UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"SISTEMA IoT PARA EL MONITOREO Y ALERTA DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA EN EL SECTOR EL GUADUAL EN LA VÍA IBARRA - SAN LORENZO UTILIZANDO UNA RED DE SENSORES (WSN) CON TECNOLOGÍA ZIGBEE"

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

Línea de investigación: Innovación Tecnológica y de productos

AUTOR:

Bryan Orlando Narváez Tapie

DIRECTOR:

MSc. Jaime Roberto Michilena Calderón

Ibarra – Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Narváez Tapie Bryan Orlando

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	SISTEMA IoT PARA EL MONITOREO Y ALERTA DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA EN EL SECTOR EL GUADUAL EN LA VÍA IBARRA – SAN LORENZO UTILIZANDO UNA RED DE SENSORES (WSN) CON TECNOLOGÍA ZIGBEE
AUTOR (ES):	NARVÁEZ TAPIE BRYAN ORLANDO
FECHA: DD/MM/AAAA	27/07/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** □ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
DIRECTOR /ASESOR:	MSC. JAIME ROBERTO MICHILENA CALDERÓN MSC. JORGE RICARDO BENALCÁZAR GÓMEZ

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 27 días del mes de julio de 2026

EL AUTOR:



Narváez Tapie Bryan Orlando

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 27 de julio de 2026.

MSc. Jaime Roberto Michilena Calderón
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:
Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JAIME ROBERTO MICHILENA CALDERON

MSc. Jaime Roberto Michilena Calderón

C.C: 1002198438

DEDICATORIA

A mi madre, por ser mi mayor inspiración, mi refugio inagotable y mi guía constante. Por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba, y por haberme enseñado con su ejemplo el verdadero significado de la perseverancia y el amor incondicional.

A mi padre, por ser el pilar fundamental de mi vida, por brindarme siempre su apoyo, sus sabios consejos y por forjar en mí el carácter necesario para no rendirme ante ninguna adversidad.

A mis hermanos, mis primeros compañeros de vida y mis confidentes más sinceros. Gracias por cada sonrisa, por su aliento en los momentos difíciles y por compartir conmigo este largo y hermoso camino.

A mis amigos, aquellos que la vida me regaló como hermanos de otra sangre. Por comprender mis ausencias, por sus palabras de ánimo y por regalarme incontables momentos de alegría que aligeraron la carga durante todos estos años de estudio.

Bryan Orlando Narváez Tapie

AGRADECIMIENTO

A mi familia, por ser el cimiento sobre el cual he construido todos mis sueños. Gracias por su inmenso amor, por su paciencia y por acompañarme incondicionalmente en cada paso de este proyecto de vida. Su apoyo ha sido la fuerza detrás de este logro.

A mis amigos, por estar siempre presentes. Por cada noche de desvelo compartida, por los ánimos en los momentos de cansancio y por celebrar cada pequeño avance como si fuera suyo. Su compañía hizo que este trayecto fuera mucho más llevadero y feliz.

A mi director Msc Jaime Michilena, por su invaluable guía, su tiempo y su sabiduría. Gracias por aclarar mis ideas, por exigirme siempre dar lo mejor de mí y por haberme acompañado con tanta dedicación y profesionalismo en la culminación de esta investigación. Su paciencia y conocimientos fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

Bryan Orlando Narváez Tapie

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA 5
AGRADECIMIENTO 6
ÍNDICE DE FIGURAS 15
ÍNDICE DE TABLAS 17
RESUMEN 20
ABSTRACT 21
CAPÍTULO I
1.1 Problema 22
1.2 Objetivos 24
1.2.1 Objetivo General 24
1.2.2 Objetivos Específicos 24
1.3 Alcance 25
1.4 Justificación 28

CAPÍTULO II

2.1 Movimientos en masa 30
2.1.1 Tipos de movimientos en masa 31
2.1.1.1 Caído 31
2.1.1.2 Inclinación o Volteo 32
2.1.1.3 Reptación 32
2.1.1.4 Deslizamiento 33
2.1.1.5 Esparcimiento Lateral 35
2.1.1.6 Flujo 35
2.1.1.7 Avalanchas 36
2.1.1.8 Movimientos Complejos 37
2.1.2 Causas de los deslizamientos de tierra 38
2.1.2.1 Parámetros Geométricos 39
2.1.2.2 Parámetros Geológicos 39
2.1.2.3 Parámetros Hidrológicos e Hidrogeológicos 39
2.1.2.4 Parámetros Geotécnicos 40
2.1.2.5 Parámetros Ambientales y Antrópicos 40
2.1.3 Efectos de los deslizamientos de tierra 40
2.1.3.1 Efectos en el Medio Ambiente Construido 41
2.1.3.2 Efectos en el Medio Ambiente Natural 42
2.2 Métodos de Monitoreo de Deslizamientos de Tierra 42

2.2.1 Métodos visuales y geotécnicos 43
2.2.1.1 Inclinómetros 43
2.2.1.2 Extensómetros 43
2.2.1.3 Geófonos 44
2.2.1.4 Limitaciones de los métodos geotécnicos tradicionales. 44
2.2.2 Teledetección. 44
2.2.2.1 Sensores Pasivos 45
2.2.2.2 Sensores Activos (SAR e InSAR) 45
2.2.2.3 LiDAR 45
2.2.2.4 Radar terrestre 46
2.2.2.5 Limitaciones de la teledetección para alertas tempranas 46
2.2.3 Sensores y tecnologías emergentes en el monitoreo de deslizamientos 46
2.2.3.1 Limitaciones de las tecnologías IoT y WSN en entornos rurales 48
2.2.4 Parámetros Críticos para el monitoreo de Deslizamientos 48
2.2.4.1 Precipitación. 48
2.2.4.2 Análisis de Vibraciones del Suelo 49
2.2.4.3 Humedad del Suelo 50
2.2.4.4 Inclinación del Terreno. 50
2.3 Tecnología propuesta para el monitoreo de deslizamientos de tierra 50

2.3.1 Internet de las cosas. 51

2.3.2 Redes WSN 53

2.3.2.1 Arquitectura de una Red WSN. 53

2.3.2.2 Características Comunes de las WSN 55

2.3.3 Protocolo de transmisión de datos ZigBee 56

2.3.3.1 Arquitectura ZigBee. 57

2.3.3.2 Tipos de Nodos y Topologías de Red. 59

2.3.3.3 Características Principales 61

CAPÍTULO III

3.1 Metodología 63

3.1.1 Tipo de Investigación 63

3.1.2 Metodología de trabajo 64

3.2 Situación actual 65

3.2.1 Ubicación geográfica y características del terreno 66
3.2.1.1 Actividad sísmica y riesgos endógenos 67
3.2.1.2 Ubicación de referencia y coordenadas 67
3.2.1.3 Contexto poblacional y potencial turístico. 67
3.2.2 Condiciones climáticas y ambientales. 68
3.2.2.1 Pluviosidad y humedad 68
3.2.2.2 Temperatura y condiciones operativas 69
3.2.3 Estado actual del monitoreo o vigilancia 69
3.2.3.1 Monitoreo institucional y técnico. 70
3.2.3.2 Instituciones de primera respuesta y logística de emergencia 70
3.2.4 Condiciones técnicas para la implementación 71
3.2.4.1 Arquitectura de red y conectividad híbrida 71
3.2.4.2 Análisis de propagación y modelo de pérdidas 71
3.2.4.3 Procesamiento de alertas y respuesta 72
3.2.5 Análisis de campo 72
3.2.5.1 Inspección visual del terreno y ubicación de sensores. 73
3.2.5.2 Evaluación de cobertura de red celular 74
3.3 Requerimientos 76

3.3.1 Nomenclatura de requerimientos 76
3.3.2 Requerimientos de Stakeholders (RS). 76
3.3.3 Requerimientos del Sistema (RSIS) 79
3.3.4 Requerimientos de Hardware (RHW). 81
3.3.5 Requerimientos de Software (RSW). 86
3.4 Selección de Hardware y Software 90
3.4.1 Selección de Hardware 91
3.4.1.1 Selección de la unidad de procesamiento central (Gateway). 91
3.4.1.2 Selección de la unidad de control para los nodos sensores 94
3.4.1.3 Selección del módulo de comunicación inalámbrica Zigbee. 96
3.4.1.4 Selección del sensor de inclinación y vibración. 98
3.4.1.5 Selección del sensor de precipitación. 100
3.4.1.6 Selección del sistema de alarma sonora local 103
3.4.1.7 Selección del sistema de alarma luminosa local 105
3.4.1.8 Selección del módulo de conectividad celular. 107
3.4.1.9 Selección del sistema de alimentación energética 109
3.4.2 Selección de Software. 112
3.4.2.1 Selección de la plataforma de base de datos y hosting para el Dashboard . . . 112
3.4.2.2 Selección del lenguaje de programación para el Gateway. 117
3.4.2.3 Selección del entorno de programación para los nodos sensores. 119
3.4.2.4 Selección del servicio de mensajería de alertas 121
3.5 Diseño del sistema 123

3.5.1 Arquitectura general del sistema 123
3.5.2 Capa de Dispositivos y Gateways 125
3.5.2.1 Nodo sensor 126
3.5.2.2 Nodo coordinador 133
3.5.2.3 Mantenimiento periódico de la alimentación 141
3.5.3 Capa de Red 141
3.5.3.1 Red inalámbrica de sensores (ZigBee) 143
3.5.3.2 Red de acceso a Internet (LTE) 143
3.5.4 Capa de Centro de Datos 145
3.5.4.1 Estructura de datos en Firebase 145
3.5.5 Capa de Servicio de Aplicación 149
3.5.5.1 Panel de control web 149
3.5.5.2 Sistema de notificaciones por Telegram 151
CAPÍTULO IV
4.1 Metodología de pruebas 153
4.2 Ensamblaje de los nodos de la red Zigbee 155
4.3 Pruebas por emulación 158
4.3.1 Escenario 1 — Lluvia intensa 159
4.3.2 Escenario 2 — Alto nivel de humedad del suelo 164
4.3.3 Escenario 3 — Vibración del suelo 169
4.3.4 Escenario 4 — Inclinación del terreno 173
4.4 Pruebas en campo 178

4.4.1 Instalación 178
4.4.2 Prueba de comunicación ZigBee y 4G LTE 181
4.4.3 Comportamiento del sistema ante condiciones reales. 185
4.5 Análisis de resultados 193
CONCLUSIONES 198
RECOMENDACIONES 200
BIBLIOGRAFÍA 202
ANEXOS 214
Anexo A. Datasheet de la Raspberry Pi 4 214
Anexo B. Datasheet del Arduino Nano 217
Anexo C. Datasheet del Sensor de Humedad Capacitivo 219
Anexo D. Datasheet del Sensor MPU-6050 222
Anexo E. Datasheet del Sensor Ultrasónico HC-SR04. 223
Anexo F. Asignación de roles en la red ZigBee 225
Anexo G. Ensamblaje y calibración de sensores. 225
Anexo H. Comunicación de la red ZigBee 226
Anexo I. Nodo sensor versión final. 226
Anexo J. Nodo coordinador versión final 227

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Árbol de problemas* 23
Figura 2 *Arquitectura de red WSN con tecnología Zigbee* 27

Figura 3 *Esquema de caída de rocas* 31
Figura 4 *Esquema de caídos de roca y residuos* 32
Figura 5 *Esquema de un proceso de reptación* 33
Figura 6 *Deslizamiento rotacional* 34
Figura 7 *Deslizamiento de traslación* 34
Figura 8 *Esquema de un esparcimiento lateral* 35
Figura 9 *Flujo de lodo* 36
Figura 10 *Ejemplo de una avalancha* 36
Figura 11 *Arquitectura IoT de 4 capas* 52
Figura 12 *Arquitectura general de una WSN para IoT* 54
Figura 13 *Arquitectura de un nodo sensor* 54
Figura 14 *Protocolo IEEE 802.15.4 y ZigBee* 57
Figura 15 *Topologías de una red ZigBee* 60

Figura 16 *Modelo en V* 65
Figura 17 *Condiciones topográficas generales del talud en el sector El Guadual* . 73
Figura 18 *Zona del talud propensa a deslizamientos* 74
Figura 19 *Mapa de cobertura celular en la zona de El Guadual* 75
Figura 20 *Arquitectura del sistema de monitoreo IoT* 124
Figura 21 *Esquema de conexión del Shield XBee al Arduino Uno* 126
Figura 22 *Configuración de parámetros del módulo XBee S2* 127
Figura 23 *Esquema de conexión del sensor ultrasónico HC-SR04 al Arduino Uno* . 128
Figura 24 *Esquema de conexión del sensor capacitivo de humedad del suelo al Arduino Uno* 130
Figura 25 *Conexiones del sensor MPU-6050 (GY-521) al Arduino Uno* 131
Figura 26 *Conexión del adaptador USB-XBee a la Raspberry Pi 4 Model B* 135
Figura 27 *Configuración del módulo XBee S2 en modo coordinador* 136
Figura 28 *Conexión de la alarma sonora a la Raspberry Pi 4* 137
Figura 29 *Conexión de la alarma visual a la Raspberry Pi 4* 138
Figura 30 *Conexión del módem USB a la Raspberry Pi 4* 139
Figura 31 *Arquitectura de red del sistema: enlace ZigBee IEEE 802.15.4 entre nodos sensores y coordinador, y enlace 4G LTE* 142
Figura 32 *Configuración del modem USB 4G* 144
Figura 33 *Cobertura 4G LTE en la zona de implementación* 145
Figura 34 *Estructura general de la base de datos en Firebase* 146
Figura 35 *Rama de historial de lecturas en Firebase* 146
Figura 36 *Rama de estado actual por nodo en Firebase* 147
Figura 37 *Rama de control de alarma sonora en Firebase* 147
Figura 38 *Rama de control del semáforo visual en Firebase* 148
Figura 39 *Rama de registro de auditoría en Firebase* 148
Figura 40 *Vista principal de monitoreo en el panel de control web* 150
Figura 41 *Autenticación de usuario para gestión de alertas* 150

Figura 42 *Interfaz de gestión manual de alarmas sonora y visual* 151
Figura 43 *Mensaje automático de alerta enviado a Telegram* 152

Figura 44 *Nodo 1 ensamblado* 157
Figura 45 *Nodo 2 ensamblado* 157
Figura 46 *Nodo coordinador ensamblado* 158
Figura 47 *Bloque de datos recibido por el coordinador* 159
Figura 48 *Registro en la base de datos de Firebase* 160
Figura 49 *Estado de alerta amarilla en el dashboard* 160
Figura 50 *Activación de alarma visual en estado de alerta amarilla* 161
Figura 51 *Estado de alerta roja en el dashboard* 161
Figura 52 *Activación de alarma visual en estado de alerta roja* 162
Figura 53 *Alarma visual activada* 162
Figura 54 *Mensaje automático de alerta enviado a Telegram* 163
Figura 55 *Retorno al estado normal en el dashboard tras el escenario de lluvia* . . 164
Figura 56 *Bloque de datos recibido por el coordinador* 165
Figura 57 *Registro en la base de datos de Firebase* 165
Figura 58 *Estado de alerta amarilla en el dashboard* 166
Figura 59 *Estado de alerta roja en el dashboard* 167
Figura 60 *Activación de alarma visual en estado de alerta roja* 167
Figura 61 *Mensaje automático de alerta enviado a Telegram* 168
Figura 62 *Retorno al estado normal en el dashboard tras el escenario de humedad* 168
Figura 63 *Bloque de datos recibido por el coordinador* 169
Figura 64 *Registro en la base de datos de Firebase* 170
Figura 65 *Estado de alerta amarilla en el dashboard — vibración del nodo 1* . . . 171
Figura 66 *Estado de alerta roja en el dashboard — vibración del nodo 2* 171
Figura 67 *Activación de alarma visual en estado de alerta roja* 172
Figura 68 *Mensaje automático de alerta enviado a Telegram* 172
Figura 69 *Retorno al estado normal en el dashboard tras el escenario de vibración* 173
Figura 70 *Bloque de datos recibido por el coordinador* 174
Figura 71 *Registro en la base de datos de Firebase* 174
Figura 72 *Estado de alerta amarilla en el dashboard* 175
Figura 73 *Estado de alerta roja en el dashboard* 176
Figura 74 *Activación de alarma visual en estado de alerta roja* 176
Figura 75 *Mensaje automático de alerta enviado a Telegram* 177
Figura 76 *Retorno al estado normal en el dashboard tras el escenario de inclinación* 177
Figura 77 *Ubicación de los nodos finales en el zona propensa a deslaves* 179
Figura 78 *Instalación del nodo sensor 1 en la ladera* 179
Figura 79 *Instalación del nodo sensor 2 en la ladera* 180
Figura 80 *Ubicación del nodo coordinador en la zona segura* 180
Figura 81 *Nodo coordinador instalado y en operación* 181
Figura 82 *Direccion IP que le asigna el modem USB al nodo coordinador* 182
Figura 83 *Nivel de cobertura de Claro en el sector el Guadual y dispositivos conectados a la red Wi-Fi del módem USB* 183
Figura 84 *Bloque de datos recibidos por el nodo coordinador desde los nodos sensores* 184
Figura 85 *Registros actualizados en la base de datos de Firebase durante las pruebas en campo* 184
Figura 86 *Comportamiento de la precipitación medida por el nodo 1 en campo* . . 186
Figura 87 *Niveles de humedad del suelo registrados por los nodos en campo* . . . 186
Figura 88 *Fluctuaciones del ángulo de inclinación del terreno medidas en campo* . 187

Figura 89 *Registros de vibración sísmica en campo con superaciones del umbral inicial* 188
Figura 90 *Estado de alerta roja del nodo 1 en el panel de control web* 188
Figura 91 *Estado de alerta roja del nodo 2 en el panel de control web* 189
Figura 92 *Activación de la alarma visual física en estado de alerta roja* 189
Figura 93 *Alerta de vibración enviada al bot de Telegram — Nodo 1* 190
Figura 94 *Alerta de vibración enviada al bot de Telegram — Nodo 2* 191
Figura 95 *Gestión manual de alarmas desde el panel de control web* 191
Figura 96 *Registro en el nodo coordinador del usuario que activó la alarma* 192
Figura 97 *Registro de actividad del usuario en Firebase durante la gestión de alarmas* 193

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Tipos de movimientos en masa* 37
Tabla 2 *Bandas de frecuencia usadas por el protocolo IEEE 802.15.4* 58

Tabla 3 *Nomenclatura para la clasificación de requerimientos* 76
Tabla 4 *Identificación de Stakeholders del proyecto* 77
Tabla 5 *Matriz de Requerimientos de Stakeholders (RS)* 78
Tabla 6 *Matriz de Requerimientos del Sistema (RSIS)* 79
Tabla 7 *Matriz de Requerimientos de Hardware (RHW)* 82
Tabla 8 *Matriz de Requerimientos de Software (RSW)* 87
Tabla 9 *Matriz de Valoración — Unidad de Procesamiento Central (Gateway)* . . 92
Tabla 10 *Comparación de Características — Unidad de Procesamiento Central (Gateway)* 92
Tabla 11 *Matriz de Valoración — Unidad de Control de Nodos Sensores* 94
Tabla 12 *Comparación de Características — Unidad de Control de Nodos Sensores* 95
Tabla 13 *Matriz de Valoración — Módulo de Comunicación Zigbee* 96
Tabla 14 *Comparación de Características — Módulo de Comunicación Zigbee* . . 97
Tabla 15 *Matriz de Valoración — Sensor de Inclinación y Vibración* 99
Tabla 16 *Comparación de Características — Sensor de Inclinación y Vibración* . . 99
Tabla 17 *Matriz de Valoración — Sensor de Precipitación* 101
Tabla 18 *Comparación de Características — Sensor de Precipitación* 101
Tabla 19 *Matriz de Valoración — Sistema de Alarma Sonora Local* 103
Tabla 20 *Comparación de Características — Sistema de Alarma Sonora Local* . . 104
Tabla 21 *Matriz de Valoración — Sistema de Alarma Luminosa Local* 105
Tabla 22 *Comparación de Características — Sistema de Alarma Luminosa Local* . 106
Tabla 23 *Matriz de Valoración — Módulo de Conectividad Celular* 107
Tabla 24 *Comparación de Características — Módulo de Conectividad Celular* . . 108
Tabla 25 *Matriz de Valoración — Sistema de Alimentación Energética* 110
Tabla 26 *Comparación de Características — Sistema de Alimentación Energética* . 110
Tabla 27 *Matriz de Valoración — Plataforma de Base de Datos en la Nube* 113
Tabla 28 *Comparación de Características — Plataforma de Base de Datos en la Nube* 114
Tabla 29 *Matriz de Valoración — Tecnología del Panel de Control Web* 115
Tabla 30 *Comparación de Características — Tecnología del Panel de Control Web* 115
Tabla 31 *Matriz de Valoración — Lenguaje de Programación para el Gateway* . . 117
Tabla 32 *Comparación de Características — Lenguaje de Programación para el Gateway* 118
Tabla 33 *Matriz de Valoración — Entorno de Programación para Nodos Sensores* 119
Tabla 34 *Comparación de Características — Entorno de Programación para Nodos Sensores* 120
Tabla 35 *Matriz de Valoración — Servicio de Mensajería de Alertas* 121
Tabla 36 *Comparación de Características — Servicio de Mensajería de Alertas* . . 122
Tabla 37 *Consumo estimado de corriente — Nodo Sensor* 132
Tabla 38 *Consumo estimado de corriente — Raspberry Pi y periféricos* 140
Tabla 39 *Consumo estimado de corriente — Sistema de alarmas* 140

Tabla 40 *Resumen de la metodología de pruebas* 154
Tabla 41 *Presupuesto estimado de componentes de hardware* 155
Tabla 42 *Revisión y ajuste de umbrales de alerta* 195

RESUMEN

Esta investigación desarrolla un sistema de monitoreo y alerta para la prevención del riesgo por deslizamientos de tierra, enfocado en el sector el Guadual, una zona altamente vulnerable debido a su topografía irregular y a las intensas precipitaciones durante las temporadas de lluvia. El objetivo principal fue implementar una solución tecnológica que permita supervisar continuamente el entorno mediante el uso de redes de sensores inalámbricos (WSN) y el Internet de las Cosas (IoT), mejorando la capacidad de respuesta frente a eventos adversos y salvaguardando las vidas de las personas que transitan por la vía. El sistema incluye una serie de sensores ambientales e inerciales calibrados para monitorear variables críticas que anteceden a los movimientos de masa, tales como la humedad del suelo, la acumulación pluviométrica, la vibración y la inclinación del terreno.

Se diseñaron nodos de monitoreo distribuidos estratégicamente, junto con un nodo central de procesamiento que recolecta, gestiona y sincroniza la información hacia una plataforma en la nube, permitiendo su visualización a través de un panel de control web. Como mecanismo de respuesta ante el cruce de umbrales críticos, el sistema integra una doble capa de seguridad: alertas digitales instantáneas enviadas a los dispositivos móviles de los usuarios, y un circuito de alarmas físicas locales compuesto por señales visuales y sonoras. El sistema fue validado mediante la emulación de condiciones ambientales extremas, evidenciando una alta robustez en la comunicación inalámbrica basada en tecnología ZigBee, así como tiempos de latencia mínimos en el despliegue de las alertas. Se demostró que el monitoreo de estas variables conjuntas permite advertir con alta fiabilidad los escenarios de riesgo geológico.

Los resultados indican que la propuesta tecnológica es una alternativa viable, escalable y replicable para el monitoreo de áreas vulnerables a deslaves, proporcionando una herramienta que fomenta la gestión de riesgos de manera más segura, precisa y automatizada, apoyándose en el uso de tecnologías emergentes.

