



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

“DISPOSITIVO DE RASTREO PERSONAL PARA ENTORNOS URBANOS”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en
Mecatrónica

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Daniel Gustavo Yépez Cifuentes

DIRECTOR:

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi

Ibarra – Ecuador 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1005405954
APELLIDOS Y NOMBRES:	Yépez Cifuentes Daniel Gustavo
DIRECCIÓN:	Av. Hermanas Pazmiño y Los Galeanos
EMAIL:	dgyepezc@utn.edu.ec / danielypz191@gmail.com
TELÉFONO FIJO:	N/A
TELÉFONO MÓVIL:	0981962453

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“Dispositivo de rastreo personal para entornos urbanos”
AUTOR (ES):	Yépez Cifuentes Daniel Gustavo
FECHA: DD/MM/AAAA	23/03/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	☒ PREGRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	
ASESOR / DIRECTOR:	Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi MSc. Luz María Tobar Subia Contenido

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 23 de marzo de 2026

EL AUTOR:

Nombre: Yépez Cifuentes Daniel Gustavo



Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Certificación del director del trabajo de integración curricular

En mi calidad de director del trabajo de grado “Dispositivo de rastreo personal para entornos urbanos”, presentado por el egresado Daniel Gustavo Yépez Cifuentes, que opta por el título de ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, 23 de marzo de 2026

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi

Director de Tesis



Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Aprobación del comité calificador

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Dispositivo de rastreo personal para entornos urbanos”, elaborado por Daniel Gustavo Yépez Cifuentes, previo a la obtención del título de ingeniero en Mecatrónica, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Ibarra, 23 de marzo de 2026

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi

Director de Tesis

MSc. Luz María Tobar Subía Contento

Asesor

Dedicatorias

“El secreto de la existencia humana no solo está en vivir, sino también en saber para qué se vive.” — Fiódor Dostoyevski

Dedico este trabajo con todo mi corazón a las personas que han sido pilares fundamentales en mi vida y en esta odisea que hoy llega a su culminación.

A mis padres, Soniet y Gustavo, quienes no tuvieron las mismas oportunidades, pero que con amor, sacrificio y esfuerzo me brindaron todo lo que estuvo a su alcance para que yo pudiera llegar hasta aquí. Este logro también les pertenece, porque cada paso que doy está construido sobre todo lo que ustedes hicieron por mí. Hoy puedo decirles que su sacrificio no fue en vano. Espero que se sientan tan orgullosos de ser mis padres como yo me siento profundamente orgulloso de ser su hijo.

A mis hermanas, Cristina y Verónica, por su apoyo incondicional, por sus palabras de ánimo en los momentos difíciles y por estar siempre presentes en cada etapa de mi vida. Su cariño y confianza han sido una fuerza constante que me ha impulsado a seguir adelante.

A mi sobrino Mathias José, para que vea en su tío no solo un apoyo en todo momento, sino también un ejemplo de perseverancia. Deseo que siempre encuentre en mí a alguien que lo cuide, lo guíe y lo acompañe en su camino.

Finalmente, a quienes hicieron parte de mi vida y hoy ya no están, pero que de alguna manera creyeron en mí y dejaron una huella que permanece en mi memoria y en mi corazón.

Agradecimientos

En primer lugar, a la Universidad Técnica del Norte, por brindarme la formación académica, los conocimientos y las herramientas necesarias para culminar esta importante etapa de mi vida profesional.

De manera especial, expreso mi profundo agradecimiento a mis tutores de tesis por su orientación, acompañamiento y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo, así como por su tiempo, dedicación y guía en cada una de las etapas del proceso investigativo.

A mis padres, Soniet y Gustavo, por su apoyo incondicional, su confianza y por ser el pilar fundamental que me ha permitido avanzar y alcanzar esta meta.

A mis hermanas, Cristina y Verónica, y a mi sobrino Mathias, por su constante apoyo, comprensión y por brindarme motivación a lo largo de este proceso académico.

Finalmente, agradezco a mis amigos y a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron con su apoyo y motivación para la culminación de este trabajo.

Gracias Totales.

Índice general

Certificación del director del trabajo de integración curricular	II
Aprobación del director del comité calificador	III
Dedicatorias	IV
Agradecimientos	V
Índice general	VI
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	XI
Resumen	XIV
Abstract	XVI
1. Introducción	2
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. General	4

1.2.2. Específicos	4
1.3. Alcance y delimitación	4
1.4. Justificación	4
2. MARCO REFERENCIAL	6
2.1. Antecedentes	6
2.2. Marco Teórico	7
2.2.1. Sistemas de posicionamiento global	7
2.2.2. Tecnologías complementarias de geolocalización en entornos urbanos .	11
2.2.3. Análisis de dispositivos específicos	13
2.2.4. Comparativa de rendimiento y aplicabilidad en entornos urbanos	19
2.2.5. Aplicaciones de rastreo	20
2.2.6. Filtro de Kalman	21
2.2.7. Interfaces de control de módulos con comandos AT	23
2.2.8. Dispositivos IoT	25
3. MARCO METODOLÓGICO	28
3.1. Enfoque y tipos de investigación	28
3.2. Diseño de la Investigación	28
3.2.1. <i>Fase 1: Recopilación de datos de plataformas de rastreo personal y su aplicabilidad local.</i>	29
3.2.2. <i>Fase 2: Diseño de la arquitectura del dispositivo de rastreo propio.</i> . .	30
3.2.3. <i>Fase 3: Implementación de un prototipo y su visualización en tiempo real.</i>	30
4. Implementación y pruebas	32

4.1. Motivación	32
4.1.1. Evaluación de dispositivos de rastreo	34
4.2. Criterios para la selección de dispositivos	40
4.3. Configuración de Adafruit	43
4.3.1. Creación de la cuenta	43
4.3.2. Configuración del servicio web	45
4.3.3. Obtención de credenciales y clave de acceso MQTT	47
4.4. Integración con Matlab	47
4.5. Estimaciones del filtro de Kalman	48
4.6. Pruebas de funcionamiento del dispositivo	50
4.6.1. Validación de precisión	51
4.6.2. Localización por SMS	62
4.6.3. Autonomía del dispositivo	64
5. Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo a futuro	66
5.1. Conclusiones	66
5.2. Recomendaciones	67
5.3. Trabajo a futuro	67

Índice de figuras

1.1. Comparativa de robos en el Ecuador [3].	2
1.2. Red Nacional GPS del Ecuador – RENAGE [6].	3
2.1. Red Nacional GNSS del Ecuador – RENAGE [22].	8
2.2. Crecimiento de radiobases en el Ecuador [24].	10
2.3. Mapa de cobertura 4G en Ibarra – Ecuador [25].	11
2.4. Clip universal - Pebblebee [32].	14
2.5. Clip universal - Pebblebee [32].	15
2.6. Card universal - Pebblebee [33].	16
2.7. Dispositivo AirTag - Apple [34].	18
2.8. Funcionamiento del filtro de Kalman.	22
2.9. Hardware IoT.	26
2.10. Funcionamiento en dispositivos IoT [49].	26
3.1. Diagrama de bloques de la investigación.	29
4.1. Proceso de caracterización de plataformas de rastreo personal.	34
4.2. Comparativa de distancias entre dispositivos.	40
4.3. Placa de desarrollo LilyGo SIM7600G [55].	42

4.4. Menú de la página oficial de Adafruit.	43
4.5. Campos de registros.	44
4.6. Email de verificación.	44
4.7. Credenciales de la cuenta.	44
4.8. Menú de servicios de Adafruit.	45
4.9. Configuración del entorno.	45
4.10. Configuración del tablero.	45
4.11. Bloques en blanco.	46
4.12. Enlace de feed con el tablero.	46
4.13. Mapa en tiempo real.	46
4.14. Placa de desarrollo LilyGo SIM7600G	47
4.15. Credenciales únicas de la plataforma.	47
4.16. Funcionamiento del dispositivo.	50
4.17. Trayecto A referencia.	51
4.18. Trayecto A registrado.	52
4.19. Elevación del trayecto A de referencia.	52
4.20. Elevación del trayecto A registrado.	53
4.21. Trayecto B de referencia.	53
4.22. Trayecto B registrado.	54
4.23. Elevación del trayecto B de referencia.	54
4.24. Elevación del trayecto B registrado.	55
4.25. Trayecto A filtrado.	55
4.26. Trayecto C de referencia.	56

4.27. Trayecto C registrado.	56
4.28. Elevación del trayecto C de referencia.	57
4.29. Elevación del trayecto C registrado.	57
4.30. Ruta 3 - Elevación Raw.	57
4.31. Ruta 4 - Trazado completo de referencia.	58
4.32. Ruta 4 - Trazado completo registrado.	58
4.33. Elevación del trayecto D de referencia.	59
4.34. Elevación del trayecto D registrado.	59
4.35. Trayecto D filtrado.	59
4.36. Filtrado de elevación en el trayecto D.	60
4.37. Trayecto E filtrado.	61
4.38. Procesamiento de SMS.	62
4.39. Mensajes SMS.	63

Índice de tablas

2.1. Red nacional GNSS del Ecuador – RENAGE [24].	10
2.2. Comparativa de generaciones de redes móviles [30].	13
2.3. Comparativa de planes [31].	14
2.4. Especificaciones técnicas Tile Pro.	15
2.5. Especificaciones del dispositivo Pebblebee Clip [32]	16
2.6. Especificaciones del dispositivo Pebblebee Card [33].	17
2.7. Especificaciones del dispositivo AirTag [35].	18
2.8. Comparativa de tecnologías de rastreo.	19
2.9. Comparativa entre dispositivos adquiridos.	20
2.10. Comandos de control [45].	23
2.11. Comandos para inicialización y diagnóstico del módem [45].	24
2.12. Operación de registro y monitoreo de la red celular[45].	24
2.13. Conexión de datos móviles para transmisión MQTT[45].	24
2.14. Activación y adquisición de datos GNSS[45].	25
2.15. Envío y recepción de mensajes SMS [45].	25
4.1. Criterios y pruebas de dispositivos propuestos.	33

4.2. Caracterización de los dispositivos	35
4.3. Comparativa de alcance de rastreadores sin interferencias	35
4.4. Comparativa de alcance de rastreadores parcialmente cerrado	35
4.5. Comparativa de alcance de rastreadores con interferencias	36
4.6. Persistencia de actualización de ubicación en la red colaborativa A.	36
4.7. Persistencia de actualización de ubicación en la red colaborativa B.	37
4.8. Detección de rastreadores en puntos de control - Vuelta 1	37
4.9. Detección de rastreadores en puntos de control - Vuelta 2	38
4.10. Detección de rastreadores en puntos de control - Vuelta 3	38
4.11. Distancia estimada entre el teléfono y los dispositivos de rastreo.	39
4.12. Criterios de selección y módulos de comunicación [55, 56].	41
4.13. Especificaciones técnicas del dispositivo LILYGO T-SIM7600G [55].	42
4.14. Comparativa de rastreadores de posicionamiento	43
4.15. Criterios y pruebas de la placa LilyGo 7600G.	50
4.16. Métricas en la Rutas.	61
4.17. Resultados de coordenadas registradas y valor promedio	62
4.18. Comparativa de envío por SMS	62
4.19. Consumo de corriente en diferentes estados.	64
4.20. Comparativa de consumo y autonomía según intervalo de envío.	64
4.21. Resultados experimentales de autonomía del sistema.	65

Resumen

El rastreo personal mediante tecnologías de geolocalización se ha convertido en una herramienta relevante para aplicaciones de seguridad y monitoreo. Sin embargo, el desempeño de algunas soluciones depende de las condiciones tecnológicas presentes en el entorno donde se utilizan. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una solución de rastreo personal en tiempo real mediante tecnologías de geolocalización y comunicación móvil en entornos urbanos.

La investigación se desarrolló a partir de tres etapas principales. En primer lugar, se realizó la caracterización de plataformas de rastreo personal existentes con el fin de analizar su funcionamiento y comportamiento en el contexto local. Posteriormente, se diseñó una arquitectura de rastreo personal basada en la adquisición de posición mediante geolocalización satelital y la transmisión de datos a través de comunicación móvil. Finalmente, esta arquitectura fue implementada en un prototipo funcional que permite la visualización de la información de ubicación mediante un servicio web.

Las pruebas experimentales realizadas permitieron analizar el comportamiento de los datos de posicionamiento obtenidos durante diferentes recorridos urbanos. Los resultados evidenciaron diferencias en la frecuencia de actualización de la ubicación en las plataformas evaluadas, así como la capacidad del sistema propuesto para transmitir y visualizar información de locali-

zación en tiempo real.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran la factibilidad de implementar soluciones de rastreo personal mediante la integración de tecnologías de geolocalización y comunicación móvil utilizando infraestructura de telecomunicaciones disponible.

Keywords: Comunicación móvil, Geolocalización, GPS, Posicionamiento en tiempo real, Rastreo personal.

Abstract

Personal tracking using geolocation technologies has become an important tool for security and monitoring applications. However, the performance of some solutions depends on the technological conditions present in the environment where they are used. In this context, the aim of this study is to develop a real-time personal tracking solution using geolocation and mobile communication technologies in urban environments.

The research was carried out in three main stages. First, existing personal tracking platforms were characterized in order to analyze their operation and behavior in the local context. Subsequently, a personal tracking architecture was designed based on position acquisition using satellite geolocation and data transmission via mobile communication. Finally, this architecture was implemented in a functional prototype that allows location information to be viewed via a web service.

The experimental tests carried out allowed us to analyze the behavior of the positioning data obtained during different urban routes. The results showed differences in the frequency of

location updates on the platforms evaluated, as well as the ability of the proposed system to transmit and display location information in real time.

Overall, the results obtained demonstrate the feasibility of implementing personal tracking solutions by integrating geolocation and mobile communication technologies using available telecommunications infrastructure.

Keywords: Mobile communication, Geolocation, GPS, Real-time positioning, Personal tracking.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

El incremento sostenido de delitos contra la propiedad en entornos urbanos, especialmente robos y hurtos de bienes personales, evidencia una problemática creciente de seguridad que afecta a diversos sectores de la población. En Ecuador, durante el año 2021, los robos aumentan un 24,4 % respecto al año anterior, con un promedio mensual de 1.865 casos y un pico de 2.283 en julio. El robo de vehículos presenta un incremento del 48 %, con octubre como el mes de mayor incidencia. Estos delitos ocurren con mayor frecuencia en horarios nocturnos y de madrugada, siendo el viernes el día de mayor número de reportes. Las principales modalidades son el robo a viviendas (54,7 %) y la agresión (44 %)[1, 2], la evolución anual de estos delitos en el país (véase la Fig. 1.1) [3] [4].

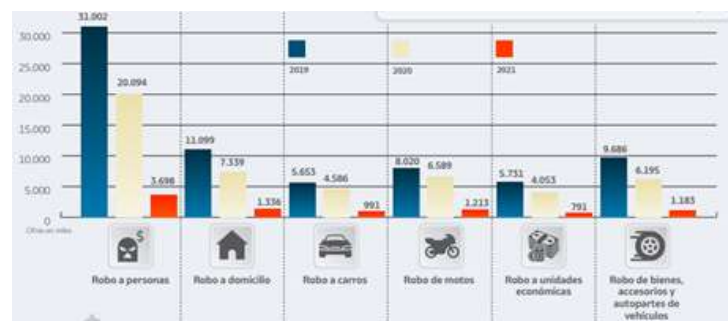


Fig. 1.1 Comparativa de robos en el Ecuador [3].

Ante este contexto, se identifica una necesidad creciente de soluciones tecnológicas accesibles que permitan rastrear objetos o personas en tiempo real. Aunque existen plataformas

comerciales consolidadas en el ámbito logístico o vehicular, su expansión hacia entornos personales, familiares y educativos enfrenta barreras relacionadas con el costo y la disponibilidad local. Esta limitación impide una adopción y representa un obstáculo para la mejora de la seguridad mediante herramientas tecnológicas. Además, la dependencia del GPS para navegación cotidiana reduce la carga cognitiva de los usuarios, pero también afecta negativamente su memoria espacial, generando una pérdida de reconocimiento del entorno [5]. No obstante, el país dispone de infraestructura nacional para georreferenciación mediante la Red Geodésica GPS, gestionada por el Instituto Geográfico Militar (véase la Fig.1.2). Esta red, conformada por 141 vértices distribuidos a escala nacional, constituye una base sólida para el desarrollo de sistemas de rastreo confiables, se presenta la distribución territorial de RENAGE [6].

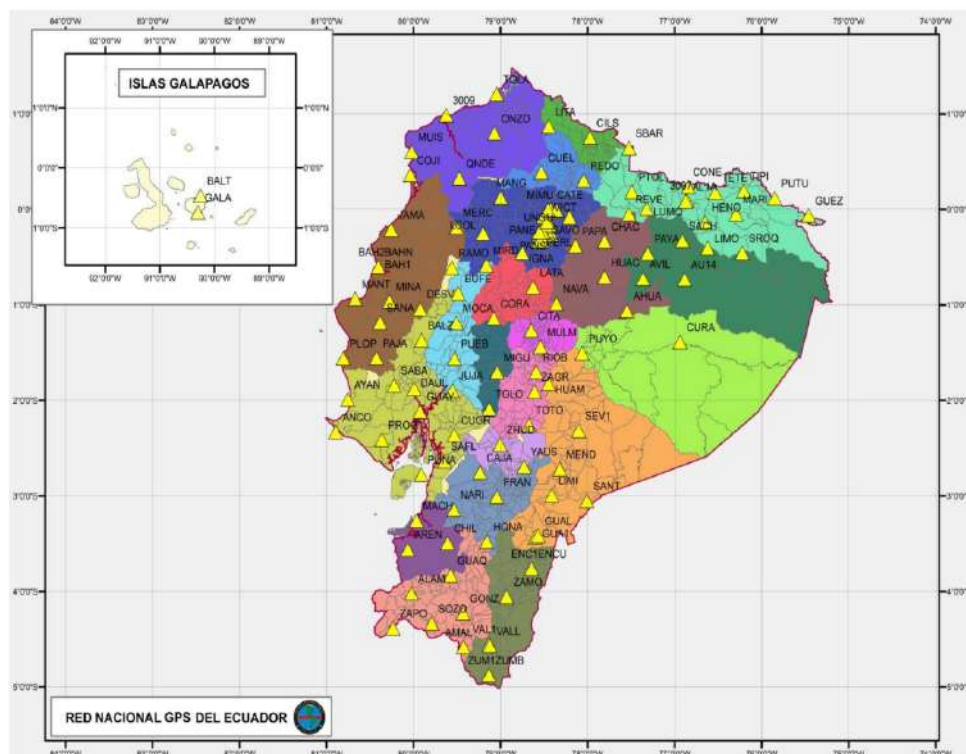


Fig. 1.2 Red Nacional GPS del Ecuador – RENAGE [6].

Frente a este diagnóstico, se propone desarrollar un sistema de rastreo personal que combine tecnologías de geolocalización, transmisión de datos móviles, almacenamiento en la nube y visualización en tiempo real mediante un servicio web. Esta solución busca ser económica, funcional y adaptable a diversos contextos urbanos, aportando al bienestar ciudadano mediante la prevención, monitoreo y localización de bienes o personas en riesgo.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Desarrollar una solución de rastreo personal en tiempo real mediante tecnologías de geolocalización y comunicación móvil en entornos urbanos.

1.2.2. Específicos

- Caracterizar plataformas de rastreo personal existentes, considerando su funcionamiento, costo y aplicabilidad local.
- Diseñar una arquitectura de rastreo personal basada en geolocalización y comunicación móvil de bajo costo.
- Implementar un prototipo funcional con visualización en tiempo real mediante servicio web.

1.3. Alcance y delimitación

Esta investigación comprende el análisis, comparación y valoración de diversas plataformas de seguimiento personal existentes en el mercado, con la finalidad de entender su operación, eficacia y posibles restricciones en diferentes situaciones reales y cuya tecnología varía entre redes de comunicación colaborativas. Estos dispositivos serán expuestos a escenarios simulados con técnicas de monitoreo y seguimiento, en contextos urbanos en la ciudad de Ibarra. Adicionalmente, se implementa un dispositivo de seguimiento propio, que incorporará tecnologías de geolocalización y comunicación móvil. Lo cual permitirá enviar la información obtenida a una base de datos en tiempo real. Esta información será posteriormente visualizada mediante un servicio web, simulando su uso por parte de un usuario interesado en conocer la ubicación de un objeto o persona bajo su responsabilidad. Esta evaluación permite identificar ventajas, desventajas, posibles mejoras y escenarios de aplicación más adecuados para cada tipo de tecnología, sin centrarse en el modelo específico, sino en el principio de funcionamiento y la capacidad de respuesta en condiciones reales.

1.4. Justificación

La presente investigación es relevante en el ámbito del rastreo personal, ya que propone el desarrollo e implementación de una solución tecnológica accesible que integra electrónica,

programación, comunicación inalámbrica y sistemas embebidos para atender una necesidad social concreta. La propuesta busca ofrecer una alternativa de bajo costo frente a plataformas comerciales, cuya adquisición puede resultar limitada en determinados contextos.

Desde una perspectiva social, el proyecto aporta al fortalecimiento de la seguridad ciudadana mediante la exploración de mecanismos viables de monitoreo en tiempo real, especialmente en entornos urbanos donde el acceso a tecnologías de rastreo es restringido. Asimismo, en el ámbito de la ingeniería, el trabajo contribuye al análisis comparativo de plataformas de geolocalización y comunicación móvil, promoviendo el desarrollo de soluciones contextualizadas, sostenibles y escalables basadas en herramientas abiertas y componentes de bajo costo.

Capítulo 2

MARCO REFERENCIAL

2.1. Antecedentes

El seguimiento mediante sistemas de posicionamiento constituye una herramienta fundamental en el análisis de la movilidad y los sistemas de transporte. Diversos estudios comparan algoritmos para la detección de modos de transporte, destacando el uso de técnicas de aprendizaje supervisado, aunque persiste la falta de consenso sobre el método óptimo y la eficiencia en el etiquetado de datos [7]. La aplicación de tecnologías de rastreo se extiende a contextos educativos y de seguridad infantil. En [8], se presenta un sistema que notifica en tiempo real la ubicación de un autobús escolar mediante Java y Firebase, aumentando la percepción de seguridad de los padres. De forma complementaria, en [9] se propone un sistema para optimizar el transporte público mediante GPS y GSM, con notificaciones vía SMS que informan sobre la localización del vehículo. Los sistemas de alerta de emergencia también han sido abordados. En [10], se detalla un dispositivo que integra Arduino Uno y GSM SIM900A para enviar mensajes de ubicación y realizar llamadas automáticas ante situaciones de riesgo. De igual forma en [11], se plantea un sistema para rastreo infantil con delimitación geográfica y alertas por SMS cuando el usuario excede el área permitida. El uso de plataformas GPS de código abierto ha cobrado relevancia. En [12], se destaca Traccar como opción eficiente, integrándose con servidores VPS y dispositivos como el TKStar TK909. En Ecuador, se han desarrollado interfaces abiertas utilizando herramientas como Django, OpenStreetMap y Leaflet para la visualización de datos satelitales [13]. Otras investigaciones desarrollan sistemas basados en dispositivos como el GPS Tracker 303H, integrados con bases de datos en Firebase para almacenamiento y visualización en tiempo real [14]. Asimismo, se ha incorporado el filtro de Kalman en aplicaciones que estiman posición y velocidad con mayor precisión, incluso en trayectorias curvas [15]. Redes no convencionales como Sigfox también han sido utilizadas en dispositivos de rastreo infantil, facilitando la visualización de coordenadas geográficas desde una app Android

[4]. En [16], se analiza un sistema para rastrear Smart TVs robadas mediante el módulo TT-GO T-SIM7600G-H R2, integrando visualización en Ubidots y alertas en Telegram. Sistemas orientados al cuidado de adultos mayores han sido implementados con delimitación geográfica y alertas en caso de salida de zonas seguras. La precisión medida es de ± 3.017 m, con almacenamiento en Firebase y transmisión vía red móvil [17]. La integración de módulos GPS con hardware como el GV300 y aplicaciones móviles ha permitido el rastreo vehicular en tiempo real, mostrando parámetros como velocidad y dirección mediante conexión GSM [18]. Asimismo, la plataforma PetGPS emplea Traccar, MIT App Inventor y el dispositivo TKStar 909 para rastrear mascotas con visualización desde un servidor VPS7. Finalmente, en [19] se analiza el impacto de variables urbanas y climáticas en la precisión del GPS en mochilas inteligentes, destacando una menor exactitud en zonas densamente edificadas. En [20], se valida la robustez de collares GPS para mascotas con funciones avanzadas como comunicación bidireccional y escucha remota, mejorando la capacidad de respuesta ante emergencias.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Sistemas de posicionamiento global

En un mundo cada vez más interrelacionado, la habilidad para identificar una localización exacta en cualquier instante y sitio se ha convertido en esencial. Los Sistemas de Posicionamiento, constituyen el núcleo central de esta habilidad. Estas innovadoras tecnologías emplean una red de satélites en órbita terrestre para enviar señales captadas por aparatos en la superficie, facilitando el cálculo preciso de las coordenadas geográficas. Desde el transporte de vehículos hasta la gestión de flotas, incluyendo aplicaciones de mapas en smartphones, la geolocalización por satélite ha revolucionado de manera drástica nuestra interacción con el medio ambiente. Sin embargo, para que esta información de ubicación sea realmente útil, a menudo se combina con otras tecnologías de comunicación, como servicios IoT, que facilitan la transmisión de estos datos en tiempo real, conectando así el punto en el mapa con el mundo digital.

2.2.1.1. Sistema global de navegación por satélite

Desde finales de mayo de 2022, se puede utilizar más de 130 satélites para sistemas de navegación por satélite operativos totalmente internacionales, tales como BeiDou Navigation Satellite System, Galileo, GLONASS y GPS. Es un método eficaz en el ámbito de la observación terrestre, no solo para aplicaciones convencionales de posicionamiento, sino también para aplicaciones de teledetección incorporadas [21]. El Instituto Geográfico Militar está a cargo de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador - REGME, la cual comprende un conjunto

de estaciones de seguimiento continuo, distribuidas estratégicamente a lo largo de todo el territorio nacional. Esta es la agrupación de estaciones de seguimiento continuo GNSS, vinculadas tiene como objetivo materializar en el país el sistema SIRGAS, repartidas por todo el territorio nacional, abarcando el 95 % de la superficie del país (mostrado en la Fig. 2.1) [22].

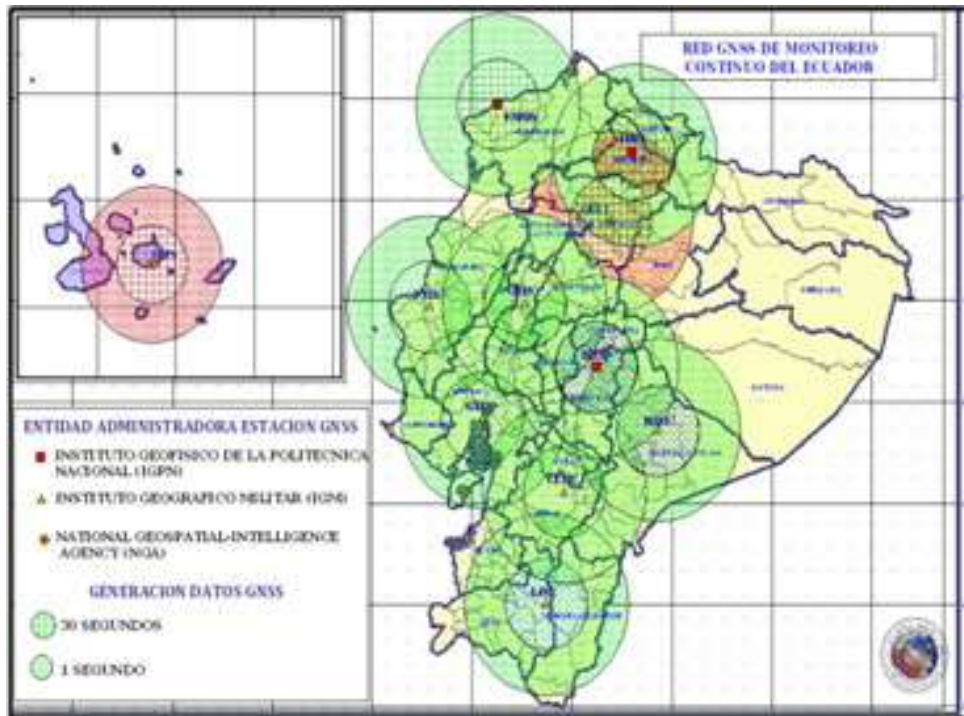


Fig. 2.1 Red Nacional GNSS del Ecuador – RENAGE [22].

2.2.1.2. Sistema global de navegación (GPS)

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es una herramienta esencial de tecnología satelital que facilita la determinación precisa de la posición de un objeto en tiempo real. Opera mediante una red de satélites en órbita terrestre, cada uno de ellos transmitiendo señales de radio. Los receptores GPS, incorporados en una extensa variedad de aparatos como smartphones, tabletas, vehículos y dispositivos GPS específicos, recogen estas señales y cuando el receptor recibe las señales de al menos cuatro satélites, determina la distancia a cada uno basándose en el tiempo que tardan las señales en llegar [23].

2.2.1.3. Tecnología de comunicación GSM

La tecnología surgió de la necesidad de un sistema estandarizado para la interconexión global de redes móviles. La implementación de las redes 2G con GSM representa un gran avance para las operadoras de comunicación móvil, ofreciendo mayor rentabilidad, protocolos de codificación más avanzados y técnicas de autenticación que resultaron en comunicaciones más

seguras comparadas con las redes 1G. Se diseñó principalmente para la transmisión digital de voz y el manejo de mensajes entre dispositivos móviles, utilizando conmutación de circuitos. Aunque inicialmente buscaba compatibilidad con ISDN, las limitaciones de ancho de banda y económicas impidieron que operara a las velocidades básicas de datos de 64 kbps de ISDN. Adicionalmente su característica mas destacada, siendo el SMS permitiendo el envío y recepción bidireccional de mensajes cortos de hasta 160 bytes [12].

2.2.1.4. Tecnología de comunicación GPR

Es una evolución del estándar GSM que habilita la transmisión de datos por paquetes, diferenciándose por su arquitectura de red basada en conmutación por paquetes en lugar de por circuitos, lo que permite el enrutamiento de múltiples paquetes por diversas rutas sin un canal dedicado. Esta mejora se logra añadiendo las estructuras SGSN, GPRS, GGSN y redes externas, manejando seguridad y asignación de direcciones IP. Las redes operan en bandas de 850-1900 MHz en América y empleando la técnica TDMA/FDMA, ofrecen velocidades de datos de hasta 20 kbps en transmisión y 40 kbps en la recepción por intervalo de tiempo, alcanzando hasta 160 kbps al combinar canales. Sus principales ventajas incluyen una conexión siempre activa, eficiencia en el uso de canales al permitir que varios usuarios compartan uno, una tarifa basada en el volumen de datos y no en el tiempo de conexión, la capacidad de realizar llamadas de voz, mensajería instantánea y aplicaciones de telemetría o control [16].

2.2.1.5. Redes móviles

La evolución de las telecomunicaciones han aportado a la búsqueda de un rendimiento superior y nuevas habilidades en las redes de telefonía móvil (véase la Fig.2.2). Cada generación, desde la básica 1G hasta la la adopción de 4G y con la 5G en camino (véase la Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Red nacional GNSS del Ecuador – RENAGE [24].

Característica	1G	2G	2.5G	3G	4G
Año de inicio	1970 - 1980	1980 - 1990	2000 - 2003	2000	2010
Tecnología	AMPS	GSM, IS-95 (CDMA), JDC	GPRS, EDGE	UMTS (WCDMA), CDMA 2000	LTE (LTE-TDD, LTE-FDD), WiMAX
Tipo de señal	Analógica	Digital	Digital	Digital	Digital
Velocidad (kbps)	1 - 2.4	14 - 64	115 / 384	384 - 2000	100000
Ancho de banda (kHz)	N/A	200 y canales de 25	N/A	5000 - 20000	5000 - 40000
Conmutación	Conmutación de circuitos	Conmutación de circuitos	Conmutación de paquetes	Conmutación de circuitos y paquetes	Telefonía IP

Su implementación entre estas tecnologías, ha aportado una tecnología única y un incremento notable en la rapidez de transmisión de datos. Estos progresos no solo han mejorado los servicios actuales, como las llamadas telefónicas, sino que también han facilitado una variedad de nuevas aplicaciones, desde el internet móvil hasta la televisión de alta definición y la computación en la nube.

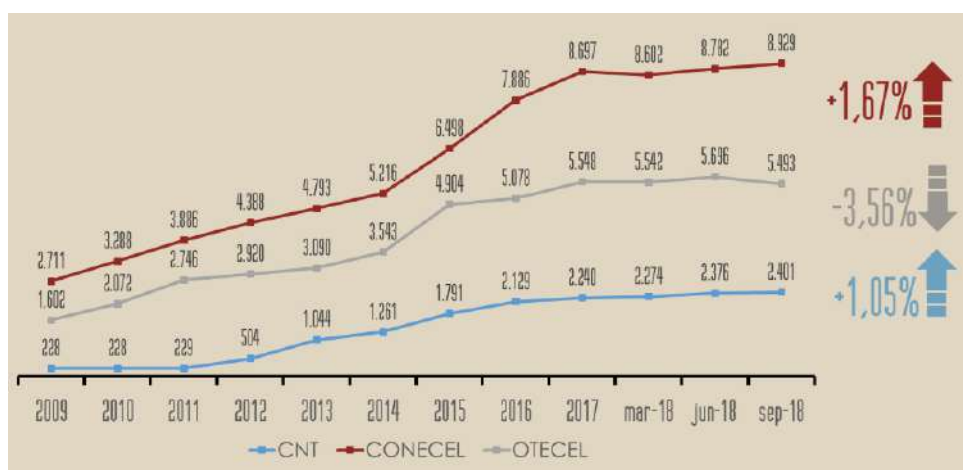


Fig. 2.2 Crecimiento de radiobases en el Ecuador [24].

2.2.1.6. Cobertura de redes móviles en Ibarra

Al examinar el mapa de cobertura 4G de Ibarra (véase la Fig. 2.3), es observable cómo las redes móviles actuales se vinculan. Esta tecnología se fundamenta en estándares de comunica-

ción inalámbrica de vanguardia como LTE, que posibilitan velocidades de datos significativamente superiores en comparación con sus antecesoras 2G y 3G. Estas redes, gracias a infraestructuras como las torres de teléfonos móviles y las antenas de transmisión, no solo facilitan la voz, sino también la transmisión de datos de localización desde aparatos IoT [24].

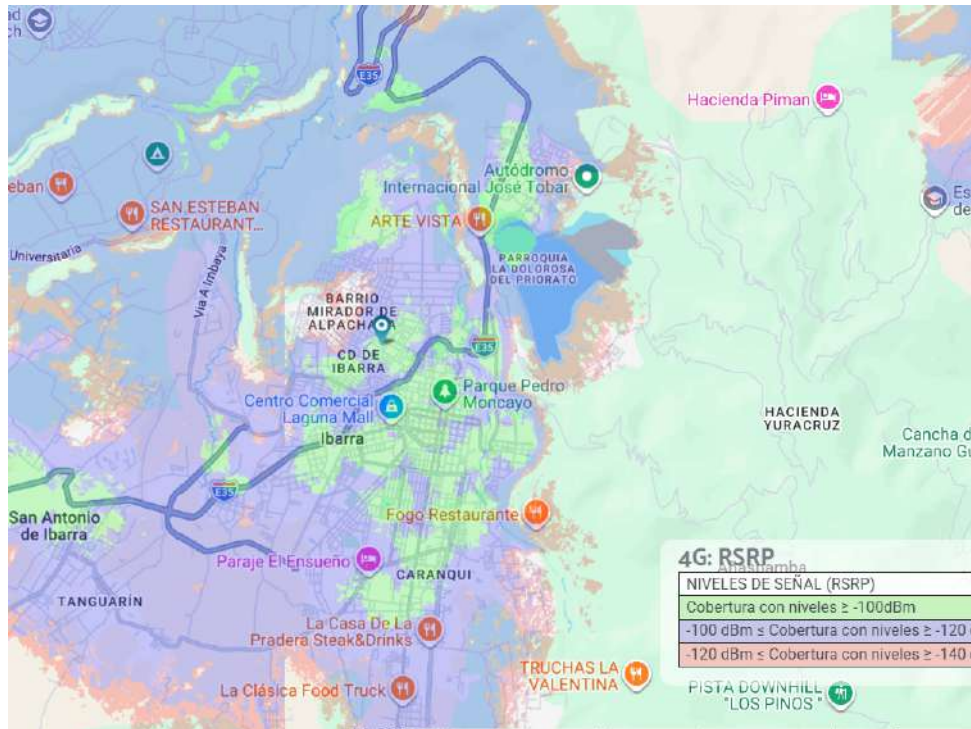


Fig. 2.3 Mapa de cobertura 4G en Ibarra – Ecuador [25].

2.2.2. Tecnologías complementarias de geolocalización en entornos urbanos

El seguimiento posicional, se concreta a través de la incorporación de varias tecnologías que, de forma independiente o conjunta, simplifican la obtención y difusión de datos espaciales exactos, la efectividad de estos sistemas no se basa únicamente en la precisión de las coordenadas adquiridas, sino también en la confiabilidad y la extensión de las infraestructuras de comunicación utilizadas para compartir estos datos.

2.2.2.1. Seguimiento de Bluetooth de baja energía

Es un sistema de comunicación sin cables empleado para el monitoreo de movimiento de corto alcance y la supervisión de localización. Este tipo de tecnología se aplica en una variedad de aparatos como smartphones y dispositivos portátiles, sin embargo, para el seguimiento de activos, se halla en dispositivos de rastreo y balizas capaces de localizar con exactitud los datos

de localización de cualquier objeto, transmiten de manera constante una señal que pueda ser recogida por dispositivos habilitado para Bluetooth. Esta señal ofrece información de identificación y localización, además de otros datos útiles como el estado y la temperatura, en función del dispositivo que se esté utilizando [26].

2.2.2.2. Tecnología RSSI

La estimación de la ubicación basada se fundamenta en la relación entre la intensidad de la señal recibida y la distancia entre transmisor y receptor. Sin embargo, dicha relación no es lineal y está influenciada por diversos factores como obstáculos, reflexiones, interferencias, orientación de las antenas y variaciones del canal de transmisión.

Para mejorar la estimación de posición, se emplea el método de trilateración. No obstante, es común aplicar técnicas de filtrado o promediado sobre múltiples lecturas para reducir el ruido y suavizar las fluctuaciones de la señal.

Existen dos configuraciones principales: en la primera, los nodos receptores permanecen fijos mientras el dispositivo transmisor se desplaza y en la segunda, el transmisor permanece fijo y los receptores se movilizan. En ambos casos, el valor medido permite estimar la distancia relativa entre los dispositivos, aunque con un margen de error dependiente de las condiciones del entorno [27, 28].

2.2.2.3. Posicionamiento UWB

Es una tecnología de alta precisión que utiliza la transmisión de pulsos de radio extremadamente cortos a lo largo de un extenso espectro de frecuencias. Esta característica facilita el cálculo de la distancia entre los transmisores y los receptores a través de métodos como la diferencia de hora de llegada (TDOA), proporcionando exactitud en términos de centímetros. Su capacidad para funcionar en condiciones de interferencias y su reducido consumo energético lo convierten en particularmente apropiado para usos en sistemas de localización personal. Sin embargo, plantea retos vinculados con el potencial de interferencia en bandas de frecuencia compartidas y la exigencia de una sincronización exacta en los receptores en contextos de alta densidad [27].

2.2.2.4. Tarjeta SIM

La tarjeta SIM es un componente esencial en las redes móviles, no solo por su función principal de permitir el acceso a los servicios del operador, sino también por su capacidad para almacenar la identidad del abonado. Gracias a algoritmos de autenticación y cifrado se garantiza la identidad del usuario y la confidencialidad de las comunicaciones. Además, puede integrar

una amplia gama de servicios de valor añadido, ofreciendo a los usuarios nuevas funcionalidades y abriendo nuevas vías de ingresos para las operadoras [?].

2.2.2.5. Mensajes de texto (SMS)

Se transformó en el estándar de telefonía móvil más extendido a escala global. Con el paso del tiempo, este servicio alcanzó todas las redes digitales. La amplia implementación de los mensajes de texto, con miles de millones de envíos anuales, propició una revolución en la escritura, originando un nuevo lenguaje principalmente iconográfico y práctico. Los mensajes no necesitan la asignación de un canal de radio exclusivo para el usuario, tal como ocurre en una llamada. En cambio, se colocan en los espacios de tiempo de señalización de la propia red, lo que facilita su envío y recepción en cualquier instante, incluso mientras se realiza una llamada[16].

2.2.3. Análisis de dispositivos específicos

En el ritmo acelerado de la vida moderna, la pérdida de objetos importantes puede generar un estrés considerable. Los dispositivos de rastreo emergen como una solución tecnológica esencial, ofreciendo la tranquilidad de saber la ubicación de los bienes con la certeza de estar siempre localizables. Estos pequeños aparatos, que utilizan tecnologías como Bluetooth y las potentes redes de búsqueda, que permiten ubicar rápidamente lo extraviado. De esta manera, no solo se ahorra tiempo, sino que también se recupera el control y la seguridad.

2.2.3.1. Dispositivo Tile

Es una empresa que produce pequeños aparatos de seguimiento Bluetooth. Considerados como identificadores inteligentes que tiene como finalidad asistir en la búsqueda de objetos desaparecidos, personas y mascotas. Estos aparatos pequeños se acoplan a objetos como llaves, carteras o mochilas, y se vinculan a un dispositivo móvil mediante su aplicación empleando tecnología BLE (véase el modelo en la Tabla 2.2). Adicionalmente ofrece la posibilidad de escuchar el Tile si el objeto está próximo, o visualizar su última localización conocida en un mapa si está fuera del alcance[30].

Tabla 2.2: Comparativa de generaciones de redes móviles [30].

Dispositivo	Color	Tamaño (mm)	Peso (g)	Volumen (dB)	Alcance (m)	Duración de la batería	Resistencia al agua	Modelo
Tile Pro	Negro/blanco	34x52.1x7.5	15	110	152	1 año, reemplazable	IP68	T1701

Además, ofrece diferentes planes de suscripción que amplían las funcionalidades básicas, proporcionan beneficios adicionales como alertas inteligentes, historial de ubicaciones extendido y en algunos casos, protección por garantía extendida y reembolso en caso de no encontrar un objeto (véase en la Tabla 2.3).

Tabla 2.3: Comparativa de planes [31].

Características	Gratuito	Silver	Gold
Historial de ubicaciones	2 días	7 días	30 días
Alerta de lugares	2 lugares	5 lugares	Sin limite
Informes de conducción	X	X	Sí
Detección de accidentes	Sí	Sí	Sí
Compartir ubicación	Sí	Sí	Sí
ETA ubicación	Sí	Sí	Sí
Monitoreo de batería	Sí	Sí	Sí
Alerta (SOS)	Sí	Sí	Sí
Resumen de conducción familiar	Sí	Sí	Sí
Soporte al cliente prioritario	X	Sí	Sí

Para entender completamente las capacidades y el funcionamiento del Tile pro ver Fig. 2.4, es esencial especificar sus propiedades técnicas y funciones principales.



Fig. 2.4 Clip universal - Pebblebee [32].

Se ofrece una panorámica breve de los elementos más significativos del rastreador (vease en la Tabla 2.4). Esta información es vital para valorar su aptitud en diferentes aplicaciones de seguimiento y protección personal, además de entender las variaciones entre los diferentes modelos existentes en el mercado.

Tabla 2.4: Especificaciones técnicas Tile Pro.

Características	Descripción
Baterías	Cuentan con una tapa de apertura manual (CR2032).
Resistencia	Soportar salpicaduras y una inmersión de hasta 1 metro de profundidad durante un máximo de 30 minutos.
Localización	Incluyen un código QR impreso. Al escanearlo se puede acceder a información de contacto.
Garantía	Garantía del fabricante de 1 año.
Rango	150 metros.
Precio	\$34,99

2.2.3.2. Dispositivo Pebblebee

Es una empresa de tecnología fundada con un enfoque singular para ayudar a las personas a mantenerse conectadas con objetos como llaves, billeteras y controles remotos también son compatibles a elección entre Apple Find My y Google's Find My Device. En este escenario, se ha consolidado como una marca de referencia, proporcionando una variedad de rastreadores inteligentes que superan lo cotidiano. Específicamente, se pone énfasis en dos de sus productos más destacados: el Pebblebee Clip y la Pebblebee Card. Cada uno con una estructura y características diseñadas para distintos usos, pero ambos con la promesa de preservar los objetos seguros y fácilmente localizables.

El Clip Pebblebee Universal (véase la Fig. 2.5) es un buscador de productos Bluetooth pequeño y adaptable, con su diseño de clip resistente, se adapta de manera sencilla a llaveros, bolsos, equipaje o cualquier objeto, adicionalmente cuenta con una advertencia sonora potente y un alcance ampliado (véase la Tabla 2.5) se desglosa de manera detallada sus especificaciones [32].



Fig. 2.5 Clip universal - Pebblebee [32].

Tabla 2.5: Especificaciones del dispositivo Pebblebee Clip [32]

Características	Descripción
Dimensiones	Aprox. 45 mm x 38 mm x 8.5 mm
Baterías	Recargable, iones de litio. Hasta 12 meses por carga.
Carga	Puerto USB-C
Peso	8 gramos
Resistencia	Clasificación IPX6 (resistente a salpicaduras y lluvia).
Conectividad	Bluetooth 4.0 y superior .
Garantía	Garantía limitada del fabricante por 1 año contra defectos.
Alarma	Sonido fuerte y luz LED brillante.
Rango	150 metros.
Asistentes de voz	Compatible con Google Assistant y Amazon Alexa.
Precio	\$49,99

La tarjeta pebblebee universal (véase la Fig. 2.6), es un producto Bluetooth delgado y recargable que se ajusta sin dificultad a carteras, fundas para ordenadores portátiles o cualquier otro espacio delgado. Al medir solo unos cuantos milímetros de espesor, añade un volumen mínimo.



Fig. 2.6 Card universal - Pebblebee [33].

Su construcción resistente y su diseño sofisticado lo hacen la opción ideal para rastrear bienes más preciados sin poner en riesgo el estilo o la comodidad (véase la Tabla 2.6) se desglosa sus especificaciones de manera detallada.

Tabla 2.6: Especificaciones del dispositivo Pebblebee Card [33].

Características	Descripción
Dimensiones	Aprox. 85.5 mm x 54 mm x 2.5 mm
Baterías	Recargable, iones de litio. Hasta 18 meses por carga.
Carga	Cable magnético
Peso	7 gramos
Resistencia	Clasificación IPX6
Conectividad	Bluetooth 4.0 y superior
Garantía	Todos los modelos Tile incluyen una garantía del fabricante de 1 año.
Alarma	Sonido fuerte y luz LED brillante
Rango	150 metros
Asistentes de voz	Compatible con Google Assistant y Amazon Alexa
Garantía adicional	Garantía limitada de 1 año contra defectos del producto
Precio	\$49,99

La selección de uno u otro se basa en las necesidades particulares: el Clip es perfecto para objetos que requieren un soporte tipo mosquetón y una carga USB-C, mientras que la Card se incorpora discretamente en carteras con una larga duración de la batería. Ambos ofrecen el significativo beneficio de la compatibilidad con las redes de búsqueda de Apple y Google.

2.2.3.3. Dispositivo AirTag

Dentro del segmento de los dispositivos de rastreo personal, el AirTag (véase la Fig. 2.7) representa la propuesta de Apple Inc. para facilitar la localización de objetos cotidianos. Lanzado en abril de 2021, este dispositivo se integra de manera nativa y profunda en el ecosistema de productos y servicios de Apple, ofreciendo una experiencia de usuario optimizada para dispositivos iOS o macOS. Sus características según el fabricante (véase la Tabla 2.7). Su funcionamiento es simple el dispositivo envía una señal Bluetooth segura que puede ser identificada por aparatos próximos en la red de la aplicación Encontrar. Por otro lado, transmiten la localización del AirTag a iCloud, permitiéndote visualizarla en su mapa a través de la aplicación [34].



Fig. 2.7 Dispositivo AirTag - Apple [34].

El dispositivo y su plataforma no guarda el historial ni la información de localización, y solo se puede identificar su ubicación. Además, los aparatos que comunican su ubicación también se conservan anónimos, y los datos se mantienen cifrados durante todo el procedimiento.

Tabla 2.7: Especificaciones del dispositivo AirTag [35].

Características	Descripción
Dimensiones	Diámetro: 31.9 mm Grosor: 8 mm
Peso	11 gramos
Resistencia	Clasificación IP67 .
Conectividad	Bluetooth para localización por proximidad Chip U1 NFC
Sonido	Bocina integrada
Temperatura Operativa	20 a 60 °C
Impacto ambiental	Placa madre soldada con estaño 100 % reciclado y libre de mercurio, BFR, PVC y berilio
Batería	Tipo botón CR2032, dura hasta 1 año.
Rango	10 metros en interiores y 100 metros en exteriores.
Requerimiento	Solo compatible con usuarios Apple.
Garantía	Garantía limitada de 1 año.
Precio	\$25,00

2.2.4. Comparativa de rendimiento y aplicabilidad en entornos urbanos

En el actual panorama tecnológico, repleto de alternativas, resulta esencial verificar lo que las empresas sugieren o venden como novedades. Es necesario comprender a fondo el funcionamiento de cada producto y qué otros dispositivos pueden ser similares a un menor costo o a uno mayor. Se ofrece un examen exhaustivo del Pebblebee Clip Universal y la Pebblebee Card Universal, dos soluciones revolucionarias de Pebblebee, comparándolas con rivales directos como el Apple AirTag y el Tile Pro.

2.2.4.1. Tecnologías de rastreo de baja potencia y redes colaborativas

El desempeño de los dispositivos de rastreo personal se basa en la combinación de diversas tecnologías de localización inalámbrica (vease la Tabla 2.8), cuyo principio de funcionamiento condiciona la precisión y el alcance obtenidos en entornos urbanos. La capacidad de localizar objetos fuera del alcance directo de BLE depende de las redes colaborativas en las que participan estos dispositivos, que permiten que terminales de terceros contribuyan de forma anónima a la actualización de la ubicación en la nube. La densidad y extensión geográfica de estas redes, como Apple Find My, Google Find My Device o la red de Tile, constituyen un factor crítico para el rendimiento global del sistema en escenarios reales.

Tabla 2.8: Comparativa de tecnologías de rastreo.

Tecnología	Bluetooth BLE + RSSI	UWB	Red colaborativa potente
Pebblebee	Sí	No	Apple Find My o Google Find My Device
AirTag	Sí	Sí	Apple Find My
Tile Pro	Sí	No	Red Tile

2.2.4.2. Rendimiento teórico de los dispositivos de rastreo

El análisis del rendimiento teórico de los dispositivos de rastreo propuestos cuyos parámetros son un punto de partida inicial (véase la Tabla 2.9), permite establecer diferencias significativas en esos dispositivos. Facilitando una comprensión clara de sus diferencias en elementos como la conectividad, la autonomía de la batería y la resistencia, lo que es crucial para identificar la alternativa más apropiada para las necesidades personales de seguimiento.

Tabla 2.9: Comparativa entre dispositivos adquiridos.

Características	Pebblebee Card	Pebblebee Clip	Apple AirTag	Tile Pro
Alcance Bluetooth (m)	150	150	100	152
Batería	Cargador magnético, duración hasta 18 meses	Recargable USB-C, duración hasta 12 meses	CR2032	CR2032
Red colaborativa urbana	Apple Find My o Google Find My Device	Apple Find My o Google Find My Device	Apple Find My	Red Tile
Red colaborativa	Depende del sistema operativo conectado	Depende del sistema operativo conectado	Muy alta; casi en tiempo real	Media; depende solo de dispositivos tile
Precisión de localización	RSSI Bluetooth	RSSI Bluetooth	Alta precisión con UWB y Precision Finding	Bluetooth

2.2.5. Aplicaciones de rastreo

Las aplicaciones de rastreo y geoposicionamiento son esenciales para capturar, el procesamiento y la visualización de datos de localización adquiridos a través de sistemas de posicionamiento. Estas son cruciales para áreas que van desde la logística hasta la navegación al aire libre. Estas plataformas se caracterizan por la posibilidad de brindar seguimiento activo, lo cual posibilita la supervisión en tiempo real mediante la transmisión continua de datos y por su función de trazabilidad histórica, que guarda y examina caminos para analizar métricas de eficiencia.

2.2.5.1. WIKILOC

Wikiloc es una aplicación de navegación que se enfoca en actividades al aire libre. Su propósito es documentar rutas para el senderismo, ciclismo y otras actividades fuera de casa. La aplicación brinda una funcionalidad sólida, ya que ofrece estadísticas en tiempo real como la distancia recorrida, velocidad y gráficos exhaustivos de elevación. Además, incluye una opción de mapas offline, que es perfecta para no tener que depender de la conexión a datos móviles ni pagar tarifas de roaming. Aunque el plan gratuito tiene opciones restringidas en comparación

con la versión Premium, sus funciones básicas se ajustan de forma muy adecuada a las necesidades del caso de estudio presentado. La característica esencial del proyecto es que puede exportar las rutas grabadas en formato, lo cual posibilita que sus datos sirvan como un patrón de referencia verificable para comprobar la exactitud del dispositivo rastreador creado [36].

2.2.5.2. OpenStreetMap

OpenStreetMap es una plataforma de cartografía mundial que se caracteriza por ser de código abierto y por su método de desarrollo colaborativo, el cual está fomentado por una amplia comunidad de voluntarios. Este proyecto ofrece un mapa editable y preciso, brindando acceso total y gratuito a los datos geográficos subyacentes y a las imágenes satelitales. Posibilita que todos los usuarios colaboren en la edición y perfeccionamiento del mapa, utilizando un sistema parecido al de una wiki. Los colaboradores tienen la opción de efectuar cambios mediante el uso de herramientas en línea, como el editor iD, o bien descargando JOSM, una aplicación para escritorio. Para la integración de servicios cartográficos y para visualizar datos en proyectos de geolocalización constituye una fuente invaluable que no tiene las limitaciones de licencia vinculadas a las plataformas comerciales [37].

2.2.5.3. Aplicaciones deportivas

Strava, Garmin Connect y Nike Run Club son ejemplos de apps para el seguimiento deportivo que son herramientas fundamentales para administrar el rendimiento físico, empleando la geolocalización para documentar y examinar actividades como el ciclismo o el running. Strava se destaca como una red social atlética que permite la competición virtual mediante la segmentación de rutas [38], mientras que Garmin Connect funciona como la central de datos para el ecosistema de wearables de Garmin [39], ofreciendo análisis avanzados de métricas fisiológicas y de salud. NRC, por su parte, se centra sobre todo en la motivación y los planes de entrenamiento dirigidos a corredores [40]. En conjunto, estas plataformas transforman los datos de geolocalización y fisiológicos en información estructurada y accionable, fundamental para la optimización del entrenamiento y la seguridad del deportista.

2.2.6. Filtro de Kalman

La incertidumbre existente en un sistema de control en lazo cerrado (véase en la Fig. 2.8) es provocada en cierta medida por el ruido en la medición. Los sensores sufren errores en el cálculo de sus lecturas debido a causas físicas internas como vibración o cambios bruscos de temperatura, afectando a su rendimiento [41].

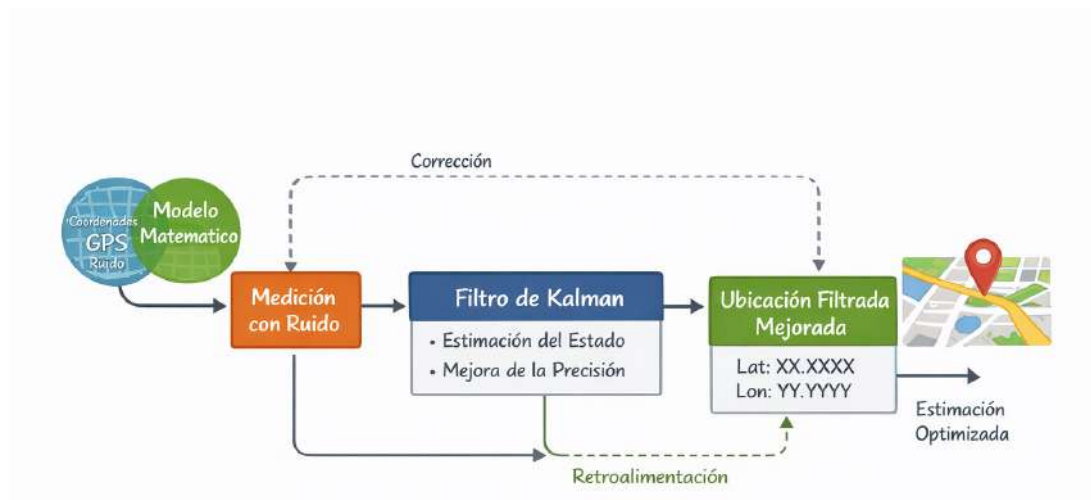


Fig. 2.8 Funcionamiento del filtro de Kalman.

2.2.6.1. Conceptos elementales

La varianza (σ^2) es el valor anticipado de las desviaciones cuadráticas de un dato en relación con su media. Matemáticamente, indica el nivel de separación de los datos alrededor del centro de la distribución. La varianza es la medida de la incertidumbre vinculada a la estimación de un solo parámetro de estado en el marco de un sistema [42].

La covarianza es una métrica bidimensional que muestra cómo dos variables se desplazan juntas. Si el valor es positivo, significa que las dos variables tienden a crecer o decrecer simultáneamente, si es negativo, significa que cuando una variable se incrementa, la otra tiende a reducirse en consecuencia posibilita que se use la información de una variable para mejorar la estimación de otra [42].

El Pseudo rango es la distancia aproximada entre el receptor y el satélite, se utiliza para calcular las coordenadas geocéntricas del receptor. Para obtener esta medición, se multiplica la velocidad de la luz por el tiempo que tarda la señal electromagnética en desplazarse. El receptor mide este tiempo recibiendo la señal y produciendo una réplica para su correlación, lo que posibilita el cálculo del tiempo de viaje. No obstante, como el reloj atómico del satélite y el oscilador del receptor no pueden estar perfectamente sincronizados, esta distancia es un pseudorango. Para solucionar las tres coordenadas espaciales y rectificar la falla en el reloj interno del receptor, se necesitan mediciones de un mínimo de cuatro satélites [43]. El vector de estado es la representación esencial que alberga las variables principales que establecen los grados de libertad de un sistema dinámico. Las variables de estado, como no suelen medirse directamente, se deducen a partir de los valores que se pueden observar. Este vector, durante el procedimiento de estimación dinámica, se distingue por dos valores sucesivos: el valor actual, que simboliza la predicción del estado previa a la actualización de la medición y el valor a posteriori, que

representa el valor optimizado y corregido que resulta tras implementar dicha medición del sensor [43]. La caracterización matemática de un sistema dinámico requiere la definición de dos modelos esenciales: el Modelo Dinámico es el encargado de describir la evolución del vector de estado a lo largo del tiempo descrito por el vector del estado actual, representando cómo se transforma el estado de un instante a otro, e incluye un componente de ruido dinámico para modelar las incertidumbres inherentes al proceso. Por otra parte, el Modelo de Observación definido por la matriz H establece la relación directa entre el estado interno del sistema y las lecturas obtenidas por los sensores. Este modelo mapea las variables de estado hacia el espacio de medición y se le añade un ruido de medición para cuantificar la incertidumbre y el error de los sensores [43].

2.2.7. Interfaces de control de módulos con comandos AT

Los módulos de comunicación celular, esenciales en dispositivos IoT, se controlan tradicionalmente a través de un conjunto de instrucciones estandarizadas conocidas como Comandos AT. Estos comandos, cuyo origen se remonta a los módems Hayes en 1981, proporcionan una interfaz de texto para configurar, controlar y gestionar diversas funcionalidades del módulo, como la conexión a la red celular, la gestión de datos, el envío de mensajes SMS y la configuración de parámetros específicos. Su uso es fundamental para programar la interacción entre un microcontrolador y el hardware de comunicación, permitiendo establecer conexiones de red y transmitir información de manera eficiente [44]. Estos comandos permiten habilitar subsistemas específicos y gestionar directamente servicios como el posicionamiento satelital y el manejo de mensajes SMS (véase la Tabla 2.10) se presentan los comandos AT enviados explícitamente y su función dentro del sistema.

Tabla 2.10: Comandos de control [45].

Comando AT	Función Principal	Descripción Técnica
AT+SGPIO=0,4,1,1	Activación del GNSS	Habilita el pin GPIO interno encargado de alimentar el módulo GNSS .
AT+CMGF=1	Configuración SMS	Establece el modo texto para el envío y recepción de mensajes SMS.
AT+CMGL=REC UN-READ"	Lectura de SMS	Lista los mensajes SMS no leídos almacenados en la memoria.
AT+CMGD=<index>	Eliminación de SMS	Elimina un mensaje SMS específico tras su procesamiento.

Para garantizar el correcto funcionamiento del módulo de comunicación, es necesario ejecutar una secuencia de inicialización y diagnóstico al inicio del sistema lo que permite verificar la comunicación entre el microcontrolador y el módem, así como obtener información del firmware y del estado operativo del dispositivo. Estas operaciones se realizan mediante comandos

AT (véase la Tabla 2.11), ejecutados de forma indirecta a través de la librería TinyGSM [46].

Tabla 2.11: Comandos para inicialización y diagnóstico del módem [45].

Función TinyGSM	Comando AT	Descripción
modem.restart()	AT+CFUN=1,1	Reinicia completamente el módem y restablece el subsistema.
modem.init()	AT / ATE0	Verifica la comunicación con el módem.
getModemName()	AT+CGMM	Consulta el nombre y modelo del módem celular.
getModemInfo()	AT+CGMR	Obtiene la versión de firmware instalada en el módem.

Una vez inicializado el módem, es imprescindible comprobar el estado de registro en la red celular y la calidad de la señal disponible. Los comandos AT para verificar el registro en red y monitorear parámetros básicos de conectividad (vease la Tabla 2.12).

Tabla 2.12: Operación de registro y monitoreo de la red celular[45].

Función TinyGSM	Comando AT	Descripción
waitForNetwork()	AT+CREG AT+CEREG	/ Verifica el estado de registro del dispositivo en la red celular.
isNetworkConnected()	AT+CREG	Comprueba si el módem se encuentra correctamente registrado en la red.
getSignalQuality()	AT+CSQ	Obtiene la intensidad de la señal celular recibida.

La transmisión de información hacia plataformas externas requiere el establecimiento previo de una conexión de datos móviles. Este procedimiento implica la configuración del contexto de datos, la activación del servicio de red y la verificación del estado de la conexión IP. Los comandos AT utilizados para habilitar la comunicación de datos móviles necesarios para la transmisión mediante protocolos de nivel superior como MQTT (véase la Tabla 2.13) [46, 47].

Tabla 2.13: Conexión de datos móviles para transmisión MQTT[45].

Función TinyGSM	Comando AT	Descripción
gprsConnect()	AT+CGDCONT	Define el contexto PDP con el APN del operador móvil.
gprsConnect()	AT+CGACT=1,1	Activa el contexto de datos móviles.
gprsConnect()	AT+NETOPEN	Abre la conexión de red para transmisión de datos IP.
isGprsConnected()	AT+NETOPEN	Verifica si la conexión de datos móviles se encuentra activa.

El sistema incorpora funcionalidades de posicionamiento satelital, para ello es necesario habilitar el subsistema GNSS y consultar periódicamente los datos de posicionamiento disponibles. Como se muestra en la Tabla 2.14, estas operaciones se realizan mediante comandos AT

específicos que permiten activar el receptor GNSS y obtener parámetros como latitud, longitud, altitud y velocidad [46, 47].

Tabla 2.14: Activación y adquisición de datos GNSS[45].

Función TinyGSM	Comando AT	Descripción
enableGPS()	AT+CGPS=1	Habilita el sistema GNSS integrado del módulo.
getGPS()	AT+CGPSINFO AT+CGNSSINFO	/ Solicita información de posicionamiento GNSS (latitud, longitud, altitud y velocidad).

Además de la transmisión de datos por red celular, el sistema contempla el uso del servicio de mensajes cortos SMS como un mecanismo alternativo de comunicación y control. Este servicio permite la recepción de comandos básicos y el envío de información relevante sin depender de una conexión de datos activa. Los comandos AT empleados para el envío, lectura y eliminación de mensajes SMS (véase la Tabla 2.15) [45].

Tabla 2.15: Envío y recepción de mensajes SMS [45].

Función TinyGSM	Comando AT	Descripción
sendSMS()	AT+CMGS	Envía un mensaje SMS al número telefónico especificado.
Lectura SMS	AT+CMGL	Lista los mensajes SMS almacenados en el dispositivo.
Eliminación SMS	AT+CMGD	Elimina mensajes SMS procesados de la memoria.

2.2.8. Dispositivos IoT

La implementación de sistemas fundamentados en el Internet de las Cosas (IoT) ha ganado terreno considerable en el ámbito de la seguridad y el monitoreo, ofreciendo soluciones innovadoras para desafíos que abarcan desde la vigilancia de fronteras hasta el control de acceso en diversos entornos. El uso frecuente de microcontroladores como Raspberry Pi y ESP8266 (vease la Fig. 2.9) se debe a su versatilidad y sencillez para vincularse con módulos de sensores ver orientados a la detección y supervisión perimetral.

Frecuentemente, se consigue la confiabilidad en la conexión con centros de control o usuarios finales a través del uso de redes redundantes e inalámbricas. Para situaciones que requieren movilidad y una amplia cobertura, como sucede con los sistemas de seguimiento, es esencial adoptar tecnologías como Bluetooth, Wi-Fi y GSM. La capacidad de estos últimos para enviar alertas vía SMS o transmitir datos a través de la infraestructura celular representa una ventaja crucial para operar en amplias zonas geográficas o en ausencia de redes locales fijas, se hace imperativa la adopción de soluciones de almacenamiento robustas, tales como bases de datos

locales y basadas en la nube. Estas estrategias aseguran la persistencia de los datos, posibilitan la visualización en tiempo real y facilitan la gestión de notificaciones [48].

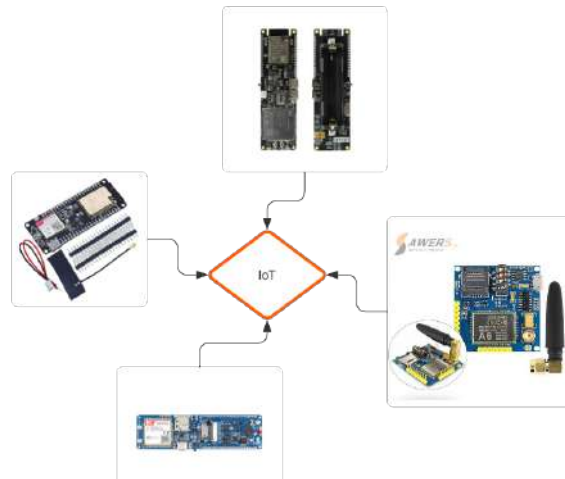


Fig. 2.9 Hardware IoT.

2.2.8.1. Vulnerabilidad en dispositivos IoT

La operación principal de un dispositivo de rastreo puede comunicarse directamente mediante comandos AT y protocolos seguros, las vulnerabilidades identificadas en el control de dispositivos IoT a través de VPA, ofrecen una perspectiva crítica sobre cómo la seguridad en un punto del ecosistema puede comprometer a otros (véase la Fig. 2.10).

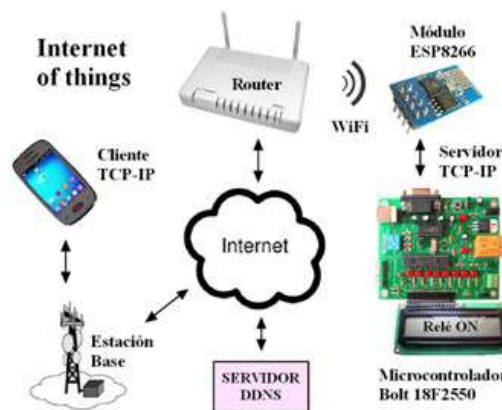


Fig. 2.10 Funcionamiento en dispositivos IoT [49].

Ataques de secuestro de comandos en sistemas con control por voz, un atacante puede crear skills con nombres similares a comandos legítimos, provocando que el asistente active la skill equivocada. Además, skills maliciosas con comandos personalizados pueden tomar prioridad

sobre los originales, desviando órdenes hacia acciones o respuestas falsas [50]. Incluso otra vulnerabilidad es la manipulación del código backend en donde los dispositivos IoT es el control arbitrario tras él envió de comandos sin importar si el rastreador usa comandos AT y protocolos seguros, una interfaz vulnerable como una skill de voz, esto puede causar fallos en el reporte de ubicación, ejecutar acciones no previstas, comprometiendo por completo la confiabilidad del sistema [50].

2.2.8.2. Protocolos TCP y UDP

El protocolo Protocolo de Control de Transmisión asegura una comunicación confiable, centrada en la conexión, garantizando la transmisión organizada e integral de los paquetes de datos. Su uso es apropiado cuando la veracidad de los datos es esencial, como en el intercambio de archivos o en las actualizaciones de software. En contraposición, Protocolo de Datagramas de Usuario funciona sin conexión, proporcionando menor confiabilidad, pero con una eficiencia y velocidad superiores. Es preferible en situaciones en las que la baja latencia es vital y se pueden tolerar algunas pérdidas de datos, como en la transmisión de telemetría o flujos en tiempo real [51].

2.2.8.3. Protocolos IoT

MQTT es un protocolo de mensajería de alta eficiencia y de bajo peso, organizado bajo el esquema "publicar/suscribir". Su diseño lo convierte en perfecto para dispositivos con recursos escasos y redes con conectividad inestable o escaso ancho de banda, empleando TCP como medio de transporte. En este modelo, los emisores de información transmiten mensajes a un intermediario central, y los receptores pueden acceder a dichos mensajes mediante "temas". De igual forma el protocolo HTTP/HTTPS gracias a su diseño reduce la información a solamente 2 bytes, favoreciendo así un consumo reducido de ancho de banda. Sin embargo, la sobrecarga de datos puede disminuir su eficacia, en particular para el envío constante de grandes cantidades de datos desde dispositivos con recursos escasos o en redes de ancho de banda reducido, lo que repercute en el consumo de energía [51].

Capítulo 3

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque y tipos de investigación

El presente trabajo de integración curricular se enmarca en el enfoque ingenieril, fundamentado en la investigación aplicada, ya que tiene como finalidad resolver un problema técnico concreto mediante el diseño y la implementación de una solución tecnológica funcional. Desde el punto de vista metodológico, se adopta un enfoque mixto que combina elementos cuantitativos y cualitativos. El enfoque cuantitativo se manifiesta en la recopilación y análisis de datos técnicos, métricas de rendimiento y pruebas comparativas de los dispositivos de rastreo. Por otro lado, el enfoque cualitativo se refleja en la evaluación del contexto local, la experiencia de usuario y la aplicabilidad real de las tecnologías estudiadas. En cuanto al tipo de investigación, se identifican tres niveles principales: Investigación aplicada: dirigida a dar solución a una necesidad práctica mediante el diseño e implementación de un sistema de rastreo personal adaptable a situaciones prácticas [52]. Investigación descriptiva: debido a que se realizara un análisis detallado de las plataformas de rastreo, estableciendo asociaciones entre variables sin determinar causalidad, sus características técnicas y su comportamiento en campo [52]. Investigación experimental: al realizar pruebas controladas tanto a plataformas de rastreo comercial como al prototipo desarrollado. Se aplica un diseño pre-experimental en la evaluación individual de los dispositivos existentes y un diseño cuasi-experimental al comparar el rendimiento del sistema propio con las demás soluciones bajo condiciones similares y en condiciones controladas [53].

3.2. Diseño de la Investigación

El diseño metodológico del presente trabajo responde a una estructura secuencial compuesta por tres fases principales. Cada fase aborda un conjunto de actividades que permiten avanzar desde la recolección de información técnica hasta la implementación y validación de una pro-

puesta funcional de sistema de rastreo personal, con aplicabilidad local. Este diseño se fundamenta en el enfoque de investigación aplicada y se apoya en la ingeniería (véase la Fig. 3.1).

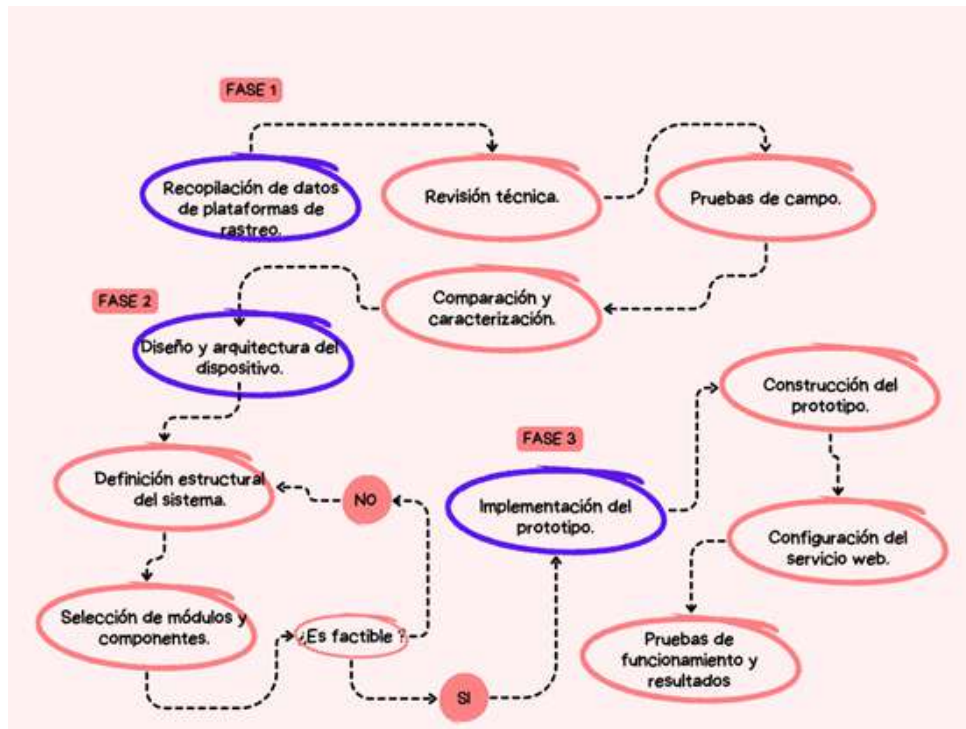


Fig. 3.1 Diagrama de bloques de la investigación.

3.2.1. Fase 1: Recopilación de datos de plataformas de rastreo personal y su aplicabilidad local.

Esta fase tiene como objetivo realizar un análisis técnico y funcional de diferentes plataformas de rastreo personal disponibles en el mercado. Se evaluará su aplicabilidad en entornos urbanos, considerando variables como precisión, conectividad, autonomía, facilidad de uso y adaptabilidad a contextos locales.

Actividad 1.1: Revisión técnica de plataformas de rastreo personal.

Se recopilará información técnica y operativa de dispositivos de rastreo como AirTag, Tile, Pebblebee, mediante revisión de documentación oficial, fichas técnicas, publicaciones de la empresa y experiencias de usuarios.

Actividad 1.2: Pruebas de campo de los dispositivos adquiridos.

Se realizarán pruebas prácticas de los dispositivos seleccionados en distintos entornos locales con el fin de registrar su comportamiento real, precisión del rastreo, tiempo de respuesta y facilidad de localización.

Actividad 1.3: Comparación funcional de dispositivos comerciales.

Se elaborará una matriz comparativa que sintetice las características técnicas y el desempeño observado de cada dispositivo, con énfasis en su aplicabilidad local y limitaciones observadas en el campo.

3.2.2. Fase 2: Diseño de la arquitectura del dispositivo de rastreo propio.

Esta fase busca establecer los lineamientos técnicos y estructurales para el desarrollo de un sistema de rastreo personal propio, aprovechando tecnologías de geolocalización y comunicación móvil, con el objetivo de construir una alternativa adaptable a contextos locales.

Actividad 2.1: Revisión técnica de tecnologías de comunicación móvil y geolocalización.

Se analizarán diferentes tecnologías disponibles como: módulos GPS, redes GSM, 3G, 4G, Wi-Fi, placas de desarrollo. Para determinar su viabilidad técnica y disponibilidad en el entorno local.

Actividad 2.2: Definición estructural del sistema de geolocalización y comunicación.

Se establecerá la arquitectura del sistema, identificando los bloques funcionales y accesibilidad a tecnologías locales en el país.

Actividad 2.3: Selección de módulos y componentes para integración.

Se seleccionarán los componentes electrónicos y módulos necesarios con las tecnologías requeridas considerando criterios de compatibilidad, consumo energético, tamaño, y facilidad de integración.

3.2.3. Fase 3: Implementación de un prototipo y su visualización en tiempo real.

En esta fase se desarrollará el prototipo funcional del sistema de rastreo, que incluirá tanto el hardware como el software necesario para la captura y visualización en tiempo real de datos de geolocalización.

Actividad 3.1: Construcción del prototipo de rastreo personal.

Se ensamblará el prototipo integrando los módulos seleccionados, y se realizará la programa-

ción correspondiente para la adquisición y transmisión de datos de posición.

Actividad 3.2: Configuración del servicio web para monitoreo en tiempo real.

Se implementará una plataforma web o aplicación conectada a una base de datos en la nube, que permita visualizar en tiempo real la ubicación del dispositivo sobre un mapa.

Actividad 3.3: Pruebas de funcionamiento.

Se realizarán pruebas finales de validación del sistema, verificando su funcionamiento en distintos escenarios locales y documentando su comportamiento, latencia, precisión y confiabilidad.

Capítulo 4

Implementación y pruebas

4.1. Motivación

El rastreo de objetos o personas mediante dispositivos electrónicos se ha popularizado en los últimos años gracias a la disponibilidad de rastreadores comerciales de bajo costo. Estos dispositivos permiten localizar objetos a través de aplicaciones móviles y redes de comunicación inalámbrica, siendo utilizados comúnmente para el seguimiento de llaves, mochilas o equipaje. Sin embargo, la mayoría de estas soluciones han sido diseñadas para operar en ecosistemas tecnológicos específicos y en entornos con alta densidad de usuarios o infraestructura de comunicación, su funcionamiento depende de redes colaborativas de dispositivos cercanos, lo cual puede limitar su desempeño en regiones donde estas condiciones no se cumplen completamente. Por esta razón, resulta pertinente evaluar el desempeño de diferentes plataformas de rastreo personal en condiciones reales de uso, con el fin de identificar sus limitaciones y determinar su viabilidad en el contexto ecuatoriano.

La comparación evidencia diferencias estructurales entre los dispositivos basados en red colaborativa (vease la Tabla 4.1) y la solución propuesta. Mientras los primeros dependen de terceros para actualizar su ubicación, la placa desarrollada permite trazado continuo, baja latencia y exportación completa de datos, lo que la convierte en una solución más adecuada para análisis técnico y evaluación cuantitativa.

Tabla 4.1: Criterios y pruebas de dispositivos propuestos.

Nº	Objetivo de la Prueba	Pasos de la Prueba	Resultado Esperado	Resultado
1	Verificación del rango de seguimiento	1) Colocar el dispositivo rastreador (A) y el buscador (B) a distancias incrementales predefinidas. 2) Documentar la distancia máxima a la cual la conexión se mantiene estable.	El dispositivo mantenga y actualice la conexión en tiempo real hasta el rango máximo especificado por el fabricante.	Aprobado
2	Evaluación de la red colaborativa	1) Simular la pérdida del dispositivo en una zona con tráfico peatonal. 2) Registrar la nueva ubicación reportada por la red colaborativa en lapsos de tiempo definidos y verificar su visualización en la plataforma nativa.	El dispositivo debe reportar una nueva ubicación y visualizarse correctamente en la plataforma nativa dentro del tiempo máximo de 60 minutos, demostrando la funcionalidad efectiva de la red en un entorno de uso real.	Aprobado
3	Análisis de la latencia en movimiento	1) Colocar dispositivos de rastreo comparativos. 2) Registrar las marcas de tiempo y la ubicación de las actualizaciones de posición para cada dispositivo a lo largo de la ruta. 3) Identificar paradas clave y forzar la verificación de la localización en esos momentos.	El sistema debe demostrar su capacidad para proporcionar múltiples actualizaciones de ubicación a lo largo de una ruta en movimiento.	Aprobado
4	Validación de la coherencia de ubicación entre el teléfono y el dispositivo	1) Ubicar ambos dispositivos en un punto fijo. 2) Registrar la ubicación y compararla con: a) la ubicación reportada en la aplicación del dispositivo y b) la ubicación obtenida mediante la función de compartir localización. 3) Analizar la diferencia espacial entre las coordenadas obtenidas en cada caso.	Se espera que la ubicación reportada por el dispositivo presente una diferencia mínima respecto a la ubicación real del teléfono y que las variaciones observadas se mantengan dentro del margen de precisión esperado del sistema de posicionamiento.	Aprobado

Aquí se presentan los resultados de las diferentes pruebas realizadas tanto a los dispositivos de rastreo personal comerciales como al sistema desarrollado a partir de una placa integrada. Con el fin de estructurar adecuadamente el análisis, las evaluaciones se dividieron en dos bloques principales. El procesamiento y análisis de los datos obtenidos durante las pruebas experimentales se realizó mediante scripts desarrollados específicamente para este estudio, los cuales se encuentran disponibles en un repositorio público [54].

4.1.1. Evaluación de dispositivos de rastreo

El primero corresponde a la caracterización de los dispositivos de rastreo (véase la Fig.4.1), enfocada en el análisis de su desempeño dentro de redes colaborativas, considerando la capacidad de detección, persistencia y cobertura en distintos entornos urbanos en la ciudad de Ibarra.

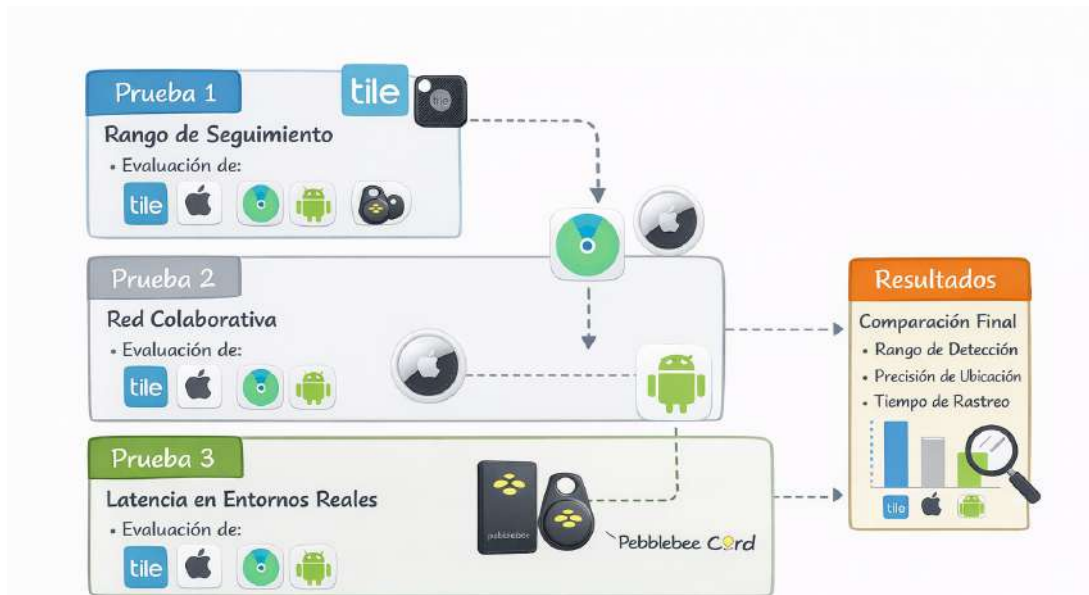


Fig. 4.1 Proceso de caracterización de plataformas de rastreo personal.

Los resultados presentados (véase la Tabla 4.2) muestran diferencias significativas en el desempeño de los dispositivos de rastreo personal evaluados. Los dispositivos AirTag alcanzan las mayores tasas de detección, con ponderaciones superiores a 0.77, lo que evidencia una alta persistencia en la actualización de ubicación y una mayor confiabilidad temporal durante las pruebas realizadas. Este comportamiento se atribuye principalmente a la elevada densidad de dispositivos compatibles presentes en la red colaborativa utilizada por estos rastreadores.

Por otro lado, los dispositivos Pebblebee presentan un desempeño intermedio, con ponderaciones comprendidas entre 0.48 y 0.52. Si bien logran reportes de ubicación en zonas con mayor concentración de usuarios, su capacidad de detección disminuye en escenarios con menor tráfico, lo que refleja una dependencia moderada de la densidad de la red colaborativa.

Finalmente, los dispositivos Tile Pro muestran el desempeño más bajo, con ponderaciones de 0.21 en ambos casos. Estos resultados indican una limitada persistencia en la detección, lo cual sugiere que la efectividad de su red colaborativa es insuficiente en el entorno de prueba considerado. Esta situación confirma que, en contextos donde la cantidad de usuarios activos es reducida, la funcionalidad de rastreo se ve significativamente comprometida.

Tabla 4.2: Caracterización de los dispositivos

Dispositivo	Detecciones (0-44)	Ponderación (0-1)
AirTag 1	36	0.82
AirTag 2	34	0.77
Pebblebee Clip	23	0.52
Pebblebee Card	21	0.48
Tile Pro 1	9	0.21
Tile Pro 2	9	0.21

4.1.1.1. Rango de seguimiento

El objetivo principal es garantizar que la conectividad de todos los dispositivos de rastreo permanezca estable utilizando la tecnología (BLE). Esta estabilidad tiene que mostrarse de manera consistente en una diversidad de contextos urbanos, abarcando tanto situaciones con gran densidad de interferencias como en aquellas que no tienen interferencias. El poder sostener una comunicación sólida en situaciones cambiantes es un indicador clave de la confiabilidad de los dispositivos de rastreo, como se describe la prueba (véase la Tabla 4.1) se muestra los siguientes parámetros.

Tabla 4.3: Comparativa de alcance de rastreadores sin interferencias

Distancia	Tile Pro	AirTag	Pebblebee Card	Pebblebee Clip
5 m	Sí	Sí	Sí	Sí
15 m	Sí	Sí	Sí	Sí
30 m	Sí	Sí	Sí	Sí
50 m	Sí	Sí	X	Sí
>60 m	X	Sí	X	X

Tabla 4.4: Comparativa de alcance de rastreadores parcialmente cerrado

Distancia	Tile Pro	AirTag	Pebblebee Card	Pebblebee Clip
5 m	Sí	Sí	Sí	Sí
15 m	Sí	Sí	X	Sí
30 m	X	Sí	Sí	X
50 m	X	X	X	X
>60 m	X	X	X	X

Tabla 4.5: Comparativa de alcance de rastreadores con interferencias

Distancia	Tile Pro	AirTag	Pebblebee Card	Pebblebee Clip
5 m	Sí	Sí	Sí	Sí
15 m	Sí	Sí	Sí	Sí
30 m	Sí	Sí	X	Sí
50 m	X	Sí	X	X
>60 m	X	X	X	X

Los resultados de las pruebas experimentales muestran que todos los dispositivos de rastreo estudiados tienen un rendimiento uniforme. En particular, en la prueba de lugar sin interferencias (véase la Tabla 4.3) y en el escenario parcialmente cerrado, en donde la señal rebota entre edificaciones, árboles, personas entre otras superficies (véase la Tabla 4.4), todos los dispositivos sostuvieron una conexión adecuada a la tecnología BLE. La conectividad se mantuvo estable en las distancias más cortas, aun cuando las condiciones eran complejas como en el entorno con interferencias (véase la Tabla 4.5). Con esto se asegura que los sistemas de rastreo funcionen correctamente adicionalmente cuentan con funciones de asistencia, como señales audibles y vibratorias.

4.1.1.2. Red colaborativa

Evaluar el tiempo requerido para que los dispositivos de rastreo personal reporten una nueva ubicación tras simular su pérdida en una zona con tráfico peatonal, mediante observaciones en lapsos de tiempo definidos hasta un máximo de 60 minutos.

Tabla 4.6: Persistencia de actualización de ubicación en la red colaborativa A.

Dispositivo	5 min	15 min	30 min	60 min
AirTag 1	Sí	Sí	Sí	Sí
AirTag 2	X	Sí	Sí	Sí
Tile Pro 1	X	X	X	X
Tile Pro 2	X	X	X	X
Pebblebee Clip	X	Sí	Sí	Sí
Pebblebee Card	X	X	Sí	Sí

Tabla 4.7: Persistencia de actualización de ubicación en la red colaborativa B.

Dispositivo	5 min	15 min	30 min	60 min
AirTag 1	Sí	Sí	Sí	Sí
AirTag 2	Sí	Sí	Sí	Sí
Tile Pro 1	X	X	X	X
Tile Pro 2	X	X	X	X
Pebblebee Clip	X	Sí	Sí	Sí
Pebblebee Card	X	X	Sí	X

A pesar de que los dispositivos fueron colocados en la misma ubicación, se observaron diferencias en los tiempos de detección entre unidades del mismo modelo (véase la Tabla 4.6) en comparativa junto (véase la Tabla 4.7). Esto se debe a la naturaleza distribuida y las redes colaborativas, donde la detección depende de eventos externos no controlables, como la proximidad de dispositivos móviles compatibles.

4.1.1.3. Latencia en movimiento

Se presenta los resultados de detección de los dispositivos evaluados en distintos puntos de control, reorganizando la información para facilitar la comparación directa del desempeño entre rastreadores.

Tabla 4.8: Detección de rastreadores en puntos de control - Vuelta 1

Punto de Control	AirTag 1	AirTag 2	P. Clip	P. Card	Tile Pro 1	Tile Pro 2
P-BL (Peña Blanca)	No	No	No	No	No	No
NA-P (Nazacota P.)	Sí	Sí	No	No	No	No
MIHI (Gral. Mihi)	Sí	Sí	No	Sí	No	No
4-ES (4 Esquinas)	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No
MAXI (Maxims)	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No
BORR (Borrero)	Sí	Sí	No	Sí	No	No
L-AD (Liceo Aduanero)	Sí	No	No	No	No	No

En esta franja horaria, el desempeño de los AirTags es superior debido a que la red Find My de Apple es sumamente sensible incluso con pocos dispositivos cerca. En P-BL, al ser una zona periférica y muy temprano, la ausencia de nodos impide cualquier reporte. Los dispositivos Pebblebee muestra una activación más lenta, logrando estabilidad solo al llegar a puntos de alta congestión como 4-ES y MAXI (véase la Tabla 4.8).

Tabla 4.9: Detección de rastreadores en puntos de control - Vuelta 2

Punto de Control	AirTag 1	AirTag 2	P. Clip	P. Card	Tile Pro 1	Tile Pro 2
P-BL (Peña Blanca)	No	No	No	No	No	No
NA-P (Nazacota P.)	Sí	No	No	No	No	No
MIHI (Gral. Mihi)	Sí	Sí	No	No	No	No
4-ES (4 Esquinas)	Sí	Sí	Sí	No	No	No
MAXI (Maxims)	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No
BORR (Borrero)	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No
L-AD (Liceo Aduanero)	No	No	No	No	No	No

Al ser mediodía, el flujo vehicular y peatonal en el centro de Ibarra garantiza que los dispositivos estén rodeados de señales Bluetooth constantemente, por ende es la prueba con mayor tasa de éxito (véase Tabla la 4.9). Es notable que incluso el Pebblebee Clip mejora su reporte en BORR y NA-P, ya que la red de colaborativa se beneficia del tráfico, permitiendo que los teléfonos detecten el tag durante más tiempo. Los Tile siguen sin reportar, confirmando que la densidad de usuarios de su App específica es insuficiente frente a las redes integradas.

Tabla 4.10: Detección de rastreadores en puntos de control - Vuelta 3

Punto de Control	AirTag 1	AirTag 2	P. Clip	P. Card	Tile Pro 1	Tile Pro 2
P-BL (Peña Blanca)	No	No	No	No	No	No
NA-P (Nazacota P.)	Sí	Sí	No	Sí	No	No
MIHI (Gral. Mihi)	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No
4-ES (4 Esquinas)	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No
MAXI (Maxims)	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No
BORR (Borrero)	No	Sí	No	Sí	No	No
L-AD (Liceo Aduanero)	Sí	Sí	No	No	No	No

Al final del día, el comportamiento se vuelve más disperso (véase la Tabla 4.10). En L-AD, la detección sube debido a la salida de estudiantes, lo que aumenta la presencia de dispositivos móviles. Se observa que el AirTag 1 es el más consistente de todos los dispositivos evaluados, logrando detecciones casi en cada punto, mientras que los Pebblebee muestran un retraso mayor a pesar de que pueden detectar el punto de control, a pesar que en ocasiones el reporte llega minutos después, lo que en una prueba de paso rápido puede figurar como un no detectado, si no se actualizó justo en el punto exacto.

4.1.1.4. Coherencia entre dispositivos

Se evalúa la precisión relativa de múltiples dispositivos de rastreo vinculados simultáneamente a un mismo teléfono móvil. La posición geográfica del teléfono fue considerada como punto de referencia para el análisis comparativo.

Se registraron las coordenadas reportadas por cada dispositivo y posteriormente se calculó la distancia aproximada respecto al teléfono, con el fin de estimar la desviación espacial entre la posición real conocida y la posición informada por cada plataforma

Tabla 4.11: Distancia estimada entre el teléfono y los dispositivos de rastreo.

Dispositivo	Latitud (°)	Longitud (°)	Distancia (m)
Teléfono (Referencia)	0.325541	-78.144468	0
Negro (Tile 1)	0.325559	-78.144688	24.3
Blanco (Tile 2)	0.325562	-78.144655	22.1
Billetera (Card)	0.325503	-78.144497	6.1
Clip	0.325498	-78.144492	5.4
Apple 1	0.325532	-78.144664	21.8
Apple 2	0.325548	-78.144270	23.2

Los dispositivos presentan distintos niveles de proximidad respecto al teléfono utilizado como referencia (véase la Tabla 4.11). Se identifican dos comportamientos diferenciados: un grupo de dispositivos con desviaciones reducidas, que indican mayor precisión relativa, y otro grupo con desplazamientos más amplios, lo que evidencia una menor exactitud en la estimación de posición. Esta dispersión confirma que, aun cuando los dispositivos se encuentran en un mismo entorno físico, la ubicación reportada no es uniforme entre plataformas. Las diferencias observadas pueden atribuirse a la arquitectura tecnológica empleada por cada sistema, la frecuencia de actualización de datos y las condiciones del entorno durante la prueba.

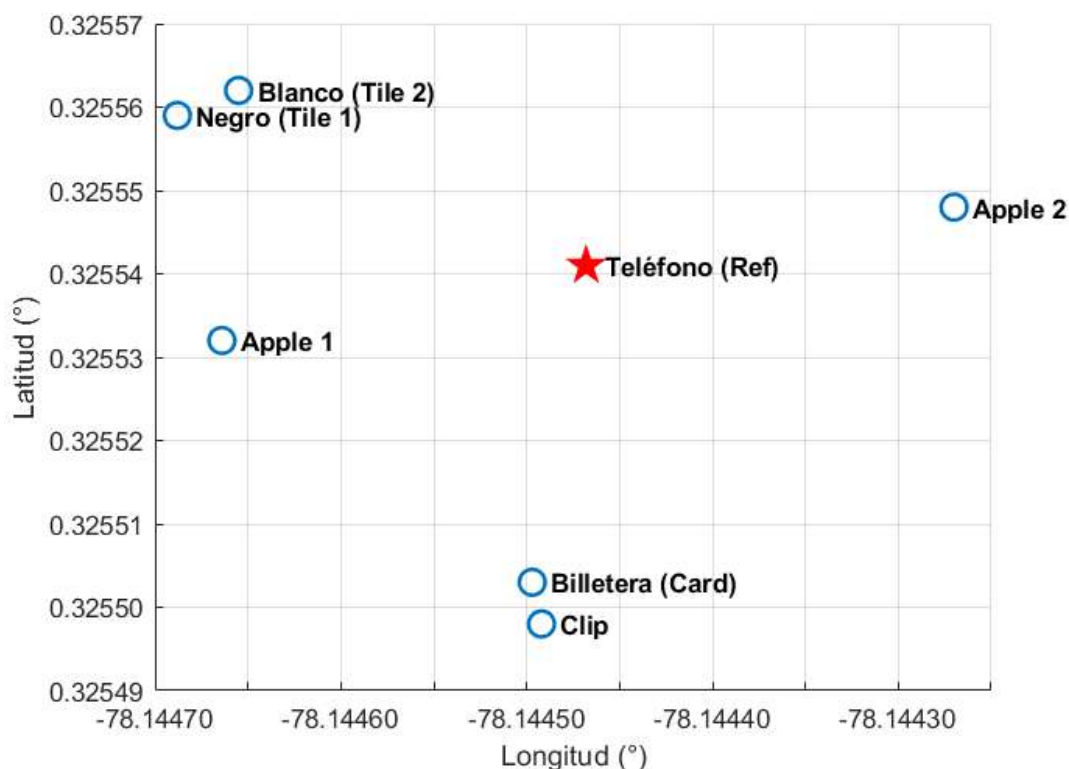


Fig. 4.2 Comparativa de distancias entre dispositivos.

Los resultados obtenidos en la evaluación de plataformas de rastreo personal comerciales evidenciaron que, si bien estos dispositivos permiten realizar funciones de localización, su desempeño presenta limitaciones en el contexto local debido a la dependencia de redes colaborativas para la actualización de la ubicación. Esta situación motivó el desarrollo de una solución alternativa basada en tecnologías de geolocalización satelital y comunicación móvil, con el fin de proponer un sistema de rastreo que no dependa de la disponibilidad de dispositivos cercanos para transmitir la información de posición.

4.2. Criterios para la selección de dispositivos

Para la selección de componentes se realiza la debida investigación de mercado buscando opciones viables, para ello se muestran los posibles dispositivos (véase la Tabla 4.12) basándose en los siguientes criterios.

Precisión del GPS: Capacidad del módulo para determinar la ubicación exacta en entornos urbanos

Velocidad de fijación: El tiempo que tarda el módulo GPS en obtener una primera fijación de posición válida.

Funcionalidad SMS: Capacidad del módulo celular de recibir comandos y enviar mensajes de texto de respuesta con la ubicación.

Cobertura celular: El módulo SIM/GSM/LTE debe operar en las bandas de frecuencia disponibles en tu zona geográfica.

Estabilidad de conexión: Capacidad de mantener una conexión estable con el broker MQTT incluso en movimiento o tras pérdidas temporales de señal.

Eficiencia Energética: Consumo bajo de corriente para maximizar la vida útil de la batería.

Tamaño y Peso: El dispositivo debe ser lo suficientemente pequeño y ligero para ser discretamente transportado.

Plataforma de Desarrollo: El entorno de software y el lenguaje utilizado para escribir el firmware.

Tabla 4.12: Criterios de selección y módulos de comunicación [55, 56].

Criterio de Selección	LilyGo SIM7600G	T- LilyGo SIM7670G	T- SIM7600G Shield ESP32/Arduino	Módulos (A6/SIM800L/SIM900)
Precisión del GPS	Muy Alta.	Muy Alta.	Muy Alta.	Baja
Velocidad de fijación	Rápida	Rápida	Rápida	Lenta
Funcionalidad SMS	Sí	Sí	Sí	Sí
Cobertura celular	4G/LTE/3G	LTE-Cat M1 / NB-IoT / 2G	4G/LTE	2G/GPRS
Estabilidad de conexión	Muy Alta	Máxima	Muy Alta	Baja
Eficiencia energética	Media/Baja	Alta	Baja	Alta
Tamaño y peso	Compacto	Compacto	Requiere cablear	Requiere cablear
Plataforma de desarrollo	Fácil	Fácil	Media	Media

Se elige la serie SIM7000 [57] porque los módulos SIM800L, A6 y SIM900 no son compatibles con la tecnología 4G, y estos modelos no satisfacen los requisitos. La placa LilyGo SIM7600G (véase en la Fig. 4.3) se eligió por satisfacer los criterios técnicos, se tomaron en cuenta elementos como la presencia de trabajos anteriores como se menciona en [16] que ya se a empleado esta placa con éxito, creando así un ambiente de desarrollo seguro y familiar. Además, aunque está conectada a nivel mundial, se ha verificado su adecuado desempeño en el país y documentación sobre trabajos anteriores.

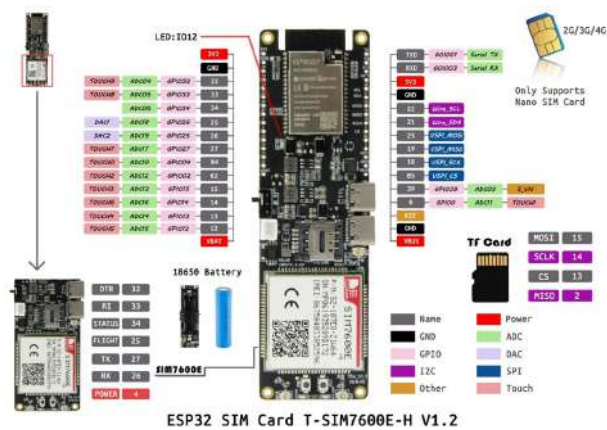


Fig. 4.3 Placa de desarrollo LilyGo SIM7600G [55].

Tabla 4.13: Especificaciones técnicas del dispositivo LILYGO T-SIM7600G [55].

Característica	Detalle
Microcontrolador principal	ESP32-WROVER (Doble núcleo, 240 MHz)
Módulo	SIM7600G (Global)
Conectividad	4G LTE, 3G y 2G
Geolocalización	GNSS (GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, QZSS)
Conectividad inalámbrica	Wi-Fi (802.11 b/g/n), Bluetooth 4.2 (BLE y Classic)
PSRAM	8 MB
Voltaje de funcionamiento	3.4 V – 4.2 V
Puerto de carga	USB Tipo-C
Alimentación	Soporte de batería 18650 integrado
Ranura SIM	Nano SIM Card
Antenas incluidas	Antena 4G/LTE, Antena GPS
Interfaces comunes	UART, SPI, I2C, ADC, DAC, GPIO

Debido a las diferentes tecnologías que se emplean y validan (véase la Tabla. 4.14), las pruebas del sistema se clasifican en dos tipos principales:

Tabla 4.14: Comparativa de rastreadores de posicionamiento

Criterio	Tile / Pebblebee / AirTag	LilyGO
Tipo de posicionamiento	Red colaborativa	GPS global
Trazado continuo	NO	Sí
Actualización en movimiento	Limitada o nula	Alta
Latencia	Depende de la red colaborativa	Segundos (configurable)
Cobertura	Depende de usuarios con la app	Depende de red celular
Datos exportables	Nulo	Completos (CSV, GPX, JSON)

4.3. Configuración de Adafruit

Es importante conocer las opciones y las herramientas para el correcto funcionamiento, configurando feeds específicos para la variable registrada y habilitando dashboards de monitoreo en tiempo real. La conexión se realizó mediante la clave API, garantizando la transmisión segura de información desde el ESP32 hacia la nube. Esta configuración permite la integración automática con MATLAB para el análisis y visualización, asegurando reproducibilidad y transparencia en el flujo de datos.

4.3.1. Creación de la cuenta

La plataforma Adafruit IO, que funciona como el servicio broker en la nube esencial para recibir. Acceder a la sección 'Registrarse' (véase la Fig. 4.4).



Fig. 4.4 Menú de la página oficial de Adafruit.

Completar los datos requeridos y hacer clic en 'Crear cuenta' (véase la Fig. 4.5).

First Name

Last Name

Email

Username

Username is viewable to the public on the forums, Adafruit IO, and elsewhere. It can only contain letters, numbers, and underscores.

Password

Create Account

Already have an Adafruit Account?

Fig. 4.5 Campos de registros.

Posteriormente, se recibe un correo electrónico para verificar la dirección de correo electrónico utilizada (véase la Fig. 4.6).



Fig. 4.6 Email de verificación.

Una vez validado el correo y creada la cuenta, se inicia sesión con las credenciales correspondientes (véase la Fig. 4.7).

Sign In

Your Adafruit account grants you access to all of Adafruit, including the shop, learning system, and forums.

Your adafruit account was successfully verified. ×

Email or Username

danielypz191@gmail.com

Password

Sign In

[Forget your password?](#)

Fig. 4.7 Credenciales de la cuenta.

4.3.2. Configuración del servicio web

Adafruit brinda servicios de IoT y entornos llamados "Feeds". A continuación, se describen las particularidades que tienen estos espacios:

Se accede a la sección de servicio IO en el menú de Adafruit (véase la Fig. 4.8).



Fig. 4.8 Menú de servicios de Adafruit.

En la sección "Feeds", se muestran los entornos existentes o, si es necesario, se generará uno nuevo (véase la Fig 4.9).

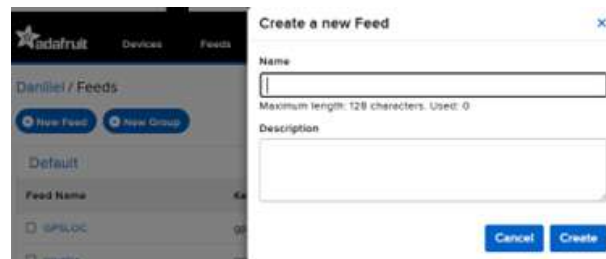


Fig. 4.9 Configuración del entorno.

Después, es necesario construir un tablero (Dashboard) para monitorear la placa de desarrollo en tiempo real. Con este fin, se diseña un tablero en blanco en la sección (véase la Fig 4.10).

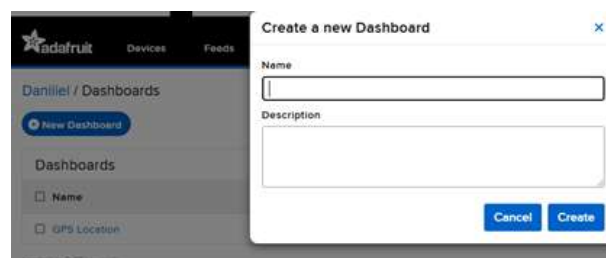


Fig. 4.10 Configuración del tablero.

Se crea un nuevo bloque y entre las opciones que aparecen, se elige la opción de Mapa (véase la Fig. 4.11).

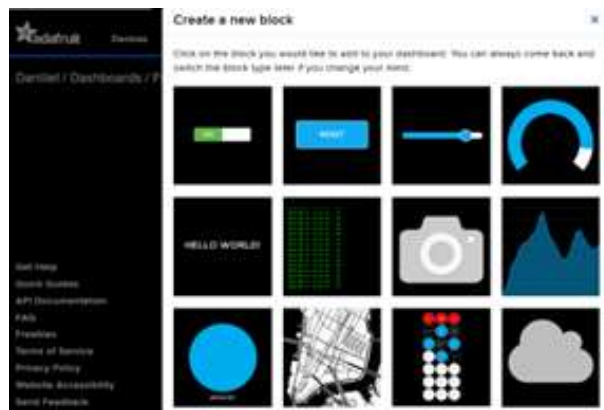


Fig. 4.11 Bloques en blanco.

El bloque de Mapa se enlaza al entorno (Feed) que se creó con anterioridad (véase la Fig 4.12).

Daniil / Feeds

[New Feed](#) [New Group](#)

Default

Feed Name	Key	Last value	Recorded
☐ GPSLOC	gpsloc	0.325599	20 days ago
☐ prueba	prueba		9 months ago

Fig. 4.12 Enlace de feed con el tablero.

Para finalizar, el entorno configurado y el tablero se visualiza el mapa del ejemplo (véase Fig 4.13).

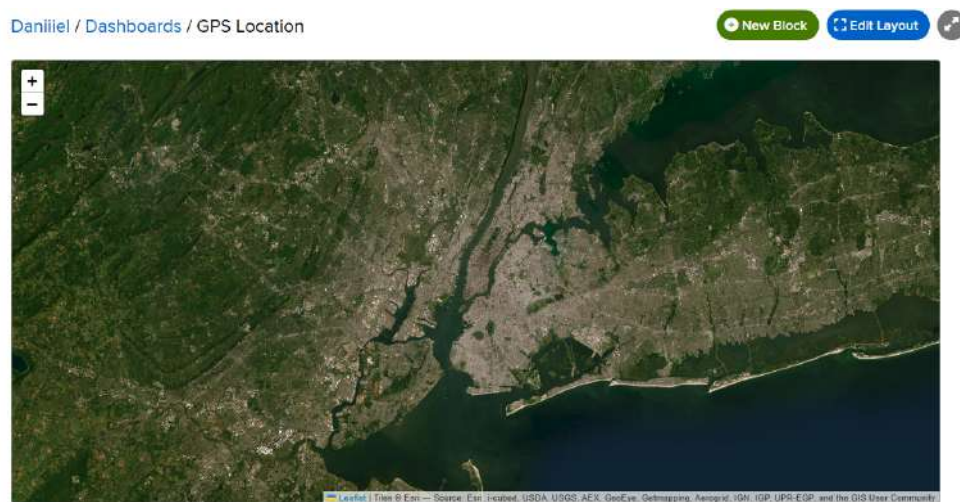


Fig. 4.13 Mapa en tiempo real.

4.3.3. Obtención de credenciales y clave de acceso MQTT

Estos datos son importantes porque sin ellos, el dispositivo no sabría dónde conectarse al broker o puerto ni cómo identificarse, incluso el envío de la información (véase la Fig. 4.14) al usar en la plataforma de Adafruit IO.

```
// CONFIGURACION ADAFRUIT IO
const char *broker = "io.adafruit.com";    // Broker MQTT
const int mqttPort = 1883;                 // Puerto MQTT
const char *mqttUser = "Daniieel";
const char *mqttPass = "aio_lzTt80fr61RfZRCsR9lxBKuLaLxa";
const char *mqttClientId = "LilyGoSim7600G";
const char *GPSTopic = "Daniieel/feeds/gpsloc/csv";
```

Fig. 4.14 Placa de desarrollo LilyGo SIM7600G .

Se debe ingresar al mapa configurado en el paso anterior, en la esquina superior derecha, se encuentra un ícono amarillo con una llave, el cual contiene los datos de las credenciales necesarias (véase la Fig 4.15).



Fig. 4.15 Credenciales únicas de la plataforma.

4.4. Integración con Matlab

Para este proyecto además de integrar una plataforma IoT con un seguimiento en tiempo real del dispositivo propuesto, con el objetivo de almacenar datos de longitud, latitud y altitud en una base de datos y además para su monitoreo. La posibilidad de bajar estos datos en formato .CSV o mediante API en un rango determinado facilita su integración con el entorno de MATLAB. Se elige esta integración con el fin de exponer e interpretar los datos de una forma

más eficaz y permitir su comparación con una fuente externa de referencia. La aplicación Wikiloc ha sido seleccionada como fuente de referencia ya que su plan gratuito proporciona todos los recursos requeridos para realizar las pruebas y porque emplea la geolocalización para crear rutas. Adicionalmente, se crea un segundo script que procesa los datos de Wikiloc, ya que esta aplicación permite descargar las rutas en un archivo con la extensión .GPX. De este modo, se obtiene un punto de referencia fiable para validar la eficacia y precisión de los datos recopilados por el dispositivo propuesto y la plataforma Adafruit.

4.5. Estimaciones del filtro de Kalman

El modelo dinámico definido por la matriz A para proyectar la estimación de la posición y velocidad desde el instante anterior ($\hat{x}_{k-1}$) al instante actual se define como,

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k \quad (4.1)$$

$\hat{x}_k^-$: Vector de estado actual.

A : Matriz de transición de estado.

$\hat{x}_{k-1}$: Vector de estado estimado posterior.

B : Matriz de control de entrada.

u_k : Vector de entrada de control.

En sistemas GPS sin control conocido, el término Bu_k se asume como cero debido a que se enfoca en el procesamiento de datos y no en un sistema de control.

La covarianza predicha cuantifica la nueva incertidumbre del estado. Se calcula propagando la incertidumbre anterior (P_{k-1}) a través de la matriz de transición (A) y añadiendo la incertidumbre del modelo o ruido del proceso (Q), ya que el paso del tiempo y las posibles imprecisiones del modelo incrementan la incertidumbre del sistema donde,

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (4.2)$$

P_k^- : Matriz de covarianza de error predicha.

A : Matriz de transición de estado.

P_{k-1} : Matriz de covarianza de error posterior.

A^T : Matriz de transición de estado traspuesta.

Q : Matriz de covarianza del ruido del proceso.

La ganancia de Kalman es el componente central del filtro, actúa como un factor de ponde-

ración que determina cuánto se debe corregir la predicción basándose en la nueva medición. La magnitud de $\mathbf{K}_k$ se define por la relación entre la incertidumbre del estado predicho ($\mathbf{P}_k^-$) y la incertidumbre total, que incluye tanto la incertidumbre del estado como el ruido del sensor ($\mathbf{R}$) donde,

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (4.3)$$

$\mathbf{K}_k$: Ganancia de Kalman.

$\mathbf{P}_k^-$: Matriz de covarianza de error predicha.

$\mathbf{H}$: Matriz de observación.

$\mathbf{H}^T$: Matriz de observación transpuesta.

$\mathbf{R}$: Matriz de covarianza del ruido de medición.

El vector de estado describe la mejor estimación final del estado ($\hat{\mathbf{x}}_k$), la corrección se realiza añadiendo un término a la predicción ($\hat{\mathbf{x}}_k^-$). Este término corresponde a la diferencia entre la medición $\mathbf{Z}_k$ y la medición predicha $\mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-$, ponderada por la ganancia de Kalman ($\mathbf{K}_k$) en donde,

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (4.4)$$

$\hat{\mathbf{x}}_k$: Vector de estado estimado.

$\hat{\mathbf{x}}_k^-$: Vector de estado predicho.

$\mathbf{K}_k$: Ganancia de Kalman.

$(\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-)$: Diferencia entre la medición real y la medición predicha por el filtro.

Finalmente, la matriz de covarianza de error estimada ($\mathbf{P}_k$), tiene como objetivo reducir la incertidumbre del estado ($\mathbf{P}_k^-$) después de incorporar la información de la medición. Esta matriz $\mathbf{P}_k$ es menor que $\mathbf{P}_k^-$ y se utiliza como la incertidumbre inicial ($\mathbf{P}_{k-1}$) en el siguiente ciclo de filtrado en donde,

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^- \quad (4.5)$$

$\mathbf{P}_k$: Matriz de covarianza de error estimada.

$\mathbf{I}$: Matriz identidad.

$\mathbf{K}_k$: Ganancia de Kalman.

$\mathbf{H}$: Matriz de observación.

$\mathbf{P}_k^-$: Matriz de covarianza de error predicha.

4.6. Pruebas de funcionamiento del dispositivo

Las pruebas de comportamiento del sistema desarrollado (véase la Tabla 4.15), evaluando su desempeño en condiciones reales de rastreo continuo, así como el análisis de su consumo energético, con el objetivo de estimar su viabilidad operativa y autonomía teórica bajo distintos intervalos de transmisión al igual que su funcionamiento (véase la Fig. 4.16).

Tabla 4.15: Criterios y pruebas de la placa LilyGo 7600G.

Nº	Objetivo de la Prueba	Pasos de la Prueba	Resultado Esperado	Resultado
1	Validación de la precisión y trazabilidad del Módulo GPS	1) Seleccionar rutas urbanas. 2) Recorrer las rutas simultáneamente usando: a) El registro de la placa propia (.CSV) y b) El track generado por Wikiloc (.GPX). 3) Importar ambos archivos de datos a MATLAB para superponer y comparar los puntos de GPS.	Se espera que los datos de la placa muestren una desviación mínima y que se encuentre dentro del rango de tolerancia del módulo GPS.	Aprobado
2	Localización instantánea por SMS	1) Colocar la placa en un punto fijo. 2) Enviar SMS's al dispositivo. 3) Medir el tiempo entre el envío del SMS y la recepción del mensaje de respuesta.	La placa debe responder al comando SMS y enviar un mensaje de texto con la ubicación actual dentro de un tiempo de respuesta predefinido.	Aprobado
	Autonomía	1) Cargar la batería del dispositivo. 2) Dejar el dispositivo rastreando continuamente. 3) Registrar el tiempo total.	El dispositivo debe operar continuamente por un tiempo similar al especificado en el diseño.	Aprobado



Fig. 4.16 Funcionamiento del dispositivo.

4.6.1. Validación de precisión

En este primer caso ocurre algo particular en concreto, el flujo de datos de la placa Lilygo se puede configurar para realizar un muestreo discreto con intervalos cercanos a los treinta segundos (como muestra la Fig. 4.17). Esta configuración es muy diferente a la del dispositivo de referencia, cuyo intervalo de muestreo oscila entre uno y dos segundos (véase la Fig. 4.18), siendo así considerablemente más denso. Para tratar esta discrepancia en la resolución temporal y asegurar que los conjuntos de datos sean comparables, fue preciso poner en marcha un procedimiento de interpolación durante el posprocesamiento. Con este método es posible crear puntos de datos intermedios, lo que iguala la densidad de muestreo y reduce las desviaciones temporales entre las diferentes fuentes.

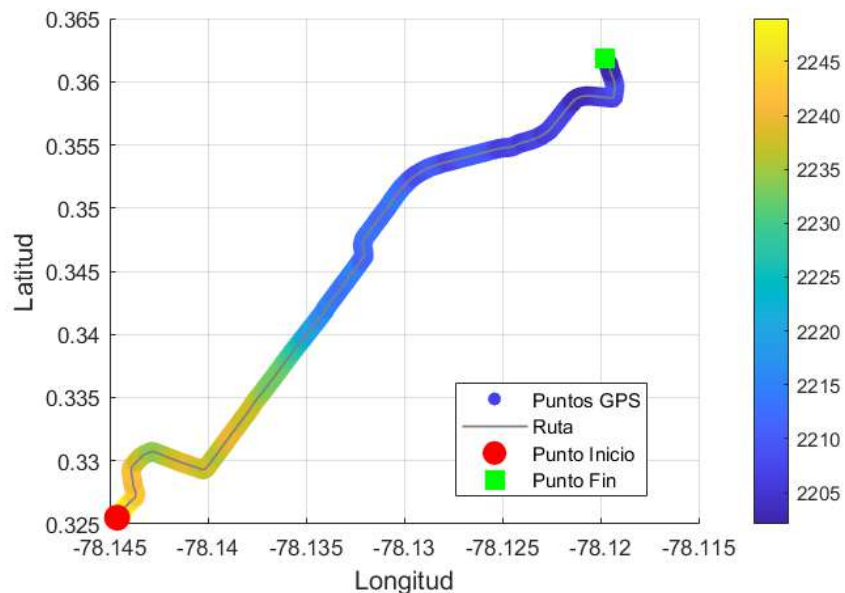


Fig. 4.17 Trayecto A referencia.

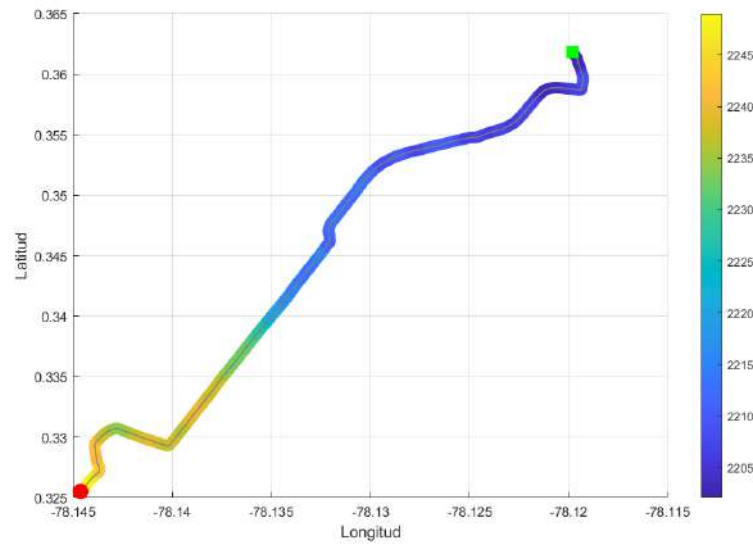


Fig. 4.18 Trayecto A registrado.

Para conseguir una caracterización topográfica completa y dinámica del trayecto, es esencial registrar los datos en función del tiempo de medición. Estos parámetros extremos no solamente determinan los límites del rango vertical de la trayectoria, sino que, al relacionarse con la variable temporal, posibilitan delinear el perfil de elevación total. La comparación de los datos (véase la Fig. 4.19 y Fig. 4.20).

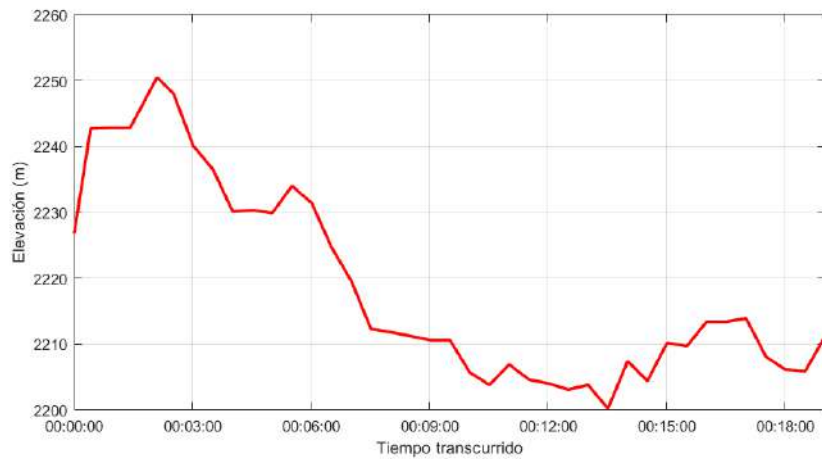


Fig. 4.19 Elevación del trayecto A de referencia.

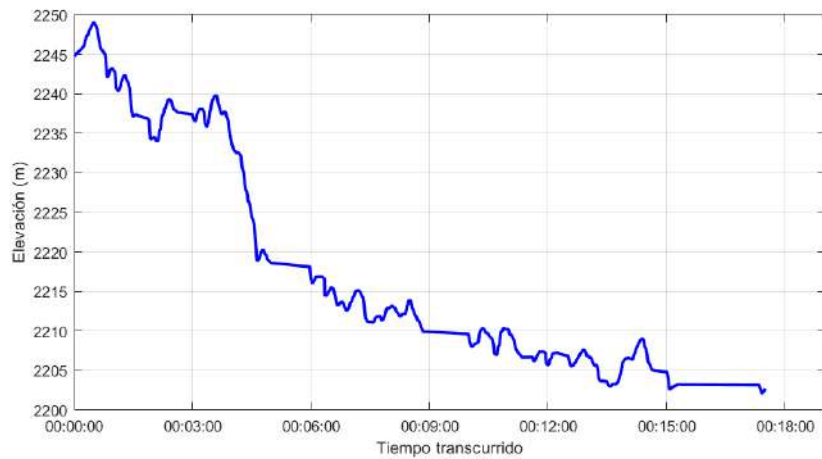


Fig. 4.20 Elevación del trayecto A registrado.

En el siguiente trayecto se modificó el tiempo de muestreo del dispositivo desarrollado, al mostrar los puntos cada dos segundos (véase la Fig. 4.21), ocurre la presencia de mayor ruido en los datos de la placa Lilygo, que es el máximo permitido en la plataforma de Adafruit en el plan gratuito. Manteniendo la misma referencia de muestreo de Wikiloc (véase la Fig. 4.22), siendo así considerablemente similar en la ruta GPS trazada.

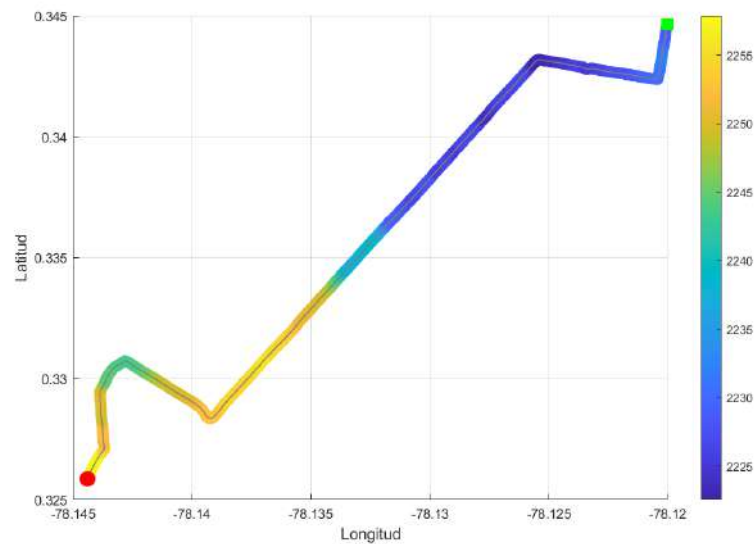


Fig. 4.21 Trayecto B de referencia.

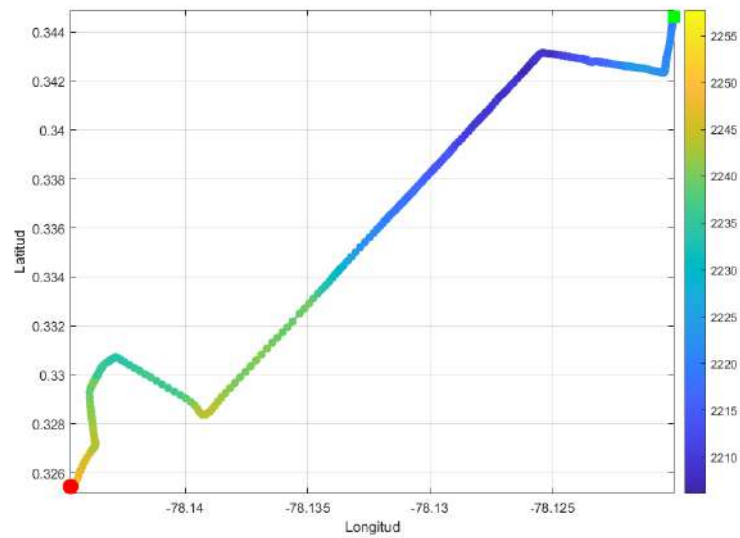


Fig. 4.22 Trayecto B registrado.

A diferencia del trayecto A específicamente (véase la Fig 4.20), estos parámetros determinan visualmente y numéricamente la nueva trayectoria lo que posibilita delinear el perfil de elevación total muy similar a simple vista pero con un ruido considerable. La comparación de los datos (véase en la Fig. 4.23 y Fig. 4.24).

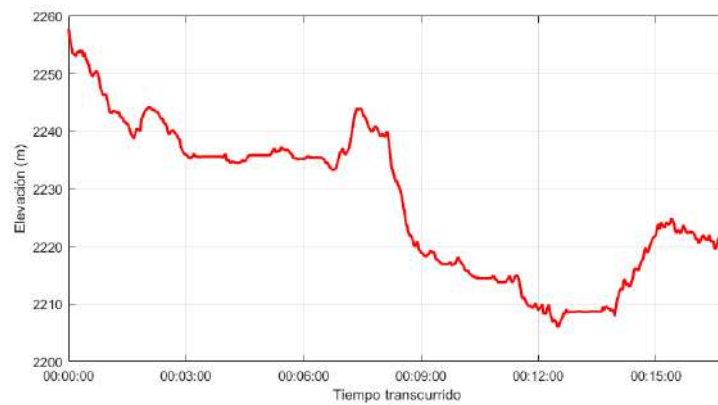


Fig. 4.23 Elevación del trayecto B de referencia.

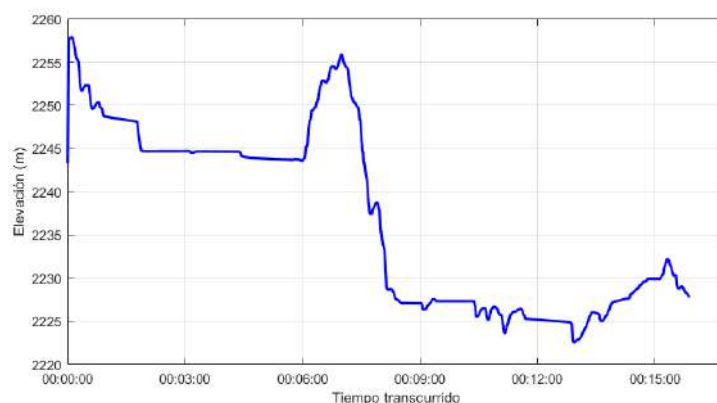


Fig. 4.24 Elevación del trayecto B registrado.

El ruido en las mediciones es algo innato de los sensores y de los sistemas GPS aun más, para ello se optó por aplicar un filtro de Kalman diseñado bajo parámetros definidos experimentalmente para la configuración del dispositivo desarrollado, obteniendo (véase la Fig. 4.25) de acuerdo a la disposición de las antenas 4G (mostrada en la Fig. 2.3) .

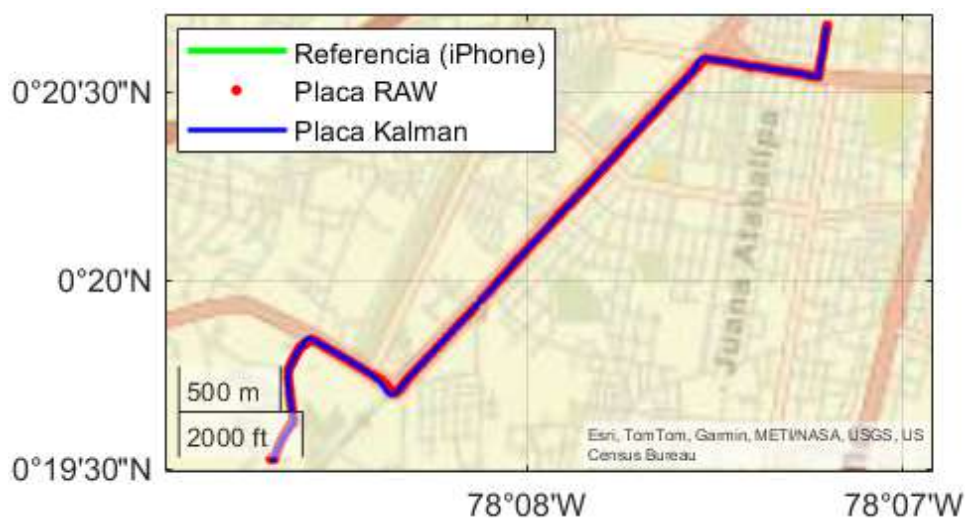


Fig. 4.25 Trayecto A filtrado.

En el trayecto C se mantienen los mismos parámetros ya que es la continuación del trayecto B, en este caso las mediciones (véase la Fig. 4.26 y la Fig. 4.27) se mantienen estables y siguen la referencia.

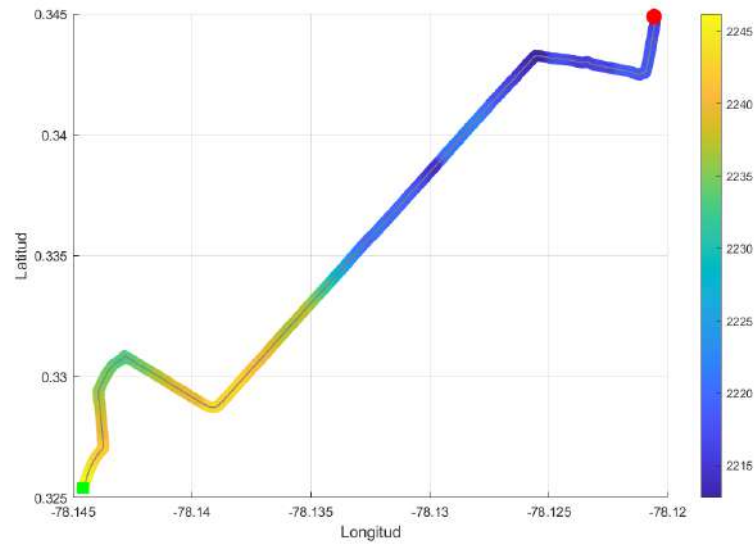


Fig. 4.26 Trayecto C de referencia.

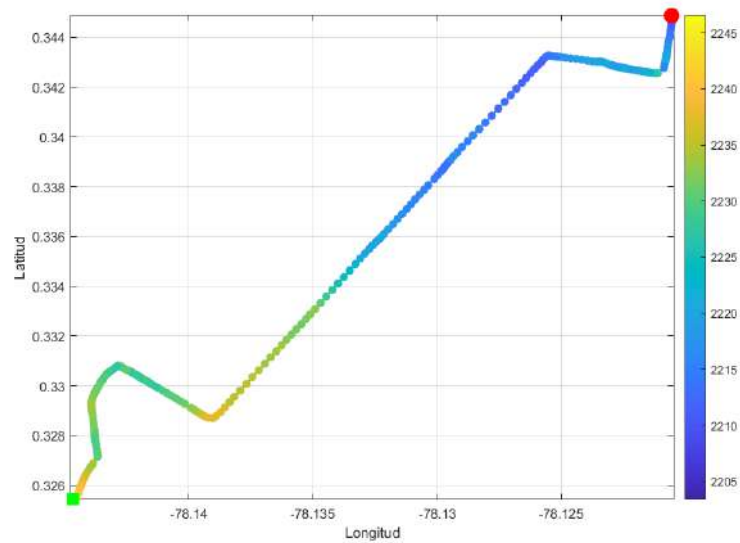


Fig. 4.27 Trayecto C registrado.

Al comparar ambos trazados, se observa una dispersión en los datos obtenidos por el dispositivo desarrollado, evidenciando la presencia de ruido en la medición de la posición, especialmente, de la misma forma presenta ruido considerable en el eje vertical en la medición (véase la Fig.4.28 y Fig. 4.29).

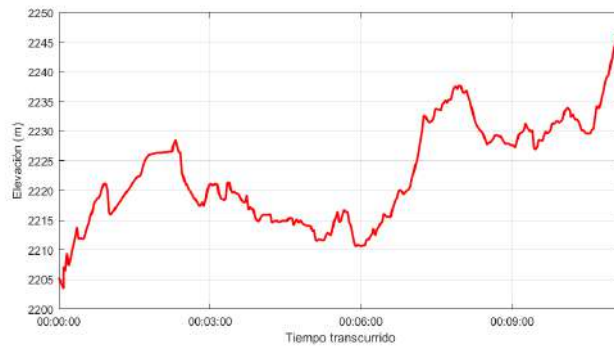


Fig. 4.28 Elevación del trayecto C de referencia.

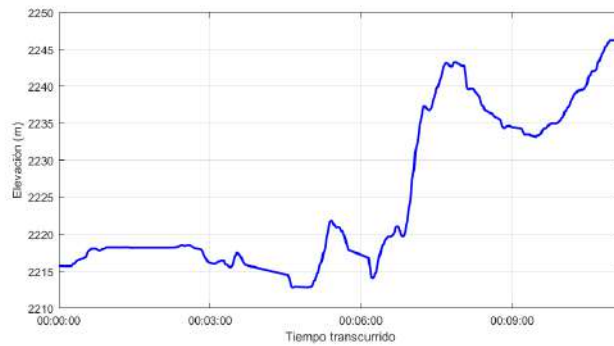


Fig. 4.29 Elevación del trayecto C registrado.

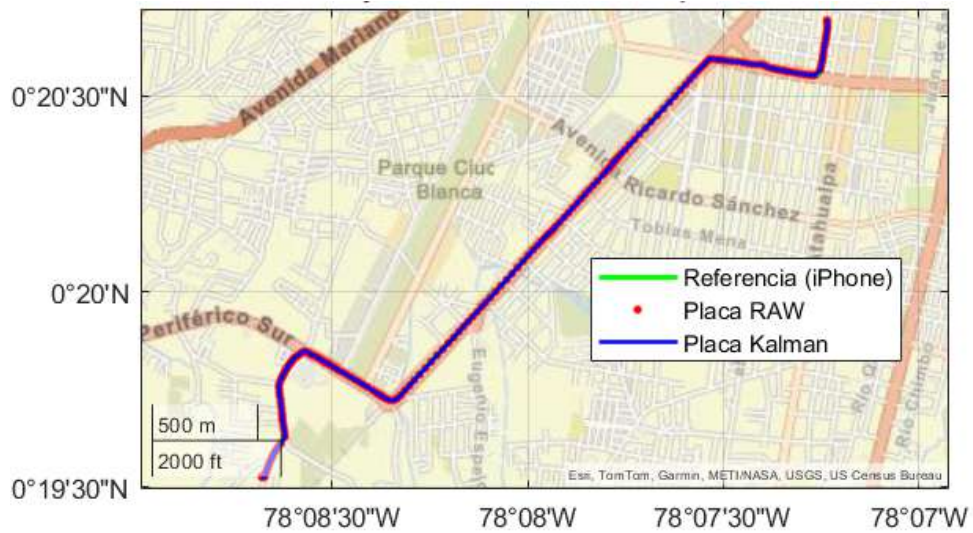


Fig. 4.30 Ruta 3 - Elevación Raw.

El comportamiento del sistema de rastreo, comparando el trazado obtenido por el dispositivo, mantiene una coherencia y un funcionamiento óptimo. Se presenta el trazado completo del trayecto (véase la Fig. 4.31), mientras que el trazado sin procesamiento (véase la Fig. 4.32).

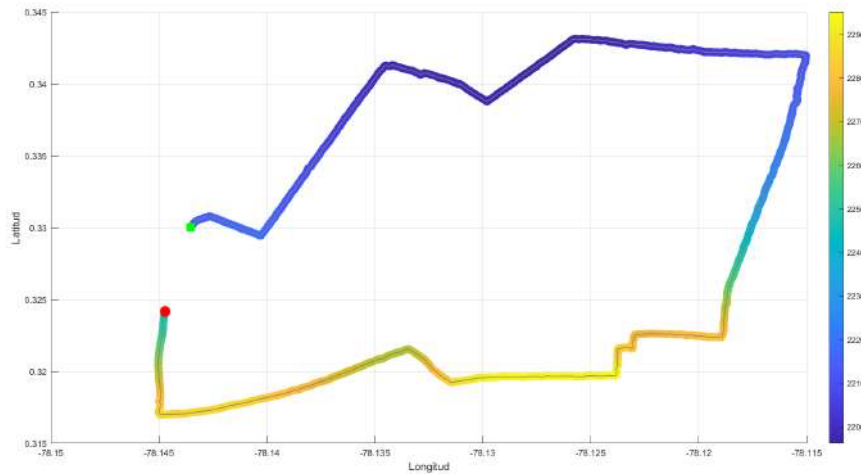


Fig. 4.31 Ruta 4 - Trazado completo de referencia.

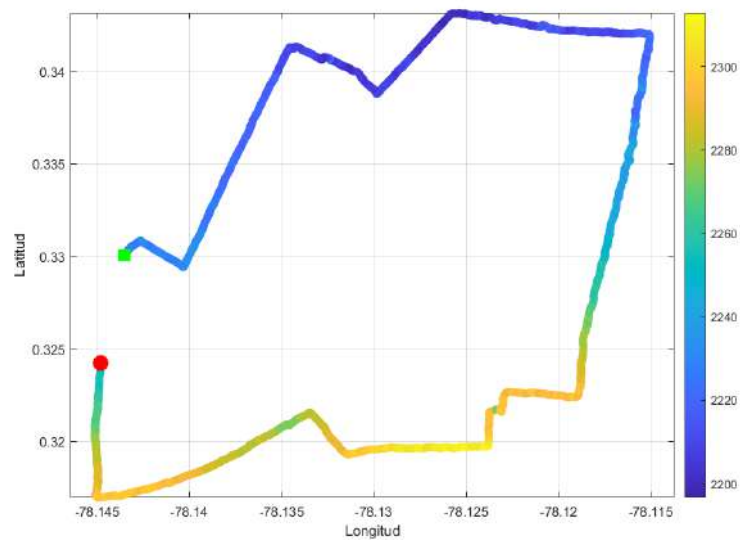


Fig. 4.32 Ruta 4 - Trazado completo registrado.

De forma similar, el comportamiento de elevación en función del tiempo, con el objetivo de identificar variaciones abruptas y ruido en la componente vertical (véase la Fig. 4.33 y la Fig.4.34) presentan la elevación registrada durante el recorrido, tanto para los datos de referencia como para los datos sin procesamiento. En las gráficas presentadas se evidencia un comportamiento irregular en los datos de elevación obtenidos por la plataforma desarrollada, caracterizado por oscilaciones de alta frecuencia que no se corresponden con la topografía real del recorrido, lo que confirma la presencia de ruido en la medición.

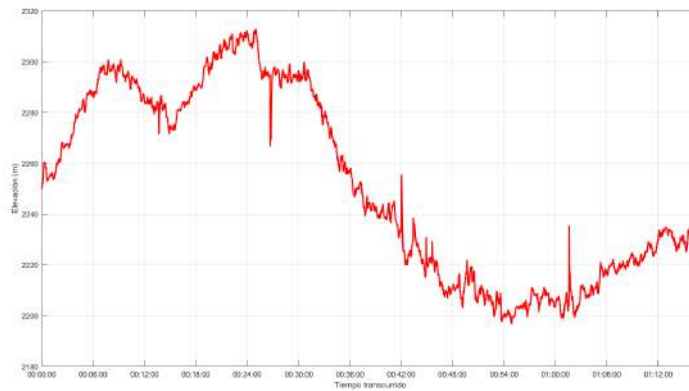


Fig. 4.33 Elevación del trayecto D de referencia.

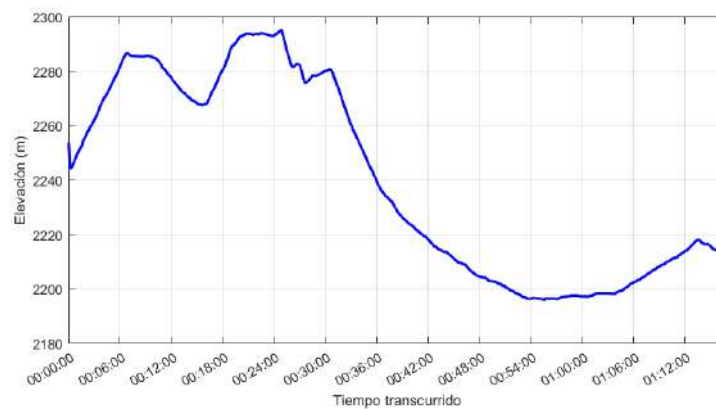


Fig. 4.34 Elevación del trayecto D registrado.

Con el fin de mitigar el efecto del ruido identificado, se aplicó un filtro de Kalman a los datos de elevación, utilizando como referencia los valores proporcionados por la plataforma Wikiloc para la misma ruta.



Fig. 4.35 Trayecto D filtrado.

La aplicación del filtro de Kalman permite suavizar las variaciones presentes en la señal original, obteniendo una trayectoria coherente con el perfil topográfico del recorrido (véase la Fig. 4.35). Los resultados obtenidos evidencian una reducción del ruido horizontal (véase la Fig.4.36), mejorando la continuidad del trazado y alineándolo de forma más precisa con los datos de referencia, lo que valida la efectividad del filtro aplicado en la señal ruidosa del GPS.

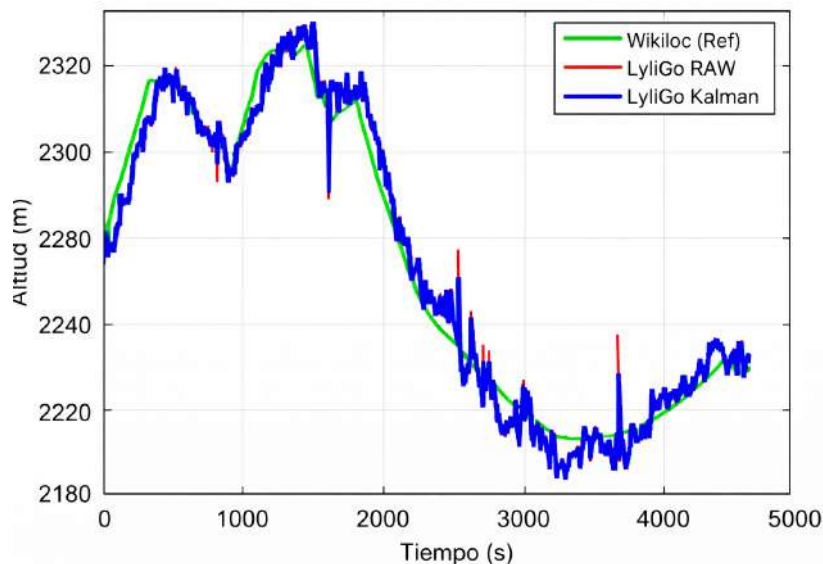


Fig. 4.36 Filtrado de elevación en el trayecto D.

Se realizó una última prueba dinámica con un recorrido corto a pie, configurando el sistema con un intervalo de transmisión de 40 segundos, lo que redujo el número total de puntos registrados en comparación con las pruebas anteriores.

Los resultados muestran que, al disminuir la cantidad de puntos, el porcentaje de mejora del filtro aumenta. Sin embargo, este incremento no implica mayor precisión global, ya que se pierde resolución en la trayectoria, especialmente en la componente de elevación.

En consecuencia, se evidencia la necesidad de establecer un punto intermedio: un mayor número de muestras reduce el porcentaje de mejora del filtro, pero conserva mejor la forma real del recorrido; mientras que menos puntos incrementan el porcentaje de mejora, a costa de perder detalle espacial (véase la Fig. 4.37).

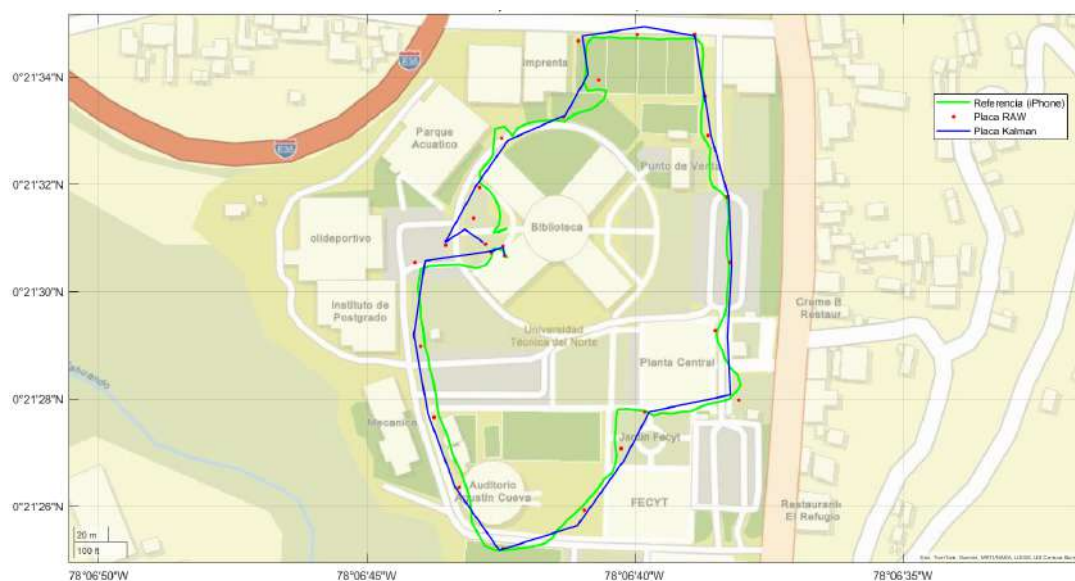


Fig. 4.37 Trayecto E filtrado.

Con el objetivo de cuantificar el desempeño del sistema propuesto (véase la Tabla 4.16) se presentan las métricas obtenidas para las rutas evaluadas, comparando los resultados del dispositivo desarrollado con los datos de referencia.

Tabla 4.16: Métricas en la Rutas.

N°	Disp.	Dist. (km)	Tiempo	Altitud Max/Min	Mejora Filtro	Puntos Totales
Trayecto A	Lilygo	5.45	00:16:55	2261.30 / 2190.70	0	39
	Wikiloc/Iphone	5.65	00:17:30	2248.99 / 2202.10	0	590
Trayecto B	Lilygo	4.23	00:16:55	2203.4 / 2246.6	0.44	498
	Wikiloc/Iphone	4.18	00:15:53	2257.89 / 2222.56	0.44	431
Trayecto C	Lilygo	4.17	00:11:02	2203.4 / 2246.6	1.89	318
	Wikiloc/Iphone	4.17	00:11:03	22246.22 / 2212.77	1.89	394
Trayecto D	Lilygo	11.14	01:16:08	2196.7 / 2312.9	0.40	2287
	Wikiloc/Iphone	11.10	01:16:39	2295.15 / 2196.20	0.40	1779
Trayecto E	Lilygo	0.892	00:17:06	2193.4 / 2220.3	42.51	27
	Wikiloc/Iphone	0.91	01:16:39	2202.30 / 2199.2	42.51	162

A partir de los resultados obtenidos, se observa que las diferencias en distancia y tiempo entre ambas plataformas son reducidas, lo que evidencia una correcta adquisición de datos. No obstante, las variaciones en altitud máxima y mínima confirman la necesidad de aplicar técnicas de filtrado para mejorar la calidad de la medición, especialmente en recorridos de mayor duración.

4.6.2. Localización por SMS

Con el objetivo de evaluar la estabilidad y repetibilidad de las coordenadas obtenidas por la placa de rastreo, se realizaron múltiples registros consecutivos en un mismo punto geográfico. Estos registros permiten analizar la dispersión de las mediciones y estimar un valor representativo de la ubicación reportada por el sistema. Con el proceso descrito (véase la Fig. 4.38), y de los datos obtenidos, se calculó el promedio de latitud y longitud, el cual se utiliza como referencia para el análisis posterior.

Tabla 4.17: Resultados de coordenadas registradas y valor promedio

Registro	Latitud	Longitud
Registro 1	0,325641	-78,144913
Registro 2	0,325657	-78,144867
Registro 3	0,325653	-78,144859
Registro 4	0,325651	-78,144859
Promedio	0,3256505	-78,1448745

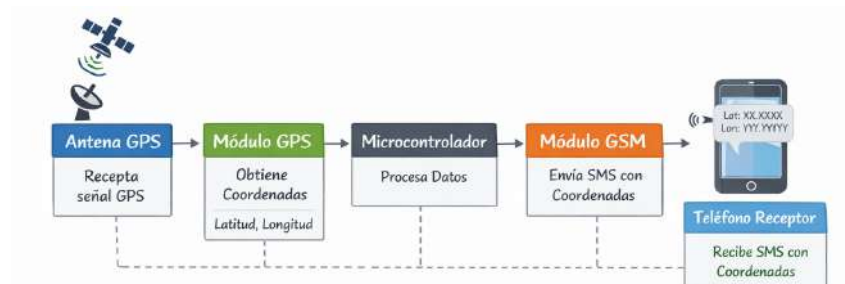


Fig. 4.38 Procesamiento de SMS.

Para calcular el error en metros, se utilizó la distancia entre cada punto y el promedio, considerando la ubicación en Ibarra, un grado equivale aproximadamente a 111,132 metros.

Tabla 4.18: Comparativa de envío por SMS

N°	Fecha hora enviado	Hora recibida	Estado	Error (m)
Registro 1	11:59:4	11:59:4	Recibido	4.38
Registro 2	11:59:44	11:59:44	Recibido	1.10
Registro 3	11:00:24	11:00:26	No recibido	1.74
Registro 4	11:01:04	11:01:4	Recibido	1.72

Durante la adquisición de los datos (véase la Tabla 4.18), se registró un evento puntual de pérdida de conectividad. En el caso del registro 3, la placa experimentó una interrupción temporal en la conexión a la red celular, lo que impidió el envío inmediato del mensaje SMS con la información de ubicación. No obstante, una vez restablecida la conexión, el sistema transmitió correctamente el mensaje correspondiente, incluyendo las coordenadas registradas en ese instante.

Este comportamiento evidencia que el sistema implementado mantiene la integridad de los datos de posicionamiento, asegurando la transmisión de la información una vez que la conectividad es recuperada. A pesar de esta interrupción momentánea, las coordenadas obtenidas no presentan variaciones significativas respecto a las demás mediciones, lo que refuerza la estabilidad del sistema de rastreo y su capacidad de operación en escenarios reales donde pueden existir pérdidas temporales de señal además se puede visualizar los mensajes enviados/recibidos por el dispositivo (véase la Fig 4.39).



Fig. 4.39 Mensajes SMS.

4.6.3. Autonomía del dispositivo

El consumo energético del sistema está dominado por el receptor GNSS y el enlace LTE activos de forma continua, sin emplear estrategias de suspensión de bajo consumo. En esta configuración, el consumo promedio del sistema se sitúa alrededor de 200 mA vease en la Tabla 4.19, lo que limita la autonomía a aproximadamente 4–5 horas al utilizar una batería de 1200 mAh. Durante este periodo, el volumen de datos transmitidos se mantiene por debajo de los 5 MB, evidenciando que el consumo energético está dominado por la conectividad LTE y no por el tamaño de los datos enviados.

Tabla 4.19: Consumo de corriente en diferentes estados.

Estado	Corriente (mA)
LTE registrado idle	60–90
GNSS activo	+30–40
Transmisión LTE	200–800 (picos)
Promedio	150–300

Tabla 4.20: Comparativa de consumo y autonomía según intervalo de envío.

Intervalo de envío (s)	Envíos/min	Corriente promedio (mA)	Autonomía teórica (h)	Datos por día (MB)
2	30	260	4.6	8.3
15	4	215	5.6	1.1
30	2	200	6.0	0.55
60	1	195	6.15	0.28

Aunque el datasheet del módulo SIM7600G reporta consumos del orden de pocos mili-amperios para LTE, WCDMA y GSM, estos valores corresponden a modos de bajo consumo (véase en Tabla 4.13). Además los estados sin transmisión de datos ni receptor GNSS activo. En el sistema desarrollado, el módulo opera en modo LTE activo con GNSS habilitado y conexión MQTT persistente, lo que incrementa el consumo promedio.

Tabla 4.21: Resultados experimentales de autonomía del sistema.

Prueba	Intervalo de envío (s)	Tiempo total (h)	Puntos	Consumo estimado (mA)
1	2	2,97	5339	404
2	5	3,07	2205	391
3	15	3,41	819	352
4	30	3,06	513	392
5	40	4,27	385	281
6	60	4,95	297	242

El intervalo de transmisión influye directamente en la autonomía del sistema (véase la Tabla 4.21), se observa una tendencia general en la que, al incrementar el tiempo entre envíos, el consumo promedio de corriente disminuye y su anomia se reduce. Este comportamiento se debe a que intervalos más cortos implican mayor frecuencia de activación del módulo de comunicación, lo cual incrementa el consumo energético.

Capítulo 5

Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo a futuro

5.1. Conclusiones

La caracterización de las plataformas de rastreo personal evidenció que su desempeño depende de la densidad de dispositivos que conforman la red colaborativa. En el contexto local analizado, se observó que la efectividad de estos dispositivos es limitada debido a la baja presencia de nodos, presentando un funcionamiento más consistente únicamente en zonas con mayor concentración de usuarios.

El desarrollo de una solución de rastreo personal demostró la viabilidad de implementar sistemas de localización en tiempo real en entornos urbanos mediante el uso de tecnologías de geolocalización satelital y comunicación móvil. La integración de estos componentes permitió obtener y transmitir información de ubicación hacia una plataforma web utilizando infraestructura de telecomunicaciones disponible.

El diseño de una arquitectura de rastreo personal basada en geolocalización satelital y comunicación móvil permitió establecer una estructura funcional compuesta por un módulo de adquisición de posición, un sistema de transmisión de datos y una plataforma de almacenamiento y visualización.

La implementación del prototipo permitió validar el funcionamiento de la arquitectura propuesta mediante la visualización de la trayectoria del dispositivo en tiempo real. Las pruebas realizadas y la aplicación de técnicas de filtrado permitieron mejorar la representación de los datos de posicionamiento obtenidos.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda realizar el respaldo periódico de los datos generados por la plataforma utilizada, debido a que el servicio de almacenamiento mantiene la información únicamente por un periodo limitado de 30 días. Asimismo, es importante considerar posibles diferencias de horario entre el envío de datos del dispositivo y el registro de los mismos en la plataforma.

Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema, se recomienda verificar previamente la configuración del dispositivo, incluyendo la disponibilidad de datos móviles, el registro del número telefónico para el envío de mensajes SMS y la correcta recepción del comando de consulta de ubicación.

Durante la adquisición de datos de posicionamiento, se recomienda ubicar el dispositivo en espacios abiertos y con mínima interferencia, con el fin de facilitar la conexión con los satélites y mejorar la calidad de la señal GPS.

Para el procesamiento y análisis de los datos experimentales, se recomienda aplicar procesos de filtrado para eliminar valores erróneos o coordenadas nulas, verificar las rutas de acceso a los archivos utilizados en los programas de análisis y registrar una única trayectoria por día para facilitar la organización de la información.

5.3. Trabajo a futuro

Como trabajo futuro, se plantea la evaluación del sistema de rastreo propuesto en diferentes tipos de entornos, tales como zonas rurales o áreas con limitada cobertura de red móvil, con el fin de analizar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones de conectividad.

Se propone además el desarrollo de una aplicación móvil que permita interactuar directamente con el sistema de rastreo, facilitando la visualización y gestión de la información de localización desde dispositivos portátiles.

Finalmente, se plantea la integración de mecanismos de gestión energética que permitan optimizar el consumo del sistema, con el fin de mejorar la autonomía del dispositivo y ampliar su aplicabilidad en escenarios de uso prolongado.

Bibliografía

- [1] El Telégrafo, “Robos incrementaron en el Ecuador durante 2021, respecto al año de confinamiento,” en línea. Disponible en: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/justicia/1/robos-incrementaron-en-el-ecuador-durante-2021>. Accedido: 19-abr-2025.
- [2] D. Montalvo, “Ecuador registra los niveles más altos de crimen, inseguridad y delincuencia del continente,” en línea. Disponible en: <https://www.ohchr.org/es/press-briefing-notes/2023/03/el-salvador-state-emergency>. Accedido: 11-abr-2025.
- [3] Fiscalía General del Estado, “Ecuador: Las cifras de robos,” en línea. Disponible en: <https://www.fiscalia.gob.ec/wp-content/uploads/2021/03/Cifras-robo-marzo2021.pdf>. Accedido: 25-abr-2025.
- [4] L. Guaman, *Desarrollo de un rastreador GPS para ubicación y desplazamiento de niños en rutas o zonas configuradas en una aplicación*, tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, ago. 2021.
- [5] L. Dahmani y V. Bohbot, “Habitual use of GPS negatively impacts spatial memory during self-guided navigation,” *Scientific Reports*, vol. 10, p. 6310, 2020.
- [6] Instituto Geográfico Militar, “Campañas de medición de la red GPS (RENAGE),” en línea. Disponible en: <http://www.geograficomilitar.gob.ec/campanas-de-medicion-de-la-red-gps-renage/>. Accedido: 18-abr-2025.
- [7] P. Sadeghian, J. Hakansson y X. Zhao, “Review and evaluation of methods in transport mode detection based on GPS tracking data,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 8, pp. 467–482, ago. 2021.
- [8] M. Sobhana, T. Chowdary, M. Venkatesh y K. Devendra, “Smart campus bus tracking alert system using real-time GPS,” en *ICACCS 2023*, 2023, pp. 1777–1781.

- [9] V. Mahadevan, N. Al-Busaidi, J. Moamari, P. V. Bindu, M. Konijeti y K. Venusamy, “An advanced public transport with tracking the vehicle and sending the location using GSM and GPS during pandemic situations,” en *INCET 2021*, may. 2021.
- [10] E. Prakash, S. Kanth, P. Chaitanya y B. Sirisha, “Enhancing emergency alert system: Live location sharing and phone call activation,” en *ICIMIA 2023*, dic. 2023, pp. 114–117.
- [11] D. Khutar, O. Yahya y H. Alrikabi, “Design and implementation of a smart system for school children tracking,” *IOP Conference Series*, vol. 1090, p. 012033, mar. 2021.
- [12] M. Limber, *Análisis e implementación de un sistema de rastreo satelital aplicado a mascotas mediante software libre con tecnología GPS y GSM*, tesis de grado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, may. 2021.
- [13] P. Morillo, “Interfaz abierta para servidor de datos de localización,” Universidad Técnica del Norte, feb. 2020.
- [14] K. Ruiz, *Sistema abierto para seguimiento de posición global: software de gestión de datos*, tesis de grado, Universidad Técnica del Norte, feb. 2020.
- [15] V. Tapia, *Estimación de posición y velocidad en datos de posicionamiento global*, tesis de grado, Universidad Técnica del Norte, abr. 2025.
- [16] K. Ortiz, *Diseño e implementación de un sistema de rastreo mediante GPS y red celular para detección de ubicación de Smart TVs robadas*, tesis de grado, ESPOCH, nov. 2023.
- [17] J. Salazar y J. Rojas, *Desarrollo de un dispositivo de rastreo para personas adultas mayores en red IoT y cloud*, tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, may. 2021.
- [18] T. Jair, *Desarrollo de un dispositivo de rastreo satelital en tiempo real y bloqueo vehicular*, tesis de grado, Universidad Internacional del Ecuador, dic. 2021.
- [19] L. Calle, *Implementación de geolocalización en mochilas de viaje mediante Arduino y aplicación móvil*, tesis de grado, Instituto Tecnológico Superior Compu Sur, abr. 2025.
- [20] B. Cando, “Implementación de tecnología GPS en el desarrollo de sistemas de rastreo de mascotas mediante dispositivos móviles,” abr. 2025.
- [21] S. Jin, Q. Wang y G. Dardanelli, “A review on multi-GNSS for earth observation and emerging applications,” *Remote Sensing*, vol. 14, p. 3930, ago. 2022.
- [22] REGME, “Red GNSS de monitoreo continuo del Ecuador,” en línea. Disponible en: <http://www.geograficomilitar.gob.ec/red-gnss-de-monitoreo-continuo-del-ecuador-regme/>. Accedido: 09-jun-2025.

- [23] Senseize, “Seguimiento GPS explicado,” en línea. Disponible en: <https://www.senseize.net/gps-tracking-explained>. Accedido: 06-jun-2025.
- [24] ARCOTEL, “Boletín estadístico de servicios de telecomunicaciones y radiodifusión, datos 2023,” 2023.
- [25] ARCOTEL, “Mapa de cobertura del servicio móvil avanzado,” en línea. Disponible en: <https://www.arcotel.gob.ec/mapa-de-cobertura-servicio-movil-avanzado-sma/>. Accedido: 12-jun-2025.
- [26] C. Conor, “¿Qué es el seguimiento BLE?,” en línea. Disponible en: <https://tech.co/asset-tracking/ble-tracking>. Accedido: 08-jun-2025.
- [27] Dunsun, “Tecnología de posicionamiento interior: Bluetooth RSSI vs BLE AoA vs UWB,” en línea. Disponible en: <https://www.dusuniot.com/blog/indoor-positioning-technology-bluetooth-rssi-vs-ble-aoa-vs-uw positioning/>. Accedido: 08-jun-2025.
- [28] Dunsun, “Bluetooth RSSI: tecnología de determinación de distancia,” en línea. Disponible en: <https://www.dusuniot.com/blog/bluetooth-rssi-positioning/>. Accedido: 08-jun-2025.
- [29] Claro, “Cobertura Claro Ecuador,” en línea. Disponible en: <https://www.claro.com.ec>. Accedido: 15-dic-2025.
- [30] Life360, “Modelos de Tile,” en línea. Disponible en: <https://www.life360.com>. Accedido: 10-ene-2026.
- [31] Life360, “Planes y precios internacionales,” en línea. Disponible en: <https://www.life360.com>. Accedido: 10-ene-2026.
- [32] Pebblebee, “Pebblebee Clip,” en línea. Disponible en: <https://pebblebee.com>. Accedido: 10-ene-2026.
- [33] Pebblebee, “Card Universal,” en línea. Disponible en: <https://pebblebee.com>. Accedido: 10-ene-2026.
- [34] Apple, “AirTag,” en línea. Disponible en: <https://www.apple.com/airtag/>. Accedido: 12-ene-2026.
- [35] Apple, “Especificaciones técnicas de AirTag,” en línea. Disponible en: <https://support.apple.com>. Accedido: 28-dic-2025.
- [36] Wikiloc, “Wikiloc,” en línea. Disponible en: <https://www.wikiloc.com>. Accedido: 03-ene-2026.

- [37] OpenStreetMap, “OpenStreetMap Wiki,” en línea. Disponible en: <https://wiki.openstreetmap.org>. Accedido: 20-ene-2026.
- [38] Strava, “Acerca de Strava,” en línea. Disponible en: <https://www.strava.com>. Accedido: 20-ene-2026.
- [39] Garmin, “Acerca de Garmin,” en línea. Disponible en: <https://www.garmin.com>. Accedido: 14-ene-2026.
- [40] Nike, “Nike Run Club App,” en línea. Disponible en: <https://www.nike.com>. Accedido: 14-ene-2025.
- [41] O. Israel, *Algoritmo para disminución de degradación del rendimiento en sistemas de control con actuación periódica*, tesis de grado, Universidad Técnica del Norte, sep. 2021.
- [42] MathWorks, “Multi-object tracking for autonomous systems and surveillance systems,” en línea: <https://www.mathworks.com/campaigns/offers/understand-multi-object-tracking.html> Accedido: 20 oct 2025.
- [43] A. Fausto, E. Iguasnia, R. López, L. Guzmán y W. Chango, “Análisis para la corrección de errores en la señal GPS,” *Mikarimin*, vol. 6, pp. 27–42, dic. 2020.
- [44] E. Constantino, “AT commands guide for GSM,” en línea. Disponible en: <https://www.emnify.com/developer-blog/at-commands-for-cellular-modules>. Accedido: 21-jun-2025.
- [45] SIMCom, “SIM7600 series AT command manual,” en línea. Disponible en: <https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2022/12/AR3437-LILYGO-SIM7600G-H-R2-ESP32-con-Soporte-de-Bateria-18650-Manual-de-comandos.pdf>. Accedido: 21-ene-2026.
- [46] S. Proaño, O. Gil y G. Rosario, “Development of a GPS and IoT based localization system: A case study in Quito,” *Investigación Tecnológica IST Central Técnico*, vol. 6, jul. 2024.
- [47] A. Granero, *Diseño e implementación de un sistema embebido de geolocalización y seguridad para bicicletas basado en MQTT*, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2025.
- [48] M. Castaño, A. López y P. Villa, “Estructuras metodológicas de revisiones sistemáticas en ingeniería de software,” *Ingeniare*, vol. 26, pp. 45–44, jun. 2021.

- [49] M. Moisés, “Sistema IoT con microcontrolador y WiFi TCP/IP,” Disponible en: <https://www.puntoflotante.net/INTERNET-OF-THINGS-BOLT-18F2550-ESP8266.htm>. Accedido: 21-jun-2025.
- [50] W. Ding, S. Liao, L. Cheng, X. Mi, Z. Zhao y H. Hu, “Command hijacking on voice-controlled IoT in Amazon Alexa platform,” en *AsiaCCS 2024*, pp. 654–666, jul. 2024.
- [51] A. Gharat y S. Patil, “IoT based smart home using MQTT protocol,” *International Journal of Science Technology and Management*, vol. 10, 2021.
- [52] A. Sarango, E. Pallmay, J. Sarzosa y J. Pozo, “Tipos y clasificación de las investigaciones,” *LATAM*, vol. 5, 2024.
- [53] C. Galarza, “Diseños de investigación experimental,” *CienciAmérica*, vol. 10, pp. 1–7, 2021.
- [54] D. Cifuentes, “Códigos fuente y datos del sistema de rastreo personal basado en IoT,” en línea. Disponible en: <https://github.com/danielypz191-hue/Codigos-Tesis>. Accedido: ene. 2026.
- [55] Lilygo, “T-SIM7600E/G/SA-H,” ficha técnica. Disponible en: <https://www.puntoflotante.net/INTERNET-OF-THINGS-BOLT-18F2550-ESP8266.htm>. Accedido: 21-jun-2025.
- [56] Lilygo, “T-A7670E/G/SA R2,” ficha técnica. Disponible en: <https://lilygo.cc/products/t-sim7600>. Accedido: 9-dic-2026.
- [57] SIMCom, “SIM7600X-H 4G wireless module,” ficha técnica. Disponible en: <https://www.simcom.com/product/SIM7600X-H.html>. Accedido: 09-dic-2025.

Anexos

Anexo A: Repositorio de archivos del dispositivo

En esta sección se presentan los archivos utilizados para el desarrollo del dispositivo propuesto. El repositorio completo del código y los recursos asociados se encuentra disponible en el siguiente enlace: <https://github.com/danielypz191-hue/Codigos-Tesis>