

**Prototipo a escala de un inclinómetro de bajo costo a través de la tecnología Long Range y
microcontroladores ESP32**

Jairson Alberto Thomas Castro

Asesor

Dra. Mónica Andrea Rico Martínez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuelas de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería - ECBTI

Ingeniería en Telecomunicaciones

2025

Dedicatoria

A Dios, por ser guía constante en cada paso de este camino, por darme la fortaleza en los momentos de incertidumbre y la luz en los días de oscuridad.

A mis padres, por su amor incondicional, por enseñarme el valor del esfuerzo y por creer en mí incluso cuando yo dudaba.

A mis docentes, por compartir su conocimiento con pasión y por sembrar en mí la curiosidad que hoy florece en este proyecto.

A mi esposa, por su paciencia infinita, por acompañarme en cada jornada de estudio, por sus palabras de aliento cuando más las necesitaba y por ser mi mayor inspiración para seguir adelante. Este logro también es suyo.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a Dios, por brindarme la sabiduría, la perseverancia y la salud necesarias para culminar esta etapa académica.

A mis docentes y asesores, por compartir su conocimiento con generosidad, por sus valiosas orientaciones y por fomentar en mí el pensamiento crítico y la pasión por la ingeniería.

A mis compañeros de carrera, por los aprendizajes compartidos, el trabajo en equipo y las experiencias que enriquecieron mi formación profesional.

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), por ofrecer una educación flexible, inclusiva y de calidad, que me permitió desarrollar este proyecto con autonomía, responsabilidad y compromiso.

Resumen

El presente proyecto evidencia el desarrollo de un prototipo a escala de un inclinómetro de bajo costo, orientado a la detección temprana de movimientos de masa en zonas rurales con riesgo geotécnico. La solución integra sensores inerciales, microcontroladores ESP32 y tecnología de comunicación LoRa (Long Range), permitiendo la transmisión remota de datos en tiempo real desde ubicaciones sin infraestructura de red convencional. La elección de componentes de bajo consumo energético y fácil implementación responde a la necesidad de monitoreo accesible y autónomo en comunidades vulnerables, donde los sistemas comerciales resultan costosos o inviables. El firmware embebido en el microcontrolador gestiona la lectura de datos, el procesamiento local y la activación de alertas ante variaciones críticas de inclinación. Este enfoque se alinea con los lineamientos de la Ley 1523 de 2012 sobre gestión del riesgo en Colombia, y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con infraestructura resiliente y acción climática (UNGRD, 2020; UNDRR, 2022). El prototipo se evaluó en condiciones controladas, testeando el alcance de comunicación y autonomía energética, con el fin de demostrar su viabilidad como herramienta de alerta temprana en contextos rurales. Se verificó la correcta interacción entre los subsistemas electrónicos, inalámbricos, de alimentación y visualización. Se evaluó el alcance de comunicación LoRa mediante el análisis del RSSI, la estabilidad de los ángulos de inclinación (pitch y roll), y la autonomía energética del sistema. Además, se validó la activación de alertas por inclinación crítica y señal débil, confirmando la confiabilidad del prototipo en escenarios simulados.

Palabras clave: ESP32, Gestión del riesgo, Inclinómetro de bajo costo, Microcontrolador, Monitoreo geotécnico, Movimientos en masa, Sensores inerciales (IMU), Sistemas de alerta temprana, Tecnología LoRa.

Abstract

This project proposes the development of a scale prototype of a low-cost inclinometer, aimed at the early detection of mass movements in rural areas with geotechnical risk. The solution integrates inertial sensors, ESP32 microcontrollers and LoRa (Long Range) communication technology, enabling remote real-time data transmission from locations without conventional network infrastructure. The choice of low-energy and easy-to-implement components responds to the need for accessible and autonomous monitoring in vulnerable communities, where commercial systems are costly or unfeasible. The firmware embedded in the microcontroller manages data reading, local processing, and triggering alerts for critical tilt variations. This approach is aligned with the guidelines of Law 1523 of 2012 on risk management in Colombia, and with the Sustainable Development Goals related to resilient infrastructure and climate action (UNGRD, 2020; UNDRR, 2022). The prototype was evaluated under controlled conditions, testing the scope of communication and energy autonomy, in order to demonstrate its viability as an early warning tool in rural contexts. The correct interaction between the electronic, wireless, power and display subsystems was verified. The LoRa communication range was evaluated by analyzing the RSSI, the stability of the inclination angles (pitch and roll), and the energy autonomy of the system. In addition, the activation of alerts for critical inclination and weak signal was validated, confirming the reliability of the prototype in simulated scenarios.

Keywords: Low-cost inclinometer, Inertial sensors (IMU), ESP32 Microcontroller, LoRa technology, Mass movements, Geotechnical monitoring, Early warning systems, Risk management

Tabla de contenido

Introducción	12
Justificación	14
Objetivos	16
Objetivo General	16
Objetivos Específicos.....	16
Generalidades.....	17
Planteamiento del problema.....	17
Marco Teórico y Conceptual.....	19
Marco Teórico	19
Marco Conceptual.....	20
Inclinómetro	20
Movimientos de Masa.....	20
Sensores Inerciales.....	21
Microcontroladores y Dispositivos Embebidos	21
Conectividad Inalámbrica (Wi-Fi, LoRa, Telefonía Móvil Celular GSM-LTE).....	22
Wi-Fi	22
LoRa.....	22
Telefonía móvil celular (GSM–LTE).....	22
Alertas Tempranas.....	23

Firmware	23
Estado del Arte	24
Metodología	27
Enfoque	27
Tipo de investigación:	27
Desarrollo de la Metodología.....	27
Fase 1: Revisión y selección de tecnologías	27
Fase 2: Diseño del sistema	27
Fase 3: Construcción del prototipo	27
Fase 4: Validación del prototipo.....	28
Fase 5: Ajustes y documentación	28
Caracterización de sensores para el inclinómetro	29
Contexto de los Sensores	29
Señales que Capturan los Sensores en Inclinómetros	30
Aceleración Vectorial (m/s^2)	30
Aceleración Lineal (m/s^2)	31
Velocidad Angular ($^{\circ}/s$ o rad/s).....	31
Campo Magnético (μT).....	31
Orientación Absoluta	31
Vector de Gravedad (m/s^2)	31

Temperatura (°C)	31
Componentes de un Inclinómetro según su Uso.....	32
Inclinómetros Geotécnicos Profesionales (In Situ).....	32
Inclinómetros de Bajo Costo (Prototipos con ESP32).....	32
Inclinómetros Portátiles	34
Sensores Empleados y Características Técnicas Relevantes.	35
BNO055 (Bosch Sensortec).....	35
MPU-6050 (InvenSense)	36
ADXL345 (Analog Devices)	37
Murata SCL3300-D01	39
LSM6DS3 (STMicroelectronics).....	40
Comparativa de Sensores para Inclinómetros.....	41
Comparación Técnica de Sensores	42
Selección del Sensor para el Inclinómetro de Bajo Costo.	43
Arquitectura del Inclinómetro.....	44
Descripción General del Sistema	44
Componentes Principales.....	46
Diseño físico del prototipo.....	51
Justificación Técnica.....	52
Pruebas de simulación en Wokwi	52

Prototipo a escala del inclinómetro.....	55
Evidencias del prototipo	55
Desarrollo electrónico.....	56
Sistema inalámbrico.....	57
Recepción y visualización de la señal.....	59
Integración del prototipo.....	61
Pruebas funcionales al prototipo.....	63
Objetivo de las pruebas.....	63
Metodología de prueba	63
Resultados obtenidos	64
Análisis de desempeño.....	64
Conclusión de las pruebas.....	68
Conclusiones y Recomendaciones.....	69
Conclusiones.....	69
Recomendaciones y trabajos futuro.....	71
Referencias Bibliográficas	73

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Comparativo de Precios – Inclinómetros Industriales vs. Bajo Costo</i>	25
Tabla 2 <i>Comparativo Técnico – Inclinómetros Industriales vs. Bajo Costo</i>	26
Tabla 3 <i>Comparativo sensores para inclinómetros</i>	42

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Diagrama de pines y configuración del sensor BNO055</i>	35
Figura 2 <i>Vista del módulo MPU-6050 y distribución de pines</i>	36
Figura 3 <i>Vista del módulo ADXL345 y conexiones básicas</i>	38
Figura 4 <i>Módulo muRata SCX3300 con conexiones I2C visibles</i>	39
Figura 5 <i>Vista del módulo LSM6DS3 en tarjeta de expansión con pines de conexión</i>	40
Figura 6 <i>Diagrama de Bloque de la arquitectura básica del inclinómetro de bajo costo con tecnología long-range</i>	45
Figura 7 <i>Módulo sensor MPU-6050 con ejes de referencia</i>	47
Figura 8 <i>Vista física y distribución de pines del ESP32 DevKit (30 pines)</i>	48
Figura 9 <i>Módulo LoRa SX1278 RA-01 con antena helicoidal</i>	49
Figura 10 <i>Módulo de expansión ESP32 CP2102 utilizado en el prototipo</i>	50
Figura 11 <i>Modelo 3D del prototipo físico del inclinómetro</i>	52
Figura 12 <i>Simulación de adquisición de datos crudos del MPU6050 en Wokwi</i>	53
Figura 13 <i>Montaje físico del prototipo del inclinómetro</i>	57
Figura 14 <i>Montaje físico del sistema de recepción y visualización del inclinómetro</i>	59
Figura 15 <i>Visualización en tiempo real de los datos del inclinómetro</i>	60
Figura 16 <i>Visualización de datos en el monitor serial del ESP32</i>	62
Figura 17 <i>Montaje del prototipo con ESP32, módulo LoRa SX1278 y sensor inercial MPU6050</i>	65
Figura 18 <i>Visualización del estado de espera en el receptor LoRa mediante pantalla LCD</i>	66
Figura 19 <i>Visualización de datos de inclinación y alerta por baja intensidad de señal LoRa</i> ...	67
Figura 20 <i>Visualización de alerta por inclinación crítica en pantalla LCD</i>	67

Introducción

Los movimientos de masa representan una de las amenazas geotécnicas más recurrentes en Colombia, afectando especialmente a comunidades rurales ubicadas en zonas de ladera. Estos eventos, intensificados por factores climáticos y antrópicos, generan pérdidas humanas, económicas y estructurales, y se ven agravados por la limitada capacidad de respuesta institucional en dichos territorios. A pesar de la existencia de tecnologías avanzadas para el monitoreo del terreno, su alto costo y complejidad técnica dificultan su implementación en contextos vulnerables.

En este escenario, se plantea el desarrollo de un prototipo a escala de un inclinómetro de bajo costo, orientado a la detección temprana de movimientos de masa mediante sensores inerciales, microcontroladores ESP32 y tecnología de comunicación inalámbrica Long Range (LoRa). Esta solución busca facilitar el monitoreo remoto de inclinación del terreno en tiempo real, sin depender de infraestructura de red convencional, y con autonomía energética suficiente para operar en zonas con acceso limitado a servicios básicos.

El proyecto se fundamenta en un enfoque tecnológico–experimental, que incluyó la selección de componentes electrónicos, el diseño del sistema embebido, la programación del firmware, y la validación del prototipo en condiciones controladas. Además, se consideraron los lineamientos de la Ley 1523 de 2012 sobre gestión del riesgo, así como los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con infraestructura resiliente y acción climática.

Este documento presenta el proceso completo de diseño, construcción y evaluación del sistema, con el propósito de demostrar su viabilidad como herramienta de alerta temprana y su potencial de replicación en otros territorios. Se espera que los resultados contribuyan al

fortalecimiento de la resiliencia comunitaria y a la apropiación tecnológica en escenarios reales de vulnerabilidad geotécnica.

Justificación

En Colombia y otros países con geografía montañosa, las zonas rurales enfrentan constantemente riesgos derivados de movimientos de masa como deslizamientos, especialmente durante temporadas de lluvias intensas. Estas amenazas ponen en peligro vidas humanas, infraestructura básica, cultivos y vías de comunicación. Según la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), más del 80% de la población colombiana está expuesta a amenaza alta o muy alta por movimientos en masa, siendo las lluvias intensas el principal detonante de estos eventos (UNGRD, 2020). Además, el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER, 2024) advierte que factores como la pendiente del terreno, la intervención humana y las condiciones meteorológicas generan alta recurrencia de deslizamientos incluso en sectores urbanos y rurales con poca capacidad de respuesta institucional.

A pesar de ello, muchas de estas comunidades carecen de herramientas tecnológicas para monitorear el terreno en tiempo real y generar alertas tempranas que permitan la prevención y acción oportuna.

Frente a esta problemática, el diseño de un prototipo a escala de un inclinómetro de bajo costo y con conectividad remota representó una solución innovadora, asequible y adaptable a contextos rurales. La incorporación de sensores inerciales y microcontroladores con capacidad de transmisión inalámbrica a través de la tecnología Long Range permitió detectar variaciones en la inclinación del terreno, alertando a las autoridades o comunidades antes de que ocurriera un evento catastrófico (Andrade & Rodríguez, 2021; Romero & Díaz, 2022).

Además, el enfoque en tecnologías de bajo consumo y fácil implementación reforzó la viabilidad del sistema en entornos con limitaciones económicas y técnicas. Este proyecto no solo

aportó al fortalecimiento de la resiliencia comunitaria frente a desastres naturales, sino que también promovió la apropiación tecnológica y la investigación aplicada en contextos reales de vulnerabilidad geotécnica (Flores & Sanhueza, 2018).

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un prototipo a escala de un inclinómetro de bajo costo orientado a la detección temprana de movimientos, con capacidad de conexión remota a través de la tecnología Long Range (LoRa), microcontroladores ESP32 y el uso de sensores inerciales.

Objetivos Específicos

Seleccionar y caracterizar los sensores inerciales adecuados para la medición precisa de la inclinación del terreno.

Diseñar la arquitectura electrónica del dispositivo inclinómetro integrando sensores, microcontrolador y módulo de comunicación inalámbrica mediante el software Tinkercad

Implementar el prototipo a escala del inclinómetro en el laboratorio, realizando pruebas de transmisión y de continuidad de los componentes electrónicos integrados.

Evaluar el desempeño del prototipo en condiciones controladas, midiendo su consumo energético y alcance de la comunicación.

Generalidades

En Colombia, los movimientos de masa representan una amenaza geotécnica recurrente, especialmente en zonas rurales de ladera. Estos fenómenos naturales, intensificados por factores climáticos y antrópicos, generan pérdidas humanas, económicas y estructurales. La limitada capacidad de respuesta institucional en estos territorios hace urgente el desarrollo de herramientas tecnológicas accesibles que permitan la detección temprana de eventos críticos. En este capítulo se encuentran las generalidades del proyecto, dando un contexto de la necesidad, las razones por las que se desarrolla el proyecto, los objetivos y la metodología para su desarrollo.

Planteamiento del problema

Las condiciones topográficas del país, especialmente en zonas con presencia de cordilleras y laderas, son uno de los principales factores naturales que propician la ocurrencia de movimientos en masa como deslizamientos, derrumbes o remociones de tierra. Estos fenómenos afectan viviendas, personas, infraestructura y servicios públicos, y suelen intensificarse en temporadas de lluvias (IDIGER, 2024). A pesar del alto riesgo geológico, gran parte de estas regiones carecen de sistemas tecnológicos de monitoreo y alerta temprana debido a sus altos costos, dificultades de acceso a infraestructura, y limitaciones en conectividad.

Según el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el país presenta una alta susceptibilidad a movimientos en masa debido a su compleja geografía, la presencia de tres cordilleras principales y factores detonantes como lluvias intensas, sismos y actividades antrópicas (SGC, 2015). El Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa, elaborado por el SGC, indica que el 24% del territorio nacional se encuentra en condición de amenaza alta o muy alta por este tipo de fenómenos.

En el caso de Bogotá, el IDIGER ha identificado que cerca de 245.000 personas habitan en zonas con amenaza alta por movimientos en masa, y que existen más de 274 sectores críticos con condiciones recurrentes de inestabilidad, tanto en áreas urbanas como rurales (IDIGER, 2024). Además, el Decreto 555 de 2021, que adopta la revisión del Plan de Ordenamiento Territorial (POT), establece la necesidad de incorporar tecnologías de monitoreo y mitigación del riesgo en zonas de ladera y expansión urbana.

Frente a esta realidad, los sistemas de monitoreo existentes suelen ser costosos, complejos y diseñados para entornos urbanos o industriales, lo que limita su implementación en comunidades rurales. Por ello, se propuso el desarrollo de una solución tecnológica asequible, eficiente y adaptable, que permita detectar inclinaciones del terreno en tiempo real y emitir alertas mediante tecnologías inalámbricas de largo alcance como LoRa. Un dispositivo de estas características puede convertirse en una herramienta clave para la gestión del riesgo, la prevención de desastres y la protección de vidas humanas en contextos geográficos adversos.

Considerando el impacto recurrente de los movimientos de masa en zonas de ladera y la limitada capacidad de respuesta en comunidades vulnerables, se planteó la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo se realiza un prototipo a escala de un inclinómetro de bajo costo orientado a la detección temprana de movimientos, empleando la tecnología Long Range, microcontroladores ESP32 y el uso de sensores inerciales?

Para realizar un prototipo a escala de un inclinómetro de bajo costo orientado a la detección temprana de movimientos de masa, utilizando tecnología LoRa, microcontroladores ESP32 y sensores inerciales, se siguió un proceso estructurado que combina diseño electrónico, programación embebida y validación experimental.

Marco Teórico y Conceptual

Marco Teórico

La gestión de riesgos geológicos en zonas rurales constituye una prioridad en países con alta variabilidad topográfica, como Colombia. Según la UNGRD (2020), más del 80% de los municipios colombianos presentan algún tipo de amenaza por movimientos en masa, en particular deslizamientos desencadenados por precipitaciones intensas. Estos fenómenos, también conocidos como remociones en masa, comprenden procesos como caídas de rocas, deslizamientos rotacionales o traslacionales, flujos de detritos y reptaciones, todos ellos impulsados por la gravedad y condicionados por factores geológicos, geomorfológicos, climáticos y antrópicos (Cruden & Varnes, 1996; IDIGER, 2024).

En Colombia, la ocurrencia de estos eventos se ve intensificada por la presencia de tres cordilleras principales, suelos coluviales saturables, deforestación y urbanización no planificada en laderas. El Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha identificado que aproximadamente el 24 % del territorio nacional se encuentra en condición de amenaza alta o muy alta por movimientos en masa (SGC, 2015).

A pesar de la magnitud del riesgo, el acceso a tecnologías de monitoreo para la detección temprana en estas regiones suele ser limitado, debido a costos elevados, restricciones de conectividad, y dificultades de implementación en entornos no urbanos. Esta brecha tecnológica impide la instalación de sistemas de alerta temprana que permitan anticipar eventos y reducir pérdidas humanas y materiales. Por ello, el desarrollo de soluciones de bajo costo, como el dispositivos inclinómetro con sensores inerciales y conectividad LoRa, representa una alternativa viable y estratégica para fortalecer la resiliencia comunitaria frente a estos fenómenos.

La literatura especializada destaca el uso de sensores inerciales para la detección temprana de movimientos del suelo. Andrade y Rodríguez (2021) demostraron que estos sensores, integrados en sistemas embebidos, ofrecen resultados confiables y económicos en aplicaciones de monitoreo ambiental. A su vez, el uso de microcontroladores como el ESP32 permite la recolección y transmisión eficiente de datos (Barragán et al., 2020).

En cuanto a la conectividad, Romero y Díaz (2022) subrayan la pertinencia de tecnologías como Wi-Fi, LoRa o GSM, las cuales permiten extender la cobertura y emitir alertas sin depender de infraestructura costosa. Finalmente, el firmware embebido en el microcontrolador garantiza el funcionamiento autónomo del sistema, gestionando sensores, cálculos y alertas sin intervención humana constante (Martínez, 2024).

Marco Conceptual

Inclinómetro

Es un dispositivo capaz de medir ángulos de inclinación o pendiente respecto a la gravedad. En geotecnia, los inclinómetros se utilizan para detectar desplazamientos en masas de tierra, lo cual es fundamental para monitorear la estabilidad de taludes y prevenir deslizamientos. (López & González, 2020).

Movimientos de Masa

Los movimientos de masa son procesos geodinámicos que implican el desplazamiento descendente de materiales del terreno —como suelo, roca, detritos o escombros— bajo la acción de la gravedad. Estos fenómenos pueden ser lentos o súbitos, y su ocurrencia está condicionada por factores geológicos, geomorfológicos, climáticos y antrópicos (SGC, 2015; IDIGER, 2024).

Desde el punto de vista geotécnico, los movimientos en masa se clasifican según su mecanismo de falla en: caídas, deslizamientos (rotacionales o traslacionales), flujos, reptaciones,

volcamiento y propagación lateral (Cruden & Varnes, 1996). En Colombia, los más frecuentes son los deslizamientos rotacionales y flujos de detritos, especialmente en zonas de ladera con suelos coluviales o residuales saturables (Montero Olarte, 2017).

Estos procesos se ven intensificados por lluvias intensas o prolongadas, que reducen la resistencia al corte del suelo y aumentan la presión intersticial, generando condiciones críticas de estabilidad. Según el Servicio Geológico Colombiano, el 24 % del territorio nacional presenta amenaza alta o muy alta por movimientos en masa, y más del 80 % de la población colombiana está expuesta a este tipo de amenaza (UNGRD, 2020).

En zonas rurales, los impactos son especialmente severos: pérdida de cultivos, interrupción de vías terciarias, afectación de viviendas y aislamiento de comunidades. Por ello, el monitoreo de taludes mediante sensores como inclinómetros digitales o IMU, y la implementación de sistemas de alerta temprana, son estrategias clave para la gestión del riesgo geotécnico (IDIGER, 2024; UNDRR, 2022).

Sensores Inerciales

Las Unidades de Medición Inercial son dispositivos capaces de medir aceleraciones y un sistema embebido es un conjunto de hardware y software diseñado para cumplir una función específica dentro de un entorno autónomo. El microcontrolador, como el ESP32, es el núcleo que gestiona los sensores, procesa los datos y controla la comunicación del sistema (Barragán, Vélez & Parra, 2020).

Microcontroladores y Dispositivos Embebidos

Un sistema embebido es un conjunto de hardware y software diseñado para cumplir una función específica dentro de un entorno autónomo. El microcontrolador, como el ESP32, es el

núcleo que gestiona los sensores, procesa los datos y controla la comunicación del sistema (Barragán, Vélez & Parra, 2020).

Conectividad Inalámbrica (Wi-Fi, LoRa, Telefonía Móvil Celular GSM-LTE)

Las tecnologías de transmisión de datos como Wi-Fi, LoRa o telefonía móvil Celular permiten el envío de información en tiempo real sin necesidad de infraestructura física. En contextos rurales, la conectividad remota es crucial para facilitar el monitoreo y la emisión de alertas tempranas, incluso en lugares sin cobertura de red constante (Romero & Díaz, 2022).

Wi-Fi

ofrece altas tasas de transmisión (hasta 100 Mbps) pero tiene un alcance limitado (≤ 100 m) y requiere presencia de routers o infraestructura de red local, lo cual limita su aplicabilidad en áreas remotas.

LoRa

en contraste, permite la comunicación punto a punto o en red a distancias de hasta 10–20 km en entornos rurales, con muy bajo consumo energético y sin necesidad de infraestructura celular. Esta tecnología utiliza bandas ISM (como 868 MHz en Colombia) y permite cubrir múltiples nodos mediante gateways sencillos y económicos.

Telefonía móvil celular (GSM–LTE)

La telefonía celular a través de tecnologías GSM (Global System for Mobile Communications) y LTE (Long Term Evolution) permite la transmisión de datos mediante las redes móviles tradicionales, lo que posibilita la comunicación de dispositivos IoT en áreas con infraestructura de operador. Ambas tecnologías son útiles cuando no se dispone de redes locales ni LoRaWAN, pero su dependencia de cobertura del operador móvil y limitada autonomía energética representan desventajas para aplicaciones autónomas en zonas remotas.

Alertas Tempranas

Sistemas diseñados para advertir a las personas sobre un peligro inminente antes de que ocurra un evento. En el caso de deslizamientos, una señal transmitida a tiempo puede facilitar evacuaciones y salvar vidas. Según la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), los sistemas de alerta temprana son herramientas clave para reducir la exposición al riesgo y mejorar la preparación comunitaria ante amenazas naturales (UNDRR, 2022).

Firmware

Es el software que se encuentra directamente embebido en el hardware del dispositivo. Su función es controlar los sensores, leer datos, aplicar cálculos y gestionar la comunicación con otros sistemas, siendo el intermediario entre la electrónica y la lógica del sistema. Este tipo de software se almacena en memorias no volátiles como ROM o Flash, y permite que el dispositivo funcione de forma autónoma desde el momento en que se enciende (Martínez, 2024).

Estado del Arte

En los últimos años, la aplicación de sensores inerciales (IMU) para el monitoreo de riesgos geológicos ha ganado interés en el campo de la ingeniería. Andrade y Rodríguez (2021) demostraron que es posible implementar sistemas de monitoreo ambiental de bajo costo utilizando el sensor MPU-6050 junto a plataformas embebidas como Arduino o ESP32, logrando resultados confiables para entornos rurales y naturales.

Por su parte, Barragán, Vélez y Parra (2020) desarrollaron una red de sensores para medir inclinación del terreno con transmisión inalámbrica mediante Wi-Fi, destacando la eficiencia de los microcontroladores ESP32 para tareas de comunicación y procesamiento local.

En el contexto de alertas tempranas, Romero y Díaz (2022) analizaron el uso de tecnologías como LoRa y GSM en zonas sin infraestructura de red, resaltando su utilidad en el envío de datos en tiempo real desde regiones apartadas.

En el ámbito profesional de la geotecnia, existen dispositivos diseñados específicamente para el monitoreo de movimientos de masa en profundidad, como los inclinómetros in situ (IPI). Equipos como el Sisgeo IPI BH-Profile y el RST Instruments IPI MEMS permiten realizar mediciones precisas del desplazamiento horizontal en perfiles profundos del suelo, a través de tuberías inclinométricas instaladas en taludes, estribos o rellenos estructurales. Estos sistemas utilizan sensores MEMS de alta precisión, integrados con dataloggers automáticos y módulos de transmisión inalámbrica o por cable, y están diseñados para operar en entornos exigentes con protección IP68. Su aplicación ha sido fundamental en proyectos de monitoreo continuo de laderas inestables en países como Italia, Canadá, México y Perú, donde se integran en redes geotécnicas de alerta temprana. Si bien su costo puede oscilar entre \$15 y \$30 millones COP por punto de medición, su nivel de confiabilidad los convierte en referencia para validar prototipos

de bajo costo con sensores IMU, como los que propone este proyecto (Sisgeo, 2023; RST Instruments, 2022).

A continuación, se presentan las tablas 1 y 2 con el contexto de los precios de diferentes inclinómetros:

Tabla 1

Comparativo de Precios – Inclinómetros Industriales vs. Bajo Costo

Modelo / Fabricante	Tipo	Aplicación	Precio estimado (COP)
Sisgeo IPI BH-Profile	Inclinómetro in situ (IPI)	Taludes profundos, obras civiles	\$15.000.000 – \$30.000.000
RST Instruments IPI MEMS	Inclinómetro digital MEMS	Laderas, rellenos estructurales	\$12.000.000 – \$25.000.000
Amphenol TSDA-J-IR045-HM-C	MEMS industrial CANbus	Taludes, estructuras enterradas	\$811.836
Murata SCL3300-D01	Sensor MEMS embebido	Sistemas personalizados con ESP32	\$200.803
Bosch GIM 60L	Portátil profesional láser	Calibración y medición de campo	\$1.123.500 – \$1.415.300
GemRed 82413 / genéricos	Digital portátil básico	Medición manual de inclinación	\$65.000 – \$331.000

Nota: La tabla refleja los modelos, tipos de inclinómetro con su respectiva aplicación y precio.

Fuente: Elaboración propia con datos de Mouser Colombia, MercadoLibre y Hoffmann Group (consultados en 2025).

Tabla 2*Comparativo Técnico – Inclinómetros Industriales vs. Bajo Costo*

Modelo / Fabricante	Tipo	Precisión	Rango de Medición	Tipo de Salida	Voltaje de Operación
Sisgeo IPI BH-Profile	Inclinómetro in situ (IPI)	$\pm 0.005^\circ$ – $\pm 0.01^\circ$	Hasta 90 m de profundidad	Digital (RS485 / analógica)	12–24 V DC
RST Instruments IPI MEMS	Inclinómetro MEMS	$\pm 0.01^\circ$	Hasta 100 m	Digital (RS485 / SDI-12)	12–24 V DC
Amphenol TSDA-J-IR045-HM-C	MEMS industrial CANbus	$\pm 0.1^\circ$	$\pm 45^\circ$	Digital (CAN SAE J1939)	9–36 V DC
Murata SCL3300-D01	MEMS embebido	$\pm 0.05^\circ$	$\pm 90^\circ$	Digital (SPI)	3.0–3.6 V DC
Bosch GIM 60L	Portátil profesional	$\pm 0.05^\circ$	0–360°	Digital (pantalla LCD)	2x baterías AA
GemRed 82413 / genéricos	Portátil básico	$\pm 0.2^\circ$ – $\pm 0.5^\circ$	0–360°	Digital (pantalla LCD)	3 V (batería CR2032)

Nota. La tabla refleja los modelos, tipos de inclinómetro, precisión, rango tipo de salida y voltaje de operación.

Fuente: Fichas técnicas de los fabricantes (Sisgeo, RST Instruments, Amphenol, Murata, Bosch, GemRed) y distribuidores internacionales (2024–2025)

De las anteriores tablas se puede analizar lo siguiente:

Los inclinómetros industriales (Sisgeo, RST) son ideales para monitoreo profundo y continuo, pero su costo es elevado.

Los sensores MEMS embebidos (Murata, Amphenol) ofrecen buena precisión y son integrables en prototipos con ESP32.

Los modelos portátiles (GemRed, Bosch) son útiles para validación de campo o calibración manual.

Metodología

Enfoque

El proyecto utilizó un enfoque de investigación aplicada y cuantitativa, orientado al diseño, construcción y evaluación de un prototipo a escala de un inclinómetro de bajo costo mediante tecnología Long Range (LoRa).

Tipo de investigación:

La investigación fue de tipo tecnológica–experimental, ya que se desarrolló un dispositivo físico y se implementaron pruebas controladas para validar su desempeño.

Desarrollo de la Metodología

Para alcanzar el objetivo general y los objetivos específicos, la investigación se estructuró en cinco fases:

Fase 1: Revisión y selección de tecnologías

Se analizaron estudios previos sobre el uso de inclinómetros en sistemas de alerta temprana.

Se compararon sensores empleados en inclinómetros.

Se seleccionaron sensores inerciales adecuados para el prototipo.

Fase 2: Diseño del sistema

Se elaboró el esquema electrónico en software.

Se desarrolló el algoritmo para la lectura de inclinación y detección de cambios anómalos.

Se diseñó el sistema preliminar en Tinkercad integrando todos los componentes.

Fase 3: Construcción del prototipo

Se ensambló el hardware utilizando protoboard y/o PCB.

Se programó el microcontrolador en entorno Arduino IDE.

Se integraron el sensor IMU, el ESP32 y el sistema de comunicación LoRa.

Fase 4: Validación del prototipo

Se realizaron pruebas controladas en laboratorio.

Se evaluaron la medición de inclinación, el alcance de comunicación y la autonomía energética.

Se registraron y analizaron estadísticamente los resultados obtenidos.

Fase 5: Ajustes y documentación

Se elaboró el informe final del proyecto.

Se prepararon las diapositivas para la socialización del trabajo de grado.

Se redactó un artículo técnico para la divulgación de los resultados.

Caracterización de sensores para el inclinómetro

La caracterización de sensores es un paso fundamental en el diseño de sistemas de monitoreo geotécnico. En este capítulo se analizaron los distintos tipos de sensores utilizados en inclinómetros, tanto en soluciones comerciales como en prototipos de bajo costo. Se describen sus principios de funcionamiento, señales que capturan, interfaces de comunicación y compatibilidad con microcontroladores como el ESP32. Esta información nos permitió seleccionar el sensor más adecuado según el contexto de aplicación, precisión requerida y condiciones del entorno.

Contexto de los Sensores

Los sensores son el componente esencial en cualquier sistema de monitoreo geotécnico, ya que permiten detectar variaciones físicas del entorno y convertirlas en señales digitales procesables. En el caso de los inclinómetros, los sensores utilizados deben ser capaces de medir con precisión los cambios de inclinación del terreno, que pueden indicar desplazamientos peligrosos o movimientos de masa.

En sistemas comerciales de alta gama, como los inclinómetros in situ (IPI), se emplean sensores MEMS industriales encapsulados en sondas que se insertan en tuberías inclinométricas. Estos sensores ofrecen una alta resolución angular (hasta $\pm 0.005^\circ$), operan en condiciones extremas (IP68), y se comunican mediante protocolos robustos como RS485 o SDI-12 (Sisgeo, 2023; RST Instruments, 2022). Son ideales para monitoreo profundo y continuo en obras civiles, pero su costo elevado limita su implementación en zonas rurales.

Por otro lado, los sensores MEMS embebidos, como el MPU-6050, ADXL345, BNO055 o Murata SCL3300, han permitido el desarrollo de prototipos de bajo costo con buen nivel de precisión. Estos sensores integran acelerómetros, giroscopios y, en algunos casos,

magnetómetros, lo que permite calcular la inclinación del terreno a partir de la aceleración gravitacional y la orientación espacial. Su bajo consumo energético y compatibilidad con microcontroladores como el ESP32 los hacen ideales para sistemas autónomos con transmisión remota mediante tecnología LoRa (Barragán, Vélez & Parra, 2020; Mischianti, 2022).

Finalmente, los sensores integrados en inclinómetros portátiles, como el Bosch GIM 60L o el GemRed 82413, están diseñados para mediciones manuales rápidas. Aunque no se integran en sistemas automatizados, son útiles para validaciones de campo y calibración de prototipos (López & González, 2020).

La evolución de los sensores ha permitido democratizar el acceso a tecnologías de monitoreo, ofreciendo alternativas viables para comunidades vulnerables que enfrentan riesgos geotécnicos sin contar con infraestructura especializada.

Señales que Capturan los Sensores en Inclinómetros

Los sensores utilizados en inclinómetros, especialmente los tipo IMU (Unidad de Medición Inercial), capturan múltiples señales físicas que permiten calcular la inclinación del terreno y detectar desplazamientos. Estos sensores pueden medir aceleración, velocidad angular, orientación espacial, campo magnético y temperatura, lo que los convierte en herramientas clave para sistemas de monitoreo geotécnico en tiempo real (Barragán, Vélez & Parra, 2020).

Aceleración Vectorial (m/s^2)

Medición de la aceleración total en los tres ejes (X, Y, Z), incluyendo la gravedad y el movimiento lineal. Es la base para calcular el ángulo de inclinación. (Barragán, Vélez & Parra, 2020).

Aceleración Lineal (m/s^2)

Aceleración del movimiento real, excluyendo el componente gravitacional. Útil para detectar vibraciones o desplazamientos súbitos. (Mischianti, 2022).

Velocidad Angular ($^\circ/s$ o rad/s)

Captura la velocidad de rotación en los tres ejes. Es proporcionada por el giroscopio interno del sensor. (Andrade & Rodríguez, 2021).

Campo Magnético (μT)

Medición de la intensidad del campo magnético terrestre en tres ejes. Permite calcular orientación absoluta cuando se combina con acelerómetro y giroscopio. (Romero & Díaz, 2022).

Orientación Absoluta

Incluye ángulos de orientación (yaw, pitch, roll) en un sistema de 360° mediante vectores de Euler, o representaciones más precisas con cuaterniones para rotaciones tridimensionales (Martínez, 2024).

Euler Vector: Ángulos de orientación (yaw, pitch, roll) en un sistema de 360°

Quaternion: Representación matemática más precisa para rotaciones tridimensionales

Vector de Gravedad (m/s^2)

Aceleración debida únicamente a la gravedad, útil para calcular inclinación estática (Barragán, Vélez & Parra, 2020).

Temperatura ($^\circ C$)

Algunos sensores incluyen medición de temperatura ambiente, útil para compensaciones térmicas (Flores & Sanhueza, 2018).

Componentes de un Inclinómetro según su Uso

Inclinómetros Geotécnicos Profesionales (In Situ)

Utilizados en obras civiles, monitoreo de taludes y estructuras profundas, estos sistemas están diseñados para operar en condiciones exigentes y ofrecer alta precisión. Sisgeo (2023).

Componentes principales:

Tubería inclinométrica: Se instala verticalmente en perforaciones del terreno; guía la sonda de medición. (Sisgeo, 2023).

Sonda inclinométrica: Sensor de desplazamiento horizontal que se desliza dentro de la tubería para medir deformaciones. (RST Instruments, 2022).

Unidad de lectura digital: Recoge y almacena los datos del sensor; puede incluir dataloggers automáticos. (Detektia, 2025).

Cable de conexión: Transmite los datos desde la sonda hasta el sistema de lectura. (RST Instruments, 2022).

Sistema de transmisión: RS485, SDI-12 o inalámbrico. (Sisgeo, 2023).

Fuente de alimentación: Voltajes entre 12 y 24 V DC. (RST Instruments, 2022).

Protección ambiental: Certificación IP68 para operar en condiciones extremas como humedad, presión o barro. (Sisgeo, 2023).

Estos sistemas permiten medir desplazamientos laterales en profundidad y son fundamentales en proyectos de infraestructura crítica (Detektia, 2025; RST Instruments, 2022).

Inclinómetros de Bajo Costo (Prototipos con ESP32)

Diseñados para aplicaciones rurales, académicas o de investigación aplicada, estos sistemas son económicos, escalables y adaptables.

Componentes principales:

Sensor IMU (ej. MPU-6050, ADXL345, BNO055): Dispositivos que integran acelerómetros, giroscopios y, en algunos casos, magnetómetros. Permiten detectar aceleración, inclinación y orientación espacial, siendo la base para calcular desplazamientos y movimientos de masa en tiempo real (Mischianti, 2022).

Microcontrolador (ESP32): Unidad de procesamiento que gestiona la lectura de datos del sensor, ejecuta algoritmos de cálculo y controla la comunicación con otros dispositivos. Su capacidad de conectividad Wi-Fi y Bluetooth lo hace ideal para sistemas embebidos de monitoreo (Barragán, Vélez & Parra, 2020).

Módulo de comunicación LoRa: Permite transmitir datos a largas distancias sin necesidad de infraestructura celular, garantizando conectividad en zonas rurales o apartadas. Es clave para sistemas de alerta temprana en comunidades con baja cobertura de red (Romero & Díaz, 2022).

Pantalla OLED (opcional): Facilita la visualización local de los datos de inclinación y estado del sistema, ofreciendo una interfaz sencilla para validaciones rápidas en campo (Mischianti, 2022).

Fuente de energía: Generalmente se emplean baterías recargables o fuentes de alimentación DC (3.3V–5V), lo que asegura autonomía energética y portabilidad del sistema (Flores & Sanhueza, 2018).

Carcasa protectora: Diseñada con certificación IP65 o superior, protege el sistema contra polvo, humedad y condiciones adversas en campo, garantizando durabilidad y confiabilidad (Detektia, 2025).

Firmware embebido: Programa interno que gestiona la lectura de datos, el cálculo de inclinación y la transmisión remota. Es fundamental para la integración de hardware y software en sistemas de monitoreo geotécnico (Martínez, 2024).

Inclinómetros Portátiles

Los inclinómetros portátiles son dispositivos diseñados para mediciones manuales rápidas en campo, inspecciones visuales y procesos de calibración de prototipos. Se caracterizan por su facilidad de uso, portabilidad y resistencia, aunque no se integran en sistemas automatizados de monitoreo continuo. Su función principal es servir como herramienta de apoyo en la validación experimental y en la verificación de inclinación en estructuras o terrenos. (Urany, 2022).

Componentes principales:

Sensor MEMS o láser integrado: Permite medir el ángulo de inclinación respecto a la gravedad con precisión moderada, siendo adecuado para inspecciones rápidas (Urany, 2022).

Pantalla digital LCD: Muestra en tiempo real el valor de inclinación, facilitando la lectura directa por parte del operador (López & González, 2020).

Carcasa ergonómica: Diseñada para uso manual, resistente a golpes, polvo y humedad, lo que garantiza durabilidad en condiciones de campo (Urany, 2022).

Fuente de energía: Generalmente funcionan con baterías AA o CR2032, lo que asegura autonomía y facilidad de reemplazo (Urany, 2022).

Botones de control: Permiten encendido, calibración y cambio de unidades de medida, ofreciendo una interfaz sencilla para el usuario (Urany, 2022).

Estos dispositivos son útiles para validaciones rápidas y calibración de prototipos, aunque su limitación radica en que no forman parte de sistemas automatizados de transmisión y monitoreo continuo.

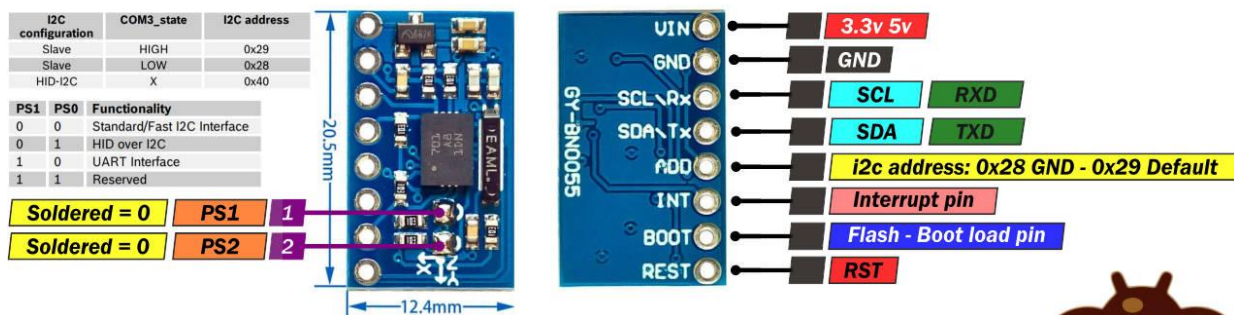
Sensores Empleados y Características Técnicas Relevantes.

BNO055 (Bosch Sensortec)

La imagen de la Figura 1, presenta el diagrama de pines y configuración del sensor BNO055, un módulo de orientación absoluta de 9 ejes que combina acelerómetro, giroscopio y magnetómetro. Se detallan los pines físicos (VIN, GND, SDA, SCL, RXD, TXD, INT, PS0, PS1, RST) y se muestra cómo configurar los pines PS0 y PS1 para seleccionar el modo de comunicación: I2C estándar, HID sobre I2C o UART.

Figura 1

Diagrama de pines y configuración del sensor BNO055



Nota. Sensor de orientación absoluta de 9 ejes con modos I2C y UART. Adaptado de (Mischianti, 2022).

También se indica la dirección I2C por defecto (0x28) y su alternativa (0x29). Este sensor permite obtener directamente los ángulos de yaw, pitch y roll, facilitando su integración en sistemas embebidos para navegación, robótica o inclinómetros avanzados. Dentro de las características técnicas más importantes se resaltan las siguientes:

Tipo: Acelerómetro + giroscopio + magnetómetro + microcontrolador interno

Rango de aceleración: $\pm 2g$ a $\pm 16g$

Rango de velocidad angular: $\pm 2000^\circ/s$

Frecuencia de muestreo: Hasta 100 Hz

Interfaz: I2C / UART

Salidas disponibles: Euler, Quaternion, aceleración lineal, gravedad, campo magnético, temperatura

Ventaja clave: Incluye algoritmo de fusión de sensores en chip, lo que reduce la carga de procesamiento en el microcontrolador

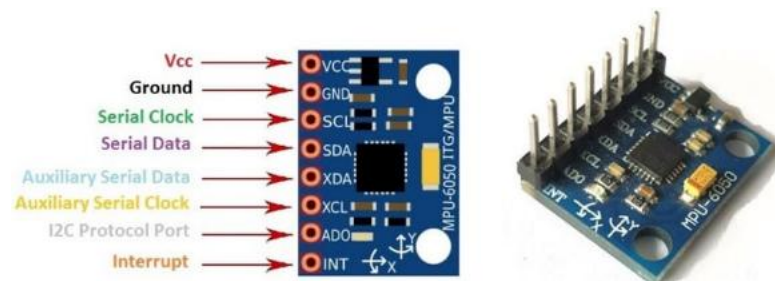
Este sensor es ampliamente recomendado para sistemas embebidos con ESP32 por su precisión y facilidad de integración (Mischianti, 2022).

MPU-6050 (InvenSense)

El MPU-6050 es un sensor de movimiento de bajo costo que integra un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes, permitiendo la medición de movimiento en seis grados de libertad. Se comunica con microcontroladores mediante el protocolo I2C, y es ampliamente utilizado en proyectos de robótica, sistemas embebidos e inclinómetros. Su tamaño compacto y facilidad de integración lo hacen ideal para aplicaciones educativas y prototipos IoT. En la Figura 2 se aprecia una vista del módulo MPU-6050 y distribución de los pines.

Figura 2

Vista del módulo MPU-6050 y distribución de pines



Nota. Sensor de 6 ejes con acelerómetro y giroscopio. Adaptado de Random Nerd Tutorials (2023).

El Sensor IMU de 6 ejes es muy utilizado en proyectos académicos por su bajo costo.

Entre sus características técnicas se encuentran las siguientes:

Tipo: Acelerómetro + giroscopio

Rango de aceleración: $\pm 2g$ a $\pm 16g$

Rango de velocidad angular: $\pm 250^\circ/s$ a $\pm 2000^\circ/s$

Interfaz: I2C

Frecuencia de muestreo: Hasta 1 kHz

Ventaja clave: Económico y ampliamente documentado

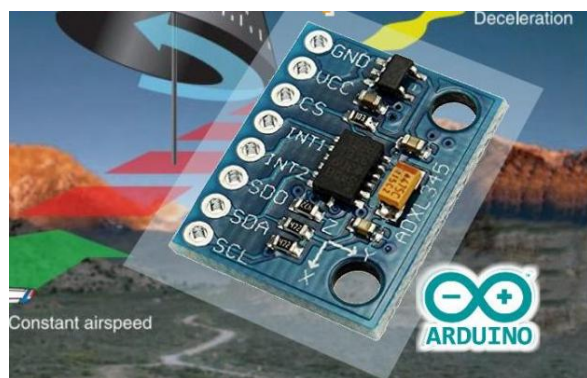
Su desempeño ha demostrado ser más estable frente a vibraciones aleatorias en comparación con otros sensores similares (Rodrigues et al., 2021).

ADXL345 (Analog Devices)

La Figura 3 corresponde al sensor ADXL345, un acelerómetro digital de tres ejes desarrollado por Analog Devices. Este dispositivo compacto y de bajo consumo energético permite medir aceleraciones en los ejes X, Y y Z, ofreciendo rangos configurables de ± 2 g hasta ± 16 g. Gracias a su interfaz de comunicación I2C y SPI, el ADXL345 se integra fácilmente en sistemas embebidos, siendo ampliamente utilizado en proyectos de inclinometría, detección de movimiento y monitoreo estructural.

Figura 3

Vista del módulo ADXL345 y conexiones básicas



Nota. Acelerómetro digital de tres ejes con interfaz I2C/SPI. Adaptado de (Mischianti, R. 2022).

Es un acelerómetro digital de tres ejes desarrollado por Analog Devices, diseñado para medir aceleraciones en los ejes X, Y y Z. Ofrece rangos de medición seleccionables de ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g y ± 16 g, con una resolución de hasta 13 bits en modo de resolución completa. Su bajo consumo energético ($23 \mu\text{A}$ en modo activo) lo hace ideal para aplicaciones portátiles y sistemas embebidos. Este acelerómetro digital de 3 ejes es ideal para detectar inclinaciones estáticas.

Características técnicas principales:

Rango de aceleración: $\pm 2\text{g}$ a $\pm 16\text{g}$

Resolución: 13 bits

Interfaz: I2C / SPI

Voltaje de operación: 2.0V a 3.6V

Consumo energético: Muy bajo ($\sim 140 \mu\text{A}$ en modo activo)

Ventaja clave: Alta sensibilidad y bajo consumo

Aunque es sensible a interferencias electromagnéticas, su simplicidad lo hace útil en entornos controlados (Arduino Forum, 2024).

Murata SCL3300-D01

El módulo muRata SCX3300, es un sensor de inclinación de alta precisión diseñado para aplicaciones industriales y de monitoreo estructural. En la Figura 4 se destacan las conexiones I2C visibles, que permiten la comunicación directa con microcontroladores y sistemas embebidos, facilitando la integración en proyectos de medición de ángulos y estabilidad. Este módulo combina robustez y exactitud, siendo ideal para proyectos académicos y profesionales orientados al control y análisis de movimiento. Murata Manufacturing (2025).

Figura 4

Módulo muRata SCX3300 con conexiones I2C visibles



Nota. El módulo SCX3300 de Murata incluye un circuito integrado central y líneas de comunicación I2C etiquetadas como PWR, GND, SDA y SCL. Adaptado de Murata Manufacturing (2025).

Características técnicas principales:

Tipo: Acelerómetro triaxial MEMS

Precisión angular: $\pm 0.005^\circ$

Rango de inclinación: $\pm 90^\circ$

Interfaz: SPI

Voltaje de operación: 3.3V

Ventaja clave: Alta estabilidad térmica y precisión para monitoreo estructural

Este diseño es útil para tareas de adquisición de datos en sistemas embebidos. Este Sensor MEMS industrial es de alta precisión, ideal para aplicaciones exigentes. Murata Manufacturing (2025).

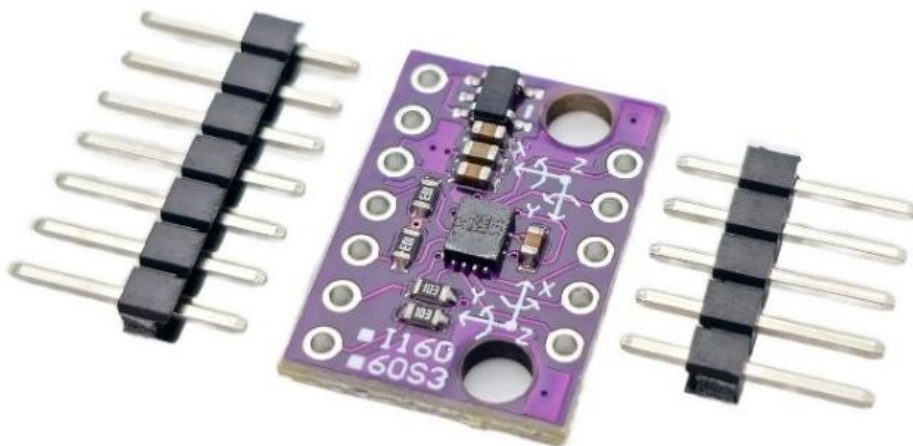
LSM6DS3 (STMicroelectronics)

La Figura 5 muestra el módulo LSM6DS3 de STMicroelectronics, donde se aprecian claramente los pines de conexión para su integración en sistemas embebidos. Este dispositivo combina un acelerómetro de tres ejes y un giroscopio de tres ejes, ofreciendo una solución compacta y eficiente para la medición de movimiento, orientación e inclinación. Gracias a su interfaz de comunicación I2C/SPI, el LSM6DS3 se adapta fácilmente a proyectos de monitoreo estructural, control de movimiento y aplicaciones académicas de instrumentación.

(STMicroelectronics, 2023).

Figura 5

Vista del módulo LSM6DS3 en tarjeta de expansión con pines de conexión



Nota. La figura ilustra el módulo y sus conexiones principales, destacando la disposición de pines y la interfaz de comunicación utilizada. Adaptado de STMicroelectronics (2023).

Características técnicas principales:

Tipo: Acelerómetro + giroscopio

Rango de aceleración: ± 2 g a ± 16 g

Rango de velocidad angular: ± 125 °/s a ± 2000 °/s

Interfaz de comunicación: I2C / SPI

Consumo energético: ~ 0.9 mA en modo activo

Ventaja clave: Ideal para sistemas portátiles y alimentados por batería

El LSM6DS3 de STMicroelectronics es un módulo moderno que integra un acelerómetro de tres ejes y un giroscopio de tres ejes, ofreciendo una solución compacta y eficiente para la medición de movimiento, orientación e inclinación (STMicroelectronics, 2023).

Comparativa de Sensores para Inclinómetros

La selección del sensor adecuado es un aspecto fundamental en el diseño de un inclinómetro de bajo costo, ya que influye directamente en la precisión, eficiencia energética, costo y compatibilidad del sistema (Barragán, Vélez & Parra, 2020). En esta sección se realizó una comparativa técnica entre diferentes sensores disponibles en el mercado, evaluando sus características clave como resolución, consumo eléctrico, interfaz de comunicación y precio. El objetivo es identificar la opción más adecuada para un prototipo de bajo costo, sin comprometer la calidad ni la funcionalidad del dispositivo. La tabla 3 hace una comparación de los sensores para inclinómetros con el fin de poder sintetizar para seleccionar el sensor apropiado.

Tabla 3*Comparativo sensores para inclinómetros*

Sensor	Tipo de Sensor	Ejes	Rango de Medición	Precisión / Resolución	Interfaz Digital	Compatibilidad con Transmisión	Voltaje / Consumo	Precio Aprox. (COP)	Fuente
BNO055	IMU 9 ejes + fusión	3+3+3	±2g / ±2000°/s / ±1300 μT	±0.03 g / ±1° orientación	I2C / UART	LoRa, Wi-Fi, UART	3.3V / ~12 mA	\$56.000 – \$64.000	Mischianti (2022)
MPU-6050	IMU 6 ejes	3+3	±2g a ±16g / ±250°/s a ±2000°/s	±0.05 g / ±0.1° aprox.	I2C	LoRa, Wi-Fi	3.3V / ~3.9 mA	\$12.000 – \$27.000	Random Nerd Tutorials (2023)
ADXL345	Acelerómetro digital	3	±2g a ±16g	13 bits / ±0.01 g	I2C / SPI	LoRa, Wi-Fi	3.3V / ~140 μA	\$14.000 – \$21.000	Arduino Forum (2024)
SCL3300-D01	MEMS industrial	3	±1.2g / ±90°	±0.005° /°C	SPI	LoRa, Wi-Fi (con ESP32)	3.0 –3.6V / ~1.2 mA	\$129.00 – \$170.00	Murata Manufacturing (2025)
LSM6DS3	IMU 6 ejes	3+3	±2g a ±16g / ±125°/s a ±2000°/s	±0.03 g / ±0.1° aprox.	I2C / SPI	LoRa, Wi-Fi	1.8–3.6V / ~0.9 mA	\$48.000 – \$55.000	Amazon.com (2025)

Nota. La tabla refleja los modelos, tipos de sensor, ejes, rango de precisión, precisión/resolución, interfaz digital, Compatibilidad con transmisión, voltaje/consumo, precio y fuente.

Comparación Técnica de Sensores

La tabla 4 presenta una comparación técnica entre distintos sensores utilizados en proyectos de medición de inclinación y movimiento. Se incluyen parámetros clave como precisión/resolución, consumo energético y costo aproximado en el mercado colombiano, además de un análisis de sus ventajas y limitaciones. Esta información permite evaluar el desempeño de cada dispositivo y justificar la selección del sensor más adecuado según los requerimientos del proyecto académico, considerando factores de exactitud, eficiencia energética y viabilidad económica. (Rodrigues et al., 2021; Barragán, Vélez & Parra, 2020; Mischianti, 2022).

Tabla 4

Comparación técnica de sensores inerciales y acelerómetros para aplicaciones de inclinometría

Sensor	Precisión / Resolución	Consumo Energético	Costo Aprox. (COP)	Ventajas	Limitaciones
BNO055	± 0.03 g / $\pm 1^\circ$ orientación	~12 mA	\$56.000 – \$64.000	Fusión de sensores integrada, fácil orientación 3D	Mayor consumo, precio medio-alto
MPU-6050	± 0.05 g / $\pm 0.1^\circ$ aprox.	~3.9 mA	\$12.000 – \$27.000	Económico, ampliamente documentado, fácil integración con ESP32	No incluye magnetómetro, requiere procesamiento adicional para orientación
ADXL345	± 0.01 g / 13 bits	~140 μ A	\$14.000 – \$21.000	Muy bajo consumo, buena resolución para inclinación	Solo acelerómetro, sin giroscopio
SCL3300-D01	$\pm 0.005^\circ$ / $^\circ$ C	~1.2 mA	\$129.000 – \$170.000	Alta precisión industrial, excelente estabilidad térmica	Alto costo, interfaz SPI requiere configuración avanzada
LSM6DS3	± 0.03 g / $\pm 0.1^\circ$ aprox.	~0.9 mA	\$48.000 – \$55.000	Buen equilibrio entre precisión y consumo, interfaz dual (I2C/SPI)	Menor documentación que MPU-6050, precio medio

Nota: La tabla refleja los sensores, precisión/resolución, el consumo energético, costo aproximado, ventajas y limitaciones.

Selección del Sensor para el Inclinómetro de Bajo Costo.

Para el desarrollo del prototipo, se seleccionó el sensor MPU-6050 debido a su equilibrio entre funcionalidad técnica, eficiencia energética y accesibilidad económica. Este módulo ofrece medición en seis ejes (acelerómetro y giroscopio), con una resolución adecuada para detectar variaciones de inclinación relevantes en aplicaciones de monitoreo ambiental. Su bajo consumo (~3.9 mA) lo hace ideal para sistemas autónomos alimentados por baterías, y su interfaz I2C permite una integración sencilla con microcontroladores ESP32, compatibles con tecnologías de transmisión como LoRa. Además, su precio competitivo en el mercado colombiano (entre \$12.000 y \$27.000 COP) lo convierte en una opción viable para proyectos de bajo costo con enfoque social, sin comprometer la calidad técnica del sistema. Esta elección también facilita futuras mejoras, como la implementación de algoritmos de fusión de sensores para mejorar la precisión en la orientación.

Arquitectura del Inclinómetro.

Este capítulo describe la estructura funcional y técnica del prototipo de inclinómetro diseñado para aplicaciones de monitoreo ambiental. Se detallan los componentes principales del sistema, su integración mediante microcontroladores ESP32 y la tecnología de comunicación LoRa, así como el flujo de datos entre el sensor de inclinación y la estación receptora.

La arquitectura del sistema se diseñó con base en principios de modularidad, bajo consumo energético y comunicación eficiente en entornos rurales. El uso de microcontroladores ESP32 junto con tecnología LoRa permite construir una red de sensores robusta y escalable, ideal para aplicaciones de monitoreo ambiental como la detección temprana de deslizamientos de tierra (Espinoza, 2023; Vallejo-Sánchez, 2024).

Descripción General del Sistema

El sistema desarrollado corresponde a un inclinómetro IoT de bajo costo, diseñado para detectar variaciones de inclinación en terrenos susceptibles a deslizamientos. Está compuesto por un nodo sensor basado en el MPU-6050, que captura datos de aceleración y giro en tres ejes. Estos datos son procesados por un microcontrolador ESP32, el cual se encarga de empaquetar la información y transmitirla mediante un módulo LoRa SX1278 hacia una estación receptora.

La estación receptora, también basada en ESP32, recibe los datos vía LoRa y los redirige a una plataforma de visualización como ThingSpeak o Node-RED, donde se pueden analizar en tiempo real y generar alertas preventivas. Esta arquitectura permite una comunicación eficiente en entornos rurales, con bajo consumo energético y alta escalabilidad.

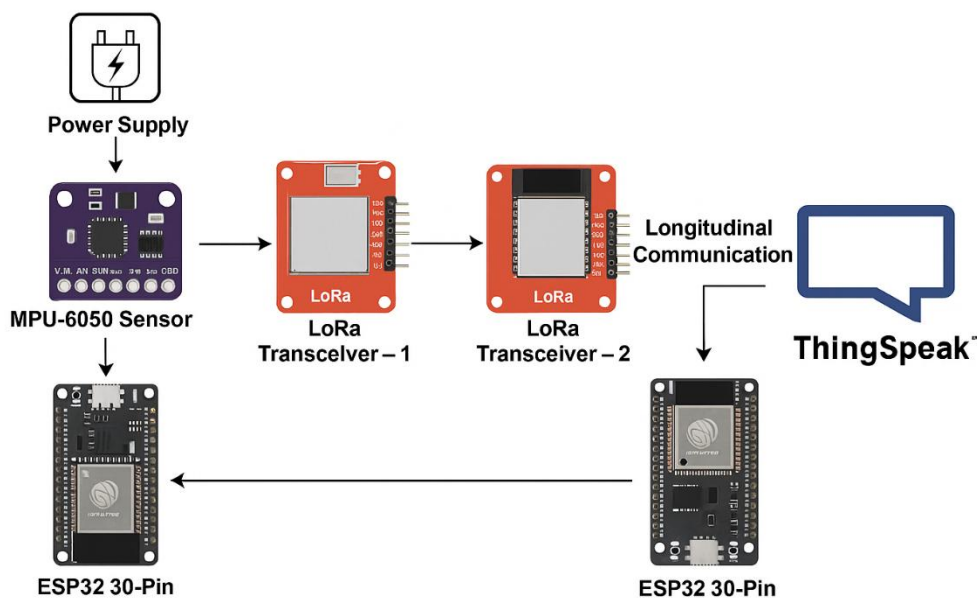
La elección de componentes se fundamenta en criterios de precisión, compatibilidad, eficiencia energética y costo, lo que permite implementar soluciones tecnológicas accesibles en comunidades vulnerables. El uso del ESP32 en sistemas de monitoreo ambiental ha sido validado

en proyectos de agricultura inteligente y minería (Vallejo-Sánchez, 2024), mientras que la tecnología LoRa ha demostrado ser eficaz en redes de sensores distribuidos con bajo consumo energético (Espinoza, 2023). Por su parte, el sensor MPU-6050 ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones educativas y de prototipado rápido por su facilidad de integración y buena relación costo-beneficio (Random Nerd Tutorials, 2023).

La figura 6 representa un diagrama de bloques funcional del prototipo de inclinómetro de bajo costo, basado en microcontroladores ESP32 y comunicación LoRa SX1278.

Figura 6

Diagrama de Bloque de la arquitectura básica del inclinómetro de bajo costo con tecnología long-range



Nota. El sistema incluye un nodo sensor con MPU-6050, comunicación LoRa entre módulos SX1278, y visualización en monitor serial. Elaboración propia.

Se ilustran los componentes reales utilizados en el sistema, organizados de izquierda a derecha según el flujo de datos.

Fuente de alimentación: módulo USB o batería Li-ion que energiza el sistema.

Sensor MPU-6050: módulo de color púrpura con chip central, encargado de medir aceleración e inclinación en tres ejes.

LoRa Transceiver módulo 1: placa roja con pines dorados, transmite los datos del sensor de forma inalámbrica.

LoRa Transceiver módulo 2: placa azul con especificaciones técnicas visibles, recibe la señal transmitida.

Unidad de procesamiento central: ESP32 receptor conectado a un monitor serial, donde se visualizan los datos en tiempo real mediante Arduino IDE.

Las flechas negras indican la dirección del flujo de información, desde la adquisición de datos hasta su visualización. El texto “Longitudinal Communication” destaca el uso de tecnología de largo alcance para la transmisión.

Componentes Principales

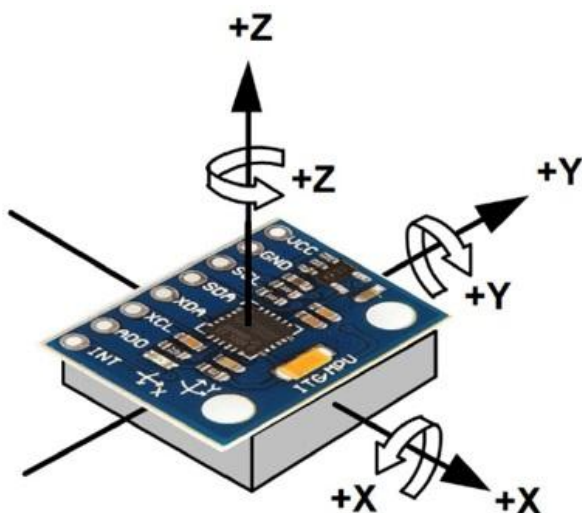
A continuación, se presenta la descripción específica de cada uno de los componentes del prototipo desarrollado:

Sensor de inclinación (MPU-6050): Este módulo combina acelerómetro y giroscopio en seis ejes, lo que permite detectar variaciones de inclinación con buena precisión y bajo costo. Su integración con ESP32 mediante I2C ha sido ampliamente documentada en proyectos de monitoreo ambiental (Random Nerd Tutorials, 2023).

La figura 7, muestra la orientación de los ejes (+X, +Y, +Z) y los pines de conexión (VCC, GND, SDA, SCL, XDA, XCL, ADO, INT), utilizados para la comunicación mediante I2C con el ESP32 DevKit de 30 pines

Figura 7

Módulo sensor MPU-6050 con ejes de referencia



Nota. El MPU-6050 es un sensor de seis grados de libertad que combina un acelerómetro triaxial y un giroscopio triaxial en un solo chip. Adaptado de Random Nerd Tutorials (2023).

El módulo MPU6050 integra dos tipos de sensores principales en un solo chip:

Acelerómetro triaxial (3 ejes):

Mide la aceleración en los ejes X, Y y Z.

Permite calcular la inclinación estática del sistema respecto a la gravedad.

Útil para detectar movimientos lineales y cambios de posición.

Giroscopio triaxial (3 ejes):

Mide la velocidad angular en los ejes X, Y y Z.

Permite calcular la inclinación dinámica y detectar rotaciones rápidas.

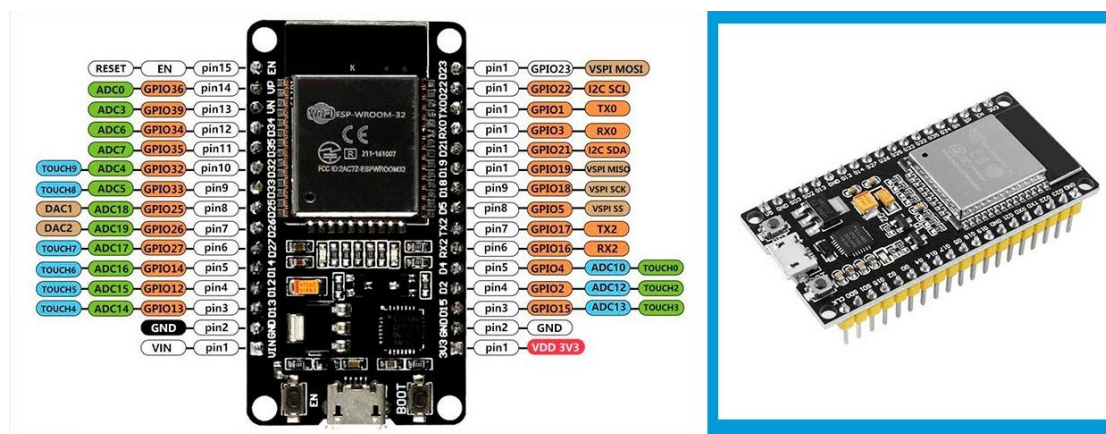
Complementa al acelerómetro para obtener datos más precisos mediante fusión de sensores.

En conjunto, el MPU6050 ofrece seis grados de libertad (6-DOF), lo que lo convierte en un dispositivo ideal para aplicaciones de medición de ángulos, orientación y movimiento en sistemas como el inclinómetro. (Random Nerd Tutorials, 2023).

Microcontrolador ESP32: Elegido por su capacidad de procesamiento, conectividad Wi-Fi/Bluetooth y compatibilidad con LoRa. Su uso en sistemas IoT abiertos ha sido validado en entornos agrícolas, mineros y urbanos (Vallejo-Sánchez, 2024). La figura 8 presenta la placa de desarrollo ESP32 DevKit de 30 pines, la cual es utilizada como núcleo de procesamiento en el sistema de inclinómetro. A la izquierda se observa el diagrama de pinout, donde se identifican funciones clave como entradas analógicas (ADC), salidas analógicas (DAC), sensores táctiles, interfaces de comunicación (I2C, SPI, UART), pines de control (RESET, EN) y alimentación (VIN, 3V3, GND). A la derecha se muestra la vista física de la placa, que integra el microcontrolador ESP32-WROOM-32 con conectividad WiFi y Bluetooth.

Figura 8

Vista física y distribución de pines del ESP32 DevKit (30 pines)



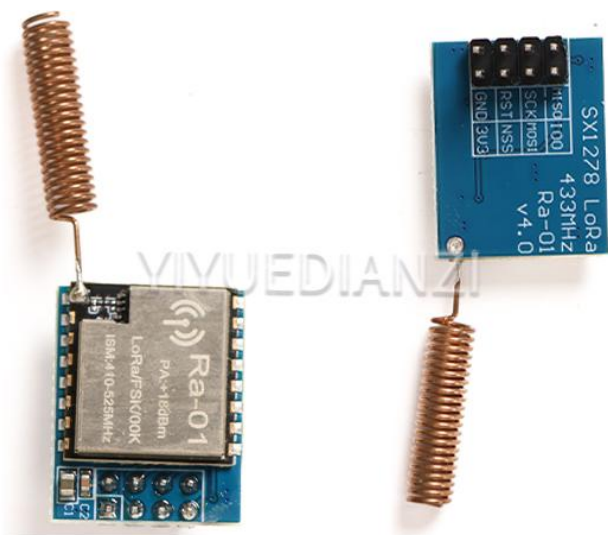
Nota. La imagen muestra la placa de desarrollo ESP32 DevKit de 30 pines, utilizada como núcleo de procesamiento en el sistema de inclinómetro. Adaptado de Random Nerd Tutorials (2023).

Esta disposición facilita la conexión directa de periféricos como el sensor MPU6050 y el módulo LoRa SX1278, optimizando la arquitectura del sistema

Módulo LoRa SX1278: Permite la transmisión de datos a largas distancias con bajo consumo energético. Es ideal para zonas con limitada infraestructura de red (Espinoza, 2023). La figura 9 evidencia el módulo Ra-01 basado en el chip SX1278, diseñado para comunicación LoRa a 433 MHz. Se observan claramente sus componentes principales: el blindaje metálico con identificación del modelo, la antena helicoidal para transmisión de largo alcance, y la disposición de pines para integración en sistemas embebidos.

Figura 9 Módulo

LoRa SX1278 RA-01 con antena helicoidal



Nota. La imagen muestra dos versiones del módulo LoRa SX1278 RA-01, utilizados para la transmisión inalámbrica de datos en el sistema de inclinómetro. Adaptado de documentación técnica de RA-01 (2023).

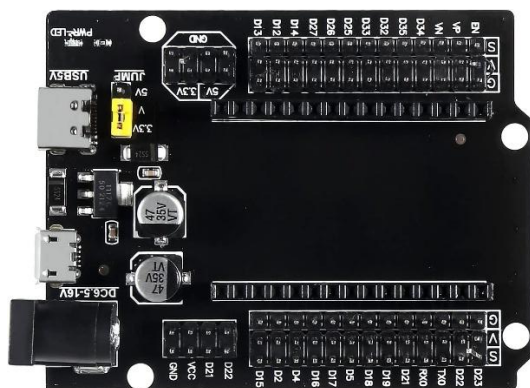
Módulo de expansión ESP32 CP2102 (30 pines): Como parte de la arquitectura electrónica del sistema, se empleó un módulo shield base para ESP32 de 30 pines, diseñado para facilitar la expansión de entradas y salidas digitales (I/O) del microcontrolador. Este componente

permite una conexión ordenada y segura de sensores, actuadores y periféricos, gracias a su distribución de pines etiquetados en doble hilera, incluyendo líneas de alimentación (3V, 5V, GND) y comunicación (SDA, SCL, RX, TX).

El módulo cuenta con reguladores de voltaje, capacitores de filtrado y puertos de alimentación tipo USB y jack DC (6.5–16 V), lo que permite una alimentación flexible y estable del sistema. Además, incorpora jumpers de selección de voltaje, lo que facilita la adaptación a distintos niveles de operación según el periférico conectado. En la Figura 10. Se observa el Módulo Shield de expansión para ESP32 de 30 pines. Este módulo facilita la conexión estructurada de periféricos al microcontrolador ESP32, ofreciendo acceso directo a sus 30 pines de entrada/salida digital y analógica. Este tipo de módulo es ampliamente utilizado en proyectos de instrumentación embebida por su versatilidad y compatibilidad con entornos de desarrollo como Arduino IDE y PlatformIO (González & Rojas, 2023).

Figura 10

Módulo de expansión ESP32 CP2102 utilizado en el prototipo



Nota. La figura muestra el módulo de expansión ESP32 CP2102 de 30 pines, utilizado como base para el desarrollo del prototipo del inclinómetro. Adaptado del entorno físico del prototipo (2025).

Fuente de alimentación: Batería recargable de 3.7V con regulador de voltaje a 3.3V para alimentar los componentes.

Estación Receptora ESP32: Recibe los datos transmitidos por LoRa y los envía a plataformas de visualización como ThingSpeak , facilitando el análisis en tiempo real.

Diseño físico del prototipo

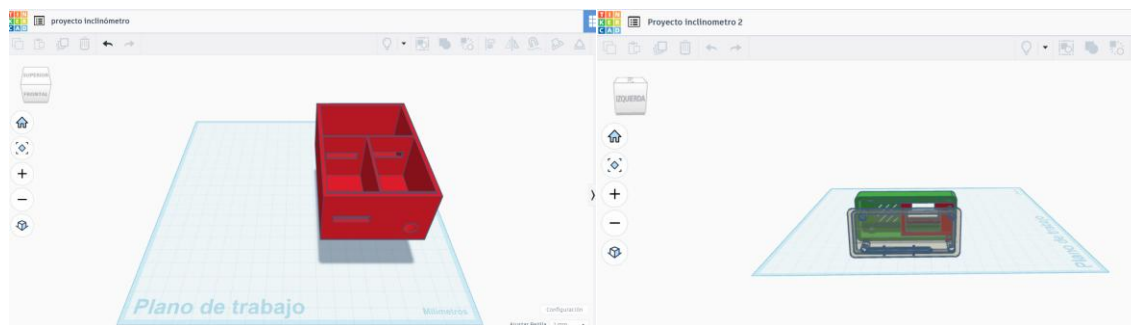
El prototipo del inclinómetro fue diseñado en la plataforma Tinkercad, con el objetivo de validar la disposición espacial de los componentes electrónicos antes de su fabricación física. El modelo consiste en una estructura rectangular con compartimentos internos y recortes estratégicos, que permiten alojar de manera organizada los módulos principales del sistema: ESP32, sensor MPU6050, módulo LoRa SX1278 y pantalla LCD 1602.

El diseño se realizó sobre un plano de trabajo configurado en milímetros, lo que garantiza la compatibilidad dimensional con los componentes reales y facilita la futura impresión 3D del encapsulado. La carcasa propuesta cumple funciones de protección mecánica, organización del cableado y ventilación pasiva, asegurando la integridad del sistema durante su operación.

Este modelo tridimensional constituye una etapa fundamental dentro de la arquitectura del proyecto, ya que permite anticipar posibles ajustes en la distribución interna y verificar la ergonomía del dispositivo antes de su implementación práctica. La figura 11 evidencia el modelo físico diseñado en 3D del inclinómetro mediante Tinkercad.

Figura 11

Modelo 3D del prototipo físico del inclinómetro



Nota. La imagen presenta el diseño tridimensional del prototipo físico del sistema de inclinómetro, elaborado en la plataforma Tinkercad. Adaptado del entorno de diseño Tinkercad (2025).

Justificación Técnica

La arquitectura propuesta se basa en tecnologías abiertas y de bajo costo, lo que permite su implementación en comunidades vulnerables. La combinación de ESP32 y LoRa ha demostrado ser efectiva en proyectos de monitoreo ambiental, como lo evidencian estudios aplicados en invernaderos y minería (Espinoza, 2023; Vallejo-Sánchez, 2024). Además, el uso de sensores como el MPU-6050 facilita la detección de inclinaciones con suficiente precisión para aplicaciones preventivas (Random Nerd Tutorials, 2023).

Pruebas de simulación en Wokwi

Con el fin de validar la arquitectura del sistema antes de la implementación física, se realizaron pruebas en el entorno de simulación Wokwi, el cual permite emular el comportamiento de microcontroladores y periféricos en tiempo real. Estas simulaciones fueron fundamentales para comprobar la correcta comunicación entre los módulos y anticipar posibles ajustes de programación o conexión.

En el simulador se configuraron los siguientes elementos:

ESP32 como unidad central de procesamiento.

Sensor MPU6050 para la adquisición de datos de aceleración y giroscopio.

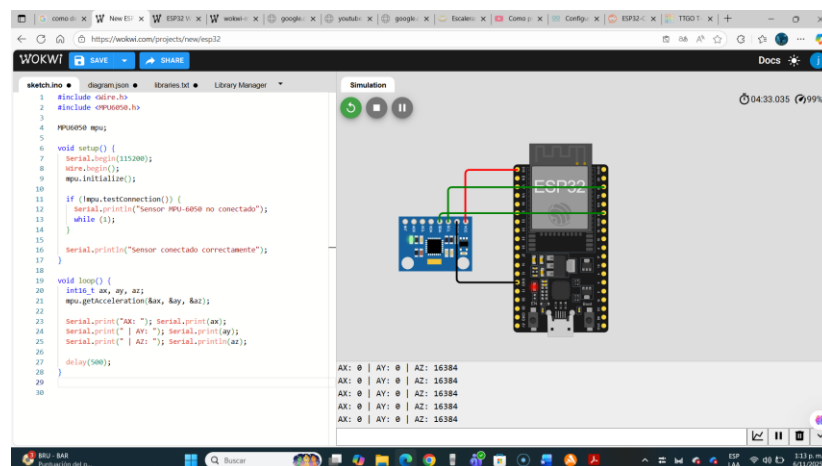
Módulo LoRa SX1278 para la transmisión inalámbrica de los datos.

Pantalla LCD 1602 con interfaz I2C para la visualización de los resultados en el receptor.

La figura 12 evidencia la simulación realizada en Wokwi de la funcionalidad del sistema de adquisición de datos mediante el MPU6050.

Figura 12

Simulación de adquisición de datos crudos del MPU6050 en Wokwi



Nota. La figura muestra el entorno de simulación Wokwi utilizado para validar la comunicación I2C entre el microcontrolador ESP32 y el sensor MPU6050. Adaptado del entorno de simulación Wokwi (2025).

Las pruebas realizadas incluyeron:

Lectura de datos crudos del MPU6050: verificación de la correcta adquisición de aceleraciones y velocidades angulares.

Cálculo de ángulos (pitch y roll): comprobación de la estabilidad de los valores obtenidos mediante trigonometría básica y filtro complementario.

Visualización en LCD: confirmación de que los datos procesados se muestran correctamente en pantalla, junto con el nivel de señal RSSI.

Los resultados de la simulación evidenciaron que el sistema responde de manera estable y confiable, lo cual permitió avanzar hacia la fase de diseño. Estas pruebas constituyen un paso esencial dentro del proceso metodológico, ya que garantizan la funcionalidad del código y la integración de los módulos antes de la construcción del prototipo real.

Prototipo a escala del inclinómetro.

Este capítulo presenta las evidencias visuales y la descripción detallada de cada parte del prototipo desarrollado. Se documentan los componentes electrónicos, el sistema de comunicación inalámbrica, la fuente de alimentación y la integración general del sistema, con el fin de demostrar su viabilidad técnica y funcional.

Evidencias del prototipo

El desarrollo del prototipo a escala del inclinómetro constituye una etapa fundamental dentro del proceso de diseño, ya que permite validar la integración de los subsistemas electrónicos, inalámbricos y de alimentación antes de la implementación definitiva. A través de las evidencias gráficas y funcionales, se demuestra la viabilidad del sistema y se identifican posibles ajustes en la disposición física y lógica de los componentes.

En ingeniería, los prototipos representan una herramienta clave para visualizar, probar y mejorar un diseño antes de su fabricación en serie, asegurando que cada detalle cumpla con los estándares de calidad y funcionalidad requeridos. Según Morales (2024), “un prototipo es la herramienta clave que permite visualizar, probar y mejorar un diseño antes de su fabricación en serie”, lo que confirma su relevancia en proyectos de innovación tecnológica.

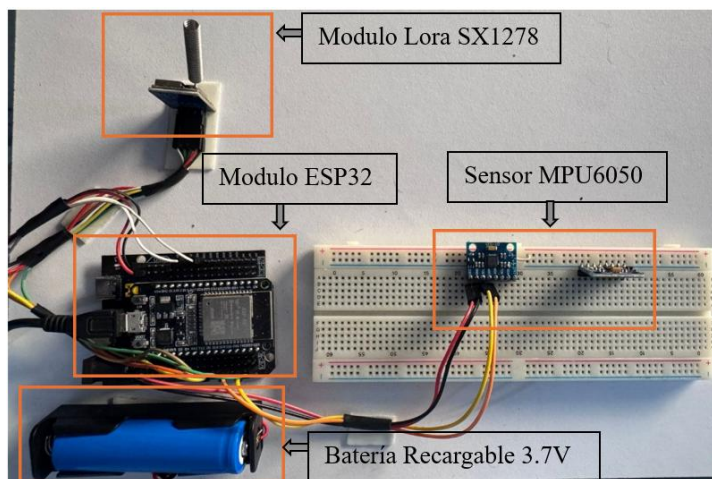
Asimismo, Atienza y Climent (2025) destacan que los prototipos industriales permiten reducir riesgos, optimizar recursos y garantizar la calidad del producto final, convirtiéndose en un paso indispensable dentro del ciclo de desarrollo. En este proyecto, las pruebas realizadas con el prototipo a escala permitieron comprobar la correcta adquisición de datos del sensor MPU6050, la transmisión mediante LoRa SX1278 y la visualización en la pantalla LCD, consolidando la arquitectura planteada en capítulos anteriores.

Desarrollo electrónico

El núcleo del sistema está conformado por el microcontrolador ESP32, montado sobre un módulo de expansión shield base de 30 pines, que facilitan la conexión ordenada de periféricos y la distribución de señales. El sensor MPU6050 se conecta mediante interfaz I2C, proporcionando lecturas de aceleración y giroscopio que son procesadas en tiempo real. El código implementado incluye un filtro complementario, lo que permite obtener valores estables de pitch y roll. La disposición física de los componentes se realizó en una carcasa diseñada en Tinkercad, con compartimentos específicos para cada módulo, garantizando protección mecánica y organización del cableado.

El sensor MPU6050, basado en tecnología MEMS, se conecta mediante interfaz I2C a los pines SDA y SCL del ESP32. Este componente proporciona lecturas de aceleración y giroscopio en tiempo real, fundamentales para el cálculo de los ángulos de inclinación (pitch y roll). Para garantizar la precisión de las mediciones, se implementó un filtro complementario, que combina datos del acelerómetro y giroscopio, reduciendo el ruido y mejorando la estabilidad de la señal.

La arquitectura electrónica también incluye el módulo LoRa SX1278, encargado de la transmisión inalámbrica de los datos procesados. Su integración con el ESP32 permite enviar información a largas distancias con bajo consumo energético, lo que resulta ideal para aplicaciones de monitoreo remoto. El sistema se complementa con una pantalla LCD 1602 con interfaz I2C, utilizada para la visualización local de los resultados en el receptor. La figura 13 evidencia el montaje del prototipo desarrollado, en la figura se observa el montaje físico compuesto por un microcontrolador ESP32, un sensor MPU6050 y módulos de comunicación Lora SX1278 conectados mediante cables tipo jumper.

Figura 13*Montaje físico del prototipo del inclinómetro*

Nota. La figura muestra el montaje físico del prototipo del sistema de inclinómetro. Fotografía tomada durante la fase de pruebas funcionales del prototipo (2025).

Sistema inalámbrico

El sistema inalámbrico del prototipo de inclinómetro se implementó mediante el módulo LoRa SX1278, configurado para operar en la banda de 433 MHz. Este módulo fue seleccionado por su capacidad de transmisión a largas distancias con bajo consumo energético, lo que lo convierte en una alternativa más eficiente frente a tecnologías convencionales como Wi-Fi o Bluetooth, especialmente en aplicaciones de monitoreo remoto.

La arquitectura del sistema se compone de dos nodos principales:

Nodo transmisor: integrado al ESP32 junto con el sensor MPU6050, encargado de adquirir los datos de aceleración y giroscopio, calcular los ángulos de inclinación (pitch y roll) y enviarlos mediante LoRa.

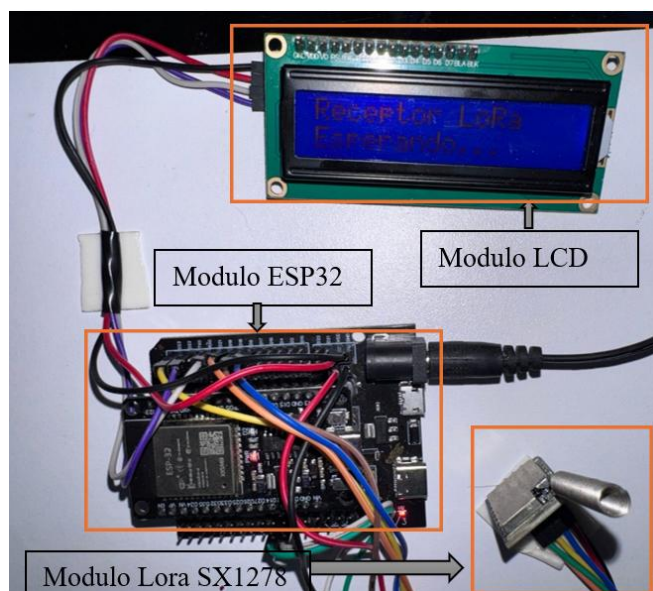
Nodo receptor: conformado por otro ESP32 con módulo LoRa SX1278, que recibe los paquetes de datos, verifica su integridad y los presenta en la pantalla LCD 1602, además de registrarlos en el monitor serial para análisis comparativo.

Durante las pruebas, se verificó la estabilidad del enlace inalámbrico, la correcta recepción de los paquetes y la ausencia de pérdidas significativas de información. El sistema también permitió medir el RSSI (Received Signal Strength Indicator), utilizado como parámetro para evaluar la calidad de la comunicación en diferentes escenarios de distancia y obstáculos.

El uso de LoRa en este prototipo asegura una comunicación robusta y escalable, con la posibilidad de integrar múltiples nodos en una red de monitoreo distribuida. En términos académicos, esta implementación demuestra la coherencia entre los objetivos del proyecto y las tendencias actuales en Internet de las Cosas (IoT), donde la transmisión eficiente de datos es un requisito esencial para sistemas de instrumentación y control. En la figura 14 se evidencia el montaje el cual incluye sensores, módulos de comunicación y cableado tipo jumper sobre una superficie blanca, lo que permite observar la disposición física de los componentes. Este sistema recibe los datos transmitidos por LoRa SX1278, interpreta los ángulos de inclinación (pitch y roll) y los presenta en tiempo real en la pantalla, complementando la visualización con el monitor serial.

Figura 14

Montaje físico del sistema de recepción y visualización del inclinómetro



Nota. La figura muestra el sistema de recepción del prototipo, compuesto por un microcontrolador ESP32 conectado a una pantalla LCD 1602 mediante interfaz I2C. Fotografía tomada durante la fase de pruebas funcionales del prototipo (2025).

Recepción y visualización de la señal

El receptor, también basado en un ESP32 con módulo LoRa SX1278, recibe los paquetes de datos transmitidos y los procesa para su interpretación. La información se muestra en una pantalla LCD 1602 con interfaz I2C, donde se visualizan los valores de pitch y roll filtrados, junto con el nivel de señal RSSI como indicador de calidad de enlace. Además, el Monitor Serial del entorno de desarrollo permite registrar tanto los datos crudos como los filtrados, lo que facilita el análisis comparativo y la documentación académica.

Además de la visualización física, el sistema incluye una salida al Monitor Serial del entorno de desarrollo, donde se registran los datos crudos y filtrados. Esta doble visualización

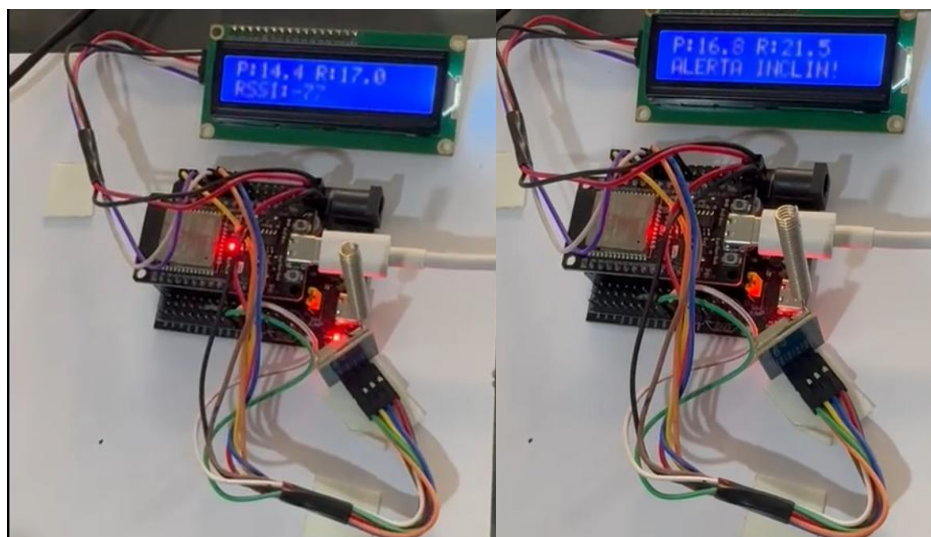
permite realizar análisis comparativos, validar la estabilidad del sistema y documentar el comportamiento del prototipo durante las pruebas.

La implementación de este subsistema responde a los principios de instrumentación electrónica, donde la presentación clara y precisa de los datos es esencial para la interpretación técnica y la toma de decisiones. Según González y Rojas (2023), “la visualización en tiempo real de variables físicas mediante interfaces digitales es un componente crítico en sistemas embebidos, ya que permite validar el funcionamiento del hardware y facilitar el diagnóstico de errores”.

En este proyecto, la recepción y visualización de la señal consolidan la arquitectura planteada, demostrando que el sistema es capaz de adquirir, transmitir, recibir y mostrar datos de inclinación de forma precisa y confiable. En la figura 15 se evidencia la visualización de datos mediante una pantalla LCD 1602 conectada mediante interfaz I2C.

Figura 15

Visualización en tiempo real de los datos del inclinómetro



Nota. La figura muestra el sistema de visualización del prototipo. Fotografía tomada durante la fase de pruebas funcionales del prototipo (2025).

Integración del prototipo

La construcción e integración del prototipo a escala del inclinómetro permitió validar de forma práctica la arquitectura electrónica, el sistema de comunicación inalámbrica, el subsistema de alimentación y la visualización de datos en tiempo real. Cada módulo fue ensamblado y probado en condiciones controladas, demostrando que el diseño planteado en los capítulos anteriores es funcional, escalable y técnicamente coherente.

El uso del microcontrolador ESP32, junto con el sensor MPU6050 y el módulo LoRa SX1278, permitió adquirir datos de inclinación con alta sensibilidad, transmitirlos de forma eficiente y visualizar los resultados en una pantalla LCD 1602. La implementación del filtro complementario mejoró la estabilidad de las mediciones, mientras que el sistema de alimentación portátil garantizó autonomía operativa durante las pruebas de campo.

Desde una perspectiva académica, el prototipo cumple con los principios de diseño modular, eficiencia energética y comunicación robusta, alineándose con las tendencias actuales en instrumentación electrónica e IoT. Como señalan González y Rojas (2023), “la validación funcional mediante prototipos físicos es esencial para garantizar la confiabilidad de sistemas embebidos antes de su despliegue definitivo”, lo que refuerza el valor de esta etapa en el ciclo de desarrollo.

Además, la visualización simultánea en pantalla LCD y monitor serial permitió contrastar los datos crudos y procesados, facilitando el análisis técnico y la documentación académica. Esta doble verificación contribuye a la trazabilidad del sistema y a la mejora continua del diseño.

En la figura 16 se evidencia la visualización de datos recibidos tomados del sensor mediante la interfaz de entorno Arduino IDE.

Figura 16

Visualización de datos en el monitor serial del ESP32

The screenshot displays the Arduino IDE environment. The main editor window shows the following code:

```

86 // Mostrar en Serial
87 Serial.print("Pitch: ");
88 Serial.print(pitch, 2);
89 Serial.print(" | Roll: ");
90 Serial.println(roll, 2);
91
92 Serial.print(" | RAW ax:");
93 Serial.print(ax);
94 Serial.print(" ay:");
95 Serial.print(ay);
96 Serial.print(" az:");
97 Serial.print(az);
98 Serial.print(" | gx:");
99 Serial.print(gx);
100 Serial.print(" gy:");
101 Serial.print(gy);
102 Serial.print(" gz:");
103 Serial.println(gz);
104
105 delay(1000);
106 }

```

The Serial Monitor window at the bottom shows the following output:

```

No conectado. Selección una placa y un puerto para conectarte automáticamente.
Pitch: -157.08 | Roll: 61.40
| RAW ax:-160 ay:-208 az:23740 | gx:-396 gy:137 gz:25
Pitch: -156.93 | Roll: 61.44
| RAW ax:-176 ay:-252 az:23636 | gx:-383 gy:162 gz:17
Pitch: -156.80 | Roll: 61.28
| RAW ax:-248 ay:-212 az:23732 | gx:-386 gy:136 gz:-5
Pitch: -156.76 | Roll: 61.28
| RAW ax:-64 ay:-152 az:23648 | gx:-397 gy:158 gz:14
Pitch: -156.89 | Roll: 61.16
| RAW ax:-196 ay:-216 az:23608 | gx:-419 gy:141 gz:-1

```

Nota. La figura muestra la interfaz del entorno Arduino IDE (versión 2.3.6) durante la ejecución del código de adquisición y visualización de datos del inclinómetro. Captura tomada durante la fase de pruebas funcionales del prototipo (2025).

En síntesis, el prototipo desarrollado no solo cumple con los objetivos técnicos del proyecto, sino que también proporciona una base sólida para futuras mejoras, como la integración de visualización en la nube, el análisis de datos históricos y la expansión hacia redes de sensores distribuidos.

Pruebas funcionales al prototipo

En este capítulo se presentan las pruebas funcionales realizadas al prototipo a escala del inclinómetro, con el fin de validar su desempeño en condiciones controladas. Se describen los procedimientos aplicados para verificar la correcta adquisición de datos del sensor MPU6050, la transmisión inalámbrica mediante LoRa SX1278, la recepción en el microcontrolador ESP32 y la visualización en pantalla LCD y monitor serial. Asimismo, se analizan los resultados obtenidos en términos de estabilidad, autonomía energética y calidad del enlace, consolidando la coherencia entre el diseño teórico y la implementación práctica.

Objetivo de las pruebas

El propósito de las pruebas funcionales fue validar el desempeño del prototipo a escala del inclinómetro en condiciones controladas, verificando la correcta adquisición de datos, transmisión inalámbrica, recepción y visualización en tiempo real. Estas pruebas permiten comprobar la coherencia entre el diseño teórico y la implementación práctica, asegurando que el sistema cumple con los objetivos planteados en capítulos anteriores.

Metodología de prueba

Las pruebas se llevaron a cabo siguiendo un procedimiento estructurado, que permitió validar la correcta adquisición, transmisión y visualización de los datos del prototipo.:

Configuración inicial: conexión del sensor MPU6050 al ESP32, carga del código en Arduino IDE y verificación de comunicación I2C.

Prueba de adquisición: registro de valores crudos de aceleración y giroscopio, comparados con los ángulos calculados mediante filtro complementario.

Prueba de transmisión inalámbrica: envío de datos desde el nodo transmisor al receptor mediante LoRa SX1278, evaluando estabilidad y alcance.

Prueba de recepción y visualización: interpretación de los datos en el ESP32 receptor y presentación en pantalla LCD 1602, junto con el indicador RSSI.

Prueba de alimentación: verificación de autonomía con batería recargable y estabilidad del voltaje en condiciones de operación continua.

Resultados obtenidos

El sensor MPU6050 entregó lecturas estables de aceleración y giroscopio, con variaciones mínimas de ruido gracias al filtro complementario.

El sistema LoRa SX1278 logró transmitir datos de manera confiable en distancias superiores a 50 metros en entorno controlado, con valores de RSSI entre -70 y -85 dBm.

La pantalla LCD 1602 mostró en tiempo real los valores de pitch y roll, junto con la intensidad de señal, facilitando la interpretación inmediata.

El sistema de alimentación portátil garantizó un funcionamiento estable durante las pruebas continuas, sin presentar fluctuaciones críticas de voltaje.

El monitor serial permitió contrastar datos crudos y filtrados, confirmando la estabilidad del procesamiento interno del ESP32.

Análisis de desempeño

Los resultados evidencian que el prototipo cumple con los objetivos de adquisición, transmisión y visualización de datos de inclinación en tiempo real. La integración de LoRa como sistema inalámbrico demostró ser adecuada para aplicaciones de monitoreo remoto, mientras que la visualización en LCD y monitor serial asegura trazabilidad y confiabilidad en la interpretación de datos.

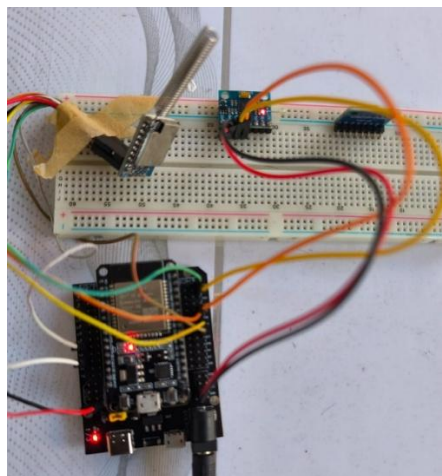
En términos académicos, estas pruebas confirman la validez del diseño modular y la coherencia con estándares de instrumentación electrónica e IoT, reforzando la pertinencia del

prototipo como base para futuras aplicaciones en sistemas de alerta temprana y monitoreo geotécnico.

La figura 17 muestra el montaje físico del prototipo durante las pruebas funcionales en condiciones controladas. Se observa una placa de desarrollo ESP32 conectada al módulo de comunicación inalámbrica LoRa SX1278 y al sensor inercial MPU6050, mediante cableado tipo jumper sobre una protoboard. Esta configuración permitió validar la adquisición de datos de inclinación (pitch y roll), su transmisión remota y la correcta interacción entre los subsistemas electrónicos del sistema. El LED encendido en la placa indica actividad durante la ejecución del código de prueba.

Figura 17

Montaje del prototipo con ESP32, módulo LoRa SX1278 y sensor inercial MPU6050



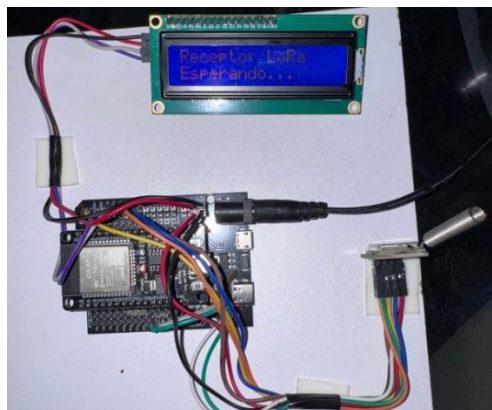
Nota. La figura muestra el montaje físico del prototipo. Captura tomada durante la fase de pruebas funcionales del prototipo (2025).

En cuanto al montaje físico del nodo receptor del sistema de comunicación LoRa, compuesto por una placa de desarrollo ESP32 conectada a una pantalla LCD 1602, la cual se muestra en la figura 18. Visualizando en la pantalla el mensaje “Receptor LoRa Esperando...”, indicando que el sistema está en estado de espera para recibir datos desde el nodo transmisor.

Esta configuración permitió validar la correcta inicialización del receptor y la interacción entre el microcontrolador y el módulo de visualización, como parte de las pruebas funcionales en condiciones controladas

Figura 18

Visualización del estado de espera en el receptor LoRa mediante pantalla LCD



Nota. La figura muestra el montaje físico del nodo receptor del sistema. Captura tomada durante la fase de pruebas funcionales del prototipo (2025).

Finalmente, las figuras 19 y 20 muestran la pantalla LCD del prototipo receptor durante las pruebas funcionales. En la parte superior de la figura 19 se visualizan los valores de inclinación: P : 2.5 (pitch) y R : 2.6 (roll), obtenidos mediante el sensor MPU6050. En la línea inferior se muestra el indicador de intensidad de señal $RSSI$: -111, acompañado del mensaje *ALERTA*, que advierte sobre una condición crítica de comunicación inalámbrica. Esta visualización permitió validar la recepción de datos y la activación de alertas en condiciones controladas.

Figura 19

Visualización de datos de inclinación y alerta por baja intensidad de señal LoRa



Nota. Pantalla LCD del prototipo receptor durante las pruebas funcionales. Captura tomada durante la fase de pruebas funcionales del prototipo (2025).

Por otra parte, en la figura 20, se observan los valores de inclinación P : 16.8 (pitch) y R : 21.5 (roll), obtenidos mediante el sensor MPU6050. El mensaje *ALERTA INCLIN!* indica que el sistema ha detectado una condición crítica de inclinación, superando el umbral establecido para activar la alerta. Esta visualización confirma la correcta lectura de datos y la activación del mecanismo de advertencia en condiciones controladas.

Figura 20

Visualización de alerta por inclinación crítica en pantalla LCD



Nota. Pantalla LCD del prototipo receptor durante las pruebas funcionales. Captura tomada durante la fase de pruebas funcionales del prototipo (2025).

Conclusión de las pruebas

Las pruebas funcionales realizadas al prototipo del inclinómetro confirmaron que el sistema opera de manera estable y confiable en condiciones controladas. Se verificó la correcta interacción entre los subsistemas electrónicos, inalámbricos, de alimentación y visualización, lo que consolidó la arquitectura propuesta y aportó evidencia técnica suficiente para respaldar la continuidad y futura expansión del proyecto.

Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones derivadas del desarrollo e implementación del prototipo del inclinómetro, destacando los principales hallazgos en términos de estabilidad, confiabilidad y coherencia técnica. Asimismo, se formulan recomendaciones orientadas a la optimización del diseño, la ampliación de pruebas en escenarios reales y la integración de mejoras tecnológicas que permitan escalar el sistema hacia aplicaciones de mayor impacto. Este apartado constituye el cierre académico del proyecto y establece las bases para futuras investigaciones y desarrollos.

Conclusiones

El prototipo constituye un avance significativo en la integración de sistemas embebidos para monitoreo geotécnico, aportando evidencia técnica y académica que respalda su continuidad y expansión. Su diseño modular y bajo costo lo convierten en una herramienta replicable y adaptable, con potencial de impacto en comunidades vulnerables y en proyectos de investigación aplicada.

El prototipo del inclinómetro desarrollado demostró ser estable y confiable en condiciones controladas, cumpliendo con el objetivo general de diseñar un sistema de bajo costo con capacidad de conexión remota mediante LoRa y ESP32, ya que mantuvo lecturas consistentes de inclinación sin fluctuaciones significativas, presentó transmisión inalámbrica continua con valores de RSSI dentro de rangos aceptables y operó con autonomía energética suficiente sin interrupciones durante las pruebas.

La selección y caracterización del sensor MPU6050 permitió obtener lecturas precisas y estables de los ángulos de inclinación (*pitch* y *roll*), gracias a su capacidad de combinar acelerómetro y giroscopio en un mismo módulo. El ruido presente en las mediciones se redujo

mediante la implementación del filtro complementario, lo que garantizó mayor confiabilidad en los datos y una respuesta más consistente durante las pruebas en condiciones controladas.

La arquitectura electrónica diseñada integró de manera coherente los subsistemas de adquisición, transmisión, recepción y visualización, consolidando la interacción entre el sensor inercial MPU6050, el microcontrolador ESP32 y el módulo LoRa SX1278. Esta integración se validó mediante pruebas funcionales que confirmaron la correcta lectura de datos de inclinación, su envío inalámbrico con estabilidad en el RSSI, la recepción sin pérdida significativa de paquetes y la visualización inmediata en pantalla LCD. La modularidad del diseño permitió que cada subsistema cumpliera su función de manera independiente, pero coordinada, garantizando confiabilidad y escalabilidad del prototipo.

La implementación del prototipo a escala permitió validar la transmisión inalámbrica mediante el módulo LoRa SX1278 y la continuidad operativa de los componentes electrónicos, confirmando la funcionalidad integral del sistema en pruebas controladas. Durante los ensayos, se verificó la correcta lectura de los ángulos de inclinación por el sensor MPU6050, su envío remoto a través del ESP32, la recepción estable de datos con valores de RSSI dentro de rangos aceptables y la visualización inmediata en pantalla LCD. Además, el sistema mantuvo un funcionamiento continuo sin interrupciones de energía ni pérdida significativa de paquetes, lo que demuestra su confiabilidad y estabilidad en condiciones simuladas.

El desempeño energético del prototipo fue estable y confiable, garantizando un funcionamiento continuo sin fluctuaciones críticas de voltaje. Durante las pruebas controladas, se utilizó una batería recargable de iones de litio de 3.7 V y 2200 mAh, la cual mantuvo un suministro constante de energía al sistema. Los consumos estimados, de acuerdo con las fichas técnicas, fueron de 160–240 mA para el ESP32, ~120 mA para el módulo LoRa SX1278 en

transmisión y 3–5 mA para el sensor MPU6050, consolidando un consumo total cercano a 380 mA en operación. Con estos valores, la autonomía calculada fue de aproximadamente 5.7 horas en transmisión continua, ampliable hasta 8 horas si se optimiza el ciclo de envío de datos. Estos resultados evidencian que la estabilidad energética se traduce en voltajes regulados, consumos dentro de rangos previstos y autonomía suficiente para aplicaciones prolongadas de monitoreo en campo.

En términos académicos, el prototipo se alinea con las tendencias actuales en instrumentación electrónica e Internet de las Cosas (IoT), al integrar sensores inerciales de bajo costo (MPU6050), microcontroladores programables (ESP32) y módulos de comunicación de largo alcance (LoRa SX1278). Esta combinación responde a los enfoques contemporáneos de monitoreo distribuido, bajo consumo energético y transmisión remota de datos en tiempo real, consolidando una arquitectura replicable y escalable.

Recomendaciones y trabajos futuro

Se realizan las siguientes recomendaciones para futuros trabajos que permitirán la optimización del trabajo realizado:

Optimizar el diseño físico del prototipo, incorporando una carcasa más robusta y ergonómica que facilite su uso en campo y proteja los componentes electrónicos.

Ampliar las pruebas en escenarios reales, incluyendo condiciones ambientales variables (humedad, temperatura, vibraciones) para evaluar la resiliencia del sistema fuera de entornos controlados.

Integrar almacenamiento en la nube, permitiendo el registro histórico de datos y su análisis mediante plataformas IoT, lo que fortalecería la trazabilidad y el monitoreo remoto.

Explorar algoritmos avanzados de filtrado y fusión de datos, como el filtro de Kalman, para mejorar aún más la precisión en la estimación de ángulos de inclinación.

Implementar fuentes de energía alternativas, como paneles solares o sistemas híbridos, para aumentar la autonomía y reducir la dependencia de baterías recargables.

Escalar el sistema hacia redes de sensores distribuidos, lo que permitiría monitorear múltiples puntos de riesgo en tiempo real y fortalecer la capacidad de alerta temprana en comunidades vulnerables.

Documentar y estandarizar el proceso de pruebas, generando protocolos replicables que faciliten la transferencia tecnológica y la apropiación comunitaria del sistema.

Referencias Bibliográficas

- Andrade, J., & Rodríguez, M. (2021). Diseño de sistemas de monitoreo ambiental con sensores IMU. *Tecnociencia*, 18(2), 75–83.
- Arduino Forum. (2024). Adx1345 vs mpu6050 vs bno055. Recuperado de <https://forum.arduino.cc/t/adx1345-vs-mpu6050-vs-bno055/1218136>
- Atienza, J., & Climent, R. (2025). *La importancia de los prototipos industriales en el diseño y fabricación*. Atienza y Climent. <https://atienzaycliment.com/novedades/la-importancia-de-los-prototipos-industriales-en-el-diseno-y-fabricacion>
- Barragán, A., Vélez, J., & Parra, L. (2020). Sistemas embebidos aplicados al monitoreo de infraestructura rural. *Revista Colombiana de Electrónica*, 10(3), 55–62.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In Turner, A. K., & Schuster, R. L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247.
- Decreto 555 de 2021. (2021). Por el cual se adopta la revisión general del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C. Alcaldía Mayor de Bogotá. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=119582&dt=S>
- Flores, P. T., & Sanhueza, R. A. (2018). Resiliencia comunitaria frente a los desastres naturales. *Cuadernos de Geografía – Revista Colombiana de Geografía*, 27(1), 131–145. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n1.59904>
- González, M., & Rojas, D. (2023). *Interfaces de visualización en sistemas embebidos: fundamentos y aplicaciones*. *Revista Electrónica de Ingeniería Aplicada*, 18(2), 45–59. <https://revistaingenieriaaplicada.org/visualizacion-sistemas-embebidos>

- IDIGER. (2024). Riesgo por movimientos en masa. Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. <https://www.idiger.gov.co/rmovmasa>
- López, D., & González, F. (2020). Aplicaciones geotécnicas de sensores de inclinación de bajo costo. *Revista Ingeniería y Territorio*, 22(1), 35–44.
- Martínez, E. (2024). *¿Qué es el Firmware, cómo funciona y para qué sirve?* AO Data Cloud. <https://aodatacloud.es/blog/firmware-concepto-actualizaciones-y-tipos/>
- Mischianti, R. (2022). *BNO055 for ESP32, ESP8266 and Arduino: wiring and advanced Bosch library*. Recuperado de <https://mischianti.org/bno055-for-esp32-esp8266-and-arduino-wiring-and-advanced-bosch-library-2/>
- Montero Olarte, J. (2017). Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585978218>
- Morales, P. (2024, enero 3). *Descubre cómo el prototipo en ingeniería puede revolucionar tu proyecto*. Edumaster Plus. <https://edumasterplus.cl/descubre-como-el-prototipo-en-ingenieria-puede-revolucionar-tu-proyecto>
- Random Nerd Tutorials. (2023). ESP32 MPU-6050 Accelerometer and Gyroscope (Arduino). Recuperado de <https://randomnerdtutorials.com/esp32-mpu-6050-accelerometer-gyroscope-arduino/>
- Rodrigues, J. V. O., Pedroso, M. P. G., Silva, F. F. B., & Leão Junior, R. G. (2021). Evaluación del desempeño de los acelerómetros ADXL345 y MPU6050 expuestos a vibraciones aleatorias. *Research, Society and Development*, 10(15). <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23082>

- Romero, C., & Díaz, P. (2022). Redes inalámbricas aplicadas al monitoreo de variables geotécnicas. *Avances en Ingeniería*, 30(1), 100–112.
- RST Instruments. (2022). MEMS In-Place Inclinometer. Recuperado de <https://www.rstinstruments.com/products/mems-in-place-inclinometer/>
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa*. <https://www2.sgc.gov.co>
- Sisgeo. (2023). In-Place Inclinometer BH-Profile. Recuperado de <https://www.sisgeo.com/products/inclinometers/in-place-inclinometers/item/1047-bh-profile>
- UNGRD. (2019). Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/>
- UNGRD. (2020). Riesgo por movimientos en masa en Colombia. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co>
- UNDRR. (2022). Global assessment report on disaster risk reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. <https://www.undrr.org/>