Palabras clave: Internet de las Cosas, IoT, Redes Inalámbricas de Sensores, WSN, ZigBee, Alerta, Deslizamientos de Tierra, Firebase

ABSTRACT

This research develops a monitoring and early warning system for landslide risk prevention, focused on the El Guadual sector, a highly vulnerable area due to its irregular topography and intense rainfall during the rainy seasons. The main objective was to implement a technological solution that allows continuous environmental monitoring through the use of Wireless Sensor Networks (WSN) and the Internet of Things (IoT), improving the response capacity to adverse events and safeguarding the lives of people traveling on the road. The system includes a series of calibrated environmental and inertial sensors to monitor critical variables that precede mass movements, such as soil moisture, rainfall accumulation, vibration, and terrain inclination.

Strategically distributed monitoring nodes were designed, along with a central processing node that collects, manages, and synchronizes the information to a cloud platform, allowing its visualization through a web dashboard. As a response mechanism when critical thresholds are crossed, the system integrates a double layer of security: instant digital alerts sent to users' mobile devices, and a local physical alarm circuit composed of visual and auditory signals. The system was validated by emulating extreme environmental conditions, demonstrating high robustness in wireless communication based on ZigBee technology, as well as minimal latency times in the deployment of alerts. It was shown that the joint monitoring of these variables allows for highly reliable warnings of geological risk scenarios.

The results indicate that the technological proposal is a viable, scalable, and replicable alternative for monitoring landslide-prone areas, providing a tool that promotes a safer, more precise, and automated risk management approach based on the use of emerging technologies.
Keywords: Internet of Things, IoT, Wireless Sensor Networks, WSN, ZigBee, Alert, Landslides, Firebase

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

En el siguiente capítulo se presenta la definición de la problemática donde se expone las causas y efectos de los deslizamientos de tierra en el sector El Guadual de la vía Ibarra - San Lorenzo. Además, se establecen los objetivos generales y específicos que guían el desarrollo del proyecto, definiendo claramente lo que se pretende realizar. Asimismo, se detalla el alcance del trabajo, describiendo los límites dentro de los cuales se llevará a cabo la investigación y el desarrollo del sistema de monitoreo. Finalmente, se incluye la justificación, que fundamenta la necesidad del proyecto tanto en términos tecnológicos y sociales resaltando su contribución a la gestión y prevención de riesgos en la zona estudiada.

1.1 Problema

Los deslizamientos de tierra representan uno de los fenómenos naturales más frecuentes y peligrosos en regiones montañosas, especialmente en aquellas con alta pluviosidad, como muchas áreas de Ecuador. Estos eventos pueden ocurrir de manera repentina, causando graves daños materiales, afectando infraestructuras viales y, en los casos más extremos, provocando pérdidas humanas. Las vías que atraviesan zonas inestables están permanentemente expuestas a esta amenaza, lo que resulta en el aislamiento de comunidades, la interrupción de actividades comerciales y la generación de riesgos significativos para los usuarios [1].

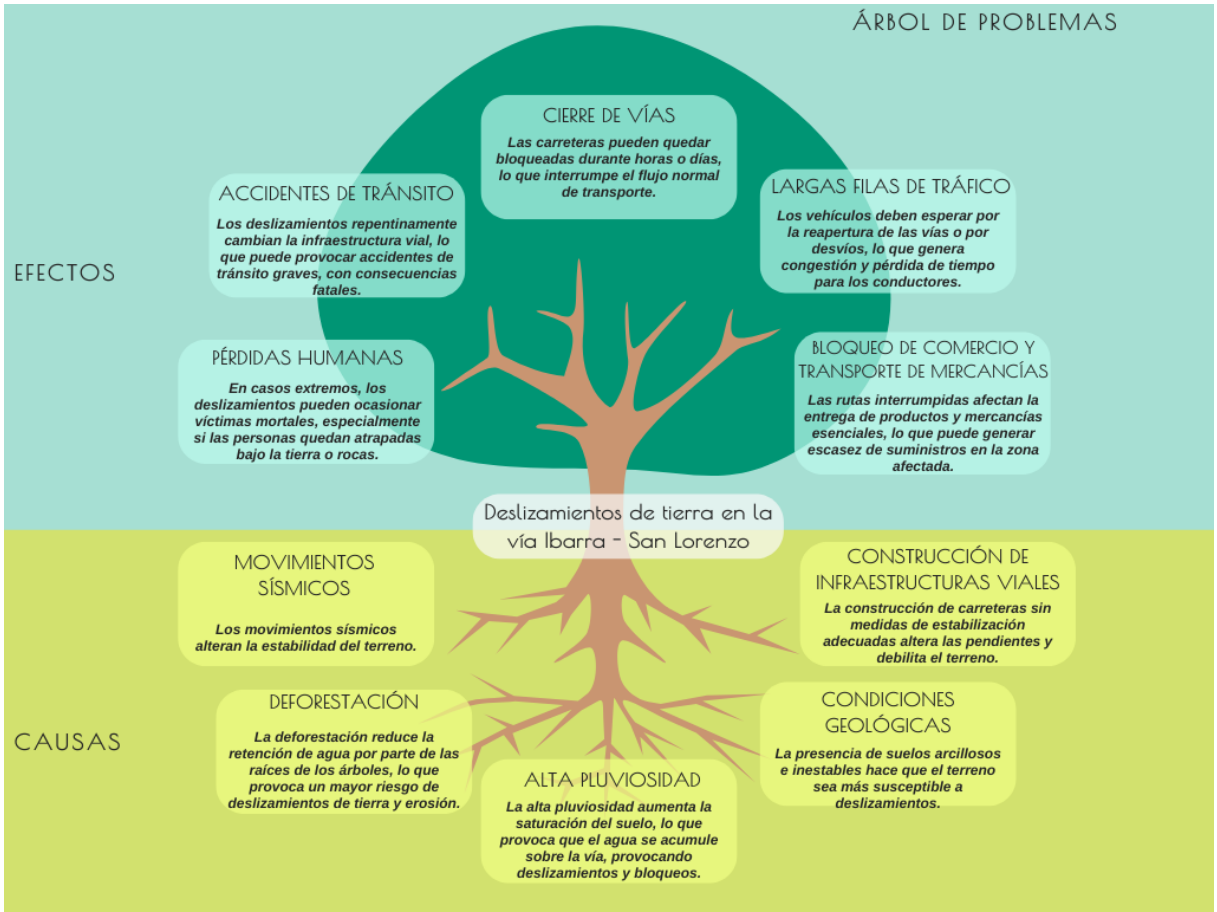
La vía Ibarra – San Lorenzo, ubicada en el norte del país, es una ruta estratégica que une la Sierra con la Costa ecuatoriana. Desde hace años, esta vía ha presentado una alta susceptibilidad a deslizamientos de tierra, especialmente durante la temporada de lluvias. El 2 de enero de 2023, un deslizamiento en el kilómetro 109, a la altura de El Limonal, interrumpió completamente el tránsito, afectando el retorno de turistas luego del feriado de fin de año [2]. En

octubre de 2023, un deslave en el sector La Granada provocó la muerte de dos niños tras el colapso de su vivienda [3], y en junio de 2024, otro deslizamiento en San Guillermo redujo la vía a un solo carril, evidenciando la necesidad de acciones preventivas [4].

Recientemente, en abril de 2025, un deslave de gran magnitud en el sector El Guadual, kilómetro 114, provocó el cierre total de la vía Ibarra – San Lorenzo, dejando incomunicadas varias comunidades y generando largas filas de vehículos varados [5]. Las condiciones de inestabilidad del terreno, sumadas a las intensas lluvias de la temporada, exponen la necesidad de implementar un sistema de monitoreo y alerta de deslizamientos.

En la Figura 1 se presenta un árbol de problemas con el fin de estructurar de manera clara las causas y efectos asociados a los deslizamientos de tierra.

Figura 1.
Árbol de problemas



Frente a esta problemática se tiene previsto implementar un sistema de monitoreo inteli-

gente para prevenir deslizamientos de tierra en la vía Ibarra - San Lorenzo, específicamente en el sector de El Guadual. Este sistema IoT utilizará una red de sensores (WSN) con tecnología Zigbee para la recolección continua de datos relacionados con variables críticas, como la cantidad de precipitación en la zona, las vibraciones del terreno y cualquier cambio en la inclinación del suelo. Cuando los valores de estos parámetros superen los umbrales críticos establecidos, el sistema enviará alertas automáticas a las autoridades locales y emitirá una alarma sonora en la zona afectada, con el fin de alertar a la comunidad y así tratar de evitar posibles accidentes.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema IoT para el monitoreo de deslizamientos de tierra en el sector El Guadual de la vía Ibarra - San Lorenzo, mediante la instalación de una red de sensores para la recolección de datos, y la generación de alertas, con el fin de notificar a la comunidad de un posible deslave.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar una investigación sobre las causas y efectos de los deslizamientos de tierra en el sector El Guadual, analizando estudios previos y datos históricos de la zona.
- Establecer los requerimientos técnicos para el diseño del sistema de monitoreo, seleccionando los parámetros clave que deben ser monitoreados frente a un posible deslave y la infraestructura de la red de sensores basada en tecnología Zigbee.
- Implementar una red de sensores (WSN) para el monitoreo de deslizamientos de tierra y envío de alertas automáticas en el sector El Guadual, utilizando tecnología Zigbee.
- Evidenciar el funcionamiento del prototipo a través de diferentes pruebas que permitan

comprobar el desempeño del proyecto.

1.3 Alcance

El alcance de esta tesis se centrará en el diseño e implementación de un sistema IoT para el monitoreo de deslizamientos de tierra en el sector El Guadual de la vía Ibarra - San Lorenzo. Se aplicará una metodología en cascada, siguiendo un enfoque estructurado y secuencial para garantizar que el sistema de monitoreo IoT se desarrolle de manera constante y controlada. Este enfoque asegura que cada fase del proyecto (investigación, diseño, implementación, pruebas y mantenimiento) se complete antes de pasar a la siguiente, permitiendo un control del avance y los resultados.

En la fase inicial, se llevará a cabo una investigación sobre las causas y efectos de los deslizamientos de tierra en la vía Ibarra – San Lorenzo. Se analizarán estudios previos sobre deslizamientos de tierra en la zona y se recopilarán datos históricos relacionados con estos eventos en el área. Esta investigación permitirá identificar los factores climáticos y geográficos que contribuyen a los deslizamientos. Además, se evaluarán los efectos sociales que estos deslizamientos han tenido sobre la comunidad y la infraestructura local.

En la fase 2 se establecerán los requerimientos técnicos para el diseño del sistema de monitoreo de deslizamientos de tierra. Se definirá la infraestructura de la red de sensores que permitirá la medición de los parámetros clave para el monitoreo de deslizamientos. Además, se determinarán los puntos estratégicos para la ubicación de los sensores en el sector El Guadual.

Según los resultados de la fase 1, para realizar el monitoreo de deslizamientos se van a utilizar los siguientes sensores: Pluviómetro, que se utilizará para medir la cantidad de precipitación en el sector, lo que influye directamente en la saturación del suelo. El sensor de humedad del suelo será crucial para monitorear el contenido de agua en el terreno, mientras que el sensor de vibración del suelo ayudará a detectar pequeños movimientos que podrían indicar inestabilidad en el terreno, y un inclinómetro para medir la inclinación del suelo.

Durante esta fase, se procederá con la programación de los microcontroladores que estarán conectados a los sensores. El diseño estará basado en la arquitectura mostrada en la Figura 2, cada sensor estará vinculado a un microcontrolador que recibirá los datos de los sensores y los enviará al coordinador central mediante un módulo ZigBee. La programación de los microcontroladores se realizará para que los sensores envíen los datos a través de una red de malla ZigBee, creando una infraestructura inalámbrica.

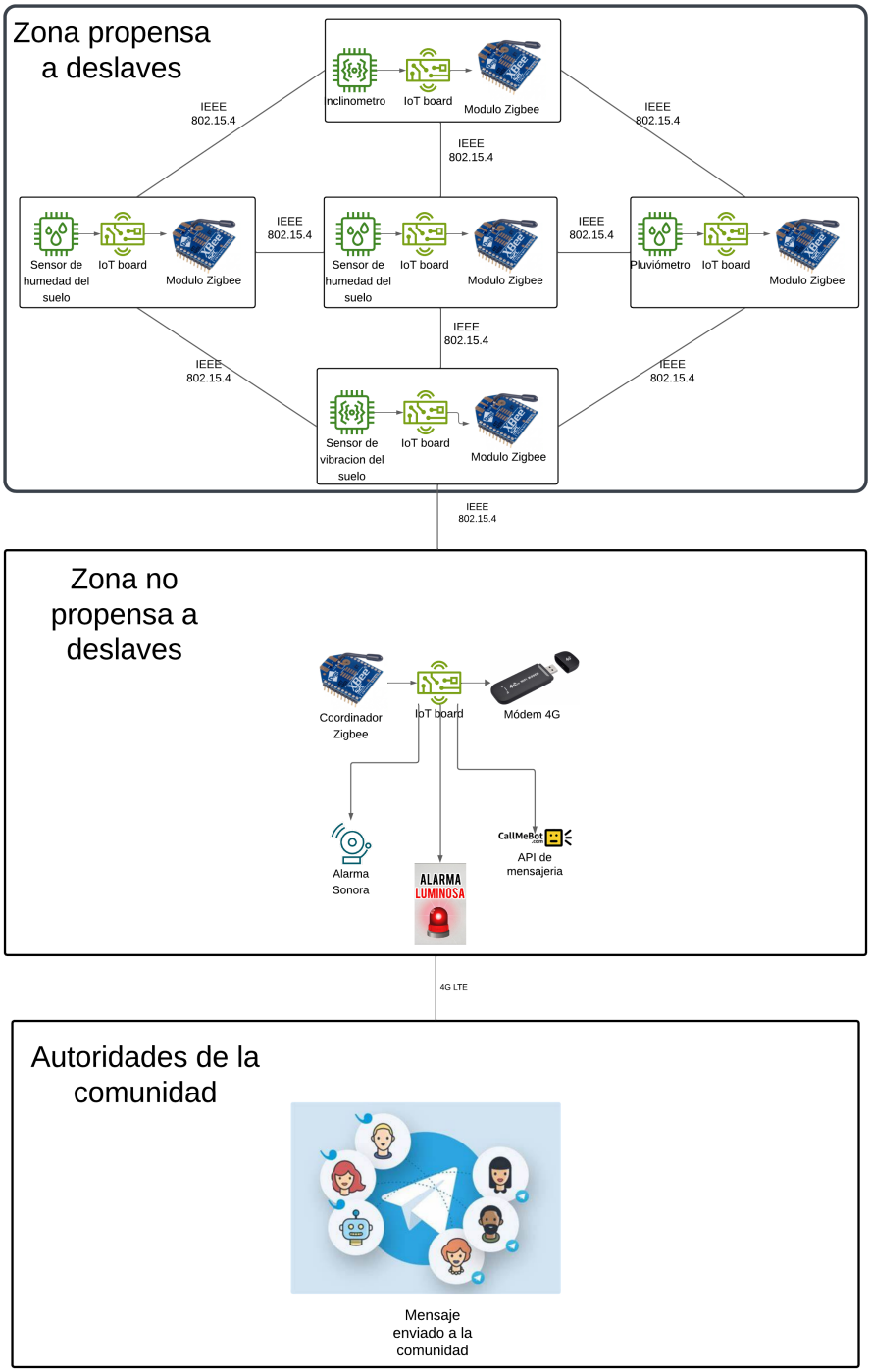
Además, se definirán los umbrales críticos para cada parámetro monitoreado, como la humedad, la inclinación y las vibraciones, que activarán las alertas cuando se superen esos límites. Esto asegurará una detección de los deslizamientos y permitirá emitir las alertas.

Estas alertas incluirán: Alarma sonora para alertar a las personas presentes en el área. Alarma visual (luz): para una alerta adicional visible. Mensaje de texto: se enviará un mensaje de alerta a las autoridades del sector utilizando una API de mensajería a la aplicación de Telegram; para esto se utilizará un módem de comunicación móvil que proporcionará acceso a internet para que sea posible el envío del mensaje.

En la fase 3, se llevará a cabo la implementación física del sistema en el sector El Guadual. A partir de los puntos estratégicos definidos en la Fase 2, se instalarán los sensores (pluviómetro, sensor de humedad del suelo, sensor de vibración del suelo, e inclinómetro) en el terreno. De la misma manera se ubicarán la alarma sonora y visual de modo que se forme una red inalámbrica con tecnología Zigbee funcional.

Figura 2.

Arquitectura de red WSN con tecnología Zigbee



Nota. La figura ilustra la arquitectura de un sistema de monitoreo para deslizamientos de tierra, donde los sensores en la zona propensa a deslaves envían datos a un coordinador central, el cual genera alertas sonoras, visuales y mensajes a la comunidad, utilizando tecnología ZigBee y un módem 4G para la transmisión de la información.

En la fase final, se realizarán pruebas de funcionamiento del sistema a través de escenarios emulados digitalmente para comprobar el desempeño del sistema en condiciones controladas. Se utilizarán simulaciones digitales que emulen situaciones de terreno extremas, como lluvias intensas, altos niveles de humedad, vibraciones y movimientos del suelo, con el fin de verificar el funcionamiento del sistema ante estos cambios.

1.4 Justificación

Los deslizamientos de tierra son fenómenos naturales que representan una grave amenaza para la seguridad pública, la infraestructura vial y el medio ambiente, especialmente en áreas montañosas y rurales. El sector El Guadual, ubicado en la vía Ibarra - San Lorenzo, es una zona particularmente vulnerable a este tipo de desastres. Los deslizamientos no solo causan pérdidas humanas y materiales, sino que también afectan el acceso a zonas clave para la movilidad, lo que genera impactos económicos y sociales significativos [6].

Según el reporte de [7], el 22 de diciembre de 2023 se registró un deslizamiento de tierra en el kilómetro 114 en el sector del Guadual en la vía Salinas – Lita (E10), afectando aproximadamente 125 metros lineales de la vía. Este evento resalta la vulnerabilidad de la zona y la necesidad de implementar un sistema de monitoreo de deslaves con alertas para tomar medidas preventivas ante riesgos similares en el futuro.

Este proyecto radica en la necesidad de implementar tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) para la mejora de la seguridad y la gestión de riesgos en tiempo real. Según el ODS 9: Industria, innovación e infraestructura, se busca promover la construcción de infraestructuras resilientes y garantizar la sostenibilidad de las comunidades mediante la implementación de tecnologías innovadoras que faciliten la gestión de desastres.

Este trabajo tiene como objetivo el diseño e implementación de un sistema IoT basado en sensores inalámbricos que utilicen tecnología ZigBee para monitorear variables críticas del suelo que pueden producir un deslave. La elección de la tecnología ZigBee para la red de sen-

sores permite una comunicación en malla (mesh), lo que aumenta la fiabilidad de la recolección de datos al proporcionar redundancia en la transmisión y reducir el riesgo de fallas en la red [8]. Esta red de sensores garantizará la transmisión eficiente de datos, lo que permitirá la emisión de alertas ante posibles deslizamientos y permitirá una respuesta rápida por parte de las autoridades y la comunidad.

Este trabajo contribuye al campo de la gestión de desastres naturales mediante tecnologías IoT y redes de sensores inalámbricos (WSN). Diversos estudios han demostrado que el uso de algoritmos y una red de sensores inalámbricos pueden mejorar significativamente el monitoreo de desastres naturales [9]. Además, se ha identificado que la red de malla ZigBee y otros protocolos inalámbricos son especialmente útiles para monitorear terrenos inestables en zonas rurales, proporcionando un modelo de prevención de desastres más efectivo en comparación con enfoques tradicionales [10].

El sistema IoT va a utilizar la metodología en cascada, que se desarrollará en fases secuenciales: desde la investigación y selección de sensores, pasando por el diseño e implementación del sistema IoT, hasta las pruebas y validación en condiciones controladas. Además, integra tecnologías de bajo consumo energético que pueden ser fácilmente implementadas en áreas rurales de difícil acceso, lo que permite una gestión de riesgos más accesible y eficaz [11].

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se desarrolla el marco teórico del proyecto, con el propósito de fundamentar los conceptos y tecnologías involucradas en el diseño de un sistema IoT para el monitoreo y alerta de deslizamientos de tierra. En primer lugar, se analizan los movimientos en masa: sus definiciones, tipos, causas y efectos. Posteriormente, se revisan los métodos de monitoreo de deslizamientos, tanto tradicionales como modernos, incluyendo técnicas visuales, geotécnicas, de teledetección y el uso de sensores emergentes. Finalmente, se aborda el estudio de las redes de sensores inalámbricos (WSN), su relación con el Internet de las Cosas (IoT), el protocolo ZigBee y la base tecnológica del sistema propuesto. Esta revisión establece los fundamentos científicos y tecnológicos necesarios para sustentar la propuesta de implementación.

2.1 Movimientos en masa

Los movimientos en masa son procesos geológicos en los que rocas, tierra o sedimentos se desplazan pendiente abajo por acción de la gravedad. Su ocurrencia responde a la pérdida progresiva de resistencia de los materiales del terreno y puede ser desencadenada por factores naturales o antrópicos: precipitaciones intensas, cambios en el uso del suelo o eventos sísmicos, entre otros. La topografía, la pendiente del terreno y las características físicas del talud determinan en gran medida cuándo y cómo ocurre un movimiento [12], [13].

El tipo de material movilizado y la rapidez del desplazamiento varían según la pendiente, la saturación del suelo y la presencia de fallas geológicas. Algunos movimientos son casi imperceptibles, como la reptación; otros son violentos e instantáneos, como las avalanchas [14]. A continuación, se describen los principales tipos de movimientos en masa.

2.1.1 Tipos de movimientos en masa

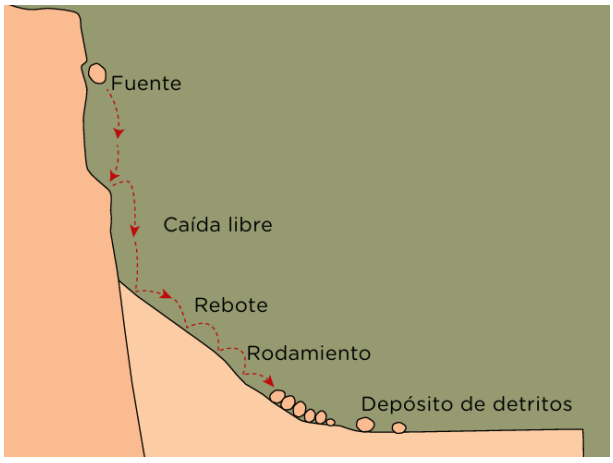
La clasificación de estos movimientos se basa en criterios como el tipo de material involucrado (roca, detritos o tierra), el mecanismo de desplazamiento (desprendimientos, deslizamientos, flujos o vuelcos) y la velocidad, que puede ir desde imperceptiblemente lenta hasta catastróficamente rápida [15].

2.1.1.1 Caído

Los caídos ocurren cuando una masa de material se desprende de un talud empinado y desciende por caída libre, saltando o rodando. El movimiento puede ser extremadamente rápido y, en ocasiones, está precedido de desplazamientos menores que conducen a la separación progresiva del bloque. Es típico en pendientes superiores a 75 grados; en taludes de menor ángulo los materiales rebotan, y por debajo de los 45 grados tienden a rodar.

Como se observa en la Figura 3 el proceso inicia con el desprendimiento en la parte superior del talud, continúa con la caída libre y el rebote, y termina con la acumulación de detritos en la base. Sus causas incluyen lluvia, vibraciones sísmicas, erosión, cortes de vías y actividades antrópicas [16], [17].

Figura 3.
Esquema de caída de rocas



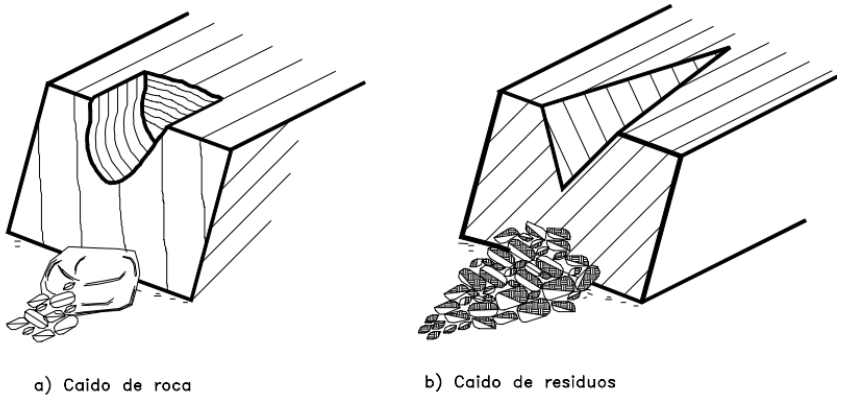
Nota. Recuperado de [16].

2.1.1.2 Inclinación o Volteo

Este movimiento se caracteriza por la rotación hacia adelante de un bloque con el centro de giro ubicado por debajo de su centro de gravedad. Ocurre principalmente en formaciones rocosas y puede abarcar desde pequeñas zonas hasta grandes volúmenes de material. Las fuerzas desencadenantes incluyen la presión del agua en grietas y los movimientos sísmicos. Según la estructura geológica, puede terminar en un deslizamiento o en un caído [15].

Como se observa en la Figura 4, este tipo de movimiento puede manifestarse en forma de caída de roca, cuando un bloque sólido se desplaza de manera compacta, o de caída de residuos, cuando fragmentos pequeños o escombros se desprenden de manera dispersa.

Figura 4.
Esquema de caídos de roca y residuos



Nota. Adaptado de [14].

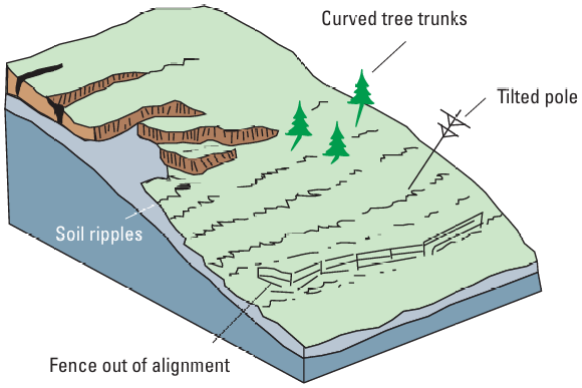
2.1.1.3 Reptación

La reptación es un proceso extremadamente lento en el que el suelo se desplaza de forma subsuperficial sin una superficie de falla definida. Afecta grandes áreas y se asocia a ciclos climáticos de humedecimiento y secado del suelo.[17].

Como se observa en la Figura 5, la reptación se caracteriza por el desplazamiento gradual del material, desde la roca hacia la superficie del suelo, lo que produce una deformación lenta

del terreno y afecta elementos visibles como árboles o estructuras.

Figura 5.
Esquema de un proceso de reptación



Nota. Adaptado de [17].

2.1.1.4 Deslizamiento

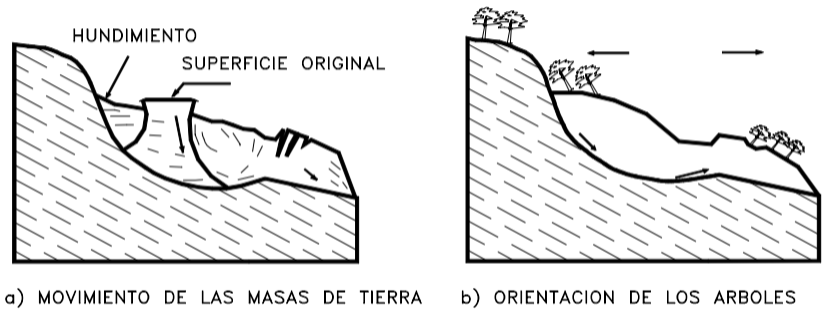
El deslizamiento implica el movimiento de una masa de material (roca, tierra, escombros) a lo largo de una o varias superficies de falla. Puede ser progresivo, desarrollándose de manera continua pendiente abajo sin iniciarse simultáneamente en toda la superficie, e involucrar una sola masa o varias unidades semi-independientes. Sus causas van desde procesos naturales hasta intervenciones humanas como cortes, rellenos o deforestación [14]. Se distinguen dos subtipos:

- **Deslizamiento Rotacional:** La superficie de falla es curva, con el centro de giro ubicado por encima del centro de gravedad de la masa. Produce agrietamientos concéntricos y hundimientos del terreno, y adopta con frecuencia una forma cóncava similar a una cuchara. En suelos tropicales, las superficies de falla son curvas pero no necesariamente circulares [14].

  Como se observa en la Figura 6, el desplazamiento de la masa de tierra provoca hundimientos en el terreno y la inclinación característica de los árboles y estructuras, lo que evidencia la rotación del material durante el proceso.

Figura 6.

Deslizamiento rotacional



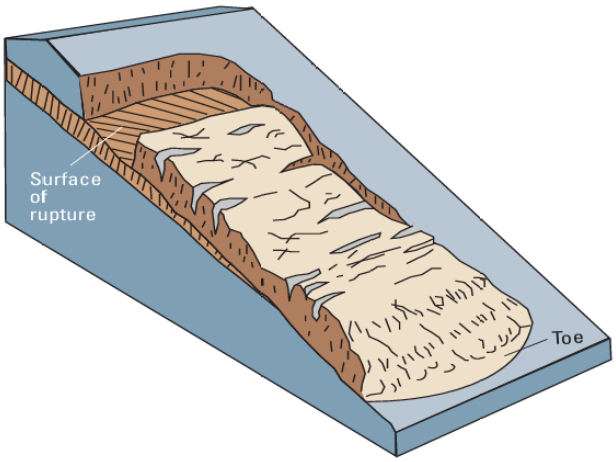
Nota. Adaptado de [14].

- **Deslizamiento de Traslación:** El material se desplaza a lo largo de una superficie plana o ligeramente ondulada, con escaso movimiento rotacional. Presenta una relación $D_r/L_r < 0{,}1$, lo que indica un movimiento más directo y continuo, sin la autoestabilización del tipo rotacional. Está controlado por superficies de debilidad como fallas, fracturas o planos de estratificación, y se clasifica en deslizamientos de bloque, de cuña o en escalera según el número de discontinuidades presentes [14], [15].

  Como se observa en la Figura 7, en este tipo de deslizamiento la masa de suelo se desplaza sobre una superficie de falla lisa, donde se evidencia el movimiento más directo y continuo, lo que puede resultar en un desplazamiento más rápido y una mayor extensión del área afectada.

Figura 7.

Deslizamiento de traslación



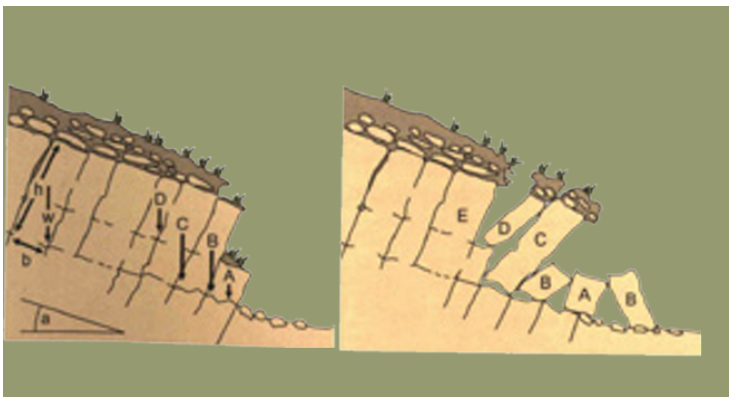
Nota. Adaptado de [17].

2.1.1.5 Esparcimiento Lateral

El esparcimiento lateral se caracteriza por la extensión horizontal del material impulsada por fracturas de corte y tensión. Ocurre principalmente en masas de roca sobre suelos plásticos o finos, como arcillas y limos sensitivos, que pierden resistencia al remoldearse. El proceso es progresivo y de desarrollo muy lento. Se distinguen dos variantes: movimientos distribuidos, sin superficie basal definida, y movimientos con licuación, donde el material subyacente fluye plásticamente provocando hundimiento y desintegración de las capas superiores [14], [16].

Como se observa en la Figura 8, el proceso de esparcimiento lateral implica el desplazamiento de bloques de material que se separan gradualmente a lo largo de planos de fractura, generando cortes y hundimientos en diferentes secciones del terreno.

Figura 8.
Esquema de un esparcimiento lateral

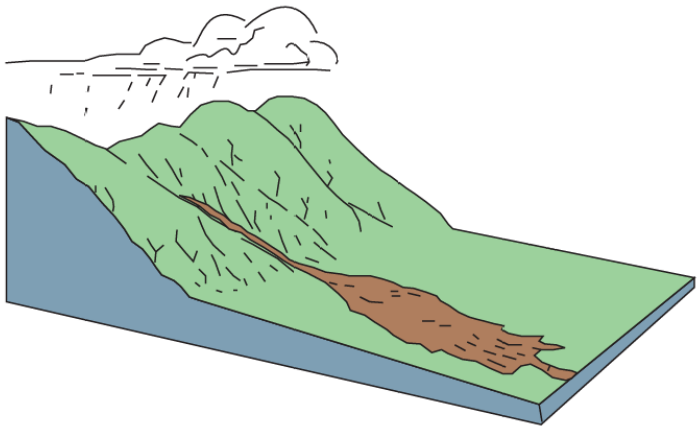


Nota. Adaptado de [16].

2.1.1.6 Flujo

Un flujo es el movimiento continuo de material sobre una superficie de falla, con desplazamiento relativo entre las partículas. A diferencia de la reptación, presenta una superficie de separación claramente definida entre el material en movimiento y el subyacente. Los flujos son causados por la saturación del material tras lluvias intensas o eventos sísmicos, y se clasifican en flujos de roca, de residuos, de suelo y de lodo [17].

Figura 9.
Flujo de lodo



Nota. Adaptado de [17].

2.1.1.7 Avalanchas

Las avalanchas son fenómenos de alta velocidad en zonas de montaña, donde grandes masas de roca, suelo y agua descienden a velocidades de hasta 50 m/s. Se desencadenan por lluvias intensas, deshielos o terremotos y tienen impacto severo sobre infraestructuras y comunidades cercanas [15].

Figura 10.
Ejemplo de una avalancha



Nota. Adaptado de [14].

2.1.1.8 Movimientos Complejos

Los movimientos complejos implican la combinación de dos o más tipos de desplazamiento, como un deslizamiento que se convierte en flujo o una inclinación que termina en un caído. Su naturaleza dinámica y la transición entre procesos dificultan su identificación y análisis [14].

La Tabla 1 resume los tipos de movimientos en masa. Esta clasificación permite comprender cómo varían en función de la velocidad, el material movilizado y las condiciones geológicas, aspectos que resultan indispensables para el análisis y la mitigación de riesgos.

Tabla 1.
Tipos de movimientos en masa

Tipo de Movimiento	Descripción	Características Principales
Caído	Desprendimiento de material desde una pendiente empinada que cae principalmente por caída libre.	Movimiento rápido, sin desplazamiento de corte significativo. Material cae o rueda.
Inclinación o Volteo	Rotación hacia adelante de una unidad de material sobre una superficie inclinada.	Movimiento lento a rápido. Afecta formaciones rocosas, provocado por fuerzas naturales.
Reptación	Desplazamiento muy lento del suelo subsuperficial, afectando grandes áreas sin una superficie de falla.	Movimiento extremadamente lento. Relacionado con alteraciones climáticas y suelos blandos.

Deslizamiento	Desplazamiento de una masa de material a lo largo de una o varias superficies de falla.	Puede ser rotacional o traslacional. Causado por condiciones naturales o actividades humanas.
Esparcimiento Lateral	Extensión lateral del material sobre fracturas, con posibles movimientos de rotación y traslación.	Movimiento lento. Afecta rocas o suelos plásticos.
Flujo	Movimiento de material líquido o semilíquido, como lodo o residuos, a través de una pendiente.	Puede ser seco o húmedo. Relacionado con saturación de materiales subsuperficiales.
Avalanchas	Desplazamiento muy rápido de una gran masa de material, generalmente en zonas de alta montaña.	Alta velocidad (hasta 50 m/s). Asociado con lluvias intensas, deshielos o sismos.
Movimientos Complejos	Combinación de dos o más tipos de desplazamiento en el mismo fenómeno.	Involucra una secuencia de movimientos como caído que termina en deslizamiento o flujo.

Nota. En la tabla se pueden observar los diferentes tipos de movimientos en masa junto con su descripción y características generales. Tabla adaptada de [14], [15], [16], [17].

2.1.2 Causas de los deslizamientos de tierra

Los deslizamientos de tierra son fenómenos complejos que resultan de la interacción de factores geológicos, hidrológicos, geométricos, geotécnicos y ambientales. Estos factores actúan de forma conjunta, alterando la estabilidad de los taludes y provocando el desplazamiento

de material pendiente abajo [14], [15].

2.1.2.1 Parámetros Geométricos

La topografía de un talud tiene un papel determinante en su estabilidad. La altura, la pendiente, la curvatura, el largo y el ancho influyen en los niveles de esfuerzo y en las fuerzas gravitacionales que desencadenan los deslizamientos. En taludes más inclinados, el ángulo de pendiente marca el límite de estabilidad: los suelos residuales de origen ígneo pueden tolerar inclinaciones superiores a 45°, mientras que en materiales blandos, como lutitas meteorizadas saturadas, la pendiente no debe superar los 20° [14]. La curvatura del talud también incide en el equilibrio del material y en la capacidad de infiltración del agua, en tanto que un talud de mayor longitud expone más superficie a la escorrentía y a la erosión superficial [17].

2.1.2.2 Parámetros Geológicos

La formación geológica define las características de los materiales presentes en el talud. Los suelos y rocas de origen ígneo-metamórfico presentan un comportamiento distinto al de los de origen sedimentario, lo que afecta directamente la resistencia de la pendiente. Las discontinuidades (fracturas, planos de estratificación) actúan como zonas de debilidad que facilitan el movimiento del material. La meteorización física y química reduce la resistencia de los materiales y aumenta su susceptibilidad a los deslizamientos [15], [17].

2.1.2.3 Parámetros Hidrológicos e Hidrogeológicos

El agua es uno de los principales detonantes de los deslizamientos. Las lluvias intensas saturan el suelo y elevan los niveles de agua subterránea, lo que reduce la resistencia al corte de los materiales y promueve la desestabilización del talud. Los cambios en el nivel freático modifican las condiciones de esfuerzo interno y pueden desencadenar el movimiento [18]. Las zonas de recarga y descarga de aguas subterráneas, condicionadas por el clima regional, son

determinantes para comprender el comportamiento de los deslizamientos [14].

2.1.2.4 Parámetros Geotécnicos

La resistencia al corte es fundamental para evaluar la estabilidad de un talud. Los parámetros de fricción y cohesión del suelo determinan el factor de seguridad ante un deslizamiento: los materiales con baja cohesión, como los suelos arenosos, ofrecen menor resistencia que los más cohesivos. La permeabilidad del material condiciona el flujo de agua subterránea, mientras que la sensibilidad y la expansividad de ciertos suelos pueden provocar pérdida de resistencia al remoldearse, facilitando el movimiento [14], [17].

2.1.2.5 Parámetros Ambientales y Antrópicos

El clima y las condiciones ambientales aceleran la meteorización de los suelos. Los aumentos de temperatura asociados al cambio climático intensifican las reacciones químicas en los materiales del talud, debilitándolos progresivamente [19]. Los sismos, microsismos, la erosión por viento, la pérdida de cobertura vegetal y las modificaciones antrópicas (deforestación, construcción de carreteras, cambio en el uso del suelo) también incrementan la inestabilidad. La actividad humana puede alterar el equilibrio natural de los taludes de formas difíciles de predecir, promoviendo la ocurrencia de estos fenómenos [17], [19].

2.1.3 Efectos de los deslizamientos de tierra

Los deslizamientos de tierra tienen un impacto significativo tanto en el entorno construido como en el natural, afectando infraestructuras, ecosistemas y comunidades. Sus efectos varían según la intensidad del evento, la ubicación y los materiales involucrados, y en muchos casos se manifiestan de forma simultánea en áreas agrícolas o boscosas [17].

2.1.3.1 Efectos en el Medio Ambiente Construido

Los deslizamientos afectan gravemente las estructuras artificiales ubicadas sobre o cerca de áreas inestables. En las redes viales, el impacto más directo es la interrupción total o parcial del tránsito por acumulación de rocas, escombros o flujos de lodo sobre la calzada [20]. Este bloqueo representa un riesgo inmediato para conductores y peatones, y provoca daños estructurales al pavimento, a los sistemas de drenaje y a las obras de contención. A nivel socioeconómico, el cierre de rutas estratégicas (como la vía Ibarra-San Lorenzo en el sector de estudio) genera costos indirectos sustanciales: paraliza el transporte de mercancías, aísla comunidades y dificulta la respuesta de los servicios de emergencia [21]. La repetitividad de estos eventos en puntos críticos como El Guadual evidencia la necesidad de transitar de un enfoque reactivo hacia uno preventivo basado en monitoreo y alerta temprana [7].

Las viviendas construidas en pendientes empinadas son vulnerables a daños parciales o destrucción total, ya que los deslizamientos desestabilizan cimientos, paredes y servicios públicos subterráneos y en superficie. El daño a líneas vitales (agua, alcantarillado, electricidad y caminos) interrumpe el acceso a propiedades cercanas y afecta tanto a estructuras residenciales como comerciales. Las corrientes rápidas de escombros son especialmente destructivas por su imprevisibilidad, mientras que los deslizamientos lentos, aunque permiten adoptar medidas preventivas, también pueden destruir estructuras si no se controlan [17]. Las fallas de corte a lo largo de carreteras comprometen su estabilidad estructural a largo plazo [21].

El crecimiento de la población en zonas de riesgo agrava esta vulnerabilidad. La construcción en terrenos inadecuados y la ausencia de políticas eficaces de uso del suelo aumentan la exposición de las comunidades, que a menudo carecen de recursos para regular prácticas de construcción inseguras [19].

2.1.3.2 Efectos en el Medio Ambiente Natural

Los deslizamientos también producen efectos profundos en el medio natural, alterando bosques, pastizales y fauna silvestre. Los cambios morfológicos en la superficie terrestre pueden modificar ecosistemas enteros, afectando ríos, tierras agrícolas y áreas boscosas. Sin embargo, al tratarse generalmente de eventos localizados, la flora y la fauna afectadas tienen capacidad de recuperación con el tiempo [17].

En algunos casos, los deslizamientos pueden modificar hábitats acuáticos de forma favorable para ciertas especies; en otros, la destrucción del hábitat tiene consecuencias graves para la fauna local. Entre los efectos naturales más relevantes se identifican los siguientes:

- **Derrumbes submarinos:** ocurren cuando materiales geológicos se desplazan desde laderas oceánicas, afectando la navegación y, en casos extremos, desencadenando tsunamis, como el registrado en el Gran Banco de Terranova en 1929 [20].
- **Erosión de acantilados:** el desprendimiento de rocas en costas y acantilados altera la calidad del agua y daña ecosistemas marinos, además de afectar la infraestructura costera [17].
- **Presas de deslizamiento:** cuando un gran deslizamiento bloquea el curso de un río, puede formar una presa natural. Estas estructuras suelen ser inestables y, aunque pueden crear lagos temporales, representan un riesgo significativo de inundaciones repentinas. Un ejemplo notable es el deslizamiento Slumgullion, cuya presa ha persistido más de 700 años [17].

2.2 Métodos de Monitoreo de Deslizamientos de Tierra

El monitoreo de deslizamientos de tierra es fundamental para evaluar y mitigar los riesgos asociados a estos eventos. En los últimos treinta años se han desarrollado técnicas que permiten obtener datos en tiempo real y realizar un seguimiento continuo del comportamiento

del terreno, desde el monitoreo geotécnico tradicional hasta la teledetección y las tecnologías emergentes como sensores inalámbricos y plataformas aéreas no tripuladas [17], [22].

2.2.1 Métodos visuales y geotécnicos

El monitoreo geotécnico permite detectar el desplazamiento de las pendientes, la profundidad de la superficie de deslizamiento y las tasas de movimiento. Los datos obtenidos constituyen insumos clave para modelar y analizar la dinámica de estos fenómenos [22]. Los instrumentos más utilizados son los inclinómetros, extensómetros y geófonos, que pueden instalarse tanto en superficie como en el subsuelo, con medición periódica, continua o en tiempo real según las necesidades del sistema de monitoreo [22], [23].

2.2.1.1 Inclinómetros

El inclinómetro es el instrumento más utilizado para medir movimientos de deslizamiento. Se instala en pozos verticales y mide la deformación normal al eje del pozo, generando un perfil horizontal de deformación subsuperficial que permite detectar movimientos pequeños en la zona de corte [23]. Los inclinómetros de alta resolución ofrecen datos precisos sobre movimientos rotacionales, típicos de muchos deslizamientos, aunque son menos adecuados para detectar movimientos de traslación [23].

2.2.1.2 Extensómetros

El extensómetro mide el desplazamiento relativo entre dos puntos: uno en zona estable y otro en zona inestable. También conocidos como medidores de grietas o de convergencia, pueden instalarse en superficie o en pozos y resultan especialmente útiles en áreas de gran pendiente donde se requiere medición precisa del desplazamiento entre puntos específicos [22].

2.2.1.3 Geófonos

Los geófonos son sensores microsísmicos que miden las vibraciones del suelo asociadas al movimiento de deslizamientos. A través de la frecuencia, amplitud y duración de las señales de vibración, permiten detectar flujos de escombros y otros movimientos rápidos, incluso antes de que sean visibles en la superficie [10], [22].

2.2.1.4 Limitaciones de los métodos geotécnicos tradicionales

Aunque los métodos geotécnicos tradicionales ofrecen alta precisión en la medición de la deformación subsuperficial, su aplicación para sistemas de alerta temprana (SAT) a escala de ladera presenta limitaciones críticas. El alto costo de instalación y la naturaleza invasiva de las perforaciones los hacen económicamente inviables para redes de monitoreo densas en áreas extensas [24]. El monitoreo visual, aunque fundamental, es discontinuo, subjetivo y depende de la frecuencia de inspecciones, por lo que ninguno de estos enfoques proporciona la resolución temporal necesaria para emitir alertas ante fenómenos de rápida evolución [18], [25].

2.2.2 Teledetección

La teledetección ha transformado el monitoreo de deslizamientos, permitiendo su detección, seguimiento y análisis a gran escala. Desde el lanzamiento del satélite Landsat en 1972, esta tecnología ha evolucionado notablemente, brindando herramientas precisas para evaluar cambios en la superficie terrestre que podrían indicar un deslizamiento [25]. Los avances en resolución espacial, espectral y temporal facilitan la identificación y el análisis de deslizamientos a través del tiempo [26].

La teledetección puede realizarse mediante sensores activos y pasivos. Los sensores pasivos capturan la radiación solar reflejada o emitida por la superficie terrestre; los activos emiten su propia señal y miden la reflexión del terreno. Ambas técnicas permiten obtener datos de

alta resolución para el seguimiento detallado de deslizamientos [26].

2.2.2.1 Sensores Pasivos

Los satélites con sensores pasivos, como Landsat, SPOT y Sentinel, adquieren imágenes en bandas ópticas, NIR e SWIR. Mediante comparación temporal, estas imágenes permiten detectar cambios en la superficie terrestre e identificar áreas afectadas por deslizamientos. Su principal limitación es la susceptibilidad a la cobertura nubosa y la vegetación densa, que pueden bloquear las imágenes en ciertas regiones [26], [27].

2.2.2.2 Sensores Activos (SAR e InSAR)

Los sensores activos, como el Radar de Apertura Sintética (SAR), operan independientemente de las condiciones meteorológicas al penetrar nubes y vegetación. La técnica InSAR (Interferometría SAR) permite medir desplazamientos del suelo con alta precisión al comparar imágenes tomadas en distintos momentos, lo que ha sido crucial para monitorear movimientos en áreas de difícil acceso o clima adverso mediante plataformas como Radarsat y Sentinel-1 [28], [29].

2.2.2.3 LiDAR

LiDAR (Light Detection and Ranging) utiliza pulsos láser para mapear la superficie terrestre en 3D. El LiDAR aéreo (ALS) genera modelos topográficos precisos en áreas extensas al penetrar vegetación densa; el LiDAR terrestre (TLS) proporciona mayor detalle en zonas específicas, permitiendo detectar cambios sutiles en la morfología del terreno cruciales para identificar deslizamientos inminentes [25], [30].

2.2.2.4 Radar terrestre

Los sistemas de radar terrestre permiten el monitoreo en tiempo real de los movimientos del suelo con precisión milimétrica, fundamental para la implementación de SAT. El radar espacial, por su parte, es útil para el monitoreo de grandes áreas mediante series temporales regulares [31].

2.2.2.5 Limitaciones de la teledetección para alertas tempranas

Las plataformas satelitales, como InSAR y LiDAR, han revolucionado la cartografía de susceptibilidad, pero presentan deficiencias graves para un SAT inminente. Su baja resolución temporal (tiempos de revisita de días) las hace aptas para medir deformaciones lentas, pero ineficaces para alertar sobre fallas rápidas que se desarrollan en horas o minutos [28]. Los sensores ópticos son inutilizados por nubes, factor persistente en zonas tropicales húmedas como El Guadual, y la vegetación densa causa decorrelación en los datos InSAR [32]. Las técnicas terrestres como el GB-InSAR ofrecen tiempo real, pero su costo es elevado y requieren línea de vista despejada, lo que limita su uso en sistemas de alerta comunitarios [31].

2.2.3 Sensores y tecnologías emergentes en el monitoreo de deslizamientos

El monitoreo de deslizamientos ha avanzado significativamente con la integración de tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT), las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) y protocolos de comunicación como LoRa, ZigBee y Sigfox, que permiten una vigilancia más eficiente de áreas propensas a desastres naturales [10], [33].

Estas tecnologías posibilitan la recopilación y transmisión continua de datos a través de una red de sensores distribuidos en zonas de riesgo. La integración de IoT con WSN facilita la creación de sistemas autónomos que no requieren intervención humana directa y cuyos datos pueden analizarse en tiempo real desde plataformas remotas [34], [35].

Las redes WSN consisten en nodos sensores distribuidos que recopilan datos ambientales (humedad del suelo, temperatura, aceleración, desplazamiento) y se comunican de forma inalámbrica entre sí y con una estación base o gateway, formando la infraestructura básica del IoT [10]. Una ventaja fundamental de las WSN es su capacidad para cubrir grandes áreas sin necesidad de infraestructura física extensa. La integración con plataformas en la nube facilita el acceso remoto y la toma de decisiones informadas [11], [33].

Los protocolos de comunicación inalámbrica son un aspecto crítico para la eficiencia de estos sistemas. Los más utilizados para monitoreo de deslizamientos son LoRaWAN, ZigBee y Sigfox, cada uno con características distintas en cuanto a alcance, consumo energético, topología y fiabilidad [35]:

- **LoRaWAN:** Protocolo LPWAN diseñado para maximizar el alcance de transmisión (hasta 10 km o más en zonas rurales) con bajo consumo energético. Su arquitectura es predominantemente en estrella, donde cada nodo debe establecer una conexión directa con un gateway para transmitir sus datos [36].
- **ZigBee (IEEE 802.15.4):** A diferencia de LoRaWAN, ZigBee maximiza la fiabilidad y resiliencia mediante una topología de malla (*mesh*). Aunque su alcance punto a punto es más corto (entre 10 y 100 metros) los nodos actúan como enrutadores, retransmitiendo mensajes entre sí para extender el alcance de la red y crear rutas de datos alternativas y redundantes [34], [37].
- **Sigfox:** Utiliza tecnología de banda ultra estrecha (UNB) para ofrecer gran alcance y bajo consumo, similar a LoRaWAN. Está optimizado para transmisiones de datos pequeñas y poco frecuentes, y depende generalmente de la cobertura de un operador de red público [38].

2.2.3.1 Limitaciones de las tecnologías IoT y WSN en entornos rurales

Aunque el IoT y las redes de sensores resuelven problemas del monitoreo tradicional, su instalación en entornos rurales presenta tres grandes desafíos. Primero, al carecer de red eléctrica, la transmisión continua de datos agota rápidamente las baterías de los equipos [11].

Segundo, la topografía accidentada y la vegetación densa atenúan las señales de radio, lo que obliga a instalar repetidores adicionales que encarecen el sistema [35]. Finalmente, los daños que sufren los sensores por la humedad extrema o golpes causan errores de calibración y falsos positivos, lo que a largo plazo destruye la confianza de la comunidad en el sistema de alerta [33].

2.2.4 Parámetros Críticos para el monitoreo de Deslizamientos

Para el desarrollo de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) efectivo, es indispensable definir umbrales críticos. Un umbral representa el límite a partir del cual las condiciones del terreno cambian de estables a inestables. En este tipo de proyectos, la medición se basa en el monitoreo constante de variables físicas y ambientales mediante redes de sensores.

2.2.4.1 Precipitación

La precipitación es el principal detonante de los deslizamientos superficiales. A medida que el agua se infiltra, aumenta la presión de poros y disminuye la fricción interna del suelo. Para medir este parámetro de forma automatizada, se utilizan redes de pluviómetros que registran la cantidad de lluvia acumulada en tiempo real.

Los umbrales de precipitación se definen típicamente relacionando la intensidad y la duración de la lluvia. Estudios clásicos como el de Guzzetti et al. [39] demuestran que lluvias prolongadas de baja intensidad pueden ser tan peligrosas como eventos cortos y torrenciales. En laderas tropicales susceptibles, una precipitación acumulada superior a 50 mm en un periodo

de 24 horas, o intensidades de 10 a 15 mm/h sostenidas durante varias horas, son indicadores suficientes para declarar una alerta por saturación crítica.

2.2.4.2 Análisis de Vibraciones del Suelo

Las vibraciones del suelo provocadas por eventos sísmicos o movimientos internos del terreno, pueden ser detectadas por sensores sísmicos o acelerómetros. Definir el umbral crítico para las vibraciones del suelo implica identificar las frecuencias y amplitudes de las vibraciones que preceden un deslizamiento.

Antes de que ocurra la falla masiva de un talud, el terreno experimenta micro-movimientos producto de la ruptura de su estructura interna. Los sistemas de alerta integran acelerómetros y sensores sísmicos capaces de registrar estas pequeñas vibraciones en múltiples ejes.

Para diferenciar entre el ruido ambiental (como el paso de vehículos o viento) y los movimientos reales de la tierra, el análisis de las señales requiere herramientas matemáticas. Según recientes investigaciones en sensores micro-sísmicos para el IoT [6], la aplicación de la Transformada de Fourier a los datos del acelerómetro permite descomponer la vibración e identificar sus frecuencias dominantes. Las anomalías asociadas a la inestabilidad de laderas suelen concentrarse en rangos de frecuencia muy bajos (típicamente entre $0{,}1$ y 1 Hz).

Por lo tanto, el umbral no se basa únicamente en un desplazamiento estático, sino en la detección de estas aceleraciones anómalas. Trabajos enfocados en el monitoreo de deslizamientos determinan que picos de aceleración superiores a $0{,}02$ m/s^2 o $0{,}05$ m/s^2 (filtrados mediante el análisis de frecuencias) son señales inequívocas de inestabilidad activa [40]. Si estos patrones coinciden con altos niveles de humedad, el riesgo de colapso es crítico.

2.2.4.3 Humedad del Suelo

La humedad volumétrica determina qué tan cerca está el terreno de su punto de saturación máxima. Cuando el agua ocupa todos los poros del suelo, la cohesión colapsa. El monitoreo de este factor mediante sondas de humedad permite conocer el estado interno de la ladera antes de que la lluvia comience a escurrir por la superficie.

Según la investigación de Wicki et al. [41], monitorear la humedad antecedente del suelo mejora la predicción de deslizamientos en comparación con medir únicamente la lluvia. El umbral crítico depende de la porosidad del terreno. En suelos arcillosos y menos porosos, un Contenido Volumétrico de Agua (VWC) que supera el 35 % al 45 % suele marcar el límite de capacidad de campo, punto en el que el talud pierde estabilidad mecánica de forma acelerada.

2.2.4.4 Inclinación del Terreno

La inclinación de la pendiente determina la fuerza de gravedad que actúa sobre la masa de tierra. Cualquier cambio repentino o progresivo en el ángulo original del talud es un indicador directo de deformación superficial. Los inclinómetros y giroscopios permiten calcular las variaciones angulares con gran precisión en tiempo real.

Los sistemas de monitoreo establecen el umbral crítico midiendo la desviación respecto al estado de reposo inicial de la ladera [40]. En aplicaciones prácticas, una variación sostenida de 2 a 5 grados respecto al ángulo base indica que la masa de tierra ha comenzado a ceder o deslizarse, justificando la activación inmediata de los protocolos de alerta comunitaria.

2.3 Tecnología propuesta para el monitoreo de deslizamientos de tierra

La evolución del monitoreo de deslizamientos ha demostrado que la eficacia de cualquier sistema de alerta radica en la capacidad para recolectar y transmitir datos fiables en tiempo real. En este escenario, la integración del Internet de las Cosas (IoT) y las Redes de Senso-

res Inalámbricos (WSN) representa la alternativa técnica más viable y económica. El presente proyecto adopta esta arquitectura combinada con el protocolo de comunicación Zigbee (basado en el estándar IEEE 802.15.4), el cual se destaca por su alta escalabilidad, su ultra bajo consumo energético y su idoneidad para el monitoreo in situ, convirtiéndolo en la opción más eficiente para operar redes de sensores en zonas remotas.

2.3.1 Internet de las cosas

El Internet de las Cosas (IoT) es un paradigma tecnológico que permite la interconexión continua de dispositivos a través de la red, facilitando el intercambio y procesamiento de datos físicos en tiempo real. Funciona como un ecosistema donde múltiples objetos (sensores, placas de desarrollo y actuadores) digitalizan la información del entorno y la transmiten a servidores alojados en la nube para su posterior análisis y visualización [42].

Aplicado al monitoreo de deslizamientos, el IoT permite distribuir múltiples nodos sensores a lo largo de las áreas más vulnerables de la ladera. Estos dispositivos miden de forma ininterrumpida factores de riesgo como la saturación de humedad, las vibraciones anómalas o las variaciones en la inclinación del terreno. Una vez enviados a la nube, estos datos son analizados por el sistema central, el cual emite notificaciones inmediatas si se detectan patrones precursores de un derrumbe, mejorando sustancialmente el tiempo de respuesta ante la emergencia.

Como se detalla en la Figura 11, la estructura lógica de un sistema IoT se organiza en cuatro capas fundamentales, las cuales garantizan el flujo de la información desde su captura hasta el usuario final [43]:

Figura 11.
Arquitectura IoT de 4 capas



Nota. Adaptado de [43].

- **Capa de Dispositivos y Gateways:** Corresponde al nivel de hardware físico desplegado en el terreno. Incluye todos los sensores encargados de muestrear las variables ambientales (inclinómetros, acelerómetros, pluviómetros, entre otros) y los dispositivos puente o gateways que concentran los datos locales antes de enviarlos a Internet.

- **Capa de Red:** Es el canal de comunicación encargado de movilizar la información desde el entorno físico hacia los servidores. Dependiendo de los requerimientos de distancia y consumo energético, emplea protocolos inalámbricos de corto o largo alcance como Wi-Fi, LoRa, Sigfox o Zigbee.

- **Capa de Centro de Datos:** Actúa como el cerebro del sistema. En esta capa, plataformas en la nube reciben la información en crudo, la filtran para descartar ruido e integran los datos útiles. Aquí se ejecutan los algoritmos que determinan si las lecturas superan los umbrales de seguridad establecidos.

- **Capa de Servicio de Aplicación:** Representa la interfaz final del sistema. Convierte los datos procesados en información digerible para los usuarios (tales como autoridades de gestión de riesgos o habitantes locales) a través de plataformas web, tableros de control (dashboards) o alertas móviles directas.

2.3.2 Redes WSN

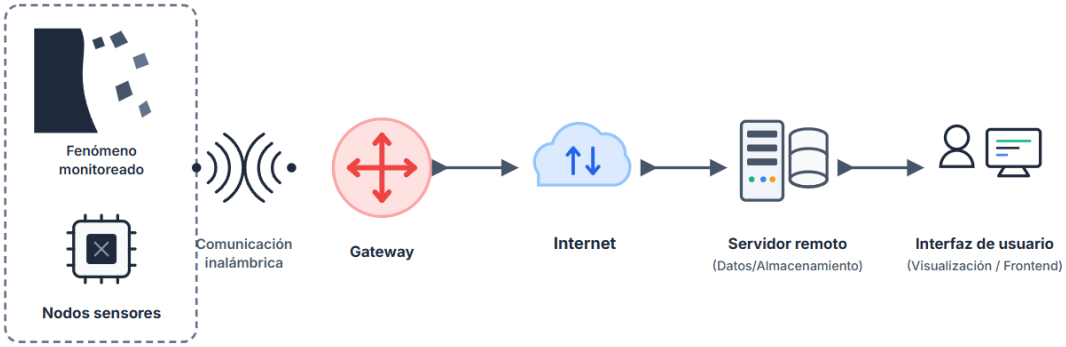
Las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés) constituyen la infraestructura fundamental para la captura y recolección de datos físicos en el entorno. Estas redes operan mediante la distribución estratégica de nodos autónomos e interconectados de manera inalámbrica. Cada nodo es un dispositivo compacto equipado con capacidad de procesamiento computacional, almacenamiento local, transceptores de radio y sensores especializados. En conjunto, estos elementos permiten capturar la información del terreno y transmitirla en ráfagas hacia estaciones centralizadas, habilitando el monitoreo continuo sin necesidad de intervención humana directa en el sitio [44].

2.3.2.1 Arquitectura de una Red WSN

Una red WSN típica no opera de forma homogénea; se compone de múltiples nodos que asumen diferentes roles para garantizar la eficiencia de las comunicaciones. Para transmitir los datos, los dispositivos emplean protocolos estandarizados (como LoRa, Wi-Fi o Zigbee), encaminando los paquetes de información desde los extremos de la red hasta una puerta de enlace (gateway).

Cuando una red WSN se integra bajo el ecosistema IoT, se logra un nivel superior de robustez y escalabilidad [45]. Como se ilustra en la Figura 12, esta arquitectura abarca desde los nodos sensores distribuidos en el campo, pasando por el canal inalámbrico y el gateway, hasta llegar a los servidores remotos encargados de procesar la telemetría y presentarla a través de interfaces visuales.

Figura 12.
Arquitectura general de una WSN para IoT

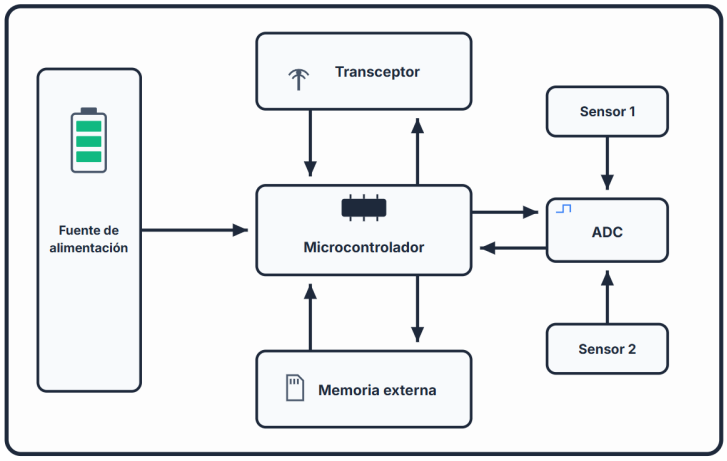


Nota. Adaptado de [45].

En la topología de la red, los nodos sensores capturan los datos y, a menudo, actúan como enrutadores retransmitiendo la información de sus vecinos. Estos datos fluyen en saltos sucesivos hasta alcanzar el nodo coordinador o gateway. Este último actúa como el maestro del sistema, conectando la red local inalámbrica con Internet para derivar los datos a la nube [44].

A nivel de hardware individual, cada nodo de la WSN es un microsistema embebido. Como muestra la Figura 13, la arquitectura interna clásica se compone de unidades dedicadas para el procesamiento, la transmisión, el censado y el manejo de energía [46]:

Figura 13.
Arquitectura de un nodo sensor



Nota. Adaptado de [46].

- **Sensores:** Encargados de captar las magnitudes físicas del entorno. Las señales analógicas se digitalizan mediante un conversor analógico-digital (ADC) incorporado en el microcontrolador o en el propio sensor.
- **Microcontrolador:** Es el núcleo de procesamiento. Gobierna la adquisición de datos, gestiona la energía del nodo y prepara los paquetes de información para su envío.
- **Transceptor:** Módulo de radiofrecuencia responsable de la transmisión y recepción inalámbrica de datos hacia la pasarela u otros nodos.
- **Memoria:** Almacenamiento no volátil o temporal utilizado para registrar datos de forma transitoria antes de su transmisión o para conservar la configuración del sistema.
- **Fuente de alimentación:** Generalmente baterías de litio, apoyadas en ocasiones por sistemas de recolección de energía (*energy harvesting*) como pequeños paneles solares, vitales para el funcionamiento autónomo a largo plazo.

Dependiendo de la jerarquía impuesta por el protocolo de comunicación, los nodos asumen diferentes roles lógicos, tales como nodos sensores finales, nodos enrutadores (con mayor carga de retransmisión) y nodos coordinadores o pasarelas [44].

2.3.2.2 Características Comunes de las WSN

Las WSN poseen atributos técnicos inherentes que las convierten en la solución idónea para sistemas críticos como el monitoreo de deslizamientos [47]:

1. **Tolerancia a fallos:** La red está diseñada para continuar operando incluso si uno o varios nodos quedan fuera de línea por daños ambientales o agotamiento de batería.
2. **Topología dinámica y autogestión:** Los dispositivos pueden reconfigurar automáticamente sus rutas de comunicación si detectan obstáculos, caídas de señal o la incorporación de nuevos nodos.

3. **Consumo energético ultra bajo:** Dado que los nodos permanecen en reposo (*sleep mode*) la mayor parte del tiempo y solo despiertan para medir y transmitir, su vida útil se maximiza.

4. **Escalabilidad:** La arquitectura permite añadir decenas o cientos de sensores a la malla inalámbrica de forma orgánica, sin requerir reprogramaciones extensivas de la infraestructura central.

5. **Despliegue no intrusivo:** Al ser inalámbricos y alimentados por baterías, se pueden instalar en terrenos escarpados o remotos donde el cableado tradicional es imposible.

Para los Sistemas de Alerta Temprana, estas características garantizan que los sensores capten y transmitan, de manera ininterrumpida y desde las zonas más inaccesibles, parámetros decisivos como el contenido de agua en el suelo y las alteraciones mecánicas del talud, facilitando una respuesta preventiva eficaz [45].

2.3.3 Protocolo de transmisión de datos ZigBee

La tecnología ZigBee comprende un conjunto de protocolos de comunicación estandarizados que brindan un soporte fundamental a las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN). Su arquitectura está diseñada específicamente para satisfacer los requisitos de aplicaciones que demandan conexiones inalámbricas seguras, bajas tasas de transferencia de datos y, sobre todo, una optimización extrema en la vida útil de las baterías, superando en eficiencia energética a otras tecnologías como Wi-Fi o Bluetooth clásico [48]. Estas cualidades facilitan el monitoreo continuo y el control remoto de dispositivos desplegados en la red [44].

En la práctica, ZigBee es un estándar de comunicación ideal para crear mallas inalámbricas con un alcance típico de hasta 100 metros entre nodos adyacentes, dependiendo del entorno físico. El protocolo opera globalmente en la banda libre de 2.4 GHz, aunque también soporta las frecuencias de 868 MHz y 915 MHz, alcanzando una velocidad de transmisión máxima teórica de 250 Kbps. Dado que su objetivo primordial es maximizar la autonomía energética,

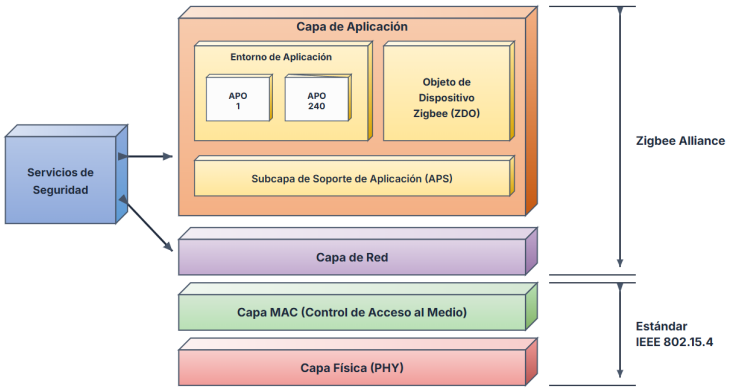
los módulos ZigBee permanecen la mayor parte de su ciclo operativo en modo de suspensión (*sleep mode*), despertando únicamente en fracciones de segundo para transmitir ráfagas de telemetría antes de volver a un estado de consumo mínimo [37], [44].

2.3.3.1 Arquitectura ZigBee

El ecosistema ZigBee no se construye desde cero, sino que se asienta sobre cimientos estandarizados. Según la arquitectura descrita por Velasco Iglesias [46] y las normativas internacionales [49], el estándar IEEE 802.15.4 rige las capas inferiores (la capa Física y la capa de Control de Acceso al Medio o MAC) responsables del bajo consumo y la modulación de las ondas electromagnéticas. Sobre esta sólida base, la ZigBee Alliance (actualmente Connectivity Standards Alliance) aporta las capas superiores de Red, Seguridad y Aplicación, encargadas del enrutamiento complejo y la estandarización lógica de los dispositivos [48].

Como se detalla en la Figura 14, la interacción combinada de ambos estándares conforma una pila de protocolos (*protocol stack*) jerárquica y completa:

Figura 14.
Protocolo IEEE 802.15.4 y ZigBee



Nota. Adaptado de [46].

- **Capa Física:** La capa física es el puente directo hacia el hardware de radiofrecuencia (transceptor). Su labor principal es la activación y desactivación del radio, la modulación de las señales y la selección del canal operativo tras realizar una evaluación previa

de la calidad de señal y ruido electromagnético en el ambiente.

En la Tabla 2 se detallan las características operativas de las bandas de frecuencia soportadas por la capa física del estándar IEEE 802.15.4.

Tabla 2.
Bandas de frecuencia usadas por el protocolo IEEE 802.15.4

Banda	Frecuencia	Canales	Velocidad	Modulación	Tasa de Datos
868 MHz	868-868.8 MHz	1	300 kchip/s	BPSK	20 kb/s
915 MHz	902-928 MHz	10	600 kchip/s	BPSK	40 kb/s
2.4 GHz	2.4-2.4835 GHz	16	2.0 Mchip/s	O-QPSK	250 kb/s

Nota. Adaptado de [46].

- **Capa MAC:** La subcapa de Control de Acceso al Medio (MAC) rige el acceso al canal de radio, evitando colisiones cuando múltiples nodos intentan transmitir simultáneamente mediante el uso del algoritmo CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) [37]. Además de ensamblar las Unidades de Datos del Protocolo (PDU), la capa MAC garantiza la sincronización estricta de la red mediante el envío periódico de tramas baliza (*beacons*), un proceso indispensable para coordinar los ciclos de suspensión de los nodos.

- **Capa de Red:** La capa de Red (Network Layer) es la responsable directa del descubrimiento y enrutamiento inteligente de los mensajes. Implementa los algoritmos matemáticos que calculan la mejor ruta de salto en salto para garantizar que un paquete de datos llegue desde el sensor más recóndito hasta el servidor central, incluso en escenarios con obstáculos móviles o topologías cambiantes, soportando mecanismos robustos de autorreparación de rutas [48].

- **Capa de Aplicación:** Situada en la cúspide de la pila, la capa de Aplicación alberga los objetos lógicos y las rutinas específicas de la tarea del nodo. ZigBee define perfiles de aplicación estandarizados, lo que permite que sensores, actuadores y pasarelas de

distintos fabricantes interactúen entre sí de manera transparente y sin conflictos de compatibilidad en una misma malla [37].

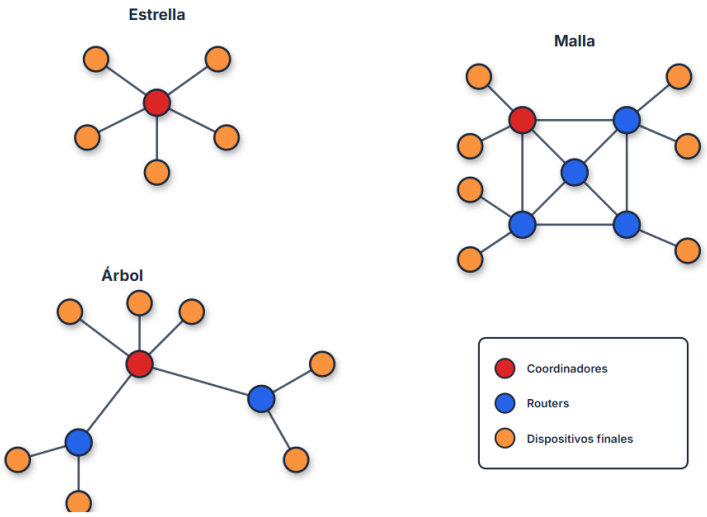
2.3.3.2 Tipos de Nodos y Topologías de Red

Para operar una malla estable, el protocolo ZigBee define tres roles lógicos que los dispositivos deben asumir dentro de la red, los cuales se dividen a nivel de hardware en Dispositivos de Función Completa (FFD) y Dispositivos de Función Reducida (RFD) [37], [46]:

- **Coordinador (ZC):** Es un nodo FFD que actúa como el cerebro absoluto y el único indispensable para iniciar la red. Selecciona el canal libre, asigna identificadores de red (PAN ID) y permite que nuevos nodos se unan. Suele mantenerse encendido permanentemente y actúa como la puerta de enlace principal hacia el sistema central.
- **Enrutador (ZR):** Es también un nodo FFD que actúa como un intermediario o repetidor. Su función es recibir paquetes de nodos distantes y retransmitirlos para extender el alcance geográfico de la red. Debe estar siempre activo para no romper las rutas de comunicación.
- **Dispositivo Final (ZED):** Es un nodo RFD, siendo el dispositivo más simple y el encargado exclusivo de recolectar datos del entorno. Al no tener responsabilidades complejas de enrutamiento ni requerir excesiva memoria, puede entrar en modo de suspensión profunda, despertando solo para enviar sus lecturas a su nodo padre (enrutador o coordinador) [48].

El modo en que estos nodos se distribuyen geométricamente define la topología de la red. Como se ilustra en la Figura 15, existen tres estructuras clásicas soportadas por el estándar:

Figura 15.
Topologías de una red ZigBee



Nota. Adaptado de [46].

1. **Topología Estrella:** Todos los nodos finales se conectan exclusivamente con el coordinador central. Aunque es simple de implementar y consume pocos recursos, presenta un único punto de fallo y un alcance limitado estrictamente al radio de cobertura del coordinador [37].

2. **Topología Árbol:** El coordinador actúa como la raíz, y de él se desprenden ramas formadas por enrutadores y nodos finales. Permite mayor alcance territorial, pero si un enrutador intermedio falla, todos sus nodos dependientes quedan aislados de la red [48].

3. **Topología Malla (Mesh):** Es la estructura más avanzada y recomendada para entornos críticos. Los enrutadores y coordinadores pueden comunicarse libremente entre sí estableciendo múltiples caminos redundantes. Si un nodo falla o se bloquea por un obstáculo físico (como un pequeño desprendimiento de tierra), la red recalcula instantáneamente una ruta alternativa para asegurar la entrega de la información al servidor central [37], [50].

2.3.3.3 Características Principales

La adopción de ZigBee en sistemas de monitoreo ambiental y de infraestructura crítica no es casual. Investigaciones centradas en el despliegue híbrido de redes de sensores han consolidado a este protocolo como una de las soluciones más viables [50]. Sus ventajas competitivas incluyen:

- **Alta tolerancia a fallos:** La topología de malla (*mesh*) nativa garantiza una conectividad continua. Si un camino se interrumpe, la red se autorrepara desviando el tráfico por nodos vecinos ilesos.
- **Extrema eficiencia energética:** El riguroso manejo de los modos de suspensión permite que los dispositivos finales operen durante mucho tiempo con baterías de baja capacidad.
- **Despliegue rápido y escalable:** La arquitectura modular autoriza la inserción espontánea de nuevos nodos sin necesidad de reconfigurar toda la red.
- **Seguridad robusta:** ZigBee implementa criptografía avanzada, control de accesos y autenticación.
- **Interoperabilidad y bajo costo:** Su modelo de código abierto y uso de perfiles estándar asegura que equipos de diversos fabricantes puedan convivir económicamente en una misma red.
- **Adecuación del ancho de banda:** Dado que los sensores registran variables que generan datos muy bajos, los 250 Kbps de ZigBee son más que suficientes, evitando el gasto energético de protocolos más pesados.

En síntesis, la integración de la arquitectura de las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) con la robustez del protocolo ZigBee proporciona la base tecnológica ideal para el diseño de

este Sistema de Alerta contra deslizamientos de tierra. Al garantizar un consumo bajo de energía, una topología de red resiliente y una transmisión confiable de datos, esta tecnología aborda de manera directa y eficiente los desafíos logísticos que impone el monitoreo continuo en áreas geográficas complejas, escarpadas y de difícil acceso.

CAPÍTULO III

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Este capítulo presenta el desarrollo del sistema de monitoreo. Se detalla esl Modelo en V como la metodología de ingeniería seleccionada para guiar el desarrollo del prototipo. El capítulo avanza secuencialmente a través de las fases de este modelo, comenzando con las características del sitio de despliegue y la definición formal de los requerimientos. Basado en estos criterios, se presenta el proceso de selección de componentes de hardware y software mediante un análisis comparativo. Posteriormente, se expone el diseño detallado del sistema, incluyendo la arquitectura general, los esquemáticos electrónicos y el funcionamiento del sistema.

3.1 Metodología

A continuación, se detalla la metodología seleccionada para el desarrollo e implementación del sistema de monitoreo. Se define el tipo de investigación que enmarca el proyecto y se adopta el Modelo en V como el modelo de desarrollo, justificando su idoneidad sobre alternativas más lineales para un proyecto que integra hardware y software.

3.1.1 Tipo de Investigación

Este trabajo se enmarca en tres tipos de investigación que se complementan:

- **Investigación Aplicada:** El proyecto no busca desarrollar nuevas teorías geológicas sobre deslizamientos, sino que se enfoca en la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad. El objetivo es aplicar conocimientos existentes

en tecnologías como IoT y WSN para resolver el problema práctico y específico del riesgo de deslizamientos en el sector el Guadual.

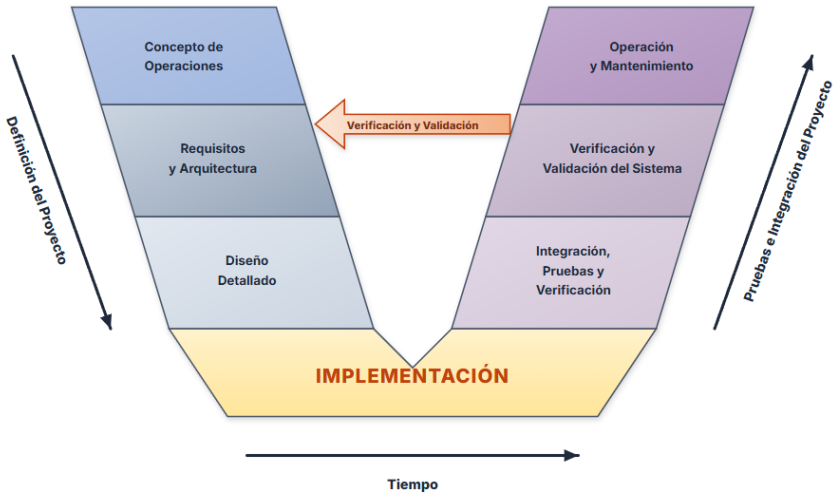
- **Investigación de Campo:** Se define como un diseño que se basa en la información o datos primarios, obtenidos directamente de la realidad. El desarrollo del proyecto exige la caracterización del sitio de despliegue, la instalación física de hardware en el talud y la recolección de datos in situ.
- **Investigación Experimental:** El proyecto implica la manipulación de una o más variables (independientes) para analizar las consecuencias sobre una o más variables (dependientes). En este caso, la variable independiente es el sistema IoT que se diseña e implementa, y las variables dependientes son los parámetros de riesgo (precipitación, humedad, vibración, inclinación) que se miden para generar una alerta efectiva.

3.1.2 Metodología de trabajo

Si bien este proyecto sigue una progresión secuencial (diseño, implementación, pruebas), se descarta el modelo en Cascada tradicional por su principal debilidad, que es la postergación de las pruebas hasta el final del ciclo. En un sistema de hardware y software como este, un error de diseño no detectado a tiempo puede comprometer el proyecto. Por esta razón, se adopta el Modelo en V, una evolución del modelo secuencial que integra la Verificación y la Validación (V&V) en paralelo con el diseño.

El Modelo en V es una metodología donde la ejecución de los procesos ocurre de forma secuencial en forma de “V”. Como se observa en la Figura 16, el modelo en V representa una relación directa entre las fases de desarrollo y sus correspondientes fases de prueba [51].

Figura 16.
Modelo en V



Nota. Recuperado de [52].

El beneficio principal del Modelo en V es la mitigación de riesgos mediante la detección temprana de defectos. Para un sistema que integra hardware expuesto a la intemperie con software de comunicación y de alerta, un riesgo importante es el fallo de integración.

A diferencia del Cascada clásico, donde los errores de diseño se detectan tarde, el Modelo en V vincula las pruebas a los requisitos y al diseño, lo cual es esencial para sistemas integrados [53]. Al planificar las pruebas de aceptación mientras se definen los requisitos, se asegura que el producto final cumpla con su objetivo.

3.2 Situación actual

Las condiciones físicas, ambientales y logísticas del sitio de implementación son el principal insumo para el diseño técnico. Por lo tanto, esta sección se incluye para establecer que la caracterización del sitio no es un contexto secundario, sino que actúa como la fuente primaria para el análisis del diseño.

La ingeniería de sistemas IoT moderna prioriza el diseño basado en el contexto, donde el sistema debe estar adaptado a su entorno operativo para garantizar la fiabilidad, la sostenibi-

lidad y la precisión de los datos [54]. Un análisis del entorno es indispensable, ya que la influencia ambiental impacta directamente el rendimiento y la fiabilidad de las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN), afectando desde la vida útil de la batería hasta la potencia de la señal [55].

3.2.1 Ubicación geográfica y características del terreno

El sitio de implementación del proyecto se localiza en la provincia de Imbabura, cantón Ibarra, en el área de influencia de la parroquia La Carolina. Específicamente, el sistema se centra en la falla geológica activa del sector el Guadual, cubriendo el tramo de la carretera E10 (Ibarra - San Lorenzo) entre los kilómetros 114 y 115 [56]. Un informe técnico del Ministerio de Transporte y Obras Públicas precisa la zona de intervención en la abscisa 114+400, entre los kilómetros 113+900 y 114+900 [57]. Esta vía es un corredor estratégico que conecta la Sierra norte con la provincia de Esmeraldas.

Topográficamente, la zona de estudio se encuentra cerca de la vía, en un cañón adyacente al río Mira [57], [58]. El factor de riesgo predominante es la morfología del terreno. El MTOP describe la topografía como “montañosa con taludes muy escarpados”, con pendientes transversales que varían entre el 60 % y el 85 %. El material del talud es predominantemente rocoso, propenso a la meteorización y fractura, lo que ha requerido trabajos de estabilización mediante detonación controlada [59].

Debido a esta alta fragilidad física, el sector es un punto de riesgo crítico recurrente. El cantón Ibarra se encuentra entre los de mayor recurrencia de eventos de deslizamiento a nivel nacional [7]. Como resultado de esta inestabilidad, la Secretaría de Gestión de Riesgos mantiene alertas vigentes para la provincia de Imbabura, fundamentadas en el aumento de precipitaciones y deslizamientos de tierra.

3.2.1.1 Actividad sísmica y riesgos endógenos

El sector el Guadual se asocia a la cuenca media del río Mira, una zona de alta complejidad tectónica caracterizada por la presencia de fallas geológicas activas que atraviesan la Cordillera Occidental [60]. La región se encuentra bajo la influencia de sistemas de fallas regionales como la falla de Otavalo y la falla del Río Mira, las cuales han generado enjambres sísmicos recientes con magnitudes de entre 2.5 y 3.5 MLv [60]. Esta actividad sísmica recurrente actúa como un factor desencadenante de inestabilidad, ya que las vibraciones telúricas comprometen la cohesión mecánica de los taludes escarpados del sector, incrementando el riesgo de deslizamientos durante la temporada invernal.

3.2.1.2 Ubicación de referencia y coordenadas

Para efectos de localización técnica y monitoreo remoto, el área crítica de intervención en el kilómetro 114 de la vía E10 se identifica bajo las siguientes coordenadas de referencia geográfica:

- **Latitud:** 0.736590832507638
- **Longitud:** -78.23340676704979

Este punto se localiza en la parroquia rural La Carolina, específicamente a unos 3 km al sureste del centro poblado de San Jerónimo [57]. El sitio corresponde a un corte de montaña agresivo cerca de la vía, donde la calzada se encuentra confinada entre el talud inestable y el cauce del río Mira.

3.2.1.3 Contexto poblacional y potencial turístico

De acuerdo con los resultados del censo poblacional, la parroquia La Carolina cuenta con una población total de 3,258 habitantes, lo que refleja un asentamiento predominantemente

rural y disperso [61]. La población es mayoritariamente afroecuatoriana, con una rica herencia cultural [62].

Más allá de la dinámica local, el sector El Guadual es un punto crítico en la Red Vial Estatal E10, considerada la principal arteria de conexión entre la Sierra Norte (provincias de Imbabura y Carchi) y la Costa ecuatoriana (provincia de Esmeraldas). Esta carretera es la ruta predilecta de miles de ciudadanos que se desplazan hacia los balnearios del norte del país, especialmente durante periodos de feriados [57].

En el ámbito turístico, el sector es parte del corredor estratégico Ibarra–San Lorenzo, el cual atrae visitantes interesados en el ecoturismo y turismo de aventura [62]. No obstante, la inestabilidad recurrente en el kilómetro 114 ha impactado severamente el flujo turístico y la seguridad de los pasajeros; se han registrado múltiples siniestros en este tramo, lo que subraya la urgencia de implementar el sistema de alerta [63].

3.2.2 Condiciones climáticas y ambientales

La caracterización climática del sector El Guadual es determinante para el diseño del sistema IoT, ya que los agentes meteorológicos actúan como los principales detonantes de los movimientos en masa. De acuerdo con el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) de la parroquia La Carolina, el clima predominante se clasifica como subtropical mesotérmico húmedo y cálido húmedo [62].

3.2.2.1 Pluviosidad y humedad

La precipitación es el factor crítico de riesgo en El Guadual. Históricamente, la parroquia presenta un rango de pluviosidad anual que oscila entre los 500 mm y los 2000 mm [62]. Durante la temporada invernal, las lluvias intensas provocan la saturación de los suelos, reduciendo su cohesión mecánica y facilitando el colapso de los taludes. Un evento significativo ocurrió en diciembre de 2021, cuando precipitaciones extremas causaron el colapso de aproxima-

damente 150 metros de la mesa de la vía en el kilómetro 114, dejando la zona incomunicada [64].

En cuanto a la humedad relativa, el diagnóstico biofísico de la parroquia La Carolina identifica valores medios que oscilan entre el 75 % y el 90 %, con tendencia a incrementarse durante los períodos de mayor pluviosidad [62]. Este nivel de humedad y la presencia de partículas de agua en suspensión representan un factor de atenuación para la propagación de señales en la banda de 2.4 GHz, utilizada por la tecnología ZigBee, lo que exige una planificación detallada del enlace de radio.

3.2.2.2 Temperatura y condiciones operativas

La temperatura en el área varía generalmente entre los 15 °C y los 26 °C, dependiendo de la estacionalidad y la nubosidad [61]. Estas variaciones térmicas, sumadas a la alta radiación UV y la humedad, imponen requerimientos estrictos de diseño para los nodos sensores. El hardware debe contar con carcasas de protección con grado de estanqueidad (IP65 o superior) para prevenir la corrosión de los componentes electrónicos y asegurar la estabilidad de las mediciones de los sensores de vibración e inclinación.

3.2.3 Estado actual del monitoreo o vigilancia

En la actualidad, el monitoreo del sector El Guadual carece de un sistema de alerta temprana (SAT). La vigilancia de la estabilidad del talud y de la transitabilidad de la vía E10 depende primordialmente de métodos convencionales y reactivos, los cuales se describen a continuación:

3.2.3.1 Monitoreo institucional y técnico

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) y la Secretaría de Gestión de Riesgos realizan inspecciones visuales periódicas y evaluaciones geológicas post-evento. Según reportes institucionales, el monitoreo actual se basa en notificaciones de vigías comunitarios y patrullajes de la Policía Nacional, quienes reportan obstrucciones en la vía una vez que el fenómeno ya ha ocurrido [58]. Este modelo presenta una latencia de respuesta, ya que no permite la detección de micro-movimientos o variaciones de humedad que preceden a un deslizamiento mayor.

3.2.3.2 Instituciones de primera respuesta y logística de emergencia

Debido a la ubicación del sector El Guadual, la eficacia de la respuesta depende de la proximidad de las unidades de socorro. Las instituciones articuladas al Servicio Integrado de Seguridad ECU 911 que cubren esta zona son:

- **Cuerpo de Bomberos Ibarra (Estación Lita):** Es la unidad de respuesta más cercana, ubicada aproximadamente a 15 km del sector crítico. A pesar de su proximidad, la topografía accidentada y la posible caída de escombros pueden retrasar su llegada.
- **Policía Nacional (Destacamento Salinas/Lita):** Encargados del control del flujo vehicular y cierre de la vía. Su actuación es estrictamente operativa ante la confirmación de un evento.
- **Ministerio de Salud Pública (Centro de Salud Lita):** Provee la atención prehospitalaria inicial.

3.2.4 Condiciones técnicas para la implementación

El despliegue del sistema IoT en el sector El Guadual requiere una infraestructura híbrida que garantice la captura de datos en el talud y su posterior transmisión a la red. La viabilidad técnica se fundamenta en los siguientes criterios de ingeniería:

3.2.4.1 Arquitectura de red y conectividad híbrida

Se implementará una Red de Sensores Inalámbricos (WSN) compuesta por nodos finales (End Devices) y un nodo central (Gateway). Cada nodo final integrará los siguientes sensores: un pluviómetro para precipitación, un sensor capacitivo para humedad de suelo, y un acelerómetro/giroscopio para medir inclinación y vibración del terreno.

La comunicación interna de la WSN se realizará mediante el protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4) debido a su bajo consumo de energía. Sin embargo, para la fase de publicación de datos y alertas, el sistema requiere conexión a internet. Tras el análisis de campo, se va a determinar qué operadoras específicas proveen cobertura celular estable en el sector. Por tanto, el Gateway actuará como puente, recolectando datos vía ZigBee y retransmitiéndolos a un servidor web mediante un módem USB que permite la comunicación celular y el uso de datos móviles.

3.2.4.2 Análisis de propagación y modelo de pérdidas

Debido a la topografía irregular y la composición del suelo en El Guadual, no se puede asumir una propagación de espacio libre perfecta. Para el análisis del enlace, se considera el modelo de Log-distancia con sombreado (*Log-normal Shadowing*). Este modelo permite estimar la pérdida de trayectoria considerando el índice de pérdida y el desvanecimiento provocado por los obstáculos naturales, según la ecuación general:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \tag{3.1}$$

Donde X_σ representa el componente de sombreado (*shadowing*) debido a la vegetación y la humedad del aire del sector [65]. Este análisis es de gran utilidad para asegurar que los paquetes de datos de los nodos lleguen al Gateway sin pérdida de integridad, incluso bajo condiciones de lluvia intensa.

3.2.4.3 Procesamiento de alertas y respuesta

El nodo central procesará las señales comparándolas con umbrales de seguridad preestablecidos basados en la saturación del suelo y la aceleración sísmica. Si las mediciones superan los límites operativos, el sistema ejecutará un protocolo de respuesta inmediata en tres niveles [11]:

- **Publicación Web:** Actualización del panel de control IoT con el estado de alerta correspondiente.
- **Notificación Digital:** Envío de mensajes de emergencia mediante aplicaciones de mensajería (como la API de Telegram) a los grupos de gestión de riesgos.
- **Alerta Local:** Activación de alarmas sonoras y visuales situadas en la carretera para advertir de forma inmediata a los conductores que transitan por la zona crítica.

3.2.5 Análisis de campo

Como parte fundamental del desarrollo del proyecto, se llevó a cabo una visita técnica al sector de El Guadual con el objetivo de validar empíricamente las condiciones del entorno. Esta etapa permitió evaluar la viabilidad de la instalación de los componentes del sistema IoT, enfocándose en la topografía del terreno y la disponibilidad de conectividad hacia la nube.

3.2.5.1 Inspección visual del terreno y ubicación de sensores

Durante el recorrido por el kilómetro 114 de la vía E10, se constató la alta complejidad morfológica del sitio. Como se evidencia en la Figura 17, el talud adyacente a la carretera presenta una pendiente pronunciada, caracterizada por material rocoso altamente fracturado y la acumulación constante de escombros en la base. Estas observaciones iniciales confirman la fragilidad mecánica general de la ladera y su propensión a deslizamientos.

Figura 17.
Condiciones topográficas generales del talud en el sector El Guadual



Nota. Fotografía capturada durante la inspección técnica en el sitio de estudio. Autoría propia

Al analizar en detalle la composición del talud, se identificaron áreas con características geológicas diferenciadas. Mientras que amplias secciones de la ladera están compuestas por macizos de roca sólida que presentan un menor riesgo inminente, existen focos específicos de alta inestabilidad. Como se ilustra en la Figura 18, ciertas zonas exhiben una mezcla de material disgregado, tierra suelta y fragmentos rocosos sin cohesión aparente.

Figura 18.
Zona del talud propensa a deslizamientos



Nota. Sector identificado con mayor susceptibilidad al desprendimiento de material. Autoría propia

Con base en esta inspección, se determinó que estas zonas de material disgregado representan los puntos tentativos óptimos para la instalación de los nodos sensores (End Devices). Para asegurar que el monitoreo sea representativo, la instrumentación debe focalizarse exclusivamente en estas áreas propensas al deslizamiento y no en la roca estable. Por otro lado, se estableció que el nodo central (Gateway) debe instalarse en una zona ligeramente más baja y despejada, cercana a la calzada, para facilitar su mantenimiento y asegurar línea de vista hacia los nodos superiores.

3.2.5.2 Evaluación de cobertura de red celular

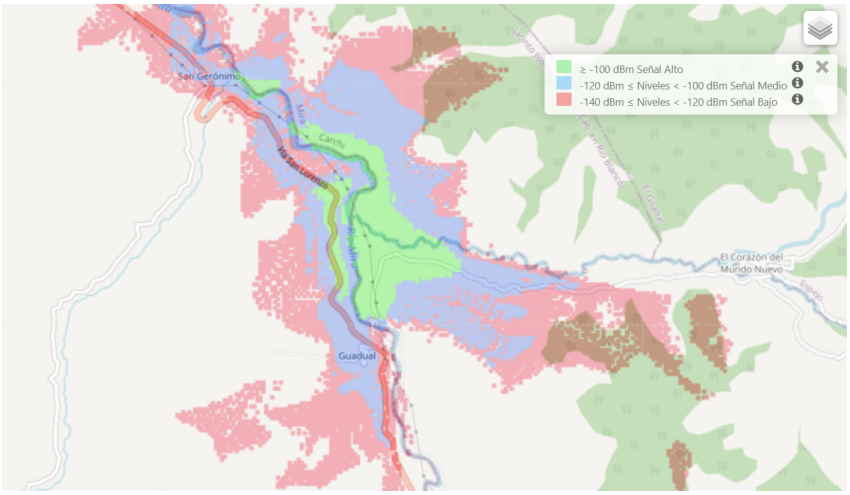
Para que el Gateway pueda transmitir las alertas en tiempo real hacia el servidor central, resulta indispensable contar con una conexión a internet estable. En términos de hardware, el diseño contempla el uso de un módem USB conectado al microcontrolador principal, en el cual se insertará una tarjeta SIM (chip) para establecer el enlace de datos. Por lo tanto, durante la visita se ejecutaron pruebas de intensidad de señal utilizando equipos móviles de las tres principales operadoras de telecomunicaciones del país (Claro, CNT y Movistar).

Los resultados obtenidos en campo fueron concluyentes:

- **Movistar:** Ausencia total de señal (zona de sombra).
- **CNT:** Cobertura intermitente bajo tecnología 3G, con niveles de señal bajos que no garantizan la transmisión ininterrumpida de datos críticos.
- **Claro:** Cobertura estable bajo tecnología 4G (LTE), con niveles de señal óptimos para la transmisión de telemetría.

Estos resultados empíricos concuerdan con el mapa de cobertura celular referencial provisto por la operadora, ilustrado en la Figura 19, el cual muestra niveles de señal aceptables a lo largo del cañón del río Mira en el área específica de El Guadual [66].

Figura 19.
Mapa de cobertura celular en la zona de El Guadual



Nota. Zonas de cobertura según datos oficiales de la operadora Claro [66].

Por consiguiente, la validación de campo ratifica la viabilidad técnica de utilizar un módem USB celular integrado en el Gateway, el cual operará exclusivamente con un chip de Claro, garantizando así la conectividad continua del Sistema de Alerta con la nube.

3.3 Requerimientos

Esta sección describe las necesidades, restricciones y funcionalidades que el sistema IoT para el monitoreo de deslizamientos debe satisfacer. La definición de requerimientos permite establecer una línea base para la validación del prototipo, asegurando que el diseño técnico responda a la problemática real del sector El Guadual. Para una gestión estructurada, se sigue un modelo jerárquico que parte desde las expectativas de los interesados hasta las especificaciones técnicas de hardware y software.

3.3.1 Nomenclatura de requerimientos

Para facilitar la identificación, trazabilidad y control de cada requerimiento a lo largo del documento, se ha definido una nomenclatura codificada estandarizada, la cual se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3.
Nomenclatura para la clasificación de requerimientos

Código	Categoría	Descripción
RS-XX	Stakeholders	Necesidades expresadas por los actores involucrados en el proyecto.
RSIS-XX	Sistema	Funcionalidades lógicas y operativas del sistema completo.
RHW-XX	Hardware	Especificaciones físicas de componentes electrónicos y sensores.
RSW-XX	Software	Requerimientos de programación, interfaces y bases de datos.

Nota. Autoría propia.

3.3.2 Requerimientos de Stakeholders (RS)

La ingeniería de requisitos comienza con la identificación de los interesados o stakeholders, quienes definen las expectativas que el sistema debe satisfacer. De acuerdo con el estándar

ISO/IEC/IEEE 29148 [67], estos requerimientos se dividen en necesidades orientadas al usuario (enfocadas en el beneficio final) y requerimientos operacionales (enfocados en el funcionamiento técnico).

En la Tabla 4 se presentan los actores clave que intervienen en el desarrollo, supervisión y beneficio del sistema de monitoreo.

Tabla 4.
Identificación de Stakeholders del proyecto

Stakeholder	**Rol**	**Descripción e Interés**
MSc. Jaime Michilena	Director de Tesis	Responsable de la validez académica, rigor científico del proyecto, supervisor de la arquitectura de red y protocolos de telecomunicaciones.
MSc. Jorge Benalcázar	Asesor Técnico	Responsable de la validez académica, rigor científico del proyecto, supervisor de la arquitectura de red y protocolos de telecomunicaciones.
Sr. Bryan Narváez	Desarrollador	Responsable del diseño, construcción y validación del prototipo.
Presidente GAD La Carolina	Autoridad Local	Representante de la comunidad beneficiaria del sistema de alerta.
Usuarios de la vía E10	Usuarios Finales	Disponer de una plataforma de consulta rápida para conocer el estado de seguridad del talud.

Nota. Autoría propia.

A partir de las necesidades de estos actores, se ha formulado la matriz de requerimientos operacionales fundamentales, detallada en la Tabla 5. Cada una de estas especificaciones se

clasifica mediante una jerarquía de prioridades basada en su criticidad técnica. La prioridad alta identifica aquellos requerimientos vitales cuya ejecución es obligatoria para la viabilidad del prototipo. La prioridad media comprende funcionalidades que mejorarían significativamente el sistema pero no bloquean su funcionamiento básico. Finalmente, la prioridad baja designa atributos complementarios de soporte [68].

Tabla 5.

Matriz de Requerimientos de Stakeholders (RS)

ID	Requerimiento	Alta	Media	Baja
RS-01	El sistema debe generar datos reales y reportes técnicos para sustentar la investigación.	X		
RS-02	La red de sensores debe operar bajo el estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee).	X		
RS-03	El sistema debe activar alarmas sonoras y visuales locales para alertar a los conductores de un posible deslave.	X		
RS-04	El sistema debe permitir el envío de notificaciones de alerta a los dispositivos móviles de los entes de control y el GAD.	X		
RS-05	Se debe integrar un sistema de alimentación mediante baterías portátiles para garantizar la autonomía de los nodos entre ciclos de mantenimiento programado.	X		
RS-06	Los gabinetes de los nodos instrumentados deben ser herméticos y resistentes a las condiciones climáticas del sector.	X		
RS-07	Los sensores de los nodos deben tener un diseño modular para facilitar su reemplazo en caso de avería.		X	

RS-08	Se requiere una interfaz gráfica (Dashboard) accesible vía web para la visualización del comportamiento de las variables geológicas.	X

Nota. Autoría propia.

3.3.3 Requerimientos del Sistema (RSIS)

Los requerimientos del sistema comprenden el conjunto de funcionalidades y especificaciones técnicas integrales que el prototipo debe satisfacer para asegurar su correcto despliegue y operatividad en el entorno de estudio. Estos requisitos establecen las capacidades esenciales para el funcionamiento de los nodos de la red de sensores inalámbricos (WSN), el procesamiento centralizado en el Gateway, el despliegue del Dashboard para la visualización de datos y la ejecución de los mecanismos de alerta temprana. La definición precisa de los RSIS garantiza que la interacción conjunta entre el hardware y el software responda de manera eficiente a las condiciones críticas del sector El Guadual.

La Tabla 6 detalla los requisitos operacionales que rigen el sistema de monitoreo.

Tabla 6.
Matriz de Requerimientos del Sistema (RSIS)

ID	Requerimiento	Alta	Media	Baja
Requerimientos de los Nodos Sensores				
RSIS-01	El sistema debe realizar la recolección continua y periódica de datos de humedad del suelo, inclinación, vibración y nivel de precipitación.	X		

RSIS-02	Los nodos sensores deben transmitir los datos capturados de forma inalámbrica mediante el protocolo Zigbee (IEEE 802.15.4) hacia el nodo coordinador central (Gateway).	X
RSIS-03	Los nodos sensores deben operar de forma autónoma mediante baterías, garantizando continuidad operacional durante los intervalos de mantenimiento programado sin acceso a red eléctrica convencional.	X
RSIS-04	Cada nodo sensor debe alojarse en un gabinete con grado de protección suficiente para resistir las condiciones climáticas del entorno de monitoreo.	X
Requerimientos del Gateway		
RSIS-05	El nodo coordinador (Gateway) debe recibir los datos enviados por los nodos sensores a través del protocolo Zigbee, procesarlos y compararlos con los umbrales de seguridad predefinidos para determinar el estado de alerta.	X
RSIS-06	El Gateway debe gestionar de forma simultánea la comunicación inalámbrica Zigbee y la salida a internet mediante conectividad celular, manteniendo ambos canales operativos.	X
RSIS-07	El sistema debe publicar los datos procesados hacia una plataforma de almacenamiento en la nube en tiempo real, de modo que los datos estén disponibles para consulta y visualización.	X

RSIS-08	El Gateway debe accionar los actuadores de alerta local (alarma sonora y alarma visual) de forma inmediata ante la detección de superación de umbrales críticos, tanto por lógica local como por comandos recibidos desde la nube.	X	
RSIS-09	El sistema debe enviar notificaciones de alerta automatizadas a los dispositivos móviles de los entes de control mediante mensajería digital, ante la detección de condiciones de riesgo.	X	
Requerimientos de Interfaz, Visualización y Alerta			
RSIS-10	La interfaz gráfica (Dashboard) debe visualizar en tiempo real el estado actual de todas las variables monitoreadas por nodo, actualizándose automáticamente.	X	
RSIS-11	El Dashboard debe mostrar el historial de datos almacenados, permitiendo la consulta de registros pasados por variable y nodo.		X
RSIS-12	El sistema debe permitir el control remoto de los actuadores de alerta desde el Dashboard web, mediante comandos enviados desde la nube hacia el Gateway.	X	

Nota. Autoría propia.

3.3.4 Requerimientos de Hardware (RHW)

Los requerimientos de hardware definen las especificaciones físicas, eléctricas e interfaces que los componentes electrónicos deben poseer para garantizar la integridad estructural y el

funcionamiento del sistema bajo las condiciones geográficas y climáticas del sector el Guadual. Estos requisitos establecen las capacidades en cuanto a procesamiento, interfaces de comunicación, sensibilidad de detección y autonomía energética, indispensables para la selección objetiva de los componentes y la gestión del riesgo en tiempo real.

En la Tabla 7 se presenta la matriz de requerimientos físicos e instrumentales.

Tabla 7.
Matriz de Requerimientos de Hardware (RHW)

ID	Requerimiento	Alta	Media	Baja
Requerimientos de los Nodos Sensores				
RHW-01	La placa de control de cada nodo sensor debe disponer de entradas analógicas suficientes para conectar simultáneamente todos los sensores del nodo.	X		
RHW-02	La placa de control debe disponer de buses de comunicación digital (I2C y/o SPI) y al menos un puerto UART disponible para la integración de sensores digitales y el módulo de comunicación inalámbrica.	X		
RHW-03	La placa de control debe operar con un voltaje de alimentación compatible con el sistema de energía del nodo y con los sensores seleccionados, sin requerir conversores de nivel adicionales.	X		
RHW-04	La placa de control debe ser compatible con un módulo de expansión estándar que permita la integración directa del módulo de comunicación Zigbee.	X		
Requerimientos del Gateway				

RHW-05	El Gateway debe disponer de capacidad de memoria RAM y almacenamiento suficiente para ejecutar de forma simultánea el sistema operativo, el servicio de recepción de datos Zigbee, el procesamiento de datos y el envío hacia la nube.	X
RHW-06	El Gateway debe contar con puertos de conexión suficientes para la integración simultánea del módulo de comunicación Zigbee y del módulo de conectividad celular, sin conflictos de recursos.	X
RHW-07	El Gateway debe ejecutar un sistema operativo que permita la instalación de entornos de programación de código abierto y la gestión de periféricos de comunicación serial.	X
RHW-08	El Gateway debe exponer salidas digitales configurables para el control de los actuadores de alerta local, ya sea directamente o mediante módulos de expansión de relés.	X
Requerimientos del Módulo de Comunicación Zigbee		
RHW-09	El módulo de comunicación debe implementar el estándar Zigbee (IEEE 802.15.4), con la pila de protocolo integrada en el propio módulo, sin requerir el desarrollo ni la carga de firmware personalizado.	X
RHW-10	El módulo debe garantizar una cobertura de transmisión en campo abierto suficiente para cubrir la distancia máxima entre los nodos sensores y el Gateway en la zona de monitoreo.	X

RHW-11	El módulo debe disponer de interfaz de comunicación serial compatible con la placa de control del nodo, e integrarse sin necesidad de circuitos de adaptación de nivel adicionales.	X
RHW-12	El adaptador del módulo Zigbee para el Gateway debe proporcionar una interfaz de conexión reconocida automáticamente por el sistema operativo, sin necesidad de controladores propietarios adicionales.	X
Requerimientos de los Sensores		
RHW-13	El sensor debe poseer el rango y precisión adecuados para medir su respectiva variable física (humedad, precipitaciones o movimiento) en un entorno exterior.	X
RHW-14	La interfaz de comunicación o señal de salida debe ser directamente compatible con las entradas de la placa de control del nodo (señales digitales, I2C o analógicas).	X
RHW-15	El sensor debe operar en el rango de voltaje de 5 V para alimentarse directamente del sistema del nodo sin conversores de voltaje.	X
RHW-16	El consumo de corriente en operación debe ser bajo para asegurar la autonomía energética del nodo alimentado por baterías.	X
Requerimientos de las Alarmas		

RHW-17	El sistema debe integrar una alarma sonora activada por señal digital desde el Gateway, que alerte a los usuarios de la vía ante una condición de riesgo.	X
RHW-18	El sistema debe integrar una alarma visual activada por señal digital desde el Gateway.	X
RHW-19	El sistema debe enviar mensajes de alerta a dispositivos móviles de los entes de control ante la detección de condiciones de riesgo, utilizando un servicio de mensajería digital.	X
RHW-20	Los actuadores de alerta deben poder activarse tanto por la lógica local del Gateway como por comandos remotos recibidos desde la plataforma en la nube.	X
Requerimientos del Módulo USB para Conectividad Celular		
RHW-21	El módulo de conectividad celular debe ser compatible con redes móviles de datos y reconocido por el sistema operativo del Gateway como interfaz de red, sin necesidad de controladores propietarios adicionales.	X
RHW-22	El módulo celular debe ser compatible con las frecuencias y tecnologías de red de la operadora con cobertura disponible en el sector El Guadual, garantizando conectividad estable para la transmisión de datos.	X
Requerimientos de Energía		

RHW-23	El sistema de alimentación de los nodos sensores debe basarse en fuentes de energía recargable, con capacidad suficiente para garantizar la operación continua durante períodos.	X
RHW-24	El sistema de alimentación debe permitir el reemplazo rápido de la batería en campo durante los ciclos de mantenimiento programados, sin necesidad de herramienta especializada.	X
Requerimientos de Protección		
RHW-25	La electrónica de cada nodo sensor y del Gateway debe alojarse en gabinetes con un grado de protección IP65, que garantice resistencia contra polvo y lluvia directa en campo.	X

Nota. Autoría propia.

3.3.5 Requerimientos de Software (RSW)

Esta sección detalla las especificaciones lógicas, los entornos de desarrollo y las plataformas de despliegue que el sistema debe implementar. Los requerimientos de software establecen las condiciones necesarias para que los nodos y el Gateway gestionen correctamente los datos capturados, los publiquen hacia la nube y la plataforma web los visualice y genere alertas en tiempo real. Se organizan en cuatro categorías: programación de los nodos y el Gateway, plataforma de base de datos en la nube, plataforma de alojamiento web (Dashboard) y servicio de mensajería de alerta.

La Tabla 8 expone la matriz de requerimientos lógicos del sistema.

Tabla 8.
Matriz de Requerimientos de Software (RSW)

ID	Requerimiento	Alta	Media	Baja
Requerimientos de Programación — Nodos Sensores				
RSW-01	El software de los nodos sensores debe desarrollarse en un lenguaje de código abierto compatible con la plataforma de hardware seleccionada, que permita la gestión de entradas analógicas, comunicación mediante buses digitales y transmisión serial hacia el módulo de comunicación inalámbrica.	X		
RSW-02	El firmware de los nodos debe implementar la lógica de construcción y transmisión de paquetes de datos, incluyendo el identificador del nodo, los valores de cada sensor y una marca de estado de lectura.	X		
Requerimientos de Programación — Gateway				
RSW-03	El software del Gateway debe desarrollarse en un lenguaje de programación de código abierto que disponga de librerías para la lectura de puertos de comunicación serial, el procesamiento de tramas de datos y la integración con plataformas en la nube.	X		
RSW-04	El software del Gateway debe implementar la lógica de comparación de los valores recibidos con los umbrales de alerta predefinidos, y ejecutar las acciones correspondientes: activación de actuadores locales y envío de notificaciones.	X		

RSW-05	El software principal del Gateway debe ejecutarse como un servicio en segundo plano con inicio automático al encender el sistema, garantizando la reanudación de operaciones tras reinicios o cortes de energía.	X	
RSW-06	El Gateway debe implementar la comunicación con la plataforma en la nube mediante protocolos seguros de transmisión de datos, para el envío de datos en tiempo real.	X	
Requerimientos de la Base de Datos en la Nube			
RSW-07	La plataforma de base de datos en la nube debe permitir la escritura y lectura concurrente de datos desde el Gateway y el Dashboard, con sincronización en tiempo real.	X	
RSW-08	La base de datos en la nube debe ofrecer librerías oficiales compatibles con el lenguaje de programación del Gateway y del Dashboard web, con soporte para actualizaciones en tiempo real.	X	
RSW-09	La plataforma de base de datos debe contar con un plan gratuito o de bajo costo operacional suficiente para el almacenamiento del historial de lecturas del prototipo durante el período de pruebas.		X
RSW-10	La plataforma de base de datos debe implementar mecanismos de control de acceso configurables para restringir el acceso de escritura y lectura según el rol del usuario o del componente del sistema.	X	

Requerimientos del Servidor Web y Dashboard			
RSW-11	La plataforma de alojamiento web debe ser accesible desde cualquier navegador web moderno sin necesidad de instalación de software adicional en el dispositivo del usuario.	X	
RSW-12	El Dashboard debe desarrollarse con tecnologías web de código abierto y conectarse a la base de datos en la nube para visualizar los datos en tiempo real.	X	
RSW-13	El Dashboard debe incluir gráficas temporales para cada variable monitoreada por nodo, con actualización automática al recibir nuevos datos.	X	
RSW-14	El Dashboard debe mostrar indicadores visuales de estado de alerta diferenciados por nivel de riesgo para cada nodo.		X
RSW-15	El Dashboard debe incluir controles de interfaz para la activación y desactivación remota de los actuadores de alerta del Gateway.	X	
Requerimientos del Servicio de Mensajería de Alerta			
RSW-16	El servicio de mensajería debe permitir el envío automatizado de notificaciones a dispositivos móviles a través de una plataforma de mensajería instantánea ampliamente adoptada, mediante una interfaz de programación (API) compatible con el lenguaje del Gateway.	X	

RSW-17	El servicio de mensajería debe contar con un plan gratuito o de bajo costo que sea suficiente para las notificaciones requeridas durante la fase de prototipado, sin requerir contratos comerciales.		X
RSW-18	Los mensajes de alerta enviados deben incluir como mínimo: identificación del nodo afectado, variable crítica, valor medido, umbral superado y marca de tiempo del evento, para facilitar la toma de decisiones de los entes de control.	X	

Nota. Autoría propia.

3.4 Selección de Hardware y Software

Una vez consolidados los requerimientos técnicos, se procede a la etapa de selección de las tecnologías de hardware y software requeridas para la construcción del prototipo. Con el fin de garantizar una toma de decisiones objetiva y rigurosa, se emplea una metodología basada en matrices comparativas, en las cuales se contrastan diversas alternativas disponibles en el mercado frente a las exigencias operativas del proyecto.

El proceso de evaluación se fundamenta en un sistema de puntuación binaria: se asigna un valor de “1” si el componente analizado cumple satisfactoriamente con la especificación técnica, y “0” en caso contrario o si precisa adaptaciones complejas que comprometen el diseño del circuito. Finalmente, se seleccionan los equipos, sensores y plataformas que obtengan la mayor calificación acumulada, asegurando así la viabilidad funcional del sistema de alerta en el sector el Guadual.

3.4.1 Selección de Hardware

La elección del hardware abarca todos los componentes estructurales de la red, incluyendo la placa coordinadora (Gateway), las placas de los nodos sensores finales y los diversos transductores necesarios para la monitorización geológica y climática: el acelerómetro/sensor de inclinación, el sensor de humedad del suelo y el pluviómetro. Asimismo, la selección contempla los módulos de comunicación inalámbrica Zigbee, los dispositivos de alerta en campo (sonora y visual), el módulo de conectividad celular para la transmisión hacia la nube y el sistema de alimentación energética. Cada uno de estos elementos desempeña un rol crítico para asegurar la precisión en la recolección de datos, la autonomía del prototipo y la eficacia del sistema de alerta.

3.4.1.1 Selección de la unidad de procesamiento central (Gateway)

El Gateway constituye el núcleo de procesamiento del sistema: recibe las tramas Zigbee de los nodos sensores, ejecuta la lógica de umbrales de alerta, controla los actuadores locales y transmite los datos hacia la plataforma en la nube. Para cumplir estas funciones de forma simultánea, la unidad debe disponer de suficiente capacidad de procesamiento y memoria RAM, múltiples puertos de comunicación, un sistema operativo compatible con entornos de programación de código abierto y salidas digitales para el control de actuadores de alerta. Con base en los requerimientos RHW-05, RHW-06, RHW-07 y RHW-08, se evaluaron tres alternativas: la Raspberry Pi 4 Model B, la Raspberry Pi 3 Model B+ y la Orange Pi 3 LTS.

La Tabla 9 presenta la matriz de valoración de estas opciones frente a los requerimientos establecidos.

Tabla 9.
Matriz de Valoración — Unidad de Procesamiento Central (Gateway)

Hardware	**Requerimientos**				**Valoración**
	RHW-05	**RHW-06**	**RHW-07**	**RHW-08**	
Raspberry Pi 4 Model B	1	1	1	1	**4**
Raspberry Pi 3 Model B+	0	1	1	1	**3**
Orange Pi 3 LTS	0	1	0	0	**1**
Elección	Raspberry Pi 4 Model B				

Nota. Valoración: 1 = cumple, 0 = no cumple. Autoría propia.

A continuación se presentan las características técnicas más relevantes de las tres alternativas evaluadas, con el fin de sustentar la decisión de selección.

Tabla 10.
Comparación de Características — Unidad de Procesamiento Central (Gateway)

Característica	**Raspberry Pi 4 Model B**	**Raspberry Pi 3 Model B+**	**Orange Pi 3 LTS**
Procesador	BCM2711, Quad-core Cortex-A72, 64-bit, 1.5 GHz	BCM2837B0, Quad-core Cortex-A53, 64-bit, 1.4 GHz	Allwinner H6, Quad-core Cortex-A53, 64-bit, 1.8 GHz
RAM	1, 2, 4 u 8 GB LPDDR4	1 GB LPDDR2	1 o 2 GB LPDDR3
Almacenamiento	MicroSD (expansible)	MicroSD	MicroSD + eMMC opcional

Puertos USB	2×USB 3.0 + 2×USB 2.0	4×USB 2.0	2×USB 3.0 + 1×USB 2.0
GPIO	40 pines, 3.3 V	40 pines, 3.3 V	26 pines (subconjunto)
SO compatible	Raspberry Pi OS, Ubuntu, Debian	Raspberry Pi OS, Ubuntu, Debian	Armbian (soporte limitado)
Alimentación	5.1 V / 3 A (USB-C)	5 V / 2.5 A (Micro-USB)	5 V / 2 A (USB-C)
Dimensiones	85.6×56.5 mm	85×56 mm	69×48 mm
Comunidad/Soporte	Muy amplia (oficial)	Amplia (oficial)	Limitada (foros)

Nota. Adaptado de [69], [70] y [71].

De acuerdo con los resultados de la matriz de valoración (Tabla 9) y la comparación de características (Tabla 10), se selecciona la Raspberry Pi 4 Model B como unidad de procesamiento central del sistema.

Esta placa satisface el requerimiento de capacidad de memoria RAM (RHW-05), al ofrecer hasta 8 GB garantizando la ejecución simultánea del sistema operativo, el servicio de recepción Zigbee y el cliente de base de datos en la nube sin saturación de recursos. Sus cuatro puertos USB (dos USB 3.0 y dos USB 2.0) permiten la conexión simultánea del módulo Zigbee y del módulo celular sin conflictos de recursos (RHW-06). El cabezal GPIO de 40 pines con salidas de 3.3 V, compatible con el estándar de la familia Raspberry Pi, garantiza el control de relés para los actuadores de alerta (RHW-08).

Por otra parte, la Raspberry Pi 3 Model B+ queda descartada por su limitada memoria de 1 GB, insuficiente para la ejecución concurrente de todos los procesos del sistema. La Orange Pi 3 LTS, si bien dispone de conectividad adecuada, presenta soporte de software limitado (sin

distribución Linux oficial de primera parte) y un cabezal GPIO reducido de 26 pines, incompatible con los módulos de expansión estándar (RHW-07 y RHW-08) [69].

3.4.1.2 Selección de la unidad de control para los nodos sensores

Los nodos sensores (End Devices) son responsables de leer los sensores conectados y transmitir los datos al coordinador mediante el protocolo Zigbee. La placa de control debe disponer de entradas analógicas (ADC de 10 bits mínimo) para la lectura del pluviómetro y el sensor de humedad (RHW-01), buses I2C y UART hardware disponibles sin compartirlos con otros periféricos (RHW-02), nivel lógico de 5 V para compatibilidad directa con los sensores y el módulo de comunicación sin conversores adicionales (RHW-03), y factor de forma compatible con adaptadores de expansión estándar del mercado (RHW-04). Se evaluaron el NodeMCU ESP32, el Arduino Nano y el Arduino Uno R3.

La Tabla 11 presenta la matriz de valoración de estas opciones frente a los requerimientos establecidos.

Tabla 11.
Matriz de Valoración — Unidad de Control de Nodos Sensores

Hardware	**Requerimientos**				**Valoración**
	RHW-01	**RHW-02**	**RHW-03**	**RHW-04**	
NodeMCU ESP32	1	1	0	0	**2**
Arduino Nano	1	1	1	0	**3**
Arduino Uno R3	1	1	1	1	**4**
Elección	Arduino Uno R3				

Nota. Valoración: 1 = cumple, 0 = no cumple. Autoría propia.

A continuación se presentan las características técnicas más relevantes de las tres alternativas

evaluadas, con el fin de sustentar la decisión de selección.

Tabla 12.
Comparación de Características — Unidad de Control de Nodos Sensores

Característica	**NodeMCU ESP32**	**Arduino Nano**	**Arduino Uno R3**
Microcontrolador	Tensilica LX6 Dual-Core, 32-bit, 240 MHz	ATmega328P, 8-bit AVR, 16 MHz	ATmega328P, 8-bit AVR, 16 MHz
Flash / SRAM	4 MB / 520 KB	32 KB / 2 KB	32 KB / 2 KB
Entradas analógicas	15 (12-bit)	8 (A0–A7), 10-bit	6 (A0–A5), 10-bit
Interfaces	3×UART, 2×I2C, 4×SPI	UART, I2C, SPI	UART, I2C, SPI
Voltaje operación	3.3 V	5 V	5 V
Compatibilidad con módulo de comunicación.	No	No	Sí
Conectividad extra	Wi-Fi + Bluetooth integrados	Ninguna	Ninguna
Dimensiones	51×26 mm	45×18 mm	68.6×53.4 mm

Nota. Adaptado de [72], [73] y [74].

El Arduino Uno R3 es la opción seleccionada para los nodos sensores. Sus 6 entradas analógicas de 10 bits cubren tanto el pluviómetro como el sensor de humedad (RHW-01); la UART y el bus I2C disponibles permiten conectar simultáneamente el módulo Zigbee y el acelerómetro sin conflictos de recursos (RHW-02).

El nivel lógico de 5 V es el principal punto de diferencia frente al ESP32: elimina por

completo la necesidad de conversores de voltaje para los sensores y el módulo de comunicación (RHW-03). Su factor de forma DIP estándar, en particular, facilita el ensamblaje con los adaptadores de expansión disponibles sin circuitería intermedia (RHW-04) [72].

El ESP32 tiene mayor potencia de procesamiento y conectividad inalámbrica integrada, pero opera a 3.3 V y su footprint es incompatible con los mismos adaptadores, lo que agregaría complejidad innecesaria al nodo. El Arduino Nano comparte el mismo microcontrolador que el Uno y su nivel lógico de 5 V, pero su formato miniaturizado excluye los adaptadores de expansión estándar del mercado [74].

3.4.1.3 Selección del módulo de comunicación inalámbrica Zigbee

El módulo de comunicación inalámbrica transmite los datos de cada nodo sensor al coordinador central usando el protocolo Zigbee (IEEE 802.15.4). Para este sistema, el módulo debe implementar la pila Zigbee de forma predeterminada sin firmware adicional (RHW-09), operar en la banda de frecuencia de 2.4 GHz con cobertura suficiente para el tramo de talud (RHW-10), conectarse directamente a la UART del Arduino mediante el factor de forma TH estándar sin adaptadores adicionales (RHW-11), y mantenerse dentro del presupuesto de corriente compatible con la batería del nodo (RHW-12). Se evaluaron el Módulo CC2530, el XBee-PRO S2 y el XBee S2.

La Tabla 13 presenta la matriz de valoración.

Tabla 13.
Matriz de Valoración — Módulo de Comunicación Zigbee

Hardware	**Requerimientos**				**Valoración**
	RHW-09	**RHW-10**	**RHW-11**	**RHW-12**	
Módulo CC2530	0	1	0	0	**1**

XBee-PRO S2	1	1	1	1	**4**
XBee S2	1	1	1	1	**4**
Elección	XBee S2				

Nota. Valoración: 1 = cumple, 0 = no cumple. Autoría propia.

A continuación se presentan las características técnicas más relevantes de las tres alternativas evaluadas, con el fin de sustentar la decisión de selección.

Tabla 14.
Comparación de Características — Módulo de Comunicación Zigbee

Característica	**Módulo CC2530**	**XBee-PRO S2**	**XBee S2**
Chipset	TI CC2530F256	Silicon Labs EM250	Silicon Labs EM250
Protocolo	Zigbee 2007/PRO	Zigbee / 802.15.4	Zigbee / 802.15.4
Frecuencia	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Tasa de datos RF	250 Kbps	250 Kbps	250 Kbps
Potencia de TX	+4.5 dBm	+17 dBm (50 mW)	+2 dBm (1.2 mW)
Rango campo abierto	hasta 200 m	hasta 3 200 m	hasta 120 m
Sensibilidad RX	–97 dBm	–102 dBm	–96 dBm
Interfaz serie	UART, SPI	UART, SPI	UART, SPI
Config. AT / API	Requiere Z-Stack	Sí / Sí	Sí / Sí
Voltaje operación	2.0–3.6 V	2.8–3.4 V	2.8–3.4 V
Corriente TX / RX	29 mA / 24 mA	295 mA / 45 mA	40 mA / 40 mA

Form factor	SMD / Pines 1.27 mm	TH (XBee)	TH (XBee)

Nota. Adaptado de [75], [76], [77].

Tanto el XBee S2 como el XBee-PRO S2 alcanzan el puntaje máximo: ambos implementan Zigbee de forma nativa con configuración por comandos AT (RHW-09), cubren la distancia requerida entre los nodos y el Gateway (RHW-10), y son físicamente compatibles con los adaptadores del Arduino Uno (RHW-11 y RHW-12). La diferencia entre ellos no es de viabilidad técnica sino de compromiso operativo: el XBee-PRO alcanza hasta 3 200 m en campo abierto, lo que lo hace adecuado para redes muy extensas, pero su corriente de transmisión de 295 mA es más del doble del presupuesto energético tolerable para un nodo alimentado por batería. El XBee S2, con apenas 40 mA en transmisión, es la opción que alarga significativamente la autonomía del nodo, y su rango de 120 m es más que suficiente para la separación real entre nodos en el talud de El Guadual.

El Módulo CC2530 queda descartado: no incluye la pila Zigbee grabada de fábrica (RHW-09), requiere un depurador CC dedicado para cargar firmware Z-Stack personalizado, y su encapsulado SMD con pines a 1.27 mm es físicamente incompatible con los adaptadores TH del proyecto [75].

3.4.1.4 Selección del sensor de inclinación y vibración

Para detectar movimientos del terreno asociados a deslizamientos, el sensor debe medir simultáneamente inclinación angular estática y vibraciones dinámicas. Esto exige un IMU con acelerómetro y giroscopio integrados (RHW-13), interfaz I2C o SPI compatible con el Arduino Uno (RHW-14), capacidad de operación directa a 5 V sin conversores de nivel (RHW-15) y un consumo de corriente que no comprometa la autonomía del nodo en batería (RHW-16). Se evaluaron el BNO055, el LSM6DS3 y el MPU-6050.

La Tabla 15 presenta la matriz de valoración en función de estos cuatro requerimientos.

Tabla 15.
Matriz de Valoración — Sensor de Inclinación y Vibración

Hardware	**Requerimientos**				**Valoración**
	RHW-13	**RHW-14**	**RHW-15**	**RHW-16**	
BNO055	1	1	1	0	**3**
LSM6DS3	1	1	0	1	**3**
MPU-6050	1	1	1	1	**4**
Elección	MPU-6050				

Nota. Valoración: 1 = cumple, 0 = no cumple. Autoría propia.

A continuación se presentan las características técnicas más relevantes de las tres alternativas evaluadas, con el fin de sustentar la decisión de selección.

Tabla 16.
Comparación de Características — Sensor de Inclinación y Vibración

Característica	**BNO055**	**LSM6DS3**	**MPU-6050**
Ejes medidos	9 (accel. + giroscopio + mag.)	6 (3 accel. + 3 giroscopio)	6 (3 accel. + 3 giroscopio)
Rango acelerómetro	±2g a ±16g	±2g a ±16g	±2g a ±16g
Rango giroscopio	±125 a ±2000 °/s	±125 a ±2000 °/s	±250 a ±2000 °/s
Procesador digital	ARM Cortex-M0 (fusión)	Sin procesador adicional	DMP interno
Interfaz	I2C / UART	I2C / SPI	I2C (hasta 400 kHz)

Voltaje alimentación	3.3–5 V (módulos comerciales)	1.71–3.6 V (sin LDO)	3.3–5 V (módulo GY-521 con LDO)
Corriente operación	∼12.3 mA (modo normal)	∼1.25 mA	∼3.9 mA

Nota. Adaptado de [78], [79], [80].

El MPU-6050, es el sensor seleccionado. Los tres candidatos integran giroscopio (RHW-13) e interfaz I2C (RHW-14), pero se diferencian en los dos requerimientos restantes. El BNO055 es técnicamente superior: su procesador Cortex-M0 interno calcula quaterniones y ángulos de Euler en tiempo real, pero consume 12.3 mA en modo normal, casi el triple del MPU-6050, un gasto que en un nodo alimentado por batería es inasumible a largo plazo (incumple RHW-16).

El LSM6DS3, por el contrario, tiene un consumo ejemplar de 1.25 mA, pero en su formato de circuito integrado estándar opera a 1.8 V y su rango de alimentación máximo es 3.6 V; conectarlo directamente al Arduino de 5 V sin un conversor de nivel dañaría el sensor (incumple RHW-15). El MPU-6050 incorpora un regulador LDO que adapta los 5 V del Arduino a los 3.3 V internos, opera con 3.9 mA y además cuenta con su propio procesador DMP que reduce la carga computacional del Arduino [78].

3.4.1.5 Selección del sensor de precipitación

Para medir la precipitación acumulada se construye un pluviómetro con el siguiente diseño: un recipiente con un sensor que mide el nivel de agua en su interior, permitiendo calcular los milímetros de lluvia acumulados por ciclo. El sensor debe cuantificar el nivel con la precisión suficiente para convertirlo en milímetros de precipitación real (RHW-13), conectarse a la placa de control mediante una salida digital o analógica estándar (RHW-14), operar directamente a 5 V del nodo (RHW-15) y mantenerse dentro del presupuesto de corriente del sistema (RHW-16). Se evaluaron el sensor de lluvia de placa FC-37, la tira resistiva de nivel

de agua y el sensor ultrasónico HC-SR04.

La Tabla 17 presenta la matriz de valoración en función de estos cuatro requerimientos.

Tabla 17.
Matriz de Valoración — Sensor de Precipitación

Hardware	**Requerimientos**				**Valoración**
	RHW-13	**RHW-14**	**RHW-15**	**RHW-16**	
Sensor de Lluvia FC-37	0	1	1	1	**3**
Tira Resistiva (Nivel de Agua)	0	1	1	1	**3**
Sensor Ultrasónico HC-SR04	1	1	1	1	**4**
Elección	Sensor Ultrasónico HC-SR04 (con recipiente)				

Nota. Valoración: 1 = cumple, 0 = no cumple. Autoría propia.

A continuación se presentan las características técnicas más relevantes de las tres alternativas evaluadas, con el fin de sustentar la decisión de selección.

Tabla 18.
Comparación de Características — Sensor de Precipitación

Característica	**Sensor de Lluvia FC-37**	**Tira Resistiva de Nivel**	**Sensor Ultrasónico HC-SR04**
Principio de medición	Conductividad en placa (gotas)	Resistencia eléctrica por inmersión	Tiempo de vuelo ultrasónico
Variable que cuantifica	Presencia/intensidad de lluvia	Nivel de agua superficial	Nivel milimétrico de agua acumulada

Rango de detección	Superficie de la placa	0–4 cm (muy limitado)	2–400 cm de profundidad
Tipo de salida	Digital (DO) / Analógica (AO)	Analógica (0–5 V)	Digital (pulso ECHO, 5 V)
Voltaje alimentación	3.3–5 V	3.3–5 V	5 V
Corriente operación	∼15 mA	<20 mA	∼15 mA
Contacto directo con agua	Sí	Sí	No
Durabilidad en campo	Baja (oxidación de pistas)	Baja (corrosión galvánica)	Media-alta (sin contacto físico)

Nota. Adaptado de [81], [82], [83].

El sensor ultrasónico HC-SR04, integrado en la tapa de un recipiente colector, es el sistema seleccionado. Su ventaja central frente a las otras dos opciones es la única que cumple RHW-13: mide la distancia desde el sensor hasta la superficie del agua acumulada con una resolución de milímetros, lo que permite calcular directamente el volumen precipitado a partir de la sección del recipiente. Ni el FC-37 ni la tira resistiva son capaces de cuantificar volumen; el primero solo detecta si hay gotas en su placa e infiere intensidad en tres niveles gruesos, mientras que la tira resistiva tiene un rango máximo de 4 cm y una lectura analógica ruidosa con tendencia a la corrosión galvánica por el paso continuo de corriente a través del agua.

El HC-SR04 tiene además una ventaja práctica importante: realiza la medición sin ningún contacto físico con el fluido, eliminando por completo el deterioro por corrosión u oxidación que en condiciones de lluvia continua invalida a las otras dos alternativas en pocas semanas [81].

3.4.1.6 Selección del sistema de alarma sonora local

La alarma acústica debe emitir un sonido audible a distancia en condiciones de exterior abierto, donde el ruido vehicular y ambiental compiten con el nivel sonoro del dispositivo (RHW-17). El actuador debe poder encenderse y apagarse mediante señales digitales del Gateway o un relé bajo su control (RHW-08), responder tanto a la lógica local como a comandos remotos desde la plataforma (RHW-20) y mantener un consumo compatible con el sistema de alimentación del nodo, que opera a 5 V (RHW-23). Se evaluaron el módulo de alarma KY-012, el buzzer piezoeléctrico activo y el amplificador PAM8403 con dos bocinas de 3 W.

La Tabla 19 presenta la matriz de valoración en función de estos cuatro requerimientos.

Tabla 19.
Matriz de Valoración — Sistema de Alarma Sonora Local

Hardware	**Requerimientos**				**Valoración**
	RHW-08	**RHW-17**	**RHW-20**	**RHW-23**	
Módulo KY-012	1	1	1	0	**3**
Buzzer piezoeléctrico	1	0	1	1	**3**
PAM8403 + bocinas 3 W	1	1	1	1	**4**
Elección	PAM8403 + 2 bocinas de 3 W				

Nota. Valoración: 1 = cumple, 0 = no cumple. Autoría propia.

A continuación se presentan las características técnicas más relevantes de las tres alternativas evaluadas, con el fin de sustentar la decisión de selección.

Tabla 20.
Comparación de Características — Sistema de Alarma Sonora Local

Característica	**Módulo KY-012**	**Buzzer piezoeléctrico**	**PAM8403 + 2 bocinas 3 W**
Tipo de emisión	Electromagnético	Piezoeléctrico activo	Amplificador Clase D + altavoces
Potencia de salida	∼0.5 W	<0.1 W	3 W + 3 W (estéreo)
Nivel sonoro estimado	∼80–90 dB@1m	∼70–80 dB@1m	∼90–100 dB@1m
Voltaje alimentación	5 V	3.3–5 V	2.5–5.5 V (recomendado 5 V)
Corriente consumida	∼100 mA	<30 mA	∼600 mA (pico, Clase D >90 % ef.)
Control de encendido	Módulo relé	Pin digital directo	Pin SHDN + módulo relé
Protecciones internas	Ninguna	Ninguna	Sobretemperatura y cortocircuito

Nota. Adaptado de [84], [85], [86].

El PAM8403 con dos bocinas de 3 W es el sistema seleccionado. En exteriores, un nivel sonoro por encima de 90 dB a un metro de distancia es el umbral mínimo para que una alarma sea percibida sobre el ruido vehicular a velocidades de tránsito; el PAM8403 lo cumple, mientras que el buzzer piezoeléctrico con 70–80 dB no alcanza ese umbral en un tramo de carretera abierta. El módulo KY-012 llega a 80–90 dB, lo que lo coloca en el límite, pero su consumo de 100 mA sin protección térmica ni de cortocircuito lo expone a fallos en condiciones de activación sostenida.

La arquitectura Clase D del PAM8403, aunque consume hasta 600 mA en pico, convierte más del 90 % de esa corriente en energía sonora en lugar de calor, lo que lo hace más eficiente por decibelio producido que las otras dos alternativas, y sus protecciones internas garantizan la operación continua sin riesgo de daño [84].

3.4.1.7 Selección del sistema de alarma luminosa local

La baliza visual debe complementar a la alarma acústica con una señal luminosa perceptible a distancia incluso bajo luz solar directa o con lluvia (RHW-18). Al igual que el resto de actuadores, debe activarse mediante señal digital del Gateway o un transistor bajo su control (RHW-08), responder tanto a la lógica local como a comandos remotos (RHW-20) y ser compatible con la alimentación de corriente continua del nodo sin depender de la red eléctrica (RHW-23). Se evaluaron el arreglo de LEDs difusos estándar de 5 mm, la baliza estroboscópica industrial de alto voltaje AC y los módulos LED de 12 V.

La Tabla 21 presenta la matriz de valoración en función de estos requerimientos.

Tabla 21.
Matriz de Valoración — Sistema de Alarma Luminosa Local

Hardware	**Requerimientos**				**Valoración**
	RHW-08	**RHW-18**	**RHW-20**	**RHW-23**	
Arreglo de LEDs 5 mm	1	0	1	1	**3**
Baliza industrial AC	1	1	1	0	**3**
Módulos LED 12 V	1	1	1	1	**4**
Elección	Módulos LED de 12 V				

Nota. Valoración: 1 = cumple, 0 = no cumple. Autoría propia.

A continuación se presentan las características técnicas más relevantes de las tres alternativas

evaluadas, con el fin de sustentar la decisión de selección.

Tabla 22.
Comparación de Características — Sistema de Alarma Luminosa Local

Característica	**Arreglo LEDs 5 mm**	**Baliza industrial AC**	**Módulos LED 12 V**
Tipo de emisor	Diodos de orificio pasante	Lámpara estroboscópica AC	Barra con múltiples LEDs SMD integrados
Visibilidad en exteriores	Baja (luz difusa, imperceptible de día)	Muy alta (omnidireccional)	Alta (múltiples LEDs en conjunto)
Voltaje de operación	2–3 V DC	110/220 V AC	12 V DC
Corriente aproximada	∼20 mA por unidad	Depende de inversor/red eléctrica	Depende del módulo
Control de encendido	Pin digital directo / transistor	Módulo relé AC	Transistor NPN o MOSFET
Compatibilidad en batería DC	Alta (consumo muy bajo)	Nula (requiere red eléctrica)	Alta (con convertidor DC-DC)

Nota. Adaptado de [87], [88] y [89].

Los módulos LED de 12 V son el sistema seleccionado. Los LEDs difusos de 5 mm fallan en RHW-18: su lumen por watt es bajo y su ángulo de dispersión demasiado amplio para concentrar luz visible a distancia bajo luz solar directa, que es exactamente la condición predominante en una carretera expuesta al sol. La baliza industrial estroboscópica podría cumplir con la visibilidad, pero opera a 110 V/220 V AC y depende de la red eléctrica o de un inversor de voltaje que agotaría la batería del sistema de alimentación del Gateway, incumpliendo RHW-23.

Cada módulo LED es una barra compacta con múltiples LEDs SMD integrados que opera a 12 V DC. Dado que la batería de los actuadores entrega 5 V, se debe incorporar un convertidor de voltaje DC-DC elevador para alcanzar los 12 V requeridos. Este componente es más sencillo y eficiente que un inversor AC, por lo que no compromete la autonomía del sistema en batería y sigue cumpliendo RHW-23. El control del encendido se realiza mediante el transistor MOSFET IRF540N.

3.4.1.8 Selección del módulo de conectividad celular

El módem USB provee la conexión a internet del Gateway a través de la red celular, habilitando la transmisión de datos a la plataforma en la nube y el envío de alertas digitales (RHW-19). Para integrarse en los puertos USB de la Raspberry Pi sin conflictos (RHW-06), debe ser reconocido automáticamente por el sistema operativo Linux como interfaz de red, sin necesidad de controladores adicionales ni scripts de marcado (RHW-21). Las pruebas de campo realizadas en el Guadual confirmaron cobertura LTE (4G) estable de Claro Ecuador en el área del talud; el módem debe operar en las bandas LTE que esta operadora utiliza en la región, que incluyen frecuencias de baja propagación presentes en la variante latinoamericana de algunos modelos (RHW-22). Se evaluaron el ZTE MF823, el Huawei E3372h y el Huawei E8372h.

La Tabla 23 presenta la matriz de valoración en función de estos cuatro requerimientos.

Tabla 23.
Matriz de Valoración — Módulo de Conectividad Celular

Hardware	**Requerimientos**				**Valoración**
	RHW-06	**RHW-19**	**RHW-21**	**RHW-22**	
ZTE MF823	1	1	1	0	**3**
Huawei E3372h	1	1	1	0	**3**
Huawei E8372h	1	1	1	1	**4**

Elección	Huawei E8372h LTE

Nota. Valoración: 1 = cumple, 0 = no cumple. Autoría propia.

A continuación se presentan las características técnicas más relevantes de las tres alternativas evaluadas, con el fin de sustentar la decisión de selección.

Tabla 24.
Comparación de Características — Módulo de Conectividad Celular

Característica	**ZTE MF823**	**Huawei E3372h**	**Huawei E8372h**
Interfaz de hardware	USB 2.0 (Dongle)	USB 2.0 (Dongle)	USB 2.0 (Dongle Wi-Fi)
Categoría LTE	Cat4 (150 Mbps DL)	Cat4 (150 Mbps DL)	Cat4 (150 Mbps DL)
Bandas LTE (variante Latinoamérica)	B3/B7/B20	B1/B3/B7/B8	B1/B3/B5/B7/B8/B28
Bandas LTE rurales Claro Ecuador	No (sin B5/B28, var. Latinoamérica)	No (sin B5/B28, var. Latinoamérica)	Sí (B5 y B28, var. Latinoamérica)
Modo de red en Linux	CDC-Ether	HiLink (RNDIS)	HiLink (RNDIS)
Wi-Fi integrado	No	No	Sí (802.11b/g/n, 10 usuarios)
Antena externa	1×SMA	1×TS-9	2×TS-9 (diversidad)

Nota. Adaptado de [90], [91], [92].

El Huawei E8372h es el módem seleccionado. Las pruebas de campo confirmaron señal LTE (4G) de Claro Ecuador en la zona del talud de El Guadual como tecnología predominante; no obstante, el módem debe soportar también 3G (HSPA+) como tecnología de respaldo ante posibles caídas de cobertura LTE, condición habitual en entornos rurales con orografía compleja donde la señal fluctúa.

El factor que discrimina entre las tres opciones es precisamente el soporte de bandas en la variante latinoamericana: Claro Ecuador despliega tanto su red 4G como su red 3G en la Banda 5 (850 MHz) y adicionalmente LTE en la Banda 28 (700 MHz) para las áreas rurales de la región andina, por ser frecuencias de baja propagación que atraviesan la orografía montañosa con mayor alcance. El E8372h en su variante latinoamericana incluye ambas bandas (B5 y B28), garantizando enlace LTE y fallback 3G sobre la misma infraestructura de Claro; los modelos E3372h y MF823 que predominan en el mercado ecuatoriano son en su mayoría versiones europeas con plan de bandas B1/B3/B7/B8 y B3/B7/B20 respectivamente, ninguna de las cuales coincide con las bandas rurales de Claro, de modo que podrían funcionar en áreas urbanas pero sin garantía de enlace estable ni fallback en el Guadual (incumple RHW-22).

El modo HiLink del E8372h simplifica adicionalmente la integración con la Raspberry Pi: se presenta al sistema operativo Linux como un adaptador Ethernet estándar sin requerir scripts de marcado ni librerías propietarias (RHW-21). Su punto de acceso Wi-Fi integrado permite además conectar una laptop directamente al Gateway en campo para diagnósticos, sin interrumpir el enlace celular activo [90].

3.4.1.9 Selección del sistema de alimentación energética

Los nodos y el Gateway trabajan en campo sin red eléctrica, de modo que la fuente de alimentación determina directamente la disponibilidad del sistema. El suministro debe entregar 5 V estables a la placa de control y a sus periféricos sin conversores intermedios adicionales (RHW-03), sostener la operación durante el intervalo de tiempo entre visitas de

mantenimiento (RHW-23) y permitir el reemplazo de la batería sin herramienta especializada una vez en campo (RHW-24).

La instalación también debe quedar contenida y segura dentro del gabinete IP65 (RHW-25). Se evaluaron tres opciones: una batería de litio 18650 de celda única con conversor boost MT3608, un paquete de baterías Li-ion 18650 en arreglo serie/paralelo con regulador fijo de 5 V, y una batería portátil o power bank con salida USB estándar de 5 V.

La Tabla 25 muestra la matriz de valoración según estos requerimientos.

Tabla 25.
Matriz de Valoración — Sistema de Alimentación Energética

Hardware	**Requerimientos**				**Valoración**
	RHW-03	**RHW-23**	**RHW-24**	**RHW-25**	
Celda 18650 + MT3608	1	0	0	0	**1**
Arreglo 18650 + regulador 5 V	1	1	0	0	**2**
Power bank USB	1	1	1	1	**4**
Elección	Power bank USB				

Nota. Valoración: 1 = cumple, 0 = no cumple. Autoría propia.

A continuación se detallan las características técnicas más relevantes de las tres opciones evaluadas.

Tabla 26.
Comparación de Características — Sistema de Alimentación Energética

Característica	**18650 + MT3608**	**Arreglo 18650**	**Power bank USB**
Capacidad típica	2 000–3 500 mAh	5 000–15 000 mAh	10 000–50 000 mAh

Salida regulada 5 V	No (requiere Boost)	Sí (regulador externo)	Sí (nativa, USB-A/C)
Reemplazo en campo	Complejo (soldadura)	Moderado (conector)	Inmediato (plug-and-play)
Protección integrada	Ninguna	Parcial (BMS básico)	Completa (sobrecarga, sobredescarga, cortocircuito)
Autonomía estimada (nodo)	$<$24 h	48–72 h	3–5 días
Mantenimiento requerido	Alta frecuencia	Cada 2–3 días	Cada 3–4 días
Complejidad de instalación	Alta	Media	Mínima
Indicación de nivel	No	No	Sí (LEDs integrados)

Nota. Autoría propia.

El power bank USB es el sistema de alimentación seleccionado. La celda 18650 individual con conversor boost MT3608 queda descartada desde el inicio: su capacidad máxima de 3 500 mAh no llega a sostener ni 24 horas de operación continua en el nodo, y en caso de descarga total el reemplazo requiere desconectar el cableado interno del gabinete, lo que es inviable para un protocolo de mantenimiento expedito en terreno (incumple RHW-23 y RHW-24). El arreglo de celdas 18650 extiende la autonomía hasta 48–72 horas, pero el ensamblaje manual de las celdas, el BMS y el regulador genera puntos de falla adicionales dentro del gabinete y el intercambio en campo sigue siendo laborioso [93].

El power bank resuelve ambas limitaciones. Su salida USB de 5 V se conecta directamente al micro-USB o USB-C de los controladores sin ningún conversor adicional (RHW-03), y sus protecciones contra sobrecarga, sobredescarga y cortocircuito están integradas de fábrica, eliminando circuitería extra dentro del gabinete (RHW-25).

Lo más importante es que el reemplazo en campo se reduce a desconectar el cable USB y enchufar la unidad recargada, una operación que tarda segundos sin herramienta alguna (RHW-24). Para el nodo sensor, donde el Arduino Uno y el módulo XBee S2 consumen en conjunto aproximadamente 150–200 mA durante la transmisión activa [94], un power bank de 10 000 mAh garantiza entre 3 y 4 días de operación continua antes de requerir cambio [95].

Para el Gateway, donde la Raspberry Pi 4 Model B demanda en condiciones de carga moderada alrededor de 3 A a 5 V [96], un power bank de 50 000 mAh puede generar una autonomía de hasta 2 días.

3.4.2 Selección de Software

La selección del software abarca cuatro componentes principales, presentados en orden de dependencia técnica: la plataforma de base de datos y hosting del Dashboard, el lenguaje de programación del Gateway, el entorno de desarrollo para los nodos sensores y el servicio de mensajería de alertas. En cada caso se aplica la misma metodología de evaluación binaria de la selección de hardware: “1” si la alternativa cumple el requerimiento de software (RSW) definido en la Tabla 8, “0” en caso contrario.

3.4.2.1 Selección de la plataforma de base de datos y hosting para el Dashboard

Todo el intercambio de información entre el Gateway y el panel de control pasa por la base de datos en la nube: el Gateway escribe los datos de cada nodo y el Dashboard los lee y representa en pantalla. La plataforma debe soportar lectura y escritura concurrente con sincronización en tiempo real y baja latencia (RSW-07), contar con SDKs oficiales para

Python y JavaScript (RSW-08), ofrecer un plan gratuito suficiente durante la etapa de prototipado (RSW-09) y permitir definir reglas de control de acceso por componente (RSW-10).

Dado que el Dashboard debe integrarse directamente con la misma plataforma de datos, la tecnología del panel de control forma parte de esta misma decisión. Se evaluaron InfluxDB Cloud, AWS IoT Core con DynamoDB y Firebase Realtime Database; para el Dashboard se evaluaron Grafana, Node-RED Dashboard y la combinación HTML/JS con Firebase Hosting.

La Tabla 27 presenta la matriz de valoración para la base de datos.

Tabla 27.
Matriz de Valoración — Plataforma de Base de Datos en la Nube

Software	**Requerimientos**				**Valoración**
	RSW-07	**RSW-08**	**RSW-09**	**RSW-10**	
InfluxDB Cloud	1	0	0	1	**2**
AWS IoT Core + DynamoDB	1	1	0	1	**3**
Firebase Realtime Database	1	1	1	1	**4**
Elección	Firebase Realtime Database				

Nota. Valoración: 1 = cumple, 0 = no cumple. Autoría propia.

A continuación se presentan las características más relevantes de las tres plataformas evaluadas, con el fin de sustentar la decisión de selección.

Tabla 28.
Comparación de Características — Plataforma de Base de Datos en la Nube

Característica	InfluxDB Cloud	AWS IoT + DynamoDB	Firebase Realtime DB
Modelo de datos	Series temporales	Documentos / NoSQL	JSON jerárquico (árbol)
SDK Python oficial	Cliente HTTP (limitado)	boto3 (SDK AWS)	firebase-admin (pip)
SDK JavaScript oficial	Cliente JS (polling)	AWS Amplify (complejo)	Firebase JS SDK (WebSocket)
Actualización en tiempo real	Polling periódico	Requiere SNS + Lambda	Listener WebSocket nativo
Control de acceso	Tokens de organización	IAM (configuración extensa)	Reglas JSON declarativas
Curva de configuración	Media	Alta	Baja

Nota. Adaptado de [97], [98], [99].

Firebase Realtime Database es la plataforma seleccionada. La razón principal es técnica: usa WebSocket como canal de comunicación, de manera que cuando el Gateway escribe un valor en la base de datos, el navegador del operador lo recibe en milisegundos sin hacer ninguna petición adicional. Eso es exactamente lo que necesita un sistema de alertas (RSW-07). InfluxDB Cloud está diseñado para series temporales de alta frecuencia, pero su SDK de JavaScript no soporta listeners en tiempo real y su plan gratuito vence a los 30 días (incumple RSW-08 y RSW-09).

AWS IoT Core con DynamoDB es una solución sólida a escala empresarial, pero implica

gestionar simultáneamente IoT Core, Lambda, DynamoDB y Cognito, lo que es desproporcionado para un prototipo académico y su Free Tier no cubre todos esos servicios pasado el primer año (incumple RSW-09). Firebase, en su plan Spark permanentemente gratuito, ofrece 1 GB de almacenamiento y 10 GB de transferencia mensual, suficiente para el volumen de datos del sistema en toda la fase de pruebas [97].

La Tabla 29 presenta la evaluación de la tecnología para el panel de control.

Tabla 29.
Matriz de Valoración — Tecnología del Panel de Control Web

Software	**Requerimientos**				**Valoración**
	RSW-11	**RSW-12**	**RSW-13**	**RSW-15**	
Grafana	0	0	1	0	**1**
Node-RED Dashboard	0	1	1	1	**3**
HTML/JS + Firebase Hosting	1	1	1	1	**4**
Elección	HTML/JS con Firebase JS SDK y Firebase Hosting				

Nota. Valoración: 1 = cumple, 0 = no cumple. Autoría propia.

La Tabla 30 compara las características de cada alternativa para el panel de control.

Tabla 30.
Comparación de Características — Tecnología del Panel de Control Web

Característica	**Grafana**	**Node-RED Dashboard**	**HTML/JS + Firebase Hosting**
Accesibilidad	Servidor propio o Grafana Cloud	Servidor Node-RED activo	URL pública HTTPS (CDN gratuito)

Tecnologías web estándar	No (sistema propietario)	Parcialmente (Node.js + Angular)	Sí (HTML, CSS, JavaScript puro)
Gráficas en tiempo real	Sí (con datasource plugin)	Sí (nodo ui_chart)	Sí (Chart.js + Firebase listeners)
Control remoto de actuadores	No nativo	Sí (nodos de salida)	Sí (escritura directa en Firebase DB)
Estructura de datos	Propietaria (series temporales)	msg.payload (propio)	JSON (estructura nativa de Firebase)
Costo de alojamiento	Servidor propio o plan pago	Servidor propio activo	Gratuito (Firebase Hosting Spark)

Nota. Adaptado de [100], [101], [102].

Para el Dashboard se selecciona HTML/JS con Firebase Hosting. El panel consiste en un archivo index.html que carga el Firebase JavaScript SDK y registra listeners sobre los nodos de la base de datos; cada vez que el Gateway escribe un valor nuevo, el cambio llega directamente al navegador sin que el cliente tenga que hacer ninguna petición.

Los datos en Firebase tienen estructura de árbol JSON, por lo que leer la variable de un nodo sensor o escribir el estado de un actuador para controlarlo de forma remota es tan directo como acceder a una propiedad de objeto en JavaScript. Firebase Hosting publica esos archivos desde una CDN con HTTPS incluido y sin costo en el plan Spark (RSW-11).

Grafana, aunque útil para análisis de series temporales, necesita un servidor dedicado y carece de integración nativa con Firebase (incumple RSW-11 y RSW-12). Node-RED Dashboard también depende de que un proceso Node-RED esté corriendo como servidor; exponer ese proceso en internet añade complejidad de seguridad y costo operativo permanente (incumple RSW-11) [100].

3.4.2.2 Selección del lenguaje de programación para el Gateway

El Gateway es el núcleo de procesamiento del sistema: recibe los paquetes Zigbee por el puerto serial, compara los valores con los umbrales definidos, activa los actuadores de alerta y publica los datos en Firebase. El lenguaje debe contar con librerías de código abierto para comunicación serial e integración con servicios en la nube (RSW-03), implementar la lógica de comparación con umbrales y el control de actuadores vía GPIO (RSW-04), correr como servicio de inicio automático en Raspberry Pi OS (RSW-05) y comunicarse con Firebase Realtime Database mediante protocolos seguros (RSW-06). Se evaluaron C/C++ en Linux, JavaScript (Node.js) y Python.

La Tabla 31 presenta la matriz de valoración frente a estos cuatro requerimientos.

Tabla 31.
Matriz de Valoración — Lenguaje de Programación para el Gateway

Software	**Requerimientos**				**Valoración**
	RSW-03	**RSW-04**	**RSW-05**	**RSW-06**	
C/C++ en Linux	1	1	0	0	**2**
JavaScript (Node.js)	1	1	1	1	**4**
Python	1	1	1	1	**4**
Elección	Python				

Nota. Valoración: 1 = cumple, 0 = no cumple. Autoría propia.

La Tabla 32 compara las características más relevantes de los tres lenguajes.

Tabla 32.
Comparación de Características — Lenguaje de Programación para el Gateway

Característica	C/C++ en Linux	JavaScript (Node.js)	Python
Librería serial	termios (nativo, complejo)	serialport (npm)	pyserial (pip, preinstalada)
SDK Firebase oficial	No disponible	firebase-admin (npm)	firebase-admin (pip)
Control GPIO / relés	wiringPi / pigpio (C)	onoff (npm, parcial)	RPi.GPIO (nativo Raspberry Pi)
Ejecución como servicio	systemd (configuración manual)	pm2 + systemd	systemd (plantilla simple)
Disponible en Raspberry Pi OS	Precompilado (gcc/g++)	Requiere instalación (nvm)	Preinstalado (Python 3.x)
Librería mensajería instantánea	No disponible de forma nativa	node-telegram-bot-api (npm)	python-telegram-bot (pip, oficial)

Nota. Adaptado de [103], [104].

Python y Node.js obtienen el mismo puntaje, por lo que la decisión descansa en cuál se integra mejor con el entorno real de trabajo. Python viene preinstalado en Raspberry Pi OS, así que no hay que gestionar instalaciones de runtime ni versiones en campo.

La librería pyserial para comunicación serial y el módulo RPi.GPIO para el control de relés ya están disponibles sin dependencias adicionales. El factor decisivo es el SDK de Firebase: firebase-admin para Python es el cliente oficial de Google, con documentación activa para proyectos de IoT y mantenimiento garantizado.

C/C++ no tiene SDK oficial de Firebase, lo que obligaría a construir manualmente las llamadas HTTP al API REST sin un cliente mantenido, inviable para los plazos del proyecto (incumple RSW-06). La librería python-telegram-bot para el envío de alertas también es más madura que su equivalente en Node.js [103].

3.4.2.3 Selección del entorno de programación para los nodos sensores

El Arduino Uno R3 necesita un entorno de desarrollo que compile código para el microcontrolador ATmega328P (arquitectura AVR de 8 bits), con soporte para las interfaces de comunicación del nodo (I2C, UART y ADC) y acceso a librerías de código abierto para construir y transmitir los paquetes de datos del sistema (RSW-01 y RSW-02). Se evaluaron PlatformIO IDE y el Arduino IDE.

La Tabla 33 presenta la matriz de valoración frente a estos requerimientos.

Tabla 33.
Matriz de Valoración — Entorno de Programación para Nodos Sensores

Software	**Requerimientos**		**Valoración**
	RSW-01	**RSW-02**	
PlatformIO IDE	1	1	**2**
Arduino IDE	1	1	**2**
Elección	Arduino IDE		

Nota. Valoración: 1 = cumple, 0 = no cumple. Autoría propia.

La Tabla 34 compara las características de los dos entornos.

Tabla 34.
Comparación de Características — Entorno de Programación para Nodos Sensores

Característica	**PlatformIO IDE**	**Arduino IDE**
Lenguaje	C/C++ (y otros)	C/C++ (Wiring/Arduino)
Soporte ATmega328P	Sí (board manager)	Sí (soporte nativo oficial)
Gestor de librerías	PlatformIO Registry	Library Manager integrado
Configuración inicial	Archivo platformio.ini requerido	Mínima (plug and play)
Soporte oficial Arduino Uno	Mediante compatibilidad	Sí (plataforma oficial)
Comunidad para AVR	Amplia	Muy amplia (foro oficial)

Nota. Adaptado de [105], [106].

Ambos entornos compilan C/C++ para arquitectura AVR y cuentan con gestor de librerías, por lo que los dos son viables técnicamente. La diferencia está en cuánta configuración previa exige cada uno. PlatformIO requiere crear y mantener un archivo platformio.ini con la definición del entorno y gestionar las dependencias desde su propio registro.

El Arduino IDE reconoce el Arduino Uno R3 de forma directa sin ningún archivo adicional. Con varios nodos en campo donde la programación y la actualización del firmware deben ser rápidas, esa diferencia importa. A eso se suma que el Arduino IDE concentra la mayor base de ejemplos, tutoriales y foros específicos para la plataforma Uno, lo que reduce el tiempo de depuración durante el desarrollo [105].

3.4.2.4 Selección del servicio de mensajería de alertas

El Gateway debe notificar a los responsables del talud mediante mensajería instantánea cuando se supera un umbral crítico. El servicio debe contar con una librería Python para envío automatizado desde la Raspberry Pi (RSW-16), operar con plan gratuito o costo mínimo sin contratos comerciales (RSW-17) y permitir incluir en cada mensaje el identificador del nodo, la variable crítica, el valor medido, el umbral superado y la marca de tiempo (RSW-18). Se evaluaron la API de Twilio, la API de Vonage y la Telegram Bot API, accedida mediante BotFather.

La Tabla 35 presenta la matriz de valoración frente a estos tres requerimientos.

Tabla 35.
Matriz de Valoración — Servicio de Mensajería de Alertas

Software	**Requerimientos**			**Valoración**
	RSW-16	**RSW-17**	**RSW-18**	
Twilio Messaging API	1	0	1	**2**
Vonage SMS API	1	0	1	**2**
Telegram Bot API	1	1	1	**3**
Elección	Telegram Bot API (BotFather)			

Nota. Valoración: 1 = cumple, 0 = no cumple. Autoría propia.

La Tabla 36 compara las características de los tres servicios.

Tabla 36.
Comparación de Características — Servicio de Mensajería de Alertas

Característica	**Twilio Messaging API**	**Vonage SMS API**	**Telegram Bot API**
Plataforma de destino	SMS / WhatsApp	SMS	Telegram
Costo operativo	Pago por mensaje enviado	Pago por mensaje enviado	Completamente gratuito
Verificación requerida	Registro de número	Registro de marca/campaña	Creación de bot con BotFather
Librería Python oficial	twilio (pip)	vonage (pip)	python-telegram-bot (pip)
Mensajes de texto libre	Sí (con restricciones)	Sí	Sí (Markdown/HTML soportado)
Límite de mensajes (gratis)	Saldo de prueba limitado	Saldo de prueba	Sin límite documentado

Nota. Adaptado de [107], [108], [109].

La elección de la herramienta de notificaciones debe basarse principalmente en qué plataforma de destino resulta más cómoda y accesible para los operadores que recibirán las alertas. La Telegram Bot API permite enviar mensajes de forma directamente a cualquier chat o grupo de Telegram, aprovechando una aplicación que los operadores ya tienen instalada en sus teléfonos inteligentes y que opera mediante datos móviles o Wi-Fi [107].

Twilio y Vonage son plataformas robustas orientadas al envío de mensajes SMS (y WhatsApp corporativo en el caso de Twilio); ambas cumplen con disponer de librerías Python oficiales y

soportar texto dinámico (RSW-16 y RSW-18), pero obligan a pagar por cada mensaje enviