



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE MONITOREO GEO-IOT,
APLICADO EN POTENCIALES DESLIZAMIENTOS DE TIERRA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Electrónico

AUTOR: LEONARDO RAFAEL ALVARADO NEIRA

TUTOR: ING. JUAN DIEGO JARA SALTOS. Mgt.

Cuenca - Ecuador

2024

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Leonardo Rafael Alvarado Neira con documento de identificación N°0105609671, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 15 de marzo del 2024

Atentamente,



Leonardo Rafael Alvarado Neira

0105609671

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Leonardo Rafael Alvarado Neira con documento de identificación N° 0105609671, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo académico: “Evaluación del diseño de un prototipo de monitoreo Geo-IoT, aplicado en potenciales deslizamientos de tierra”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 15 de marzo del 2024

Atentamente,



Leonardo Rafael Alvarado Neira.

0105609671

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Diego Jara Saltos con documento de identificación N° 0103543658, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE MONITOREO GEO-IOT, APLICADO EN POTENCIALES DESLIZAMIENTOS DE TIERRA, realizado por Leonardo Rafael Alvarado Neira con documento de identificación N° 0105609671, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 15 de marzo del 2024

Atentamente,



Ing. Juan Diego Jara Saltos, Mgt.

0103543658

EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE MONITOREO GEO-IOT, APLICADO EN POTENCIALES DESLIZAMIENTOS DE TIERRA.

Leonardo Rafael Alvarado Neira
Ingeniería Electrónica
Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca, Ecuador
lalvaradon@est.ups.edu.ec

Abstract—Desde tiempos inmemorables, los deslizamientos de tierra han constituido una fuente recurrente de desgracias para la humanidad. Esta problemática ha provocado daños significativos, no solo en términos económicos y estructurales, sino que también evidencia altas tasas de mortalidad en las poblaciones circundantes. Con el objetivo de mitigar estos eventos, se ha optado por la implementación de tecnología low cost en la construcción de un prototipo GEO-IoT basado en microcontroladores de 32 bits con Wi-Fi integrado. Tanto el hardware como el software han sido propiamente diseñados para monitorear estos eventos geológicos, proporcionando una solución eficiente y accesible al público en general. Este proceso incluye la evaluación del diseño mediante rúbricas que permiten examinar el rendimiento del dispositivo en condiciones características de estos fenómenos. Empleando dichas caracterizaciones se abarcan pruebas desde el estado estacionario hasta la dinámica con simulación de deslizamientos, integrando varios periféricos externos y el uso de escenarios con obstáculos predefinidos. Estas condiciones propician el contraste entre diferentes metodologías con la hipótesis de que son capaces de incrementar tanto la precisión como la exactitud del dispositivo. Este documento expone la aplicación de algoritmos matemáticos en tiempo real y filtrado a través de software, beneficiando las características inherentes a dispositivos de alta sensibilidad con protocolos NMA. Logrando una transmisión segura a través de encriptación SHA con el propósito de visualizar la cinemática del suelo en una interfaz amigable con los usuarios.

Index Terms—Geo-IoT, Deslizamientos de tierra, Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Internet de las cosas (IoT), Raspberry Pi Pico W.

I. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierra son fenómenos naturales cuya manifestación de eventos adquiere un carácter recurrente en las estaciones invernales [1], causando grandes pérdidas económicas y humanas. Según diversos estudios geológicos [2], podemos determinar su clasificación dependiendo del movimiento en relación con su constitución, caracterizándose como: caída, volcamiento, deslizamiento rotacional, deslizamiento traslacional, flujos de tierra, flujos de lodo y reptación, teniendo en cuenta que cada uno de estos puede ser de carácter lento, moderado o rápido [3]. La probabilidad de determinar

este tipo de eventos está estrechamente relacionada con actividades sísmicas, volcánicas, además de la cantidad de fluidos en la zona. Debido a que estos sucesos tienden a desestabilizar el terreno, convirtiéndose en los desencadenantes más comunes en este tipo de desastres geológicos [4].

Estos antecedentes exponen que, al no disponer de monitoreo constante en las zonas de conflicto, los deslizamientos de tierra seguirán generando vulnerabilidad en las poblaciones aledañas. Esta problemática instituye la discusión entre conocedores con planteamientos en el contexto de seguridad [5], [6], instando a la creación de proyectos que brinden resguardo en las zonas de peligro a través del uso de tecnología sustentable. Estos criterios se ven estrechamente relacionados con tratados tanto nacionales como el plan de creación de oportunidades 2021-2025, objetivo 8, política 12.3, lineamientos territoriales B3 y D3 [7], e internacionales como los apartados de salud [8], innovación [9] y ciudades sostenibles [10] establecidos en los ODS de las Naciones Unidas, los cuales generan un nicho de posibilidades en el desarrollo de dispositivos que velen por el bienestar de las comunidades. Guiando así a esta investigación por propuestas vinculadas al campo de la teledetección de deslizamientos, que permiten el monitoreo del fenómeno geológico, como lo expone [11] y [12].

Esta propuesta insta el uso de sensores remotos con la premisa de adquirir información del terreno sin necesidad de encontrarnos presentes, en consecuencia, se evita peligros innecesarios para el contingente humano. Esto expone la necesidad del uso de Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) [13] a lo largo de la porción de planisferio propensa al deslizamiento de tierra, siendo una idea útil cuando se quiere predecir un evento. Este tipo de sensores basan su funcionamiento en la interconexión de nodos, planteando la cooperación entre dispositivos y generando una cantidad de información que pueda aportar al conocimiento de los sucesos en las zonas predefinidas. Esto quiere decir que dichos nodos detectarán cambios en las variables vinculadas al fenómeno, consideradas

como movimiento [14], seguido de la posibilidad de gestionar señales de advertencia a los dispositivos conectados a la red.

Este tipo de sensores facilitan la construcción de sistemas de monitoreo, ya que pueden ser vinculados con dispositivos geofísicos, geodésicos e incluso fotogramétricos para satisfacer la falta de información en tiempo real. Teniendo de esta forma dispositivos versátiles que pueden realizar las mediciones a través de UAV's [15], escáneres láser [16] hasta cámaras de vigilancia con inteligencia artificial [17] como se propone en varios artículos científicos. Esto integra la premisa de que tanto la eficiencia como la eficacia de los datos son fundamentales a la hora de examinar estos sucesos y dependerán de las estrategias de distribución, tal como se detalla en las metodologías usadas en radares InSAR [18], detectores sísmicos [19] y despliegue de drones [20]. Este enfoque también contempla el uso del sistema de posicionamiento global (GPS) [21], [22], donde tanto la calidad como la cantidad de dispositivos generan una respuesta más precisa de los sistemas de monitoreo.

El internet de las cosas es un factor esencial en este tipo de metodología, ya que brinda un mayor número de posibilidades tanto en la transmisión como en la gestión de los datos, a la vez que se aporta al desarrollo de una ciudad inteligente [23]. El IoT facilita el conocimiento mediante el acceso a la información desde cualquier parte del globo, incrementando la disponibilidad de almacenamiento en diferentes bases de datos [24], lo que genera redundancia para evitar la pérdida de información. Esto permite que a través de un sistema multiplataforma de visualización se pueda estudiar la deformación e inestabilidad de la zona conflictiva desde un lugar remoto y seguro.

Este método es conocido como teledetección, el cual utiliza una variedad de sensores y técnicas para cumplir con los objetivos programados en el código, en este caso en particular basado en el uso de la geodésica [25], podemos estudiar la cinemática del terreno mediante las variaciones detectadas en Delta X, Delta Y y Delta Z del talud. Este tipo de mediciones establece el uso del Sistema de Posicionamiento Global que, según información oficial del Gobierno de los Estados Unidos [26], consta de una constelación de 31 satélites operativos en órbita, los cuales tienen un desplazamiento elíptico a 20.200 km de altura aproximadamente. Se debe tener en consideración que la frecuencia de portadora es:

$$f_{L1} = f_0 \times 154 = 1575.42 \text{ MHz en L1} \quad (1)$$

$$f_{L2} = f_0 \times 200 = 1227.6 \text{ MHz en L2} \quad (2)$$

donde según el tipo de módulo se dispondrá de una o dos de estas frecuencias obteniendo 1500 bits de datos codificados, útiles en el desarrollo del prototipo.

