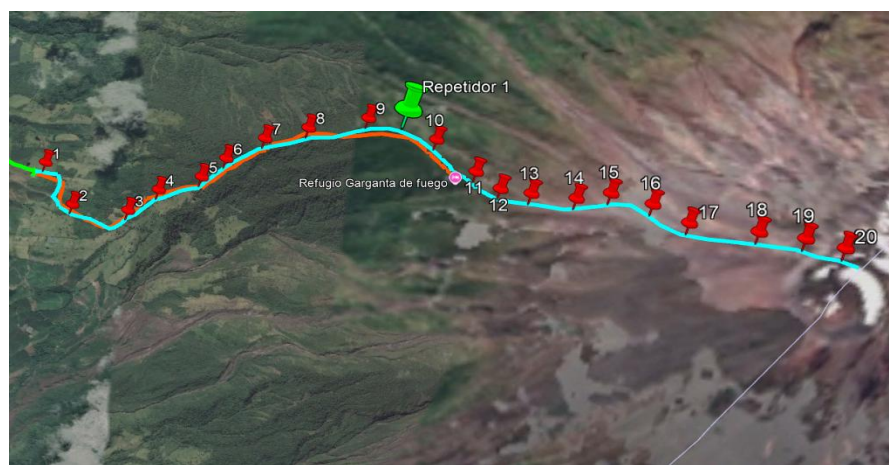


Figura 79. Comparación Ruta Norte prototipo vs GeoTracker – Pondoá

En la ruta Norte del Volcán Tungurahua, con un recorrido de 8.23 km y una duración de 4 horas, el sistema mostró una tasa de recepción aceptable. La velocidad promedio fue de 2.03 km/h, con una altitud promedio de 3820 metros, y una veracidad media de 0.74. La comunicación LoRa se mantuvo estable, aunque el error máximo de distancia fue de 9.22 metros como se observa en la Tabla 26, coincidiendo con caídas en el número de satélites y obstáculos naturales en el terreno.

La comparación con Geotracker solo fue posible hasta el punto 11, a una altura de 3812 metros, debido a la pérdida de cobertura. Sin embargo, al ajustar el intervalo de envío de datos a 3 segundos, se observó una mejora significativa en la precisión del sistema, optimizando así la localización y aumentando la fiabilidad del seguimiento en condiciones extremas.

Tabla 26. Registro de pruebas en la Ruta Norte – Volcán Tungurahua

N°	Hora	Tiempo envío seg	Coordenadas Lora Latitud	Coordenadas lora Longitud	Coordenada s geo Latitud	Coordenadas geo Longitud	Temperatura °C	# Satelites	Velocidad Km/h	Altitud m	Veracidad %	Batería mV	Error de distancia Grados	Error de distancia Metros	Dentro o Fuera de Rango	Exito %	Error %	Exactitud
1	9:30:10	25	-1,424750	-78,444238	-1,42473	-78,444201	10,5	7	3,14	2820,2	0,75	360	0,000042	4,68	0%	100%	0%	100%
2	9:42:31	40	-1,426977	-78,447001	-1,426939	-78,446952	12	6	2,91	2939,3	0,65	359	0,000062	6,90	0%	100%	0%	100%
3	9:54:05	30	-1,430707	-78,447083	-1,430667	-78,447042	12,3	7	2,77	3040	0,75	358	0,000057	6,38	0%	100%	0%	100%
4	10:06:25	22	-1,432559	-78,445542	-1,432503	-78,445481	12,1	6	2,65	3125,5	0,65	361	0,000083	9,22	100%	0%	100%	0%
5	10:18:19	21	-1,435189	-78,444470	-1,435139	-78,444419	11	7	2,52	3220,1	0,75	365	0,000071	7,95	0%	100%	0%	100%
6	10:30:55	20	-1,436595	-78,443147	-1,43655	-78,443102	12,5	8	2,69	3271,6	0,8	364	0,000064	7,08	0%	100%	0%	100%
7	10:42:40	25	-1,438835	-78,441695	-1,438799	-78,441663	12,4	9	2,54	3368,8	0,84	364	0,000048	5,36	0%	100%	0%	100%
8	10:54:26	30	-1,441368	-78,440852	-1,441312	-78,440802	12,1	6	2,43	3486,2	0,65	370	0,000075	8,36	100%	0%	100%	0%
9	11:06:31	25	-1,444784	-78,440022	-1,444731	-78,439986	13	8	2,28	3598,6	0,8	372	0,000064	7,13	0%	100%	0%	100%
10	11:18:44	32	-1,448733	-78,441127	-1,448687	-78,441076	12,2	7	2,12	3715,5	0,75	360	0,000069	7,65	0%	100%	0%	100%
11	11:30:16	25	-1,451011	-78,443000	-1,450969	-78,442956	11,5	8	2	3870,1	0,8	362	0,000061	6,77	0%	100%	0%	100%
12	11:42:13	31	-1,452346	-78,443963			11,2	9	1,83	3978,6	0,82	362	0,000062	6,85	0%	100%	0%	100%
13	11:54:11	40	-1,453914	-78,444150			10,9	8	1,79	4075	0,8	368	0,000071	7,95	0%	100%	0%	100%
14	12:06:37	31	-1,456127	-78,444280			10,1	9	1,5	4184,1	0,84	371	0,000061	6,79	0%	100%	0%	100%
15	12:18:47	30	-1,457746	-78,443859			9,5	6	1,32	4277,3	0,65	370	0,000076	8,44	100%	0%	100%	0%
16	12:30:18	25	-1,459728	-78,444345			9,2	6	1,36	4392,6	0,65	375	0,000064	7,11	0%	100%	0%	100%
17	12:42:54	31	-1,461395	-78,445276			8,9	6	1,21	4519	0,65	372	0,000074	8,19	100%	0%	100%	0%
18	12:54:43	28	-1,464255	-78,445545			7,5	7	1,2	4730,8	0,7	368	0,000070	7,79	0%	100%	0%	100%
19	13:06:55	30	-1,466068	-78,445748			7,6	8	1,19	4856,7	0,75	371	0,000071	7,89	0%	100%	0%	100%
20	13:20:12	25	-1,467784	-78,446086			7	6	1,13	4935,6	0,65	375	0,000075	8,31	100%	0%	100%	0%
Total		28,30					10,68	7,20	2,03	3820,28	0,74	366,35	0,000065	7,29		75%	25%	75%

N°	Hora	Tiempo envío seg	Coordenadas Lora Latitud	Coordenadas lora Longitud	Coordenada s geo Latitud	Coordenadas geo Longitud	Temperatura °C	# Satelites	Velocidad km /h	Altitud m	Veracidad %	Batería mV	Error de distancia Grados	Error de distancia Metros	Dentro o Fuera de Rango	Exito %
1	9:30:10	25	-1,424750	-78,444238	-1,42473	-78,444201	10,5	7	3,14	2820,2	0,75	360	0,000042	4,68	0%	100%
2	9:42:31	40	-1,426977	-78,447001	-1,426939	-78,446952	12	6	2,91	2939,3	0,65	359	0,000062	6,90	0%	100%
3	9:54:05	30	-1,430707	-78,447083	-1,430667	-78,447042	12,3	7	2,77	3040	0,75	358	0,000057	6,38	0%	100%
4	10:06:25	22	-1,432559	-78,445542	-1,432503	-78,445481	12,1	6	2,65	3125,5	0,65	361	0,000083	9,22	100%	0%
5	10:18:19	21	-1,435189	-78,444470	-1,435139	-78,444419	11	7	2,52	3220,1	0,75	365	0,000071	7,95	0%	100%
6	10:30:55	20	-1,436595	-78,443147	-1,43655	-78,443102	12,5	8	2,69	3271,6	0,8	364	0,000064	7,08	0%	100%
7	10:42:40	25	-1,438835	-78,441695	-1,438799	-78,441663	12,4	9	2,54	3368,8	0,84	364	0,000048	5,36	0%	100%
8	10:54:26	30	-1,441368	-78,440852	-1,441312	-78,440802	12,1	6	2,43	3486,2	0,65	370	0,000075	8,36	100%	0%
9	11:06:31	25	-1,444784	-78,440022	-1,444731	-78,439986	13	8	2,28	3598,6	0,8	372	0,000064	7,13	0%	100%
10	11:18:44	32	-1,448733	-78,441127	-1,448687	-78,441076	12,2	7	2,12	3715,5	0,75	360	0,000069	7,65	0%	100%
11	11:30:16	25	-1,451011	-78,443000	-1,450969	-78,442956	11,5	8	2	3870,1	0,8	362	0,000061	6,77	0%	100%
Total		26,82					11,96	7,18	2,55	3314,17	0,74	363,18	0,000063	7,04	0%	82%

El error en los datos de localización varió entre 4.68 metros y 9.22 metros, con un promedio general de 7.29 metros como se observa en la Figura 80. Este margen de error podría estar influenciado por la complejidad del entorno del volcán Tungurahua, que presenta características geográficas particulares. La presencia de montañas, terrenos irregulares y formaciones rocosas genera interferencias que afectan la precisión de las mediciones, desviando los resultados. A pesar de estas condiciones, el sistema sigue proporcionando datos útiles y confiables en situaciones desafiantes.

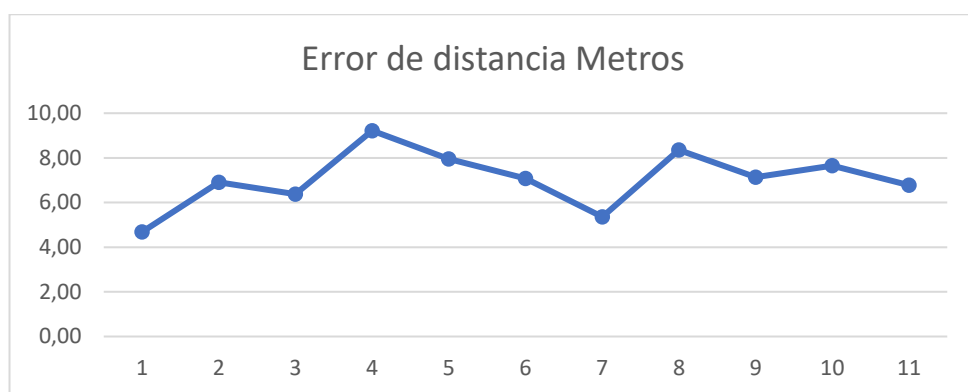


Figura 80. Gráfico del error de distancia en metros – Ruta Norte Pondoá

La temperatura registrada durante las pruebas varió entre 10.5°C y 12.8°C, con un promedio de 10.68°C como se observa en la Figura 81. Aunque las mediciones se realizaron en el entorno desafiante del volcán, la temperatura no mostró fluctuaciones significativas que afectaran la precisión del sistema. A pesar de estos desafíos, el sistema mantiene su capacidad de ofrecer datos confiables en tiempo real,

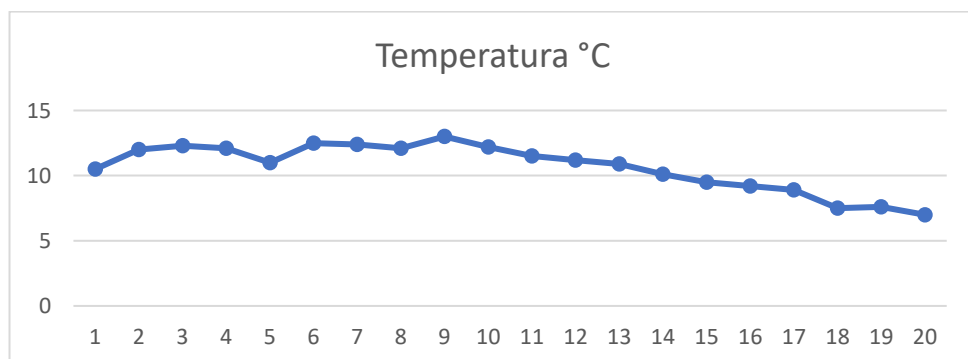


Figura 81. Gráfico de variación de temperatura C° – Ruta Norte Pondoá

El consumo de batería se mantiene entre 0.65 mV y 0.75 mV, con un promedio de 0.74 mV como se observa en la Figura 82. Este rendimiento indica que el sistema mantiene un consumo energético estable, lo cual es adecuado para su funcionamiento en áreas remotas como el volcán Tungurahua con una autonomía de 4 horas.