Establecidos estos detalles del componente teórico, se propone la vinculación de los conocimientos que fundamentan

la detección de los deslizamientos de tierra con la nueva generación computacional, implementando tecnología más barata, más robusta y de fácil adquisición. Esto permite el desarrollo de un dispositivo cuya construcción se basa en microcontroladores de 32 bits con wifi integrado, un GPS de alta sensibilidad y algoritmos matemáticos para el filtrado de la señal en tiempo real. Lo que permite visualizar la cinemática en la zona de riesgo, consiguiendo como producto final un prototipo de monitoreo GEO-IoT, aplicado en potenciales deslizamientos de tierra. Este diseño será evaluado en un ambiente controlado dentro de la provincia del Azuay, sector de Santa Lucrecia, parroquia rural Tarqui, ya que presenta cuarteamientos y hundimientos de edificaciones en el terreno, lo que nos permitirá verificar si este es un recurso eficiente.

II. DESARROLLO DEL DISPOSITIVO

El dispositivo considera una serie de trabajos que permiten exponer la cinemática del suelo, por lo que este prototipo GEO-IoT está construido siguiendo una lógica secuencial de tres fases, de tal forma que matemáticamente podamos monitorear los cambios en la capa superior del terreno.

A. Fase 1. Adquisición de datos

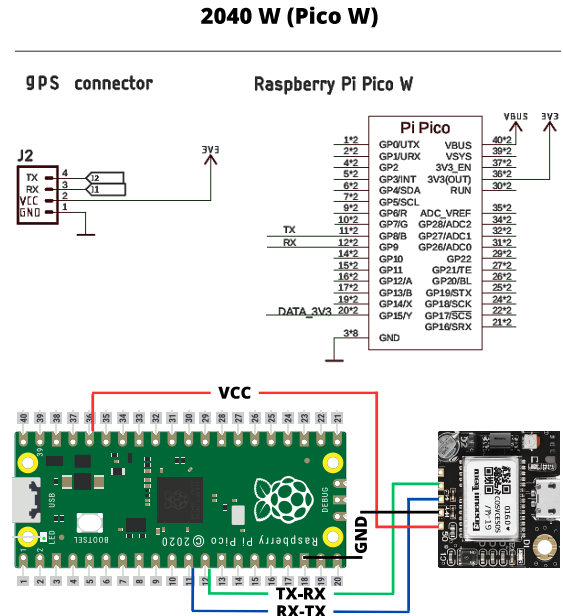


Fig. 1. Esquema de conexión de los dispositivos.

Las variables que nos mantendrán informados de buena tinta son derivadas de los sucesos en el planisferio obtenidos a través del módulo GPS GT-U7 de alta sensibilidad, utilizando tanto la antena de fábrica como una antena de alta ganancia con la posibilidad de un incremento en la precisión y exactitud mediante el uso de periféricos de bajo coste. Cabe mencionar que ciertas limitaciones influyen en la recepción

de información sin importar el tipo de antena que se vincule, entre los cuales tenemos la cantidad de satélites visibles, la disponibilidad de canales en el receptor y la presencia de obstáculos que puedan causar interferencias, como edificios, árboles y factores atmosféricos específicos.

B. Fase 2. Procesamiento de datos

El enlace establecido entre el dispositivo y los satélites permite obtener información sobre el comportamiento del prototipo. Dicha información es procesada por el Raspberry Pi Pico W ejecutando algoritmos matemáticos de gran envergadura en tiempo real. El uso de su doble núcleo nos permite integrar un filtro de mediana [27], un filtro promedio [28] y un filtro de Kalman [29]. La hipótesis plantea que estos métodos tienen mayor probabilidad de incrementar la precisión del dispositivo.

El acceso a datos concluyentes es esencial en cualquier estudio, y este no es excepción. La resolución del dispositivo se convierte en parte fundamental tanto para la exposición gráfica como para el cálculo del factor de error derivado de la diferencia entre las coordenadas reales y las obtenidas. Esto genera la necesidad de varios métodos de cálculo, donde la distancia entre dos puntos se calcula utilizando el algoritmo de Haversine, implementando la curvatura de la Tierra e integrando el sentido del deslizamiento en grados. Esto resalta la utilidad de un buffer de datos integrado para calcular un promedio de los valores en tiempo real. Dado que el dispositivo está diseñado para estudiar desplazamientos lentos y moderados, no se busca mayor velocidad de muestreo, sino una mayor precisión en las muestras del prototipo.

C. Fase 3. Transmisión de datos

El dispositivo es capaz de establecer una conexión a través del puerto 80 con la API de Mapbox, consiguiendo visualizar no solo la ubicación del dispositivo en tiempo real, sino que integra detalles como líneas de contorno que ayudan a la interpretación de los cortes en la superficie topográfica en planos acotados. En tanto, los cálculos realizados por el microprocesador serán transmitidos a través del puerto 443 hasta la interfaz de Google Sheets utilizando el algoritmo de HASH seguro con la encriptación SHA para garantizar la seguridad.

III. DESARROLLO MATEMÁTICO

Este dispositivo íntegro tres tipos de metodologías de cálculo detallados a continuación.

1) **Filtro de Mediana:** dado un conjunto de muestras:

$$x[n], \text{ donde } n = 1, 2, \dots, N.$$

Se ordena el conjunto de muestras en orden ascendente

$$x[1] \leq x[2] \leq \dots \leq x[N].$$

Si la resultante del número total de muestras N es impar, la mediana es simplemente el valor en la posición $(N + 1)/2$ del conjunto ordenado.

$$md = x[(N + 1)/2]. \quad (3)$$

Si la resultante del número total de muestras N es par, la mediana se obtiene promediando los valores en las posiciones $N/2$ y $N/2 + 1$.

$$md = (x[N/2] + x[N/2 + 1])/2. \quad (4)$$

En el código, se utiliza un algoritmo de ordenamiento simple (burbuja) para ordenar las muestras y luego aplica estas reglas para calcular la mediana.

2) **Filtro de Promedio:** dado un conjunto de muestras:

$$x[n], \text{ donde } n = 1, 2, \dots, N.$$

Se procede a sumar todas las muestras en el conjunto.

$$FP = x[1] + x[2] + \dots + x[N].$$

Se calcula el promedio dividiendo la suma total entre el número total de muestras N .

$$FP = Sum/N. \quad (5)$$

En el código, se realiza el desplazamiento de los valores previos con el objetivo de calcular latitud, longitud y altitud con los datos que ingresan en tiempo real y luego calcula el promedio como se describió anteriormente.

3) **Filtro de Kalman:** El algoritmo de estimación combina mediciones ruidosas con un modelo matemático del sistema para obtener valores más precisos por medio de iteraciones correctivas y predictivas de latitud, longitud y altitud [30]. Se plantea combinar las mediciones con un modelo dinámico del movimiento del receptor estudiado en [31] y la incertidumbre de las mediciones, lo que es especialmente útil en aplicaciones de posicionamiento.

- Modelo Dinámico del Movimiento

El modelo dinámico del movimiento para el filtro de Kalman en el caso del GPS se puede expresar como:

$$x_k = \Phi_{k-1} \cdot x_{k-1} + w_{k-1} \quad (6)$$

donde:

x_k es el vector de estado en el instante de tiempo k .

Φ_{k-1} es la matriz de transición de estado.

w_{k-1} es el ruido del proceso.

- Modelo de Medición

Las mediciones del GPS proporcionan información sobre el estado del sistema con ruido, por lo que el modelo de medición en el filtro de Kalman se puede expresar como:

$$z_k = H_k \cdot x_k + v_k \quad (7)$$

donde:

z_k es el vector de medición en el instante k.
 H_k es la matriz de sensibilidad.
 v_k es el ruido de medición.

- Paso de Predicción

$$x_k^- = \Phi_k \cdot x_{k-1} + w_{k-1} \quad (8)$$

$$P_k^- = \Phi_k \cdot P_{k-1} \cdot \Phi_k^T + Q_{k-1} \quad (9)$$

donde:

x_k^- es la estimación a priori del estado en k.
 x_{k-1} es la estimación a posteriori del estado en k-1.
 P_k^- es la covarianza a priori del error en k.
 P_{k-1} es la covarianza a posteriori del error en k-1.
 Q es la matriz de covarianza del ruido del proceso.

- Paso de Actualización

En el paso de actualización, utilizamos la nueva medición del GPS para mejorar nuestra estimación del estado del sistema y su incertidumbre.

$$K_k = P_k^- \cdot H_k^T \cdot (H_k \cdot P_k^- \cdot H_k^T + R_k)^{-1} \quad (10)$$

$$x_k = x_k^- + K_k \cdot (z_k - H_k \cdot x_k^-) \quad (11)$$

$$P_k = (I - K_k \cdot H_k) \cdot P_k^- \quad (12)$$

donde:

K_k es la matriz ganancia de Kalman.
 R es la matriz de covarianza del ruido de medición.

El prototipo tiene el objetivo de adquirir, calcular y transmitir datos que permitan, monitorear la deformación tanto horizontal como vertical del terreno. La medición de la deformación horizontal resulta de los datos vinculados a longitud y latitud correspondientes al eje X - Y, dando paso al cálculo de la deformación vertical utilizando las variaciones en la altitud en el eje Z. Lo que genera la caracterización del desplazamiento de la porción del planisferio en los ejes X, Y y Z, exponiendo los valores que permiten estudiar la deformación del terreno en diferentes direcciones, determinando la magnitud y la velocidad de la deformación.

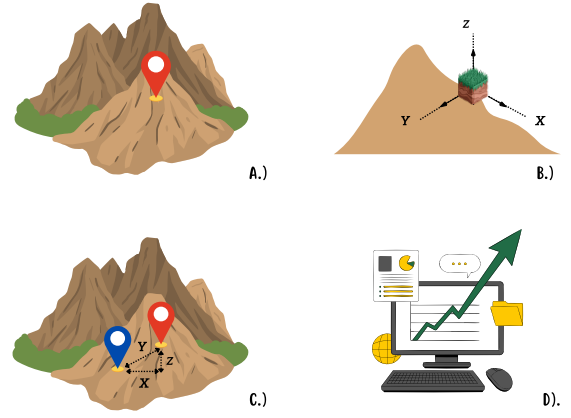


Fig. 2. A.) Ubicación del dispositivo. B.) Caracterización del desplazamiento en los ejes X, Y, Z. C.) Exposición de la deformación de tipo vertical y horizontal de la zona de conflicto. D.) Interfaz de monitoreo de los sucesos.

El estudio de estos desplazamientos se basa en el planteamiento de un umbral de detección debido a los errores de precisión que posee el dispositivo. Quiere decir que el dispositivo cambiará de posición debido a los eventos geológicos, trazando la ruta del desplazamiento después de cruzar el umbral de falsos positivos. Este tipo de detección establece cierta limitante de hardware, ya que el dispositivo fue construido con el objetivo de usarse en deslizamientos rotacionales, traslacionales, reptaciones, y desplazamientos laterales, debido a que los sensores implementados no consideran las características de los deslizamientos de tipo flujos, desprendimientos y vuelcos.

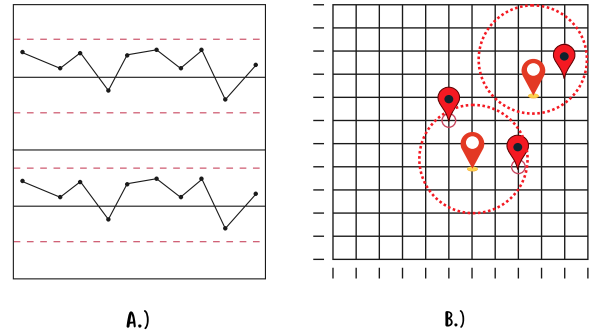


Fig. 3. A.) Umbral de detección del desplazamiento generado por la precisión del dispositivo. B.) Factor de error generado por la precisión del GPS.

IV. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO

A. Metodología

Se seleccionó cuidadosamente el lugar de ejecución de las pruebas, siguiendo un protocolo que abarcó varios pasos que se expondrán a continuación, con el objetivo de adquirir información eficaz. El propósito de este proceso fue verificar tanto el rendimiento del dispositivo como los parámetros que inciden en la detección de deslizamientos.

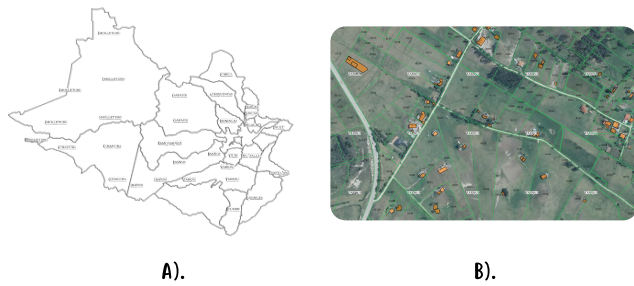


Fig. 4. A.) Ubicación de la parroquia Tarqui del cantón Cuenca utilizando el Geoportal del GAD. B.) Ubicación del predio donde se encuentra el entorno de pruebas utilizando el Geoportal del GAD.

El espacio de pruebas localiza tres tipos de terrenos con características geológicas inherentes de los deslizamientos de tierra, en el cual podemos examinar minuciosamente el dispositivo. El primer tipo expone gran acumulación de agua característica de laderas, con una extensión de 10x3 metros, el segundo se caracteriza por ser rocoso con deslizamientos laterales y una extensión de 10x4 metros, el último se encuentra constituido por relleno de escombros que expone reptaciones con una extensión de 10x3 metros llegando así a tener un área de pruebas total de 10 metros cuadrados, en estas superficies encontramos una inclinación del 90.04040% que corresponde a un ángulo de 42 grados.

Una vez seleccionado el entorno de pruebas, se designa las ubicaciones de estudio, permitiendo la recolección de 1200 muestras en cada prueba, con el fin de comparar el desplazamiento real con el medido. Durante este proceso, se examinó tanto la antena nativa del dispositivo como una antena de alta ganancia de 32 dBi. Este enfoque permite evaluar exhaustivamente el rendimiento del dispositivo en ambas configuraciones, proporcionando datos valiosos para el análisis comparativo de su desempeño.

Integrando metodologías fundamentadas en la investigación previa y en las características intrínsecas del dispositivo, se desarrolló una rúbrica adecuada que permite crear un ambiente equitativo para estudiar con detalle el rendimiento del prototipo, exponiendo su verdadero funcionamiento y se lo detalla a continuación.

- 1) Definir el entorno de pruebas: El entorno deberá contar con una pendiente del 15% - 45% [32], y un cuadrante de 10 metros en el cual podamos examinar minuciosamente el dispositivo.
- 2) Establecer la ubicación del dispositivo: Definir los puntos dentro del entorno de pruebas, considerando factores geográficos y topográficos relevantes.
- 3) Evaluación en espacios de tiempo: Tomar datos en intervalos de 60 minutos, distribuidos en 7 períodos de adquisición de datos para obtener una cobertura temporal exhaustiva.

- 4) Evaluación en diferentes condiciones climáticas: Realizar las pruebas en instancias de cielo despejado, cielo nublado y lluvia permite verificar el rendimiento en varias condiciones meteorológicas.
- 5) Evaluación diurna y nocturna: Repetir el proceso tanto durante el día como en la noche para evaluar posibles variaciones en el desempeño del dispositivo en diferentes momentos del día.
- 6) Evaluación con diferentes antenas: Experimentar tanto con la antena de fábrica como con la antena de alta ganancia, determinando si la elección de un periférico low-cost afecta significativamente el rendimiento del dispositivo.
- 7) Simulación de deslizamiento de tierra: Desplazar el dispositivo por puntos preseleccionados para simular un deslizamiento con el objetivo de estudiar el desempeño del prototipo Geo-IoT en condiciones simuladas de eventos geotécnicos.

V. RESULTADOS

El estudio derivado de las diferentes pruebas de precisión, exactitud y rendimiento a las que fue sometido el dispositivo se expresa mediante representaciones visuales, tales como gráficos de barras, representaciones 3D y mapas de contorno. Estas herramientas permiten exponer la densidad de valores estimados mediante el uso de nubes de puntos, lo que posibilita la evaluación de la precisión y exactitud del prototipo.

A. Prueba en estado estacionario con la antena de 32 dBi.

Es importante conocer cómo se desempeña el dispositivo en estado estacionario, ya que, con base en los resultados, podemos comprobar su precisión, exactitud y velocidad de transmisión de datos. Para este propósito hacemos uso de representaciones gráficas construidas de tal manera que cada literal representa los resultados de cada etapa de filtrado en el siguiente orden.

El literal A. representa los resultados obtenidos sin filtrado, el literal B. representa el filtro de media, el literal C. representa el filtro de Kalman y el literal D. representa el promedio de los datos entrantes. El literal A. es usado como referencia para la comparación de los cambios experimentados por los datos después de la aplicación del filtrado por software.

El estudio de la Figura 5, emplea la representación de datos a través de un mapa de contorno, en el cual se destacan los puntos críticos. Cada punto en este mapa representa una coordenada adquirida, y la intensidad del color en las zonas aumenta proporcionalmente a la aglomeración de puntos. Esto permite exponer la ubicación del dispositivo y examinar el rango de error, tanto en precisión como en exactitud.

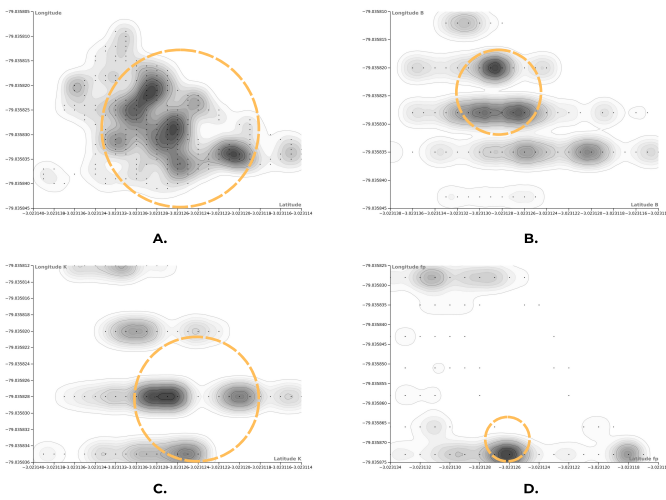


Fig. 5. Representación gráfica de los valores de latitud y longitud obtenidos con el prototipo Geo-IoT vinculado a la antena de 32 dBi.

TABLE I
RESULTADOS DE LONGITUD EN ESTADO ESTÁTICO CON ANTENA DE 32 DBI.

| Literal | Longitud inicial | Longitud final | Error (mts) |
|---------|------------------|----------------|-------------|
| A | -79.035815 | -79.035840 | 2.78 |
| B | -79.035818 | -79.035828 | 1.11 |
| C | -79.035826 | -79.035836 | 1.11 |
| D | -79.035870 | -79.035875 | 0.55 |

La tabla 1 expone los valores calculados utilizando la estimación del error por medio de la fórmula de Haversine. Esto permite comprobar que el literal B disminuye el error de precisión del dispositivo y la probabilidad de tener valores errados en el tiempo. El apartado C incrementa la precisión y la exactitud, aunque introduce un salto entre tres puntos críticos. Concluyendo con el apartado D, donde el promedio de valores reduce de manera exponencial los errores de precisión, pero produce un desplazamiento en las coordenadas del valor original por este instante.

TABLE II
RESULTADOS DE LATITUD EN ESTADO ESTÁTICO CON ANTENA DE 32 DBI.

| Literal | Latitud inicial | Latitud final | Error (mts) |
|---------|-----------------|---------------|-------------|
| A | -3.023132 | -3.023120 | 1.33 |
| B | -3.023130 | -3.023126 | 0.45 |
| C | -3.023130 | -3.023120 | 1.11 |
| D | -3.023128 | -3.023124 | 0.45 |

Con respecto a los valores de altitud, se observa una variabilidad más grande y menos controlable, esto indica que, aunque se aplique distintos tipos de filtros, los logros se acercan más a suavizar la señal que conseguir el valor real. Este fenómeno genera un rango de error que actualmente oscila entre ± 2.5 metros.

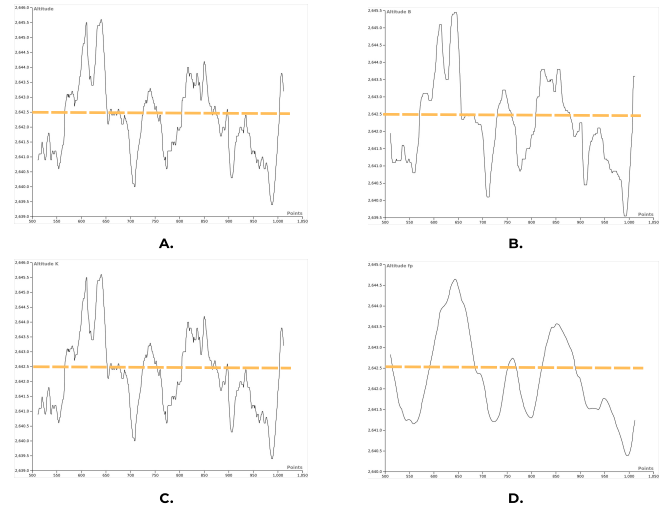


Fig. 6. Representación gráfica de los valores de altitud obtenidos con el prototipo Geo-IoT vinculado a la antena de 32 dBi.

B. Prueba en estado estacionario con la antena de fábrica.

Siguiendo la misma rúbrica utilizada previamente, se expone una clara diferencia en comparación con la antena de alta ganancia, exponiendo incrementos en el error tanto en la adquisición de coordenadas como la precisión y exactitud del dispositivo vinculado con este periférico.

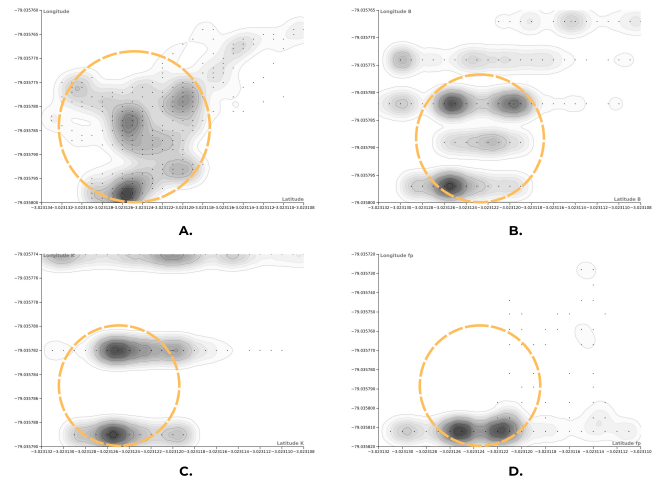


Fig. 7. Representación gráfica de los valores de latitud y longitud obtenidos con el prototipo Geo-IoT vinculado a la antena de fábrica.

TABLE III
RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA EN ESTADO ESTÁTICO SIN OBSTÁCULOS CON ANTENA DE FÁBRICA.

| Literal | Longitud inicial | Longitud final | Error (mts) |
|---------|------------------|----------------|-------------|
| A | -79.035767 | -79.035800 | 3.67 |
| B | -79.035777 | -79.035800 | 2.56 |
| C | -79.035780 | -79.035790 | 1.11 |
| D | -79.035800 | -79.035820 | 2.22 |

TABLE IV
RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA EN ESTADO ESTÁTICO SIN OBSTÁCULOS CON ANTENA DE FÁBRICA.

| Literal | Latitud inicial | Latitud final | Error (mts) |
|---------|-----------------|---------------|-------------|
| A | -3.023132 | -3.023118 | 1.55 |
| B | -3.023128 | -3.023118 | 1.11 |
| C | -3.023128 | -3.023122 | 0.66 |
| D | -3.023126 | -3.023120 | 0.66 |

En el apartado de altitud podemos apreciar que los valores continúan fluctuando entre ± 2.5 metros, llegando a la conclusión que este cambio de hardware vinculado a la antena de alta ganancia incrementa la precisión en los parámetros tanto de latitud como de longitud en los ejes X, Y, pero permanece constante con el umbral de error en el eje Z.

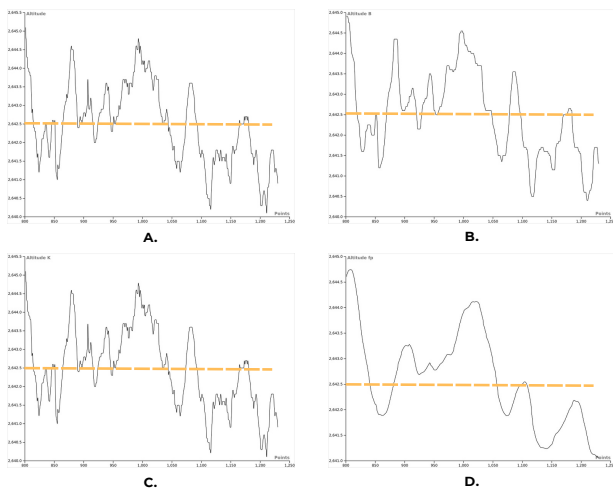


Fig. 8. Representación gráfica de los valores de altitud obtenidos con el prototipo Geo-IoT vinculado a la antena de fábrica.

C. Comparación entre la antena de fábrica y la antena de 32 dBi.

El contraste de ambos periféricos se ilustra en la Figura 9, donde se utiliza el literal A y B para el estudio de los parámetros de latitud y longitud, mientras que en los literales C y D exponemos los resultados correspondientes al parámetro de altitud. Estableciendo que en A y C el dispositivo está vinculado a la antena de 32 dBis en tanto que en el punto B y D se encuentra con la antena de fábrica.

En la Figura 9, se ofrece una comparación de primera mano exponiendo el desempeño del dispositivo conectado a cada uno de los periféricos en una misma gráfica. Se incluye también mediciones realizadas con un dispositivo más potente, proporcionando así un valor real de referencia para corroborar el funcionamiento del prototipo.

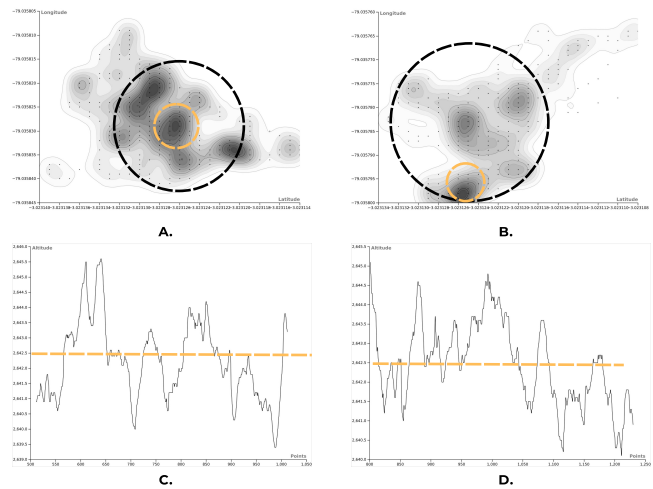


Fig. 9. Representación gráfica de los valores de latitud, longitud y altitud obtenidos con el prototipo Geo-IoT vinculado tanto a la antena de 32 dBi como a la antena de fábrica.

TABLE V
VALORES OBTENIDOS CON CADA ANTENA EN LOS EJES X,Y,Z.

| Literal | Latitud | Longitud | Error (mts) |
|---------|-----------|------------|-------------|
| Real | -3.023126 | -79.035825 | 2642.5 |
| 32 dBi | -3.023127 | -79.035830 | 2640.2 |
| Fábrica | -3.023125 | -79.035800 | 2640.2 |

Los resultados revelan la clara diferencia entre estos dos periféricos, evidenciando una mayor precisión con la antena de 32 dBi. El cambio de antena permite optimizar e incrementar la precisión del prototipo en el eje X y Y, reduciendo el error de 2.78 metros a 0.57 metros. No obstante, en el eje Z, se logra incrementar la resolución en un valor ínfimo, dando como resultado que los dos tipos de antenas reconocen un error promedio de ± 2 metros en el parámetro de altitud.

TABLE VI
DISTANCIA DE ERROR ENTRE DISPOSITIVOS.

| Tipo de antena | Error (mts) |
|----------------|-------------|
| 32 dBi | 0.57 |
| Fábrica | 2.78 |

El dispositivo exhibe una capacidad para gestionar variaciones climáticas con éxito, demostrando que en condiciones tales como días nublados, lluvia ligera y días soleados, no revela interferencias significativas. En tanto que en los exámenes de transmisión, sometido a pruebas que implicaron el envío de datos mediante cable serial y vía wifi, los paquetes son transmitidos con éxito a través de internet y almacenados en una base de datos. En este aspecto, el dispositivo demostró un rendimiento generalmente satisfactorio; sin embargo, en ocasiones se registró un retraso promedio de 1.2 segundos.

D. Pruebas con obstáculos de gran envergadura.

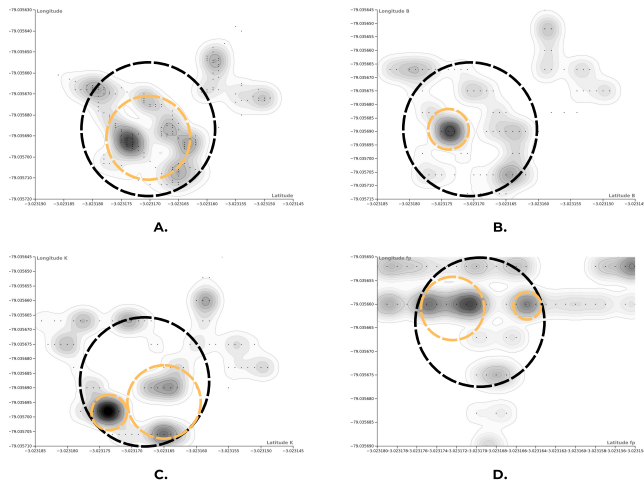


Fig. 10. Representación gráfica de los valores de latitud y longitud obtenidos con el prototipo Geo-IoT vinculado a la antena de 32 dBi con obstáculos.

Una vez establecidos los beneficios de la antena de 32 dBi continuamos las pruebas con este periférico, realizando el despliegue del prototipo entre vegetación y árboles frondosos con una altura promedio de 12 metros. Esto considera una dificultad de alto nivel, ya que se fuerza al dispositivo a trabajar casi sin línea de vista con los satélites.

TABLE VII
RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA EN ESTADO ESTÁTICO CON OBSTÁCULOS Y LA ANTENA DE 32 DBI.

| Literal | Longitud inicial | Longitud final | Error (mts) |
|---------|------------------|----------------|-------------|
| A | -79.035650 | -79.035720 | 7.78 |
| B | -79.035645 | -79.035715 | 7.78 |
| C | -79.035655 | -79.035710 | 6.12 |
| D | -79.035650 | -79.035675 | 2.78 |

TABLE VIII
RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA EN ESTADO ESTÁTICO CON OBSTÁCULOS Y LA ANTENA DE 32 DBI.

| Literal | Latitud inicial | Latitud final | Error (mts) |
|---------|-----------------|---------------|-------------|
| A | -3.023180 | -3.023155 | 2.78 |
| B | -3.023185 | -3.023160 | 2.78 |
| C | -3.023180 | -3.023162 | 2.00 |
| D | -3.023180 | -3.023154 | 2.89 |

Los resultados exponen que tanto la precisión como la exactitud del dispositivo en esta prueba sufren un desplazamiento del valor real, estableciendo un error máximo de 7.78 metros. En tanto, los mapas de contorno revelan una menor consistencia de puntos calientes en comparación con las pruebas anteriores. Es importante señalar que, a pesar de ubicarse entre densa vegetación, el dispositivo sigue operando de manera correcta en la transmisión de datos, lo que podría

atribuirse al desempeño tanto de las placas IoT-ready como a la conexión a internet.

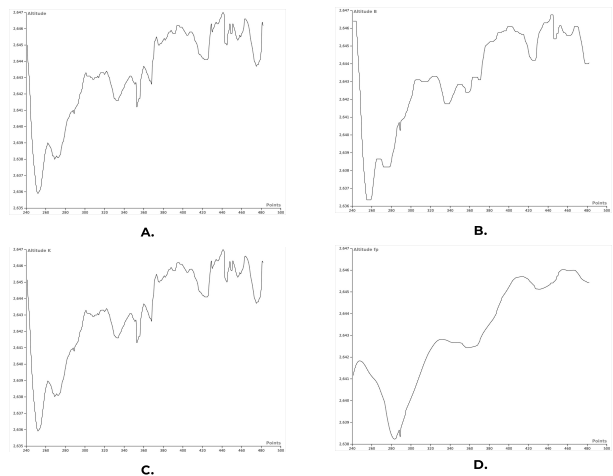


Fig. 11. Representación gráfica de los valores de altitud obtenidos con el prototipo Geo-IoT vinculado a la antena de 32 dBi con obstáculos.

En lo que respecta al parámetro de altitud, se observa que el valor máximo de error es -7.5 metros, indicando un desplazamiento significativo del valor real.

E. Pruebas del prototipo en estado dinámico simulando deslizamiento de tierra.

Esta metodología se basa en la selección de puntos de interés para trazar una ruta predeterminada que posibilite la comparación entre las mediciones físicas y las obtenidas por software. Esta variación en la ubicación del dispositivo genera una simulación del deslizamiento que puede darse tanto en distancias cortas como en distancias largas, permitiendo establecer el mínimo factor de error para detectar los eventos con base en la reconstrucción de la traza por software.

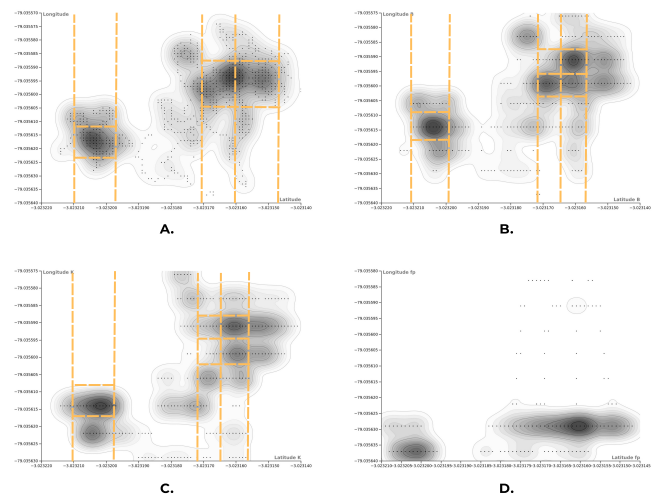


Fig. 12. Gráfica del patrón obtenido de la simulación de deslizamientos.

Con el fin de ser lo más fiel a la representación de la cinemática del suelo, se deben proporcionar las características inherentes a este tipo de eventos geológicos, como distancias, ángulos y elevaciones que fueron descritas en el apartado teórico de este documento.

Las gráficas exhibidas en la figura 12, muestran el comportamiento del dispositivo durante el procedimiento que consta de tres desplazamientos, en contexto se cambió la ubicación del dispositivo usando los desniveles existentes en la zona con el objetivo de evaluar la respuesta del dispositivo.

Este proceso emplea mapas de contorno como herramienta de estudio, donde se observa un desempeño satisfactorio en el literal B, indicando una notable capacidad del dispositivo para discernir tanto movimientos de pequeña escala como aquellos con escalas más extensas. Este resultado se fundamenta en la comparación del movimiento trazado con los valores obtenidos y el movimiento realizado en la zona de pruebas, exponiendo la coherencia y fiabilidad de la metodología propuesta. No obstante, es relevante destacar que el filtro de Kalman interactúa de manera competente exponiendo los tres movimientos realizados, aunque inferiores en comparación con el literal B.

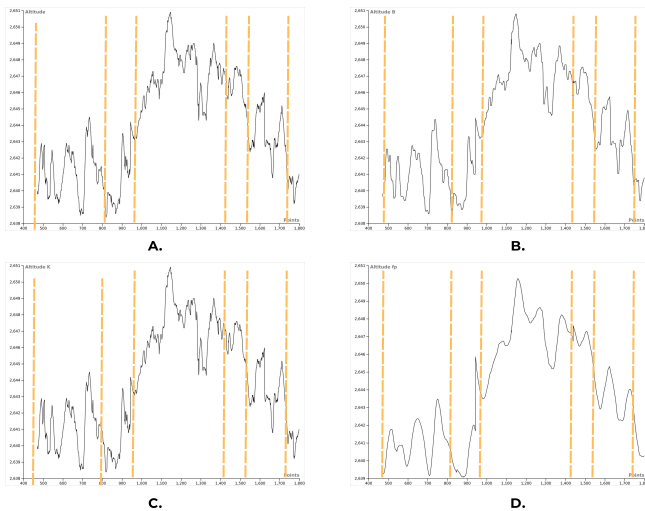


Fig. 13. Representación gráfica de los valores de altitud obtenidos con el prototipo Geo-IoT en la simulación de deslizamientos.

Los resultados con respecto al eje Z demuestran que el dispositivo es capaz de exhibir claramente los eventos ocurridos, esto plantea que se puede monitorear deslizamientos de tierra con poca resolución y se podría agregar una correspondencia matemática del desplazamiento medido con el valor real para obtener resultados más acertados con los verdaderos.

Este planteamiento puede explicarse claramente mediante el estudio con gráficos de barras. Herramienta para comunicar de manera efectiva los desplazamientos registrados, permitiendo una comprensión más intuitiva de la ubicación y la extensión del fenómeno deslizante, destacando patrones o tendencias de manera más efectiva que otros tipos de visualizaciones.

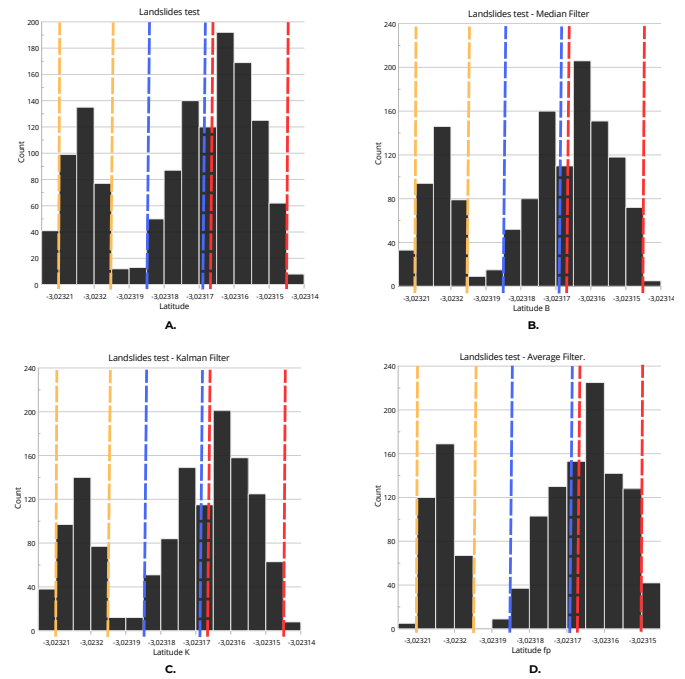


Fig. 14. Representación de los valores de latitud en gráfico de barras como contraste de los valores expresados anteriormente con gráficos de contorno.

Este segundo enfoque permite visualizar tanto los rangos de error como las coordenadas del desplazamiento, resaltando los resultados con líneas de segmentación para subrayar cada evento con un color diferente. Estos resultados son congruentes con investigaciones previas, indicando que, el enfoque del método B es el óptimo para este tipo de evaluaciones.

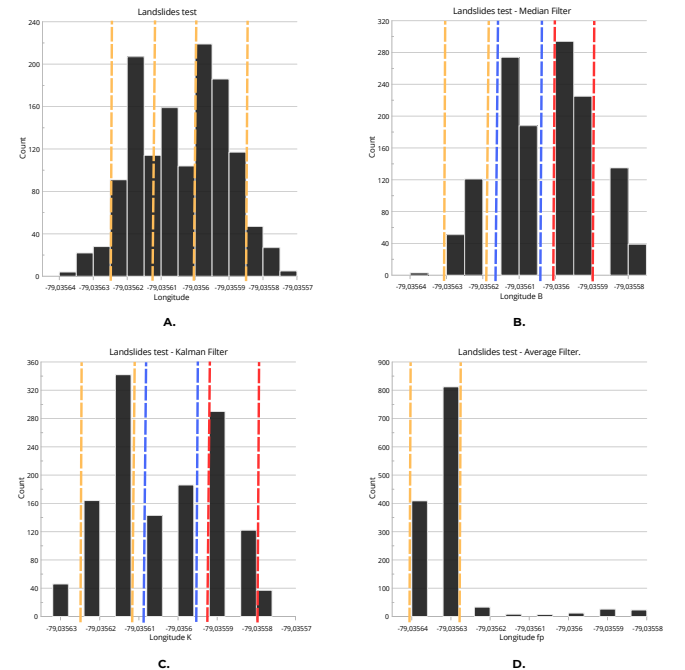


Fig. 15. Representación del incremento en la precisión de los valores de longitud expresados anteriormente con gráficos de contorno.

En esta sección, es posible identificar con mayor facilidad los puntos de inflexión de las medidas obtenidas. Lo que reduce el error y aumenta la certeza de los resultados. Este hallazgo permite reconocer que el método descrito en el literal D ocasiona un desplazamiento de las coordenadas, lo que compromete el rendimiento del prototipo, razón por la cual es descartado.

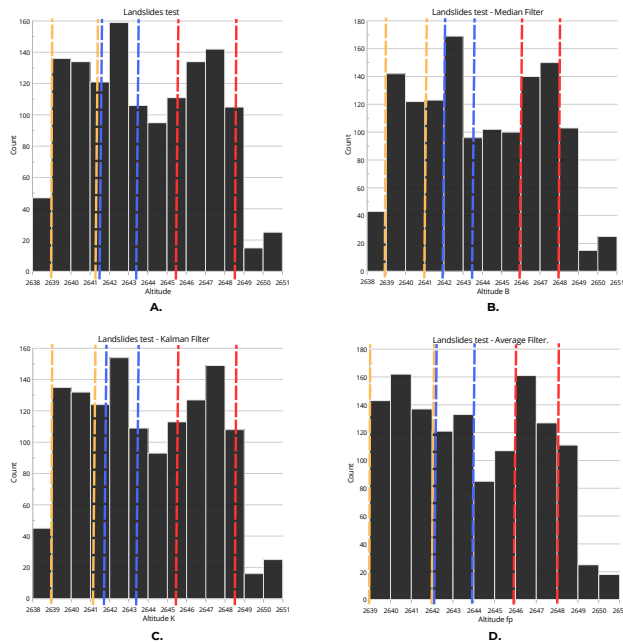


Fig. 16. Representación del incremento en la precisión de los valores de altitud expresados anteriormente con gráficos de contorno.

Desde la perspectiva del eje Z, se puede apreciar una medición con mayor detalle; sin embargo, continuamos observando la dificultad para establecer una medida precisa. Estos detalles demuestran tanto las fortalezas como las falencias que posee el dispositivo, presentando las fluctuaciones en la región comprendida entre las líneas de colores. Estas fluctuaciones causan que los puntos de inflexión sean difíciles de establecer en distancias cortas, presentando una menor precisión y una menor confiabilidad. Esto impacta directamente en la resolución del dispositivo, presentando un nivel de detalle insuficiente y una representación más tosca de los fenómenos observados.

F. Gráficos 3D

Se plantea el uso de gráficas tridimensionales con el propósito de facilitar una representación más completa y detallada del movimiento detectado por el dispositivo. Usando los datos obtenidos se grafica cada punto en los ejes X, Y y Z reconstruyendo la gráfica en 3D, con el propósito de trazar el camino recorrido en el terreno con base en las muestras obtenidas, lo cual evidenciará la eficacia tanto del software como del hardware desarrollado.

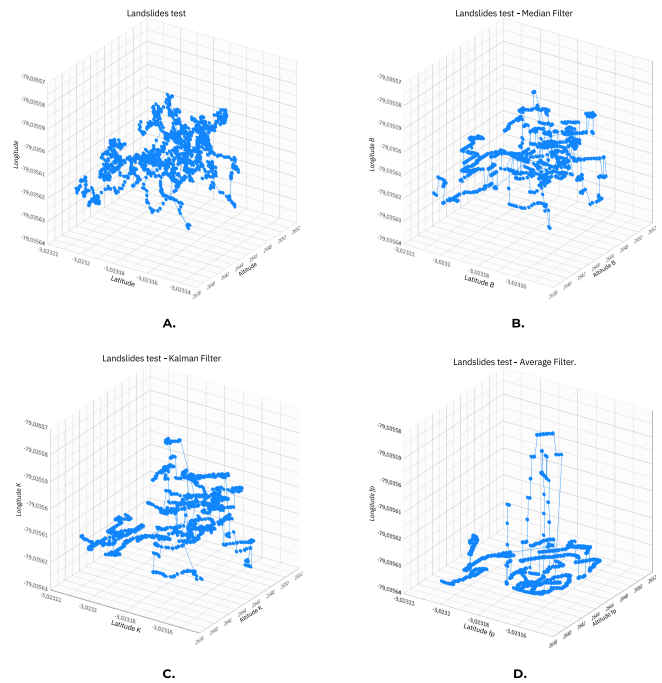


Fig. 17. Construcción de la traza del desplazamiento en los ejes X, Y, Z.

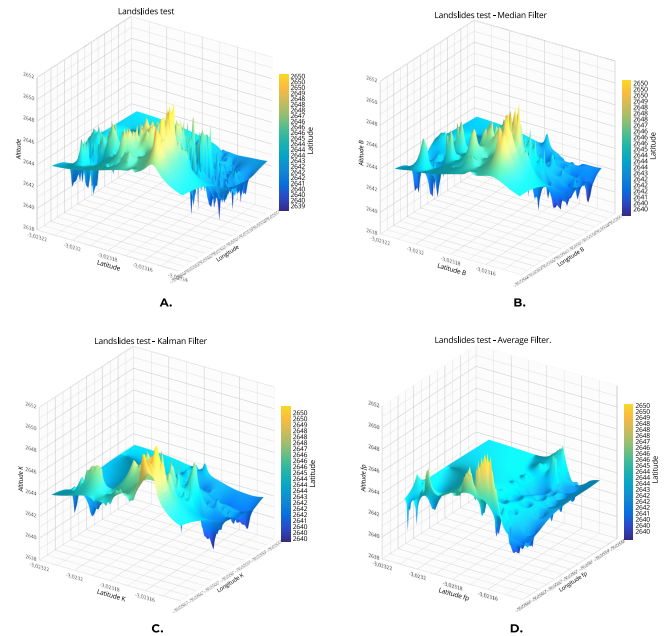


Fig. 18. Construcción del terreno con base en el desplazamiento en los tres ejes X, Y, Z.

Este enfoque proporciona una visión integral de la trayectoria, destacando que literal B, obtiene el recorrido más distinguible en comparación con sus homólogos. La distinción en el camino recorrido puede tener implicaciones significativas para la interpretación de los resultados, ya que puede revelar las variaciones en el movimiento que podrían no ser tan evidentes en representaciones bidimensionales, incrementando la fiabilidad de los resultados previamente expuestos.

VI. CONCLUSIONES

Este estudio se enfocó en la evaluación de un prototipo desarrollado desde cero tanto a nivel de hardware como de software, respaldado por una investigación robusta, con el propósito de concebir un dispositivo funcional destinado al monitoreo de deslizamientos de tierra. Donde se logró cumplir con el objetivo principal de construir un equipo low cost con tecnología accesible y determinar su desempeño. Examinando los resultados de su evaluación, se revela que la metodología apropiada para este tipo de evaluaciones es la aplicación del filtro de mediana, el cual, permite disminuir la distancia transversal del cuadrante y exhibir los desplazamientos existentes con mayor facilidad. Esto favorece el monitoreo de la cinemática del terreno, con un tiempo promedio de adquisición de la señal GPS de 32.5 segundos y una velocidad de actualización en la interfaz de 3 segundos, después de los cálculos y filtrado por software. Es fundamental destacar que las pruebas se realizaron en una ubicación rural con hundimientos de edificaciones caracterizada por un acceso a Internet precario. Durante este proceso de evaluación se realizó el envío 1.71 KB cada 3 segundos, transmitiendo 1200 muestras por hora, lo que es igual a un total de 2052 KB. Exponiendo como requerimiento el uso de 48.02 megabytes en 24 horas por dispositivo.

Tras llevar a cabo la evaluación de la transmisión, se evidencia la presencia de un retraso entre el envío de paquetes y la interfaz gráfica, estimándose en aproximadamente 1.2 segundos. Es importante destacar que este retraso se manifiesta de manera ocasional. A pesar de este ligero inconveniente, el monitoreo no se ve comprometido, ya que se necesitan varias muestras para determinar la existencia de los desplazamientos, permitiendo un estudio efectivo de la cinemática del suelo.

Uno de los puntos más importantes abarcados en esta investigación es el desempeño del prototipo en condiciones adversas, donde se comprobó que el rendimiento del dispositivo decae cuando se enfrenta a obstáculos de considerables dimensiones, donde prácticamente no posee línea de vista con los satélites, momento en el cual la precisión experimenta una disminución, presentando un error de aproximadamente 2.2 metros en relación con la posición real. La exactitud también se ve impactada, como se evidenció en los mapas de contorno, donde los puntos divergen con mayor frecuencia. Los cambios en las condiciones atmosféricas también fueron examinados para evaluar su robustez, demostrando no ser influenciado considerablemente. Contrario a lo identificando en el parámetro de altitud, donde se aprecia una problemática importante con la precisión de los valores, la cual debe ser solventada en corto plazo, exigiendo la posibilidad de incorporar un sensor tipo altímetro para optimizar el rango de error.

Los resultados exponen la necesidad de incrementar la resolución del dispositivo en labores futuras, contemplando la vinculación de tecnología más costosa. Las repercusiones no solo incrementaran el rendimiento, sino que cambiara la

perspectiva en la que se basó esta investigación, trasformando la problemática de construir un equipo low cost en un prototipo más preciso que se encuentre en un rango más asequible y más rentable que los actualmente disponibles. El estudio de mercado revela que el aumento proyectado se fundamenta en la sustitución del GPS por un sistema GNSS con acelerómetro integrado, con un incremento de \$34 dólares. Hay que recordar que a este aumento se le suma la inclusión de una antena externa con diferentes frecuencias de resonancia para garantizar la compatibilidad, generando un costo adicional de \$15 dólares. Con un total de \$70 dólares, incluido impuestos y costos de transporte.

La construcción y validación de este prototipo funcional marca un hito significativo en la aplicación de tecnologías integradas para mitigar los riesgos geológicos. Este dispositivo no solo enriquece nuestra comprensión de las dinámicas asociadas a los deslizamientos de tierra, sino que también constituye una herramienta eficaz para la prevención y respuesta a eventos de esta naturaleza. Esta investigación sienta las bases para futuros desarrollos de sistemas de monitoreo utilizando geotecnología aplicada a la gestión de desastres naturales, con el fin de prevenir fenómenos geológicos críticos.

RECOMENDACIONES

Con el fin de garantizar tanto la seguridad del investigador como el éxito de las pruebas, se debe considerar el libre tránsito y la accesibilidad al terreno tanto para la instalación como para el mantenimiento de los sistemas de monitoreo. También se debe contemplar la disponibilidad de baterías de repuesto para energizar los equipos de monitoreo. Es necesario que el terreno seleccionado tenga las condiciones geológicas similares a los lugares donde se quiere implementar de manera comercial. Y por último se debe garantizar condiciones de visibilidad entre el dispositivo y los satélites, esto permitirá un estudio efectivo de la cinemática del suelo, causando el menor número de interferencias en los estudios.

REFERENCES

- [1] F. Huang, J. Chen, W. Liu, J. Huang, H. Hong, y W. Chen, "Regional rainfall-induced landslide hazard warning based on landslide susceptibility mapping and a critical rainfall threshold," *Geomorphology*, vol. 408, pp. 108236, 2022. DOI: 10.1016/j.geomorph.2022.108236.
- [2] O. Hungr, S. Leroueil, y L. Picarelli, "The Varnes classification of landslide types, an update," *Landslides*, vol. 11, pp. 167-194, 2014.
- [3] Z. Othman, A. W. A. Wan and A. Anuar, "Evaluating the performance of GPS survey methods for landslide monitoring at hillside residential area: Static vs rapid static," 2011 IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing and its Applications, Penang, Malaysia, 2011, pp. 453-459, doi: 10.1109/CSPA.2011.5759921.
- [4] B. D. Malamud, D. L. Turcotte, F. Guzzetti, y P. Reichenbach, "Landslides, earthquakes, and erosion," *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 229, no. 1-2, pp. 45-59, 2004.
- [5] Y. Qi, F. Luo and S. Zhou, "Research and Design of landslide monitoring alarm system Platform," 2022 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Risk Management (ICBAR), Xi'an, China, 2022, pp. 175-178, doi: 10.1109/ICBAR58199.2022.00040.

- [6] L. Dai et al., "Landslide Risk Classification Based on Ensemble Machine Learning," 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, Belgium, 2021, pp. 3924-3927, doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553034.
- [7] Secretaría Nacional de Planificación. (2021). "PLAN DE CREACIÓN DE OPORTUNIDADES 2021-2025," Gobierno del Ecuador. [Online]. Available: <https://www.planificacion.gob.ec/plan-de-creacion-de-opportunidades-2021-2025/>. Accessed: [December 2, 2023].
- [8] SDG 3: United Nations. (2015). "Goal 3: Good health and well-being." [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/health/>. Accessed: [December 2, 2023].
- [9] SDG 7: United Nations. (2015). "Goal 7: Affordable and clean energy." [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>. Accessed: [December 2, 2023].
- [10] SDG 12: United Nations. (2015). "Goal 11: Make cities inclusive, safe, resilient and sustainable." [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/cities/>. Accessed: [December 2, 2023].
- [11] H. Thirugnanam, S. Uhlemann, R. Reghunadh, M. V. Ramesh and V. P. Rangan, "Review of Landslide Monitoring Techniques With IoT Integration Opportunities," in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 15, pp. 5317-5338, 2022, doi: 10.1109/JSTARS.2022.3183684.
- [12] L. Dai et al., "Landslide Risk Classification Based on Ensemble Machine Learning," 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, Belgium, 2021, pp. 3924-3927, doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553034.
- [13] A. Joshi, D. P. Kanungo and R. K. Panigrahi, "WSN-Based Smart Landslide Monitoring Device," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 72, pp. 1-12, 2023, Art no. 5501912, doi: 10.1109/TIM.2023.3269746.
- [14] S. S. binti Tuan Sariff, T. Shintarou and S. Takayama, "GPS implementation in sensing node network system for landslide disaster," SICE Annual Conference 2011, Tokyo, Japan, 2011, pp. 2014-2018.
- [15] C. Ren, H. Shang, Z. Zha, F. Zhang and Y. Pu, "Color Balance Method of Dense Point Cloud in Landslides Area Based on UAV Images," in IEEE Sensors Journal, vol. 22, no. 4, pp. 3516-3528, 15 Feb.15, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3141936.
- [16] M. Z. Syahmi, W. A. W. Aziz, M. A. Zulkarnaini, A. Anuar and Z. Othman, "The movement detection on the landslide surface by using Terrestrial Laser Scanning," 2011 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium, Shah Alam, Malaysia, 2011, pp. 175-180, doi: 10.1109/ICSGRC.2011.5991851.
- [17] A. Agrawal and S. Kar, "Development of a landslide detection surveillance system," 2022 29th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), Sofia, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/IWSSIP55020.2022.9854417.
- [18] M. Xu, P. Du, Y. He and T. Liu, "Liujiaxia Area Potential Landslides Identification and Analysis Based on InSAR Technology," 2022 3rd International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing (ICGMRS), Zhoushan, China, 2022, pp. 57-61, doi: 10.1109/ICGMRS55602.2022.9849375.
- [19] J. Li, M. Ye, L. Stankovic, V. Stankovic and S. Pytharouli, "Domain Knowledge Informed Multitask Learning for Landslide-Induced Seismic Classification," in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 20, pp. 1-5, 2023, Art no. 7503005, doi: 10.1109/LGRS.2023.3279068.
- [20] T. Deguchi, T. Sugiyama and M. Kishimoto, "Development of SAR system installable on a drone," EUSAR 2021; 13th European Conference on Synthetic Aperture Radar, online, 2021, pp. 1-3.
- [21] S. S. binti Tuan Sariff, T. Shintarou and S. Takayama, "GPS implementation in sensing node network system for landslide disaster," SICE Annual Conference 2011, Tokyo, Japan, 2011, pp. 2014-2018.
- [22] S. Calcaterra, C. Cesi, C. Di Maio, et al., "Surface displacements of two landslides evaluated by GPS and inclinometer systems: a case study in Southern Apennines, Italy," Nat. Hazards, vol. 61, no. 1, pp. 257-266, Jan. 2012. doi: 10.1007/s11069-010-9633-3.
- [23] H. Dong et al., "Landslide Monitoring Network Based on Internet of Things," 2022 International Conference on Knowledge Engineering and Communication Systems (ICKES), Chickballapur, India, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICKES56523.2022.10059814.
- [24] A. Amune, S. Patil, D. Ushir and A. Nangare, "IOT Based Smart LandSlide Detection System (S-LDS)," 2023 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI), Pune, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ESCI56872.2023.10099562.
- [25] Z. Wang, H. Li and L. Wu, "Geodesics-based topographical feature extraction from airborne Lidar data for disaster management," 2010 18th International Conference on Geoinformatics, Beijing, China, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567875.
- [26] United States Department of Defense. 2022. "GPS Overview: Space Segment." GPS.gov. [Online]. Available at: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>. Accessed: [December 7, 2023].
- [27] S. Gupta and S. Roy, "Medvar Filter—Filter for Removal of Image Noise with the Combination of Median and Average Filters," in Recent Trends in Signal and Image Processing, S. Bhattacharyya, A. Mukherjee, H. Bhaumik, S. Das, and K. Yoshida, Eds., vol. 727. Springer, Singapore, 2019, pp. 17-25. doi : 10.1007/978 – 981 – 10 – 8863 – 62.
- [28] S. I. Purnama, M. A. Afandi, and E. V. Purba, "Global Positioning System Data Processing Improvement for Blind Tracker Device Based Using Moving Average Filter," in Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics, Biomedical Engineering, and Health Informatics, T. Triwiyanto, A. Rizal, and W. Caesarendra, Eds. Springer, Singapore, 2022, vol. 898, pp. 139-145.
- [29] P. W. Sarunic, "Development of GPS Receiver Kalman Filter Algorithms for Stationary, Low-Dynamics, and High-Dynamics Applications," Cyber and Electronic Warfare Division, Defence Science and Technology Group, DST-Group, PO Box 1500, Edinburgh, South Australia 5111, Australia, June 2016, Approved for Public Release, UNCLASSIFIED.
- [30] M. I. Méndez Mejía, "Integración del filtro de Kalman a un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para aplicación en vehículos autónomos," Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2003.
- [31] P. Kaewket and K. Sukvichai, "Investigate GPS Signal Loss Handling Strategies for a Low Cost Multi-GPS system based Kalman Filter," 2022 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Prachuap Khiri Khan, Thailand, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECTI-CON54298.2022.9795494.
- [32] L. I. González de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño y C. Oteo, "Ingeniería geológica," Pearson Educación, S.A, Madrid-España, 2004.