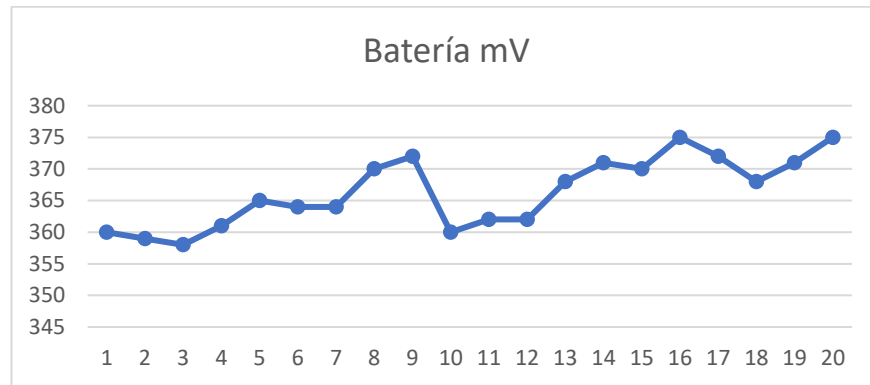


Figura 82. Gráfico de variación del consumo de batería – Ruta Norte Pondoá

En esta tabla, la velocidad promedio registrada durante las pruebas fue de 2.03 Km/h, indicando desplazamientos moderados. La temperatura promedio fue de 10.68°C, lo que sugiere condiciones ambientales estables durante las mediciones. El sistema detectó un promedio de 7 satélites, asegurando una cobertura adecuada para la localización. La altitud promedio fue de 3820.28 metros, consistente con la geografía local. La veracidad de los datos GPS fue alta, con un valor promedio de 0.74, lo que indica precisión en la obtención de las ubicaciones. La batería se mantuvo estable a 366.35 mV, lo que permitió un rendimiento constante. El error de distancia promedio fue de 7.29 metros, lo que muestra una excelente precisión en las mediciones. El porcentaje de éxito alcanzó un 75% como se observa en la Figura 83. El despliegue del sistema se puede comprobar en la Tabla 27.

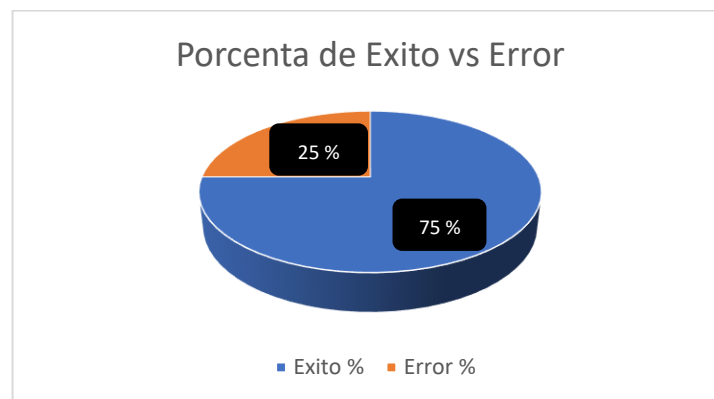


Figura 83. Gráfico del Éxito vs Error – Ruta Norte Pondoá

Tabla 27. Despliegue del sistema Ruta Norte – Volcán Tungurahua

Ruta Norte Volcán Tungurahua Pondoá – Baños

GEOLOCALIZADOR

Punto 1		Punto 2	
LATITUD 1	-1,485013	LATITUD 2	-1,438835
LONGITUD 1	-78,457553	LONGITUD 2	-78,441695
VELOCIDAD 1	1,82	VELOCIDAD 2	2,54
ALTITUD 1	3010,6	ALTITUD 2	3224,7
VERACIDAD 1	0,8	VERACIDAD 2	0,84
SATELITES 1	8	SATELITES 2	9

Hora SL1: 10:42:40 Hora SL1: 10:42:40

¡Emergencia senderista 1! ¡Estoy perdido!

Mi ubicación es:
Latitud: -1,438835
Longitud: -78,441695

Ver en Google Maps: <https://www.google.com/maps?q=-1.438835,-78.441695>

1°13'06.8"S 78°36'11.0"W

Find local businesses, view maps and get driving directions in Google Maps.

Refugio Garganta de fuego

REFUGIO AL VOLCAN TUNGURAHUA

Recomendaciones y normas para visitantes

REFUGIO A 4 Km

Hiking trail with hikers

d. Ruta Sur Volcán Tungurahua Puela - Chimborazo

Como se puede observar la Figura 84, se inició la ruta desde el final de la carretera ubicado a 2930 metros sobre el nivel del mar y desde este punto se hizo un recorrido de 7.52 km hasta la cumbre, debido a las características del equipo se ubicó el nodo repetidor en la mitad de la ruta en un lugar elevado a unos 3860 metros sobre el nivel del mar. De este modo la distancia máxima entre cada nodo es menos a 3 km garantizando la comunicación.

Se inicio el recorrido a las 9:40:35 am y se logró llegar a la cumbre a las 13:31:02, con una velocidad promedio de 1.90 Km/h y a una temperatura promedio de 10.38 grados centígrados, la duración de la batería de 3800 miliamperios duro hasta la posición 10 en donde se procedió a cambiar la batería para seguir con la ruta y coronarla con éxito



Figura 84. Ruta Sur registrada por el prototipo – Puela

Durante el recorrido de 7.52 km realizado por la ruta de Puela, con una duración de 4 horas, se compararon los datos obtenidos con el prototipo diseñado (color azul) y la ruta proporcionada por Geo Tracker (color naranja). Como se observa en la Figura 85, los valores de ubicación fueron recolectados durante todo el trayecto y se calculó el margen de error. Los resultados muestran que la distancia máxima de error fue de 10.35 metros, mientras que el error mínimo fue de 4.89 metros. Estos datos, junto con la información de velocidad, altitud y la calidad de la señal, fueron registrados en la tabla. Además, se logró obtener una alta precisión en la ubicación con una veracidad de 0.74 lo que demuestra que el sistema es confiable para la medición de distancias y ubicación en rutas de largo alcance.

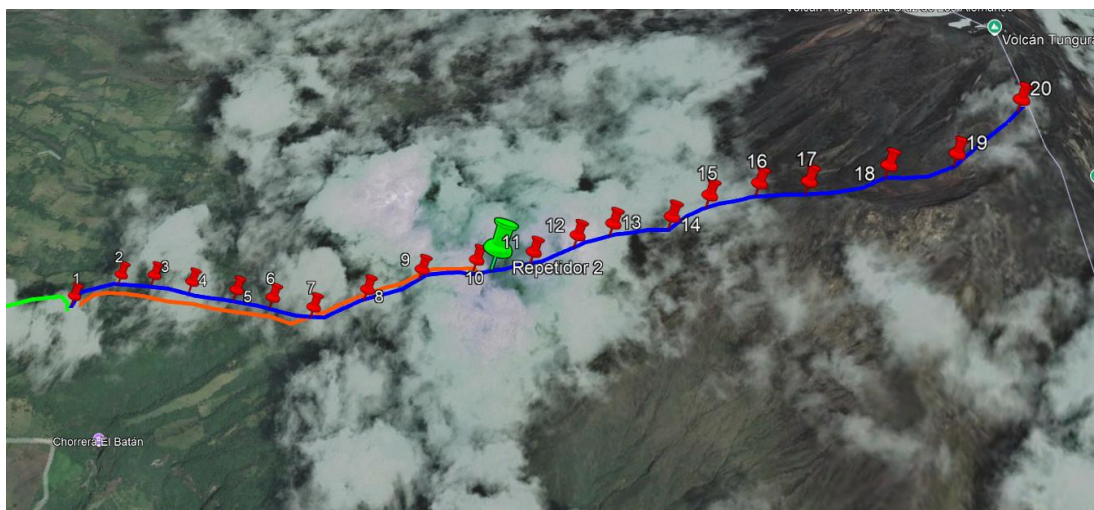


Figura 85. Comparación Ruta Sur prototipo vs GeoTracker – Puela

En la Ruta Sur del Volcán Tungurahua, con un recorrido de 7.52 km y una duración aproximada de 4 horas, el sistema basado en nodo móvil, repetidor central y nodo Gateway mostró una tasa de recepción aceptable. La velocidad promedio fue de 1.90 km/h, la temperatura ambiente estuvo en 10.38°C, y la batería se mantuvo estable alrededor de 367 mV durante toda la prueba. La altitud promedio medida fue de 3816.31 metros con una veracidad media de 0.74, y se registraron en promedio 7 satélites como se observa en la Tabla 28, garantizando una buena calidad de posicionamiento en la mayor parte del recorrido.

Sin embargo, al realizar la comparación con Geo Tracker, se pudo hacer únicamente hasta el punto 10, a una altura de 3.800 metros, debido a que la cobertura de la señal ya no estaba disponible. En ese tramo, el error de distancia máximo alcanzó los 10.35 metros, coincidiendo con caídas en el número de satélites (hasta 6) y una reducción significativa en la veracidad (por debajo de 0.7). A pesar de los obstáculos como árboles y rocas, que afectaron la precisión espacial, la comunicación LoRa se mantuvo estable durante todo el recorrido. Además, al reducir el intervalo de envío de datos a 3 segundos, se logró mejorar considerablemente la precisión del sistema.

Tabla 28. Registro de pruebas en la Ruta Sur – Volcán Tungurahua

N°	Hora	Tiempo envío seg	Coordenadas Lora Latitud	Coordenadas lora Longitud	Coordenada s geo Latitud	Coordenadas geo Longitud	Temperatura °C	# Satelites	Velocidad km/h	Altitud m	Veracidad %	Batería mV	Error de distancia Grados	Error de distancia Metros	Dentro o Fuera de Rango	Exito %
1	9:40:35	31	-1,495807	-78,479978	-1,495759	-78,479936	9,5	8	2,4	2936,2	0,8	360	0,000064	7,10	0%	100%
2	9:52:31	40	-1,493922	-78,478613	-1,493889	-78,478563	11	6	2,31	2985,1	0,65	362	0,000060	6,67	0%	100%
3	9:58:15	30	-1,493109	-78,476675	-1,49308	-78,476615	11,5	7	2,67	3052,5	0,75	359	0,000067	7,42	0%	100%
4	10:12:25	23	-1,492498	-78,474211	-1,492469	-78,474178	12	7	2,5	3126,6	0,75	362	0,000044	4,89	0%	100%
5	10:20:29	21	-1,491863	-78,471353	-1,491923	-78,471282	11	6	2,41	3224,7	0,65	365	0,000093	10,35	100%	0%
6	10:36:54	20	-1,491419	-78,469064	-1,491378	-78,469007	11,5	8	2,65	3304,2	0,8	367	0,000070	7,82	0%	100%
7	10:42:50	25	-1,490960	-78,466601	-1,490908	-78,46655	11,4	6	2,54	3374,8	0,65	364	0,000073	8,11	100%	0%
8	11:02:27	31	-1,489150	-78,464504	-1,489101	-78,464461	12,1	8	2,3	3510,4	0,8	372	0,000065	7,26	0%	100%
9	11:16:45	25	-1,487278	-78,462488	-1,487231	-78,462423	12	6	2,15	3628,6	0,65	374	0,000080	8,93	100%	0%
10	11:28:38	32	-1,486137	-78,460004	-1,486078	-78,459959	11,5	6	2	3636,8	0,65	365	0,000074	8,26	100%	0%
11	11:35:20	26	-1,485013	-78,457553			11	8	1,82	3927,1	0,8	367	0,000061	6,77	0%	100%
12	11:45:23	31	-1,483599	-78,456122			11,2	9	1,73	4018,3	0,84	365	0,000067	7,48	0%	100%
13	11:56:41	40	-1,482656	-78,454874			10,9	8	1,61	4105,5	0,84	372	0,000054	6,03	0%	100%
14	12:11:38	31	-1,481778	-78,452523			10,5	7	1,5	4246,2	0,75	371	0,000060	6,71	0%	100%
15	12:23:49	30	-1,480342	-78,451566			9,8	8	1,32	4328,7	0,8	370	0,000048	5,39	0%	100%
16	12:35:38	27	-1,478978	-78,449982			9,5	6	1,36	4385,9	0,65	375	0,000066	7,40	0%	100%
17	12:48:45	31	-1,478269	-78,448137			8,9	8	1,29	4465,1	0,8	370	0,000076	8,44	100%	0%
18	13:05:33	29	-1,476570	-78,445585			7,8	6	1,2	4590,5	0,65	372	0,000062	6,86	0%	100%
19	13:16:23	31	-1,475280	-78,443452			7,5	8	1,19	4686,3	0,8	372	0,000073	8,12	100%	0%
20	13:31:02	29	-1,472192	-78,442309			7	6	1,13	4792,6	0,65	375	0,000059	6,55	0%	100%
Total		29,15					10,38	7,10	1,90	3816,31	0,74	367,95	0,000066	7,33		70%

	Hora	Tiempo envío seg	Coordenadas Lora Latitud	Coordenadas lora Longitud	Coordenada s geo Latitud	Coordenadas geo Longitud	Temperatura °C	# Satelites	Velocidad km/h	Altitud m	Veracidad %	Batería mV	Error de distancia Grados	Error de distancia Metros	Dentro o Fuera de Rango	Exito %
1	9:40:35	31	-1,495807	-78,479978	-1,495759	-78,479936	9,5	8	2,4	2936,2	0,8	360	0,000064	7,10	0%	100%
2	9:52:31	40	-1,493922	-78,478613	-1,493889	-78,478563	11	6	2,31	2985,1	0,65	362	0,000060	6,67	0%	100%
3	9:58:15	30	-1,493109	-78,476675	-1,49308	-78,476615	11,5	7	2,67	3052,5	0,75	359	0,000067	7,42	0%	100%
4	10:12:25	23	-1,492498	-78,474211	-1,492469	-78,474178	12	7	2,5	3126,6	0,75	362	0,000044	4,89	0%	100%
5	10:20:29	21	-1,491863	-78,471353	-1,491923	-78,471282	11	6	2,41	3224,7	0,65	365	0,000093	10,35	100%	0%
6	10:36:54	20	-1,491419	-78,469064	-1,491378	-78,469007	11,5	8	2,65	3304,2	0,8	367	0,000070	7,82	0%	100%
7	10:42:50	25	-1,490960	-78,466601	-1,490908	-78,46655	11,4	6	2,54	3374,8	0,65	364	0,000073	8,11	100%	0%
8	11:02:27	31	-1,489150	-78,464504	-1,489101	-78,464461	12,1	8	2,3	3510,4	0,8	372	0,000065	7,26	0%	100%
9	11:16:45	25	-1,487278	-78,462488	-1,487231	-78,462423	12	6	2,15	3628,6	0,65	374	0,000080	8,93	100%	0%
10	11:28:38	32	-1,486137	-78,460004	-1,486078	-78,459959	11,5	6	2	3636,8	0,65	365	0,000074	8,26	100%	0%
Total		27,8					11,35	6,80	2,39	3277,99	0,72	365,00	0,000069	7,68	0%	60%

El error de distancia en metros varió en las pruebas, con los valores más bajos en 4.89 metros y los más altos en 10,35 metros como se observa en la Figura 86. A pesar de esta variabilidad, los errores permanecieron en rangos aceptables. Las pruebas realizadas en el parque del Volcán Tungurahua, con su topografía variable y la presencia de obstáculos como edificios y vegetación, podrían haber afectado la precisión del sistema de localización, especialmente en áreas con mayor interferencia.

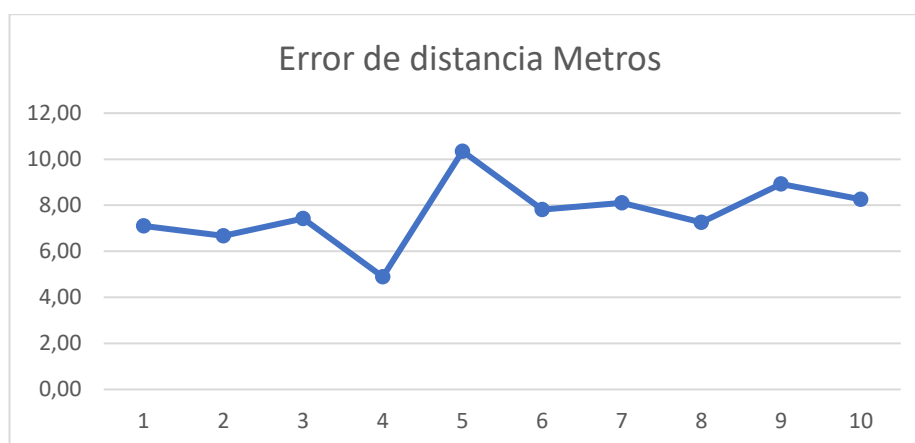


Figura 86. Gráfico del error de distancia en metros – Ruta Sur Puela

La temperatura de la prueba varió entre 9.5°C y 12.1°C como se observa en la Figura 87, lo que es coherente con un ambiente montañoso como el Volcán Tungurahua. A pesar de las fluctuaciones, el rango de temperatura observado es adecuado para la operación del sistema de rastreo sin que la temperatura haya afectado negativamente el desempeño de los equipos, garantizando la fiabilidad de los datos en este contexto.

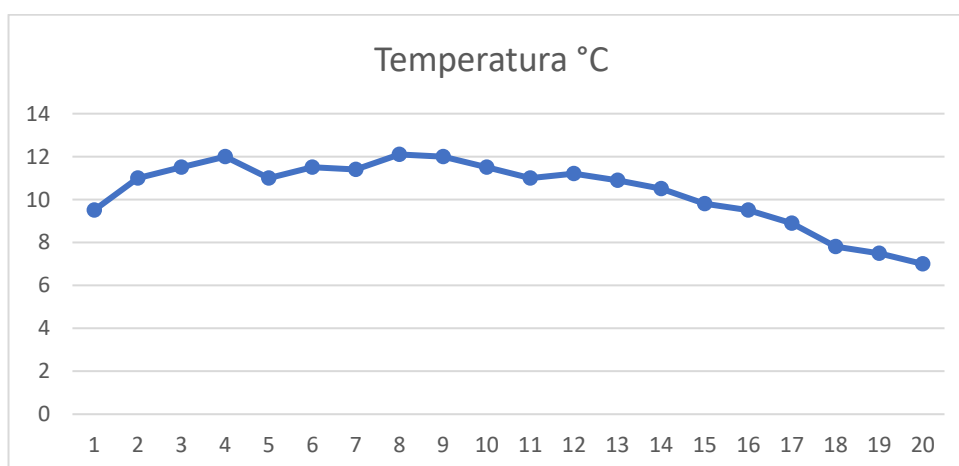


Figura 87. Gráfico de variación de temperatura C° – Ruta Sur Puela

Los niveles del consumo de batería mostraron una ligera caída, desde 0.75V hasta 0.65V a lo largo de las pruebas como se observa en la Figura 88, lo que sugiere un consumo moderado. Esto indica que el sistema tiene un consumo eficiente de energía, permitiendo su funcionamiento durante un tiempo prolongado. La caída en la batería no es significativa, lo que indica una optimización adecuada para ambientes de bajo consumo, como es requerido en las zonas montañosas.

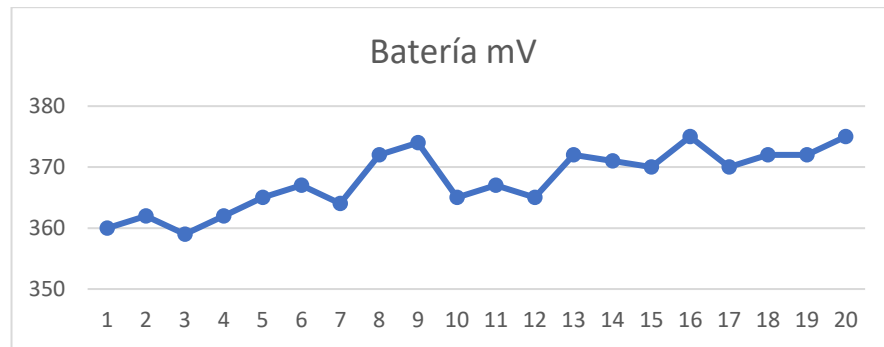


Figura 88. Gráfico de variación del consumo de batería – Ruta Sur Puela

La velocidad promedio registrada fue de 1.90 km/h, lo que indica que las pruebas se realizaron a una velocidad moderada. La temperatura promedio fue de 10.38°C. El sistema detectó un promedio de 7 satélites, lo que garantiza una adecuada cobertura para la geolocalización. La altitud promedio fue de 3816.31 metros, la veracidad de los datos fue alta, con un valor promedio de 0.74, lo que indica que los datos obtenidos fueron bastante precisos. El consumo de batería se mantuvo en un promedio de 367.95 mV, lo que permitió una duración adecuada de las pruebas. El error de distancia promedio fue de 7.33 metros, lo que muestra una buena precisión de la geolocalización en condiciones complejas de terreno. El porcentaje de éxito fue de 70%, como se observa en la Figura 89, lo que refleja un rendimiento aceptable. El despliegue del sistema se puede comprobar en la Tabla 29.

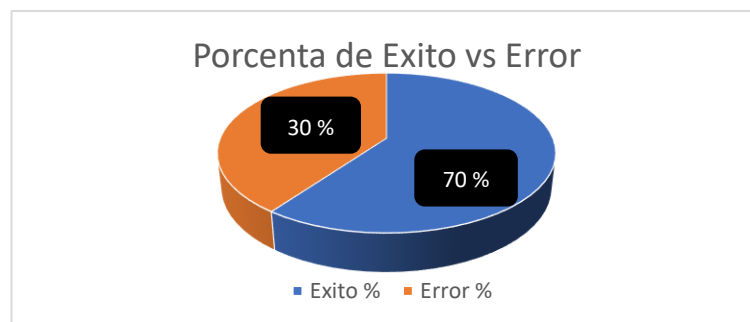
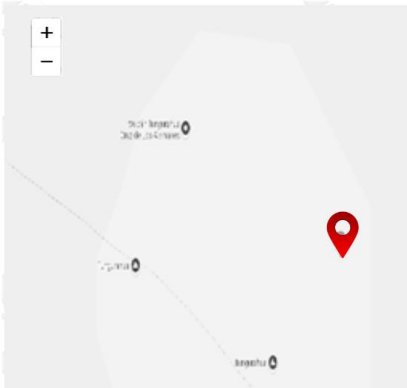


Figura 89. Gráfico de Éxito vs Error – Ruta Sur Puela.

Tabla 29. Despliegue del sistema Ruta Sur – Volcán Tungurahua

Ruta Sur Volcán Tungurahua Puela - Chimborazo

GEOLOCALIZADOR

LATITUD 1	-1,491419		LATITUD 2	-1,436595
LONGITUD 1	-78,469064		LONGITUD 2	-78,443147
VELOCIDAD 1	2,65		VELOCIDAD 2	2,69
ALTITUD 1	3304,2		ALTITUD 2	3271,6
VERACIDAD 1	0,8		VERACIDAD 2	0,8
SATELITES 1	8		SATELITES 2	8

Hora SL1: 10:36:54

Hora SL1: 10:36:54

¡Emergencia senderista 2 🧑🏻‍🦴🧑🏻‍🦴! Estoy perdido 📍

📍 Mi ubicación es:

Latitud: -1,491419 📍

Longitud: -78,469064 📍

🌐 Ver en Google Maps: <https://www.google.com/maps?q=-1.491419,-78.469064>

1°16'04.0"S 78°37'27.7"W

Find local businesses, view maps and get driving directions in Google Maps.

10:36







3.9 Resultado de encuesta de satisfacción

Como se observa en el Anexo F, los encuestados expresaron una alta satisfacción con el diseño del prototipo, destacando su adecuación para el trabajo de campo, se analizó los resultados con la prueba estadística Chi-cuadrado de independencia detallada en la Ecuación (1). Esta prueba te permitirá analizar si hay una relación significativa entre las variables categóricas. El 75% de los participantes consideró que el prototipo fue efectivo, aunque un 25% lo calificó como regular. En cuanto a su rendimiento, el 75% indicó que el prototipo cumplió con sus expectativas, mientras que un 25% mencionó que lo hizo parcialmente. Sin embargo, todos coincidieron en que la duración de la batería es un área crítica para mejorar. La mayoría (50%) calificó el prototipo con un 3 sobre 5, mientras que el 50% restante le dio un 4.

3.10 Costos del prototipo y su implementación

Los costos asociados al proyecto de investigación son cubiertos íntegramente por el investigador, y se distribuyen entre el software, que incluye los recursos de la nube y los servicios IoT, y el hardware o componentes físicos, que comprenden los elementos del prototipo para la muñeca del alpinista, detallados en la Tabla 30.

Tabla 30. Costos del prototipo de geolocalización

Nº	Concepto	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Baterías	3	\$6.00	\$18.00
2	Modulo Heltec v2	4	\$40.00	\$160.00
3	Módulos GPS	2	\$30.00	\$60.00
4	Carcasa Portable	3	\$25.00	\$75.00
5	Guía del volcán Tungurahua	4	\$20.00	\$80.00
6	Materiales electrónicos	4	\$2	\$8
7	Materiales de oficina	200	\$0.05	\$10.00
8	Google Cloud	4 meses	\$8.00	\$32.00
9	Impresiones	4 meses	\$5.00	\$20.00
10	Internet	4 meses	\$25.00	\$100.00
11	Transporte	4 meses	\$25.00	\$100.00
12	Alimentación	4 meses	\$50.00	\$200.00
Subtotal				\$863.00
Imprevistos 10%				\$86.30
TOTAL				\$949.30

Los costos asociados a la propuesta de mejora del proyecto se distribuyen entre el software, que incluye los recursos de la nube y los servicios IoT, y el hardware o

componentes físicos, que comprenden los elementos del prototipo para la muñeca del alpinista, detallados en la Tabla 31.

Tabla 31. Costos de propuesta de mejora del prototipo de geolocalización

N°	Concepto	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Baterías	4	\$6.00	\$24.00
2	Modulo Heltec v2	4	\$40.00	\$200.00
3	Módulos GPS	2	\$30.00	\$60.00
4	Carcasa Portable	4	\$25.00	\$100.00
5	Guía del volcán Tungurahua	4	\$20.00	\$80.00
6	Materiales electrónicos	4	\$2	\$8
7	Materiales de oficina	200	\$0.05	\$10.00
8	Google Cloud	4 meses	\$8.00	\$32.00
9	Impresiones	4 meses	\$5.00	\$20.00
10	Internet	4 meses	\$25.00	\$100.00
11	Transporte	4 meses	\$25.00	\$100.00
12	Alimentación	4 meses	\$50.00	\$200.00
Subtotal				\$934.00
Imprevistos 10%				\$93.40
TOTAL				\$1027.40

3.11 Análisis final

El proyecto de geolocalización para el volcán Tungurahua ha dado resultados prometedores durante las pruebas realizadas en las rutas Norte y Sur. En la Ruta Norte, la velocidad promedio alcanzó los 2.03 km/h y el error de distancia fue de 7.29 metros, lo que se traduce en un 75% de éxito. Estos datos reflejan una buena precisión en la localización. En la Ruta Sur, la velocidad promedio fue de 1.90 km/h, y el error de distancia se mantuvo en 7.33 metros, con un 70% de éxito. Aunque el rendimiento fue algo menor en esta ruta debido a las condiciones más complejas del terreno, el sistema aún funcionó de manera aceptable.

En cuanto a los costos, el prototipo original se construyó por un total de \$949.30, cubriendo elementos clave como baterías, módulos GPS, y gastos operativos como internet y alimentación. Sin embargo, para mejorar la cobertura y la estabilidad del sistema en terrenos más complejos, se propuso la adición de un nodo retransmisor extra, lo que aumentaría el costo a \$1027.40. Esta mejora tiene el potencial de optimizar aún más el rendimiento, extendiendo la cobertura y mejorando la fiabilidad de la comunicación, especialmente en áreas con más obstáculos.

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El turismo y las actividades de exploración en las zonas montañosas de Tungurahua, particularmente alrededor del volcán, están expuestas a riesgos considerables que afectan la seguridad de los exploradores. De acuerdo con las estadísticas, entre 2015 y 2025, se han registrado múltiples incidentes trágicos, como la desaparición de la joven campeona de Trail Running en 2024, y muertes en el volcán Chimborazo debido a avalanchas y caídas, con tiempos de rescate que van desde 1 a 5 días. Las causas principales de estos accidentes son condiciones climáticas extremas, terreno inestable y la falta de preparación adecuada. El 45% de los alpinistas mencionaron la ausencia de equipos de geolocalización como una de las principales razones para no poder ser localizados rápidamente en caso de emergencia.
- El análisis del equipamiento en los refugios y rutas de exploración en el volcán Tungurahua revela serias limitaciones en la cobertura de comunicación, con radios que alcanzan señales de -140 dBm a -120 dBm en áreas remotas. Según la encuesta, el 62% de los exploradores señaló la falta de equipos adecuados como un gran riesgo. El sistema ECU 911 también enfrenta dificultades en zonas de alto riesgo por la falta de cobertura constante. Los sensores científicos son útiles, pero no garantizan la seguridad total. La implementación de tecnologías como LoRaWAN y geolocalización en tiempo real es esencial para mejorar la seguridad en estas rutas.
- Las características del dispositivo electrónico diseñado con LoRaWAN para la localización y monitoreo de exploradores en las rutas del volcán Tungurahua incluyen un botón de emergencia y tres estados visuales: rojo para emergencias, amarillo si el explorador no presenta movimiento, y verde cuando se encuentra en condiciones normales. Este dispositivo está equipado con un módulo GPS NEO-6M, una batería de 8800 mAh de bajo consumo energético y utiliza el protocolo MQTT para la transmisión de datos. Con un alcance de

hasta 3 km, garantiza comunicación eficiente en áreas remotas. Según la encuesta, el 78% de los exploradores destacó la falta de sistemas de monitoreo en tiempo real como un riesgo importante.

- El sistema de localización y análisis de datos para el monitoreo de exploradores en el volcán Tungurahua emplea LoRaWAN para la transmisión de datos a distancias de hasta 3 km, y GPS NEO-6M para obtener coordenadas con una precisión de ± 6 metros en tiempo real. La comunicación se gestiona mediante el protocolo MQTT, lo que garantiza un consumo energético eficiente. Los datos se almacenan en Google Cloud utilizando una base de datos phpMyadmin para asegurar la accesibilidad y el procesamiento en tiempo real. Node-RED se utiliza para visualizar los datos en un mapa interactivo, mejorando la toma de decisiones para los equipos de rescate. Se realizaron pruebas de afinamiento en condiciones controladas, antes de realizar las pruebas finales en el volcán Tungurahua, garantizando la fiabilidad y efectividad del sistema en condiciones extremas.
- La simulación dos repetidores en las Rutas Norte - Pondoá y Ruta Sur - Puela ha demostrado una mejora significativa en varios parámetros clave de la transmisión de señal. La reducción de la obstrucción y la pérdida de camino han optimizado la propagación de la señal, especialmente en áreas de difícil acceso. La mejora en la zona de Fresnel y el aumento del campo eléctrico refuerzan la calidad de la señal, garantizando una transmisión más estable y confiable. Además, el nivel de recepción (Rx) ha mejorado considerablemente, pasando de -120.2 dBm a -75.6 dBm en la Ruta Sur, lo que asegura una mejor cobertura, incluso en zonas remotas.

4.2 Recomendaciones

- Para mejorar la seguridad en las actividades de exploración en las zonas montañosas de Tungurahua, es fundamental implementar un registro previo de ingreso de los alpinistas y exploradores en un sistema centralizado. Este registro debe incluir datos personales, itinerarios y equipos con los que cuentan, permitiendo a las autoridades y equipos de rescate tener información actualizada sobre los exploradores en todo momento. Además, un sistema de geolocalización en tiempo real utilizando tecnologías como LoRaWAN y GPS NEO-6M sería crucial para permitir una localización rápida y precisa de los alpinistas, se mejoraría la respuesta ante emergencias, reduciendo significativamente el tiempo de rescate, actualmente de entre 1 a 5 días, y aumentando la seguridad de los exploradores en condiciones extremas.
- Para mejorar el alcance y la calidad de la señal en las rutas Norte y Sur del volcán Tungurahua, se recomienda ubicar el nodo retransmisor a una altura de 10 metros. Esta altura optimiza la línea de vista y reduce las obstrucciones causadas por el terreno accidentado, lo que permitirá una mejor propagación de la señal. Con esta mejora, se espera incrementar la tasa de éxito del sistema de geolocalización en áreas de difícil acceso, superando los problemas de comunicación experimentados por los exploradores y garantizando una cobertura más confiable en todo el recorrido.
- Para asegurar la autonomía necesaria para expediciones más largas, se recomienda optimizar el código del prototipo para mejorar la eficiencia energética. Además, es importante implementar un arreglo de baterías con mayor capacidad de almacenamiento, como baterías de mayor amperaje o baterías adicionales conectadas en paralelo, lo que permitirá alcanzar las 8 horas de duración requeridas para monitoreos prolongados en rutas más exigentes.

- Para mejorar la precisión del sistema en áreas con vegetación densa y formaciones rocosas, se recomienda modificar la programación del envío de datos a cada 2 segundos. Esto permitirá obtener actualizaciones más frecuentes y precisas, reduciendo el margen de error de 7.37 metros en estas zonas. Al aumentar la frecuencia de envío de datos, se optimizará la cobertura y se mejorará la fiabilidad del sistema, garantizando una localización más precisa de los exploradores en terrenos complejos y asegurando su seguridad.
- Para mejorar aún más la cobertura y la fiabilidad del sistema en las Rutas Norte - Pondoá y Ruta Sur - Puela, se recomienda ubicar los repetidores a una altura de 10 metros. Esto optimizará la línea de vista y permitirá una mejor propagación de la señal, especialmente en zonas de difícil acceso. Además, para asegurar la autonomía de los repetidores, se sugiere integrar un sistema de carga solar. Esto garantizará que los repetidores mantengan su funcionamiento continuo sin depender de fuentes externas de energía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] «How deadly is Mount Everest?», 21 de marzo de 2019. Accedido: 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbc.com/news/world-47418215>
- [2] V. Díaz y C. M. Díaz Valentín, «10 turistas perdidos en una excursión fueron rescatados en el nevado El Altar», *El Comercio*. Accedido: 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/turistas-rescate-altar-goe-bomberos.html>
- [3] «Una cruz y una bandera para recordar a Kevin Pazmiño, joven que murió extraviado en el volcán Tungurahua», *Primicias*. Accedido: 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.primicias.ec/sucesos/rescate-kevin-pazmino-cruz-volcan-tungurahua-74717/>
- [4] «Bomberos suspenden la búsqueda de desaparecidos en el volcán Cayambe», *Primicias*. Accedido: 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/bomberos-suspension-busqueda-desaparecidos-volcan-cayambe/>
- [5] E. Telégrafo, «Cotopaxi: Turistas se perdieron por más de 14 horas en el volcán», *El Telégrafo*. Accedido: 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/locales/189/cotopaxi-turistas-perdieron-14-horas-volcan>
- [6] S. Sendra, L. García, J. Lloret, I. Bosch, y R. Vega-Rodríguez, «LoRaWAN Network for Fire Monitoring in Rural Environments», *Electronics*, vol. 9, n.º 3, Art. n.º 3, mar. 2020, doi: 10.3390/electronics9030531.
- [7] M. G. Jeison Edwin, «Sistema electrónico de monitoreo de signos vitales y geolocalización para alpinistas del Parque Nacional Cotopaxi (PNC) mediante tecnología Iot», mar. 2023, Accedido: 9 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/38469>
- [8] E. F. Cando Toapanta, «Sistema de comunicación Iot para el rastreo y localización de niños con tecnología Sigfox para la ciudad de Ambato, Ecuador», feb.

2024, Accedido: 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/40786>

[9] S. J. Asqui Llangarí, «Diseño e implementación de un sistema con tecnología Lorawan para localización de niños entre 0 y 11 años en ambientes abiertos de alta concurrencia.», may 2024, Accedido: 9 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/21777>

[10] A. Correa y D. Eduardo, «Diseño e implementación de un sistema de localización y rastreo GPS de lanchas pesqueras utilizando comunicación inalámbrica».

[11] E. G. Acuña Acuña, «Aplicación de minería de datos e Internet de las Cosas (IoT) para Productos Biomédicos», *TECHNO Rev. Int. Technol. Sci. Soc. Rev. Rev. Int. Tecnol. Cienc. Soc.*, vol. 13, n.º 1, ene. 2023, doi: 10.37467/revtechno.v12.3444.

[12] L. Q. Muelas, «Las bases de datos espaciales como origen de las Smart City», Geoinnova. Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://geoinnova.org/blog-territorio/las-bases-de-datos-espaciales-como-origen-de-las-smart-city/>

[13] «¿Qué es un almacenamiento de datos? - Explicación sobre el almacenamiento de datos - AWS», Amazon Web Services, Inc. Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aws.amazon.com/es/what-is/data-warehouse/>

[14] «Red Inalámbrica - Qué es, tipos, ventajas, desventajas y ejemplos», <https://concepto.de/>. Accedido: 21 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://concepto.de/red-inalambrica/>

[15] Y. K. Huang, «IoT de banda estrecha: Todo lo que necesita saber sobre NB-IoT», MOKOSmart #1 Solución de dispositivo inteligente en China. Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mokosmart.com/what-is-narrowband-iot-nb-iot/>

[16] «¿Qué es sigfox? – SIGFOX». Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sigfox.com.py/que-es-sigfox/>

- [17] Y. K. Huang, «¿Qué es la tecnología LoRaWAN y cómo funciona?», MOKOSmart #1 Solución de dispositivo inteligente en China. Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mokosmart.com/lorawan-technology/>
- [18] Redacción, «Al menos tres personas murieron en el Carihuairazo, en Tungurahua, tras un accidente», www.ecuavisa.com. Accedido: 24 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecuavisa.com/noticias/ecuador/al-menos-tres-personas-murieron-en-el-carihuairazo-en-tungurahua-tras-un-accidente-NY2551249>
- [19] E. Demos y AFP, «La Jornada - Derrumbe en volcán de Ecuador mata a tres montañistas». Accedido: 24 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/10/24/mundo/derrumbe-en-volcan-de-ecuador-mata-a-tres-montanistas/>
- [20] «Localizan en Ecuador los cuerpos de tres alpinistas desaparecidos hace 20 años», Diario ABC. Accedido: 24 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.abc.es/internacional/20150824/abci-localizan-alpinistas-ecuador-201508240859.html>
- [21] «Por aire y tierra, buscan a deportista de 15 años desaparecida en Penipe», Primicias. Accedido: 24 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.primicias.ec/seguridad/busqueda-deportista-adolescente-desaparecida-penipe-tungurahua75769-75769/>
- [22] «El cuerpo del atleta y militar Patricio David Factos fue recuperado en la reserva de los Illinizas», Primicias. Accedido: 6 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.primicias.ec/sucesos/patricio-david-factos-cuerpo-encontrado-illinizas-atleta-ejercito-96723/>
- [23] «¿Necesito un GPS para hacer senderismo? Explorando la necesidad de dispositivos de navegación | Crate Club», Crate Club, LLC. Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://crateclub.com/es/blogs/carga/do-i-need-a-gps-for-backpacking-exploring-the-necessity-of-navigation-devices>

- [24] «Ministerio de Inclusión Económica y Social | Ecuador - Guía Oficial de Trámites y Servicios». Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.ec/mies>
- [25] «Si tienes un smartphone tienes un GPS - Montaña Segura». Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://montanasegura.com/si-tienes-un-smartphone-tienes-un-gps/?utm_source=chatgpt.com
- [26] «Red Nacional de Sismógrafos (RENSIG) - Instituto Geofísico - EPN». Accedido: 31 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.igepn.edu.ec/red-nacional-de-sismografos>
- [27] «Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica – Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, velará por un ambiente sano y el respeto de los derechos de la naturaleza o pacha mama». Accedido: 31 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ambiente.gob.ec/>
- [28] INTERNATIONAL GPS, *Emprendiendo con Rastreo: Navegando los Desafíos de la Tecnología GPS en Latinoamérica*, (3 de abril de 2024). Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=2Dr6UNtidj0>
- [29] «Wikiloc | Rutas del Mundo», Wikiloc | Rutas del Mundo. Accedido: 10 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikiloc.com/wikiloc/map.do>
- [30] «Volcanes – Servicio Integrado de Seguridad ECU 911». Accedido: 10 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecu911.gob.ec/volcanes/>
- [31] «Nuevos requisitos para realizar turismo de montaña en Ecuador», Metro Ecuador. Accedido: 10 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.metroecuador.com.ec/ec/turismo/2020/10/03/nuevos-requisitos-turismo-montana-ecuador.html>
- [32] «Mapa de cobertura Servicio Móvil Avanzado (SMA) – Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones». Accedido: 24 de abril de 2025. [En

línea]. Disponible en: <https://www.arcotel.gob.ec/mapa-de-cobertura-servicio-movil-avanzado-sma/>

[33] «Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos – Institución del Estado ecuatoriano encargada de liderar el Sistema Nacional Descentralizado de Gestión de Riesgos para garantizar la protección de personas y colectividades frente a los efectos negativos de emergencias y desastres de origen natural o antrópicos.» Accedido: 31 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/>

[34] «Bienvenidos a GPS.gov». Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.gps.gov/spanish.php?utm_source=chatgpt.com

[35] «Seguimiento de activos RFID y gestión de inventario | HID Global». Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.hidglobal.com/es/solutions/rfid-asset-tracking-inventory-management?utm_source=chatgpt.com

[36] «La importancia de llevar un dispositivo GPS en la naturaleza • Lainakai». Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://lainakai.com/la-importancia-de-llevar-un-dispositivo-gps-en-la-naturaleza/?utm_source=chatgpt.com

[37] «Tecnología LoRA y LoRAWAN - Catsensors». Accedido: 24 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.catsensors.com/es/lorawan/tecnologia-lora-y-lorawan>

[38] jecrespom, «Arquitecturas IoT», Aprendiendo Arduino. Accedido: 10 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/arquitecturas-iot/>

[39] «content.pdf». Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/c47971b3-66c2-42a0-9cc3-f585735c0eac/content>

[40] S. Turney, «Chi-Square Test of Independence | Formula, Guide & Examples», Scribbr. Accedido: 17 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.scribbr.com/statistics/chi-square-test-of-independence/>

- [41] E. Heraldo, «Cantones incrementaron cifras turísticas», El Heraldo. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.elheraldo.com.ec/cantones-incrementaron-cifras-turisticas/>
- [42] «Informes de turismo | MINCIT - Ministerio de Comercio, Industria y Turismo». Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mincit.gov.co/estudios-economicos/estadisticas-e-informes/informes-de-turismo>
- [43] «Estadísticas de turismo internacional. Enero de 2025», 2025.
- [44] «Módulo GPS NEO-6M», AV Electronics. Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://avelectronics.cc/producto/modulo-gps-neo-6m/>
- [45] «Amazon.com: DIYmalls BN-180 GPS Glonass módulo TTL NMEA-0183 1Hz 9600bps para Arduino Aircraft RC FPV Drone Control de vuelo : Electrónica». Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.amazon.com/DIYmalls-Glonass-Raspberry-Aircraft-Betaflight/dp/B086ZKWYP5>
- [46] «NEO-7M-0 u-blox | Mouser», Mouser Electronics. Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mouser.com/ProductDetail/u-blox/NEO-7M-0?qs=KUoIvG%2F9Iib2dHa1StWjzQ%3D%3D>
- [47] «MÓDULO TINYFOX», TECA PERU S.A.C. Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://teca.pe/en/shop/sku-tinyfox-modulo-tinyfox-6>
- [48] «WiFi LoRa 32(V2), ESP32 + SX1262 LoRa Node, Meshtastic and LoRaWAN compatible — Phaseout – Heltec Automation». Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32v2/>
- [49] Y. K. Huang, «¿Qué es un módulo LoRa?? Cómo funcionan los dispositivos de largo alcance», MOKOSmart #1 Solución de dispositivo inteligente en China. Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mokosmart.com/what-is-a-lora-module/>

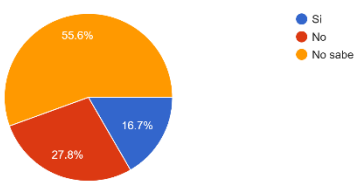
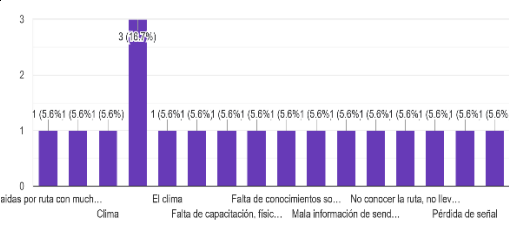
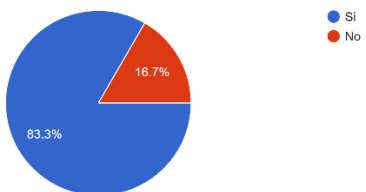
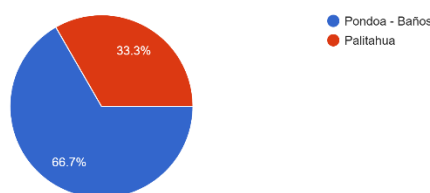
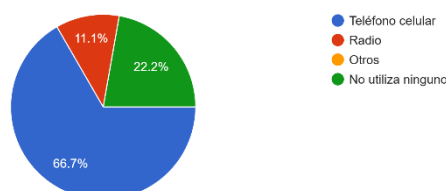
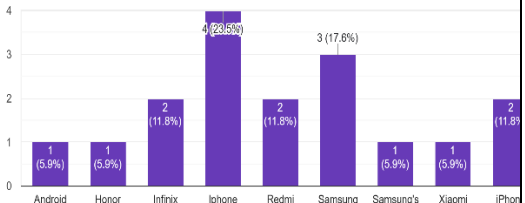
- [50] «MySQL», Google Cloud. Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cloud.google.com/mysql>
- [51] «MongoDB Atlas», Google Cloud. Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cloud.google.com/mongodb>
- [52] «DB Browser for SQLite». Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sqlitebrowser.org/>
- [53] phpMyAdmin contributors, «phpMyAdmin», phpMyAdmin. Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.phpmyadmin.net/>
- [54] «Node-RED Software de desarrollo – TUPUNATRON». Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tupunatron.com/producto/node-red-software-de-desarrollo/>
- [55] «Apache Kafka», Apache Kafka. Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://kafka.apache.org/>
- [56] «¿Qué es Apache Flink? - Explicación sobre Apache Flink - AWS», Amazon Web Services, Inc. Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aws.amazon.com/es/what-is/apache-flink/>
- [57] «¿Qué es AWS? - Computación en la nube con Amazon Web Services», Amazon Web Services, Inc. Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aws.amazon.com/es/what-is-aws/>
- [58] «Qué es Azure: Servicios en la nube de Microsoft | Microsoft Azure». Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://azure.microsoft.com/es-es/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-azure>
- [59] «Características | Documentos de IBM Cloud». Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cloud.ibm.com/docs/monitoring?topic=monitoring-features&locale=es>

- [60] S. Borges, «Servidor LAMP: ¿Qué es? Funcionamiento e Instalación paso a paso», Infranetworking. Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blog.infranetworking.com/servidor-lamp/>
- [61] «¿Qué es la pila MEAN? | IBM». Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/es-es/think/topics/mean-stack>
- [62] «Introducción a Django - Aprende desarrollo web | MDN». Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://developer.mozilla.org/es/docs/Learn_web_development/Extensions/Server-side/Django/Introduction
- [63] «¿Qué es ASP.NET? | .NET», Microsoft. Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dotnet.microsoft.com/es-es/learn/aspnet/what-is-aspnet>

ANEXOS

Anexo A. Encuesta de levantamiento de requerimiento para el prototipo

Nº	Pregunta	Grafico	Interpretación
1	¿Cuál es su edad?		El gráfico muestra que la mayoría de los encuestados tienen 25 años (22.2%), seguidos por 28 años (16.7%) y 31 años (11.1%), con una distribución variada en edades de 23 a 50 años.
2	¿De qué géneros es?		El gráfico muestra que el 77.8% de los encuestados son hombres, el 22.2% son mujeres, y no hay respuestas para "otro".
3	¿Cuál ruta usa normalmente?		El gráfico muestra que el 66.7% de los encuestados eligieron Pondoá-Baños, el 22.2% seleccionaron Pallathua, y el 11.1% eligieron "otro".
4	¿Cuánto tiempo tarda aproximadamente en hacer el recorrido de ida y vuelta?		El gráfico muestra que el 47.1% de los encuestados realiza una actividad entre 8 a 10 horas, y el resto se distribuye en otras opciones.
5	¿Con Qué tipo de personas realiza normalmente este recorrido?		El gráfico muestra que el 72.2% de los encuestados son jóvenes (18-30 años) y el 27.8% son adultos (31-50 años).
6	¿Ha tenido algún incidente o accidente durante el recorrido?		El gráfico muestra que el 83.3% de los encuestados respondió "Sí" y el 16.7% respondió "No".
7	¿Qué tipo de incidentes ha experimentado? (Puede elegir más de uno)		El gráfico muestra que los incidentes más frecuentes son "Golpes o caídas" y "Pérdida de señal o comunicación", con un 64.7% cada uno, seguidos por "Otros" (17.6%).

8	¿Existe un registro formal de ingreso, incidentes o emergencias en la zona?		El gráfico muestra que el 55.6% de los encuestados respondió "Sí", el 27.8% respondió "No" y el 16.7% indicó "No sabe".
9	¿Cuáles cree que son las causas principales de los incidentes?		El gráfico muestra que el "Clima" es el factor principal (36.3%), seguido por varios otros factores con un 6.5% cada uno.
10	En caso de una emergencia, ¿cómo suele actuar?	- Buscar un lugar donde pueda refugiarse - Llamar a la Policía - Grito auxilio y llamo al 911 - Pega el pique - Guardo la calma - Busco ayuda - De una forma tranquila y cautelosa - Llamada de emergencia - Mantener la calma y usar los radios para solicitar ayuda	En esta pregunta abierta la mayoría de las respuestas responden a mantener la calma y buscar ayudar por algún medio de comunicación
11	¿Ha experimentado problemas de comunicación durante el recorrido?		El gráfico muestra que el 83.3% de los encuestados respondió "Sí" y el 16.7% respondió "No"
12	¿En qué rutas o zonas suele encontrar problemas de comunicación o señal?		El gráfico muestra que el 66.7% de los encuestados reportan problemas en Pondoá-Baños y el 33.3% en Pallathua.
13	¿Utiliza algún medio tecnológico para comunicarse durante el recorrido?		El gráfico muestra que el 66.7% usa teléfono celular, el 22.2% usa radio y el 11.1% no usa ningún medio tecnológico.
14	En caso de usar celular, ¿qué marca utiliza principalmente?		El gráfico muestra que la mayoría usa iPhone (23.5%), seguido de Samsung (17.6%) y otras marcas con un 11.8%.

15	¿Qué aplicaciones utiliza para comunicarse o en caso de emergencia?	WhatsApp Telegram Llamadas telefónicas SMS Otra(s)	El gráfico muestra que el 64.7% usa llamadas telefónicas, el 23.5% usa WhatsApp y el 11.8% usa Telegram
----	---	--	---

Anexo B. Codificación del nodo móvil

```
//----- Include Library.
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <TinyGPS++.h>
#include <Wire.h> // Biblioteca para la comunicación I2C
#include <Adafruit_GFX.h> // Biblioteca gráfica de Adafruit
#include <Adafruit_SSD1306.h> // Biblioteca para la pantalla OLED

//-----
// Definiciones para los pines de la pantalla OLED
#define OLED_SDA 4 // Pin SDA de la pantalla OLED
#define OLED_SCL 15 // Pin SCL de la pantalla OLED
#define OLED_RST 16 // Pin de reset de la pantalla OLED
#define SCREEN_WIDTH 128 // Ancho de la pantalla OLED, en píxeles
#define SCREEN_HEIGHT 64 // Altura de la pantalla OLED, en píxeles

// Crea una instancia para la pantalla OLED
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RST);

// Define the RX and TX pins for Serial 2
#define RXD2 21
#define TXD2 22
#define GPS_BAUD 9600
int day, month, year, localHour;

//----- LoRa Pin / GPIO configuration.
#define ss 18
#define rst 14
#define dio0 26
//-----pulsador emergencia
#define BUTTON_PIN 34
boolean alerta = false;
int pulseCount = 0;
unsigned long lastDebounceTime = 0;
const unsigned long debounceDelay = 50;
bool lastButtonState = HIGH;
bool buttonPressed = false;

// The TinyGPS++ object
TinyGPSPlus gps;

// Create an instance of the HardwareSerial class for Serial 2
HardwareSerial gpsSerial(2);
// Función para ajustar la hora UTC a la zona horaria -6
int adjustHourToTimeZone(int utcHour, int &day, int &month, int &year) {
```

```

int adjustedHour = utcHour - 5; // Ajuste para zona horaria -6
if (adjustedHour < 0) {
    adjustedHour += 24; // Ajusta si la hora se vuelve negativa
    // Retrocede un día
    day--;
    if (day < 1) {
        // Retrocede el mes y ajusta el día
        month--;
        if (month < 1) {
            month = 12;
            year--;
        }
        // Calcula el número de días del mes anterior
        if (month == 2) {
            day = (year % 4 == 0 && (year % 100 != 0 || year % 400 == 0)) ? 29 : 28;
        } else if (month == 4 || month == 6 || month == 9 || month == 11) {
            day = 30;
        } else {
            day = 31;
        }
    }
}
return adjustedHour;
}

//----- Variable declaration to hold incoming and outgoing data.
String Incoming = "";
String Message = "";
//----- LoRa data transmission configuration.
//-----
// PLEASE UNCOMMENT AND SELECT ONE OF THE "LocalAddress" VARIABLES BELOW.

//byte LocalAddress = 0x02;    //--> address of this device (Slave 1).
byte LocalAddress = 0x03;    //--> address of this device (Slave 2).

byte Destination_Master = 0x01; //--> destination to send to Master (ESP32).
//----- Millis / Timer to update temperature and humidity values from
DHT11 sensor.
unsigned long previousMillis_UpdateDHT11 = 0;
const long interval_UpdateDHT11 = 2000;
//
Subroutines for sending data (LoRa Ra-02).
void sendMessage(String Outgoing, byte Destination) {
    LoRa.beginPacket();    //--> start packet
    // LoRa.write(Destination);    //--> add destination address
    LoRa.write(Destination_Master);    //--> add destination address
    LoRa.write(LocalAddress);    //--> add sender address
    LoRa.write(Outgoing.length());    //--> add payload length
    LoRa.print(Outgoing);    //--> add payload
    LoRa.endPacket();    //--> finish packet and send it
}
Subroutines for receiving data (LoRa Ra-02).
void onReceive(int packetSize) {
    if (packetSize == 0) return;    //--> if there's no packet, return

    //----- read packet header bytes:
    int recipient = LoRa.read();    //--> recipient address
    byte sender = LoRa.read();    //--> sender address
    byte incomingLength = LoRa.read();    //--> incoming msg length

```

```

// Clears Incoming variable data.
Incoming = "";
//----- Get all incoming data.
while (LoRa.available()) {
    Incoming += (char)LoRa.read();
}
//----- Check length for error.
if (incomingLength != Incoming.length()) {
    Serial.println();
    Serial.println("error: message length does not match length");
    return; //--> skip rest of function
}
//----- Checks whether the incoming data or message for this device.
if (recipient != LocalAddress) {
    Serial.println();
    Serial.println("This message is not for me.");
    return; //--> skip rest of function
}
//----- if message is for this device, or broadcast, print details:
Serial.println();
Serial.println("Received from: 0x" + String(sender, HEX));
//Serial.println("Message length: " + String(incomingLength));
Serial.println("Message: " + Incoming);
//Serial.println("RSSI: " + String(LoRa.packetRssi()));
//Serial.println("Snr: " + String(LoRa.packetSnr()));
//-----

// Calls the Processing_incoming_data() subroutine.
Processing_incoming_data();
}
//
__ Subroutines to process data from incoming messages, then send messages to the Master.
void Processing_incoming_data() {
    //----- Conditions for sending messages to Master.
    if (Incoming == "SDS2") {
        Message = "";
        Message = "SL2," + String(gps.location.lat(), 6) + "," + String(gps.location.lng(), 6) + "," +
String(gps.speed.kmph()) + "," + String(gps.altitude.meters()) + "," + String(gps.hdop.value() /
100.0) + "," + String(gps.satellites.value()) + "," + String(localHour) + "," +
String(gps.time.minute()) + "," + String(gps.time.second()) + "," + String(alerta);
        // Message = "SL2," + String(gps.location.lat(), 6) + "," + String(gps.location.lng(), 6) + "," +
String(gps.speed.kmph()) + "," + String(gps.altitude.meters()) + "," + String(gps.hdop.value() /
100.0) + "," + String(gps.satellites.value()) + "," + String(localHour) + "," +
String(gps.time.minute()) + "," + String(gps.time.second());

        // Message = "SL1," + String(h) + "," + String(t) + "," + String(LED_1_State) + "," +
String(LED_2_State);

        Serial.println();
        Serial.println("Send message to Master");
        Serial.print("Message: ");
        Serial.println(Message);

        sendMessage(Message, Destination_Master);
    }
    //-----
}

```

```

//
__ VOID SETUP
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:

  Serial.begin(115200);
  // Start Serial 2 with the defined RX and TX pins and a baud rate of 9600
  gpsSerial.begin(GPS_BAUD, SERIAL_8N1, RXD2, TXD2);
  Serial.println("Serial 2 started at 9600 baud rate");
  // --- Configurar pin del pulsador ---
  pinMode(BUTTON_PIN, INPUT_PULLUP);

  //----- Settings and start Lora Ra-02.
  LoRa.setPins(ss, rst, dio0);

  Serial.println();
  Serial.println("Start LoRa init...");
  if (!LoRa.begin(915E6)) { // initialize ratio at 915 or 433 MHz
    Serial.println("LoRa init failed. Check your connections.");
    while (true); // if failed, do nothing
  }
  Serial.println("LoRa init succeeded.");
  //-----

  // Reinicia la pantalla OLED mediante software
  pinMode(OLED_RST, OUTPUT);
  digitalWrite(OLED_RST, LOW);
  delay(20);
  digitalWrite(OLED_RST, HIGH);

  // Inicializa la pantalla OLED
  Wire.begin(OLED_SDA, OLED_SCL);
  if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3c, false, false)) { // Dirección 0x3C para
128x32
    Serial.println(F("Error al inicializar SSD1306"));
    for (;;) // Detener si falla la inicialización
  }

  // Configuración inicial de la pantalla
  display.clearDisplay();
  display.setTextColor(WHITE);
  display.setTextSize(1);
  display.setCursor(0, 0);
  display.print(" SENDERISTA ");
  display.setCursor(0, 10);
  display.print(" DOS ");
  display.setCursor(0, 40);
  display.print("COMUNICACION ");
  display.setCursor(0, 50);
  display.print(" LORA ");
  display.display();
  //-----
}
LOOP
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:

  bool currentButtonState = digitalRead(BUTTON_PIN);

```

```

// Detección de flanco de bajada (presión de botón)
if (lastButtonState == HIGH && currentButtonState == LOW) {
    unsigned long currentTime = millis();
    if (currentTime - lastDebounceTime > debounceDelay) {
        buttonPressed = true;
        lastDebounceTime = currentTime;
    }
}

lastButtonState = currentButtonState;

if (buttonPressed) {
    pulseCount++;
    buttonPressed = false;

    if (pulseCount == 1) {
        alerta = true;
        Serial.println("Emergencia = ALERTA!");
    } else if (pulseCount == 2) {
        alerta = false;
        Serial.println("Emergencia = SIN NOVEDAD!");
        pulseCount = 0; // Reiniciar contador
    }
}

//----- Millis / Timer to update the temperature and humidity values
from the DHT11 sensor every 2 seconds (see the variable interval_UpdateDHT11).
unsigned long currentMillis_UpdateDHT11 = millis();

if (currentMillis_UpdateDHT11 - previousMillis_UpdateDHT11 >= interval_UpdateDHT11) {
    previousMillis_UpdateDHT11 = currentMillis_UpdateDHT11;

    while (gpsSerial.available() > 0) {
        gps.encode(gpsSerial.read());
    }
    if (gps.location.isUpdated() ) {

        Serial.print("LAT: ");
        Serial.println(gps.location.lat(), 6);
        Serial.print("LONG: ");
        Serial.println(gps.location.lng(), 6);
        Serial.print("SPEED (km/h) = ");
        Serial.println(gps.speed.kmph());
        Serial.print("ALT (min)= ");
        Serial.println(gps.altitude.meters());
        Serial.print("HDOP = ");
        Serial.println(gps.hdop.value() / 100.0);
        Serial.print("Satellites = ");
        Serial.println(gps.satellites.value());

        //Serial.println(gps.satellites.value());

        // Ajusta la hora y corrige la fecha si es necesario
        day = gps.date.day();
        month = gps.date.month();
        year = gps.date.year();
        localHour = adjustHourToTimeZone(gps.time.hour(), day, month, year);

        // Imprimir la hora ajustada a la zona horaria -6

```

```

    // int localHour = adjustHourToTimeZone(gps.time.hour());
    Serial.print("Time in UTC: ");
        Serial.println(String(gps.date.year()) + "/" + String(gps.date.month()) + "/" +
String(gps.date.day()) + "," + String(localHour) + ":" + String(gps.time.minute()) + ":" +
String(gps.time.second()) );
    Serial.println("");

    // Mostrar datos en la pantalla OLED
    display.clearDisplay();
    display.setCursor(0, 0);
    display.print("LAT: ");
    display.print(gps.location.lat(), 6);

    display.setCursor(0, 10);
    display.print("LONG: ");
    display.print(gps.location.lng(), 6);

    display.setCursor(0, 20);
    display.print("ALT: ");
    display.print(gps.altitude.meters(), 2);
    display.print(" m");

    display.setCursor(0, 30);
    display.print("UTC: ");
    display.print(String(year));
    display.print("/");
    display.print(String(month));
    display.print("/");
    display.print(String(day));

    display.setCursor(0, 40);
    display.print(localHour);
    display.print(":");
    display.print(gps.time.minute());
    display.print(":");
    display.print(gps.time.second());
    display.setCursor(0, 50);
    if (alerta) {
        display.print("----EMERGENCIA----");
    } else {
        display.print("----NORMAL----");
    }
    display.display(); // Actualizar la pantalla con la nueva información
}

}
//-----

//----- parse for a packet, and call onReceive with the result:
onReceive(LoRa.parsePacket());
//-----
}

```

Anexo C. codificación nodo retransmisor

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>

//----- LoRa Pin / GPIO configuration.
#define ss 18
#define rst 14
#define dio0 26

//----- Variable declaration to hold incoming and outgoing data.
String Incoming = "";
String Message = "";
String CombinedMessage = "";
// Variables para almacenar los últimos mensajes de SDS1 y SDS2
String lastMessageSDS1 = ""; // Último mensaje de SDS1
String lastMessageSDS2 = ""; // Último mensaje de SDS2

//----- LoRa data transmission configuration.
byte LocalAddress = 0x01; //--> address of this device (Master Address).
byte Destination_ESP32_Slave_1 = 0x02; //--> destination to send to Slave 1 (ESP32).
byte Destination_ESP32_Slave_2 = 0x03; //--> destination to send to Slave 2 (ESP32).
byte Destination_ESP32_Master_2 = 0x04; //--> address of Master 2 (where to send CombinedMessage).

//----- Variable declaration for Millis/Timer.
unsigned long previousMillis_SendMSG = 0;
const long interval_SendMSG = 1000;

// Variable declaration to count slaves.
byte Slv = 0;

//
//----- Subroutines for sending data (LoRa Ra-02).
void sendMessage(String Outgoing, byte Destination) {
  LoRa.beginPacket(); //--> start packet
  LoRa.write(Destination); //--> add destination address
  LoRa.write(LocalAddress); //--> add sender address
  LoRa.write(Outgoing.length()); //--> add payload length
  LoRa.print(Outgoing); //--> add payload
  LoRa.endPacket(); //--> finish packet and send it
}

Subroutines for receiving data (LoRa Ra-02).
void onReceive(int packetSize) {
  if (packetSize == 0) return; //--> if there's no packet, return

  //----- read packet header bytes:
  int recipient = LoRa.read(); //--> recipient address
  byte sender = LoRa.read(); //--> sender address
  byte incomingLength = LoRa.read(); //--> incoming msg length
  //-----

  // Clears Incoming variable data.
  Incoming = "";

  //----- Get all incoming data.
  while (LoRa.available()) {
```

```

    Incoming += (char)LoRa.read();
}
//----- Check length for error.
if (incomingLength != Incoming.length()) {
    Serial.println();
    Serial.println("error: message length does not match length");
    return; //--> skip rest of function
}
//----- Checks whether the incoming data or message for this device.
if (recipient != LocalAddress) {
    Serial.println();
    Serial.println("This message is not for me.");
    return; //--> skip rest of function
}
//-----

//----- if message is for this device, or broadcast, print details:
Serial.println();
Serial.println("Received from: 0x" + String(sender, HEX));
//Serial.println("Message length: " + String(incomingLength));
Serial.println("Message: " + Incoming);
//Serial.println("RSSI: " + String(LoRa.packetRssi()));
//Serial.println("Snr: " + String(LoRa.packetSnr()));
//-----

// Si el mensaje es de SDS1, lo almacenamos
if (Incoming.startsWith("SL1")) {
    lastMessageSDS1 = Incoming; // Guardamos el último mensaje de SDS1
}

// Si el mensaje es de SDS2, lo almacenamos
if (Incoming.startsWith("SL2")) {
    lastMessageSDS2 = Incoming; // Guardamos el último mensaje de SDS2
}

// Si ambos mensajes han sido recibidos, concatenamos y mostramos
if (lastMessageSDS1 != "" && lastMessageSDS2 != "") {
    // CombinedMessage = "Último mensaje de SDS1: \n" + lastMessageSDS1 + "\n" + "Último
mensaje de SDS2: \n" + lastMessageSDS2;
    CombinedMessage = lastMessageSDS1 + "," + lastMessageSDS2;

    // Imprime los mensajes combinados
    Serial.println("Mensajes combinados:");
    Serial.println(CombinedMessage);
    // Enviar el mensaje combinado al Maestro 2
    sendMessage(CombinedMessage, Destination_ESP32_Master_2);
}
//-----
}
VOID SETUP
void setup() {
    // put your setup code here, to run once:

    Serial.begin(115200);

    //----- Settings and start Lora Ra-02.
    LoRa.setPins(ss, rst, dio0);

    Serial.println("Start LoRa init...");

```

```

if (!LoRa.begin(915E6)) {           // initialize radio at 915 or 433 MHz
  Serial.println("LoRa init failed. Check your connections.");
  while (true);                    // if failed, do nothing
}
Serial.println("LoRa init succeeded.");
//-----
}
VOID LOOP
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:

  //----- Millis or Timer to send message / command data to slaves every
  1 second (see interval_SendCMD variable).
  // Messages are sent every one second is alternately.
  // > Master sends message to Slave 1, delay 1 second.
  // > Master sends message to Slave 2, delay 1 second.

  unsigned long currentMillis_SendMSG = millis();

  if (currentMillis_SendMSG - previousMillis_SendMSG >= interval_SendMSG) {
    previousMillis_SendMSG = currentMillis_SendMSG;

    Slv++;
    if (Slv > 2) Slv = 1;

    Message = "SDS" + String(Slv);

    //:..... Condition for sending message / command data to Slave 1 (ESP32 Slave 1).
    if (Slv == 1) {
      Serial.println();
      Serial.print("Send message to ESP32 Slave " + String(Slv));
      Serial.println(" : " + Message);
      sendMessage(Message, Destination_ESP32_Slave_1);
    }
    //:.....

    //:..... Condition for sending message / command data to Slave 2 (UNO Slave 2).
    if (Slv == 2) {
      Serial.println();
      Serial.print("Send message to ESP32 Slave " + String(Slv));
      Serial.println(" : " + Message);
      sendMessage(Message, Destination_ESP32_Slave_2);
    }

    //----- parse for a packet, and call onReceive with the result:
    onReceive(LoRa.parsePacket());
    //-----
  }
}

```

Anexo D. Codificación nodo Gateway

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
//-----
//----- OLED Display
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <ArduinoJson.h>
//----- LoRa Pin / GPIO configuration.
#define ss 18
#define rst 14
#define dio0 26
//-----
//-----
// Definiciones para los pines de la pantalla OLED
#define OLED_SDA 4 // Pin SDA de la pantalla OLED
#define OLED_SCL 15 // Pin SCL de la pantalla OLED
#define OLED_RST 16 // Pin de reset de la pantalla OLED
#define SCREEN_WIDTH 128 // Ancho de la pantalla OLED, en píxeles
#define SCREEN_HEIGHT 64 // Altura de la pantalla OLED, en píxeles

// Crea una instancia para la pantalla OLED
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RST);

const char* ssid = "Virus Troyano";
const char* password = "@@@@@@@@@@";
// Add your MQTT Broker IP address, example:
//const char* mqtt_server = "192.168.1.144";
//const char* mqtt_server = "35.232.94.172";
const char* mqtt_server = "34.70.227.240";

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

//----- Variable declaration to hold incoming and outgoing data.
String Incoming = "";
String SL1Data = "";
String SL2Data = "";

// Variables para almacenar los datos de SL1
float SL1_lat, SL1_lon, SL1_speed, SL1_altitude, SL1_accuracy;
int SL1_satellites, SL1_hour, SL1_minute, SL1_second, SL1_emergencia;
// Variables para almacenar los datos de SL2
float SL2_lat, SL2_lon, SL2_speed, SL2_altitude, SL2_accuracy;
int SL2_satellites, SL2_hour, SL2_minute, SL2_second, SL2_emergencia;
//-----

//----- LoRa data transmission configuration.
byte LocalAddress = 0x04; // Dirección del esclavo (este es el esclavo 3 en este caso).
byte Destination_Master = 0x01; // Dirección del maestro
//-----
String output;
StaticJsonDocument<128> doc;
String output1;
```

```

StaticJsonDocument<128> doc1;

//
__ Subroutines for receiving data (LoRa Ra-02).
void onReceive(int packetSize) {
  if (packetSize == 0) return; //--> if there's no packet, return

  int recipient = LoRa.read();    //--> recipient address
  byte sender = LoRa.read();      //--> sender address
  byte incomingLength = LoRa.read(); //--> incoming msg length

  Incoming = "";

  while (LoRa.available()) {
    Incoming += (char)LoRa.read();
  }

  if (incomingLength != Incoming.length()) {
    Serial.println("Error: message length does not match length");
    return;
  }

  if (recipient != LocalAddress) {
    Serial.println("This message is not for me.");
    return;
  }

  // Mostrar el mensaje combinado recibido
  Serial.println("Mensaje combinado recibido:");
  Serial.println(Incoming);

  // Extraemos y descomponemos los datos de SL1
  if (Incoming.indexOf("SL1") != -1) {
    int sl1_start = Incoming.indexOf("SL1") + 3; // Saltamos "SL1"
    int sl1_end = Incoming.indexOf("SL2") - 1; // Fin antes de "SL2"
    SL1Data = Incoming.substring(sl1_start, sl1_end);

    // Verificar la cadena SL1Data
    Serial.println("Datos SL1 (antes de descomponer):");
    Serial.println(SL1Data); // Imprimir la cadena para revisar su contenido

    // Limpiar cualquier coma o espacio innecesario al principio de la cadena
    if (SL1Data.charAt(0) == ',') {
      SL1Data = SL1Data.substring(1); // Eliminar el primer carácter si es una coma
    }

    // Descomponemos los datos de SL1 usando sscanf()
    int n = sscanf(SL1Data.c_str(), "%f,%f,%f,%f,%d,%d,%d,%d,%d", &SL1_lat, &SL1_lon,
    &SL1_speed, &SL1_altitude, &SL1_accuracy, &SL1_satellites, &SL1_hour, &SL1_minute,
    &SL1_second, &SL1_emergencia);

    // Verificar cuántos valores se leyeron correctamente
    Serial.print("-----Número de valores leídos de SL1: ");
    Serial.println(n);

    // Mostrar los datos descompuestos de SL1
    if (n == 10) { // Si se leyeron los 9 valores correctamente
      Serial.println("Latitud SL1: " + String(SL1_lat, 6));
      Serial.println("Longitud SL1: " + String(SL1_lon, 6));
    }
  }
}

```

```

        Serial.println("Velocidad SL1: " + String(SL1_speed, 2));
        Serial.println("Altitud SL1: " + String(SL1_altitude, 2));
        Serial.println("Veracidad SL1: " + String(SL1_accuracy, 2));
        Serial.println("Satélites SL1: " + String(SL1_satellites));
        Serial.println("Hora SL1: " + String(SL1_hour) + ":" + String(SL1_minute) + ":" +
String(SL1_second));
        Serial.println("Estado de emergencia: " + String(SL1_emergencia));
    } else {
        Serial.println("Error: No se pudieron leer todos los valores de SL1");
    }
    // Convertir las variables a String y luego a const char* para enviar
    String lat = String(SL1_lat, 6);
    String lon = String(SL1_lon, 6);
    String speed = String(SL1_speed, 2);
    String altitude = String(SL1_altitude, 2);
    String accuracy = String(SL1_accuracy, 2);
    String satellites = String(SL1_satellites);
    String time = "Hora SL1: " + String(SL1_hour) + ":" + String(SL1_minute) + ":" +
String(SL1_second);
    String eme = String(SL1_emergencia);

    // Convertir cada String a const char* y publicar
    client.publish("gps1/Latitud", lat.c_str());
    client.publish("gps1/Longitud", lon.c_str());
    client.publish("gps1/Velocidad", speed.c_str());
    client.publish("gps1/Altitud", altitude.c_str());
    client.publish("gps1/Veracidad", accuracy.c_str());
    client.publish("gps1/Satelites", satellites.c_str());
    client.publish("gps1/Hora", time.c_str());
    client.publish("gps1/Eme", eme.c_str());

    doc["DEVICE"] = "gps1";
    doc["lat1"] = lat.c_str();
    doc["long1"] = lon.c_str();
    serializeJson(doc, output);
    Serial.print("Publish message: ");
    Serial.println(output);
    client.publish("gps1", output.c_str());
}

// Extraemos y descomponemos los datos de SL2
if (Incoming.indexOf("SL2") != -1) {
    int sl2_start = Incoming.indexOf("SL2") + 3; // Saltamos "SL2"
    SL2Data = Incoming.substring(sl2_start);

    // Verificar la cadena SL2Data
    Serial.println("Datos SL2 (antes de descomponer):");
    Serial.println(SL2Data); // Imprimir la cadena para revisar su contenido

    // Limpiar cualquier coma o espacio innecesario al principio de la cadena
    if (SL2Data.charAt(0) == ',') {
        SL2Data = SL2Data.substring(1); // Eliminar el primer carácter si es una coma
    }

    // Descomponemos los datos de SL2 usando sscanf()
    int n = sscanf(SL2Data.c_str(), "%f,%f,%f,%f,%f,%d,%d,%d,%d,%d", &SL2_lat, &SL2_lon,
&SL2_speed, &SL2_altitude, &SL2_accuracy, &SL2_satellites, &SL2_hour, &SL2_minute,
&SL2_second, &SL2_emergencia);

```

```

// Verificar cuántos valores se leyeron correctamente
Serial.print("Número de valores leídos de SL2: ");
Serial.println(n);

// Mostrar los datos descompuestos de SL2
if (n == 10) { // Si se leyeron los 9 valores correctamente
  Serial.println("Latitud SL2: " + String(SL2_lat, 6));
  Serial.println("Longitud SL2: " + String(SL2_lon, 6));
  Serial.println("Velocidad SL2: " + String(SL2_speed, 2));
  Serial.println("Altitud SL2: " + String(SL2_altitude, 2));
  Serial.println("Veracidad SL2: " + String(SL2_accuracy, 2));
  Serial.println("Satélites SL2: " + String(SL2_satellites));
  Serial.println("Hora SL2: " + String(SL2_hour) + ":" + String(SL2_minute) + ":" +
String(SL2_second));
  Serial.println("Estado de emergencia: " + String(SL2_emergencia));

} else {
  Serial.println("Error: No se pudieron leer todos los valores de SL2");
}

// Convertir las variables SL2 a String y luego a const char* para publicar
String latSL2 = String(SL2_lat, 6);
String lonSL2 = String(SL2_lon, 6);
String speedSL2 = String(SL2_speed, 2);
String altitudeSL2 = String(SL2_altitude, 2);
String accuracySL2 = String(SL2_accuracy, 2);
String satellitesSL2 = String(SL2_satellites);
String timeSL2 = "Hora SL2: " + String(SL2_hour) + ":" + String(SL2_minute) + ":" +
String(SL2_second);
String eme2 = String(SL2_emergencia);

// Publicar cada valor en MQTT
client.publish("gps2/Latitud", latSL2.c_str());
client.publish("gps2/Longitud", lonSL2.c_str());
client.publish("gps2/Velocidad", speedSL2.c_str());
client.publish("gps2/Altitud", altitudeSL2.c_str());
client.publish("gps2/Veracidad", accuracySL2.c_str());
client.publish("gps2/Satelites", satellitesSL2.c_str());
client.publish("gps2/Hora", timeSL2.c_str());
client.publish("gps2/Eme2", eme2.c_str());

doc1["DEVICE"] = "gps2";
doc1["lat1"] = latSL2.c_str() ;
doc1["long1"] = lonSL2.c_str() ;
serializeJson(doc1, output1);
Serial.print("Publish message: ");
Serial.println(output1);
client.publish("gps1", output1.c_str());

}
display.clearDisplay();
display.setTextColor(WHITE);
display.setTextSize(1);
display.setCursor(0, 0);
display.print(" PUBLICANDO ");
display.setCursor(0, 10);
display.print(" DATOS ");
display.setCursor(0, 40);
display.print(" EN LA ");

```

```

display.setCursor(0, 50);
display.print("    NUBE    ");
display.display();

}
VOID SETUP
void setup() {
  Serial.begin(115200);

  setup_wifi();
  client.setServer(mqtt_server, 1883);
  client.setCallback(callback);
  LoRa.setPins(ss, rst, dio0);

  if (!LoRa.begin(915E6)) {
    Serial.println("LoRa init failed. Check your connections.");
    while (true);
  }
  Serial.println("LoRa init succeeded.");

  // Reinicia la pantalla OLED mediante software
  pinMode(OLED_RST, OUTPUT);
  digitalWrite(OLED_RST, LOW);
  delay(20);
  digitalWrite(OLED_RST, HIGH);

  // Inicializa la pantalla OLED
  Wire.begin(OLED_SDA, OLED_SCL);
  if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3c, false, false)) { // Dirección 0x3C para
128x32
    Serial.println(F("Error al inicializar SSD1306"));
    for (;;) // Detener si falla la inicialización
  }

  // Configuración inicial de la pantalla
  display.clearDisplay();
  display.setTextColor(WHITE);
  display.setTextSize(1);
  display.setCursor(0, 0);
  display.print(" NODO PARA ENVIO DE ");
  display.setCursor(0, 10);
  display.print("  DATOS A LA NUBE  ");
  display.setCursor(0, 40);
  display.print("  INICIANDO COMU  ");
  display.setCursor(0, 50);
  display.print("    LORA    ");
  display.display();
  //-----
}

void setup_wifi() {
  delay(10);
  // We start by connecting to a WiFi network
  Serial.println();
  Serial.print("Connecting to ");
  Serial.println(ssid);

  WiFi.begin(ssid, password);

```

```

while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(100);
    Serial.print(".");
}

Serial.println("");
Serial.println("WiFi connected");
Serial.println("IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
}

void callback(char* topic, byte* message, unsigned int length) {
    Serial.print("Message arrived on topic: ");
    Serial.print(topic);
    Serial.print(". Message: ");
    String messageTemp;

    for (int i = 0; i < length; i++) {
        Serial.print((char)message[i]);
        messageTemp += (char)message[i];
    }
    int resultado = messageTemp.toInt();

    Serial.println();

    // Feel free to add more if statements to control more GPIOs with MQTT

    // If a message is received on the topic esp32/output, you check if the message is either "on" or
    "off".
    // Changes the output state according to the message
    /*if (String(topic) == "servo/estado") {
        Serial.print("Changing output to ");
        if (messageTemp == "on") {
            Serial.println("on");
            digitalWrite(ledPin, HIGH);
        }
        else if (messageTemp == "off") {
            Serial.println("off");
            digitalWrite(ledPin, LOW);
        }
    }*/
}

void reconnect() {
    // Loop until we're reconnected
    while (!client.connected()) {
        Serial.print("Attempting MQTT connection...");
        // Attempt to connect
        if (client.connect("ESP8266Client")) {
            Serial.println("connected");
            // Subscribe
            // client.subscribe(topic_metros);
            // client.subscribe(topic_idvuelos);
            // client.subscribe(topic_direccion);
            // client.subscribe(topic_estado);
            //client.subscribe("servo / estado");
            //client.subscribe("servo / metros");
            //client.subscribe("servo / direccion");
        }
    }
}

```

```

    } else {
        Serial.print("failed, rc = ");
        Serial.print(client.state());
        Serial.println(" try again in 5 seconds");
        // Wait 5 seconds before retrying
        //delay(5000);
    }
}
}
//
__ VOID LOOP
void loop() {
    onReceive(LoRa.parsePacket());
    if (!client.connected()) {
        reconnect();
    }
    client.loop();
}

```

Anexo E. Simulación en Radio Mobile de rutas con 2 retransmisores - volcán Tungurahua



Anexo F. Encuesta de satisfacción del prototipo

Nº	Pregunta	Grafico	Interpretación
1	¿El diseño del prototipo es adecuado para su implementación en el terreno de trabajo?	Legend: Excelente (Blue), Buena (Red), Regular (Yellow), Mala (Green), Muy mala (Purple)	El gráfico muestra que el 100% de los encuestados piensa que el diseño del prototipo es adecuado
2	¿Qué tan efectivo consideras que es el prototipo para el propósito para el cual fue diseñado?	Legend: Muy efectivo (Blue), Efectivo (Red), Regular (Yellow), Poco efectivo (Green), Nada efectivo (Purple)	El gráfico muestra que el 75% de los encuestados piensa que el prototipo es efectivo, el 25% que es regular
3	¿En qué medida el prototipo cumple con tus expectativas de rendimiento?	Legend: Superó mis expectativas (Blue), Cumplió mis expectativas (Red), Cumplió parcialmente (Yellow), No cumplió mis expectativas (Green)	El gráfico muestra que el 75% de los encuestados, el prototipo cumple sus expectativas y el 25% que cumple parcialmente
4	¿Has experimentado alguna dificultad al usar el prototipo (problemas técnicos, fallos, errores)?	Legend: No, no he tenido problemas (Blue), Sí, pero fueron mínimos (Red), Sí, algunos problemas significativos (Yellow)	El gráfico muestra que el 75% de los encuestados no ha tenido problemas, mientras que el 25% si, pero mínimos
5	¿Qué opinas sobre la duración de la batería del prototipo durante las pruebas de campo?	Legend: Excelente duración (Blue), Buena duración (Red), Aceptable (Yellow), Baja duración (Green)	El gráfico muestra que el 100% de los encuestados piensa que la batería es de buena duración
6	En general, ¿cuál es tu grado de satisfacción con el prototipo?	Legend: 0 (0%), 1 (0%), 2 (50%), 3 (50%), 4 (0%), 5 (0%)	El gráfico muestra que el 50% de los encuestados en una escala de 5 le asignan una calificación de 3 y el 50% una calificación de 4

7	¿Qué características crees que se deben mejorar en el prototipo?	mejorar bateria Hacer un arreglo de baterías y mejoras la precisión La duracion de la bateria deberia ser mayor para poder aguantar excursiones Aumentar la duración de la batería	Todos los encuestados concluyen que se debe mejorar el tema de duración de la batería
---	--	--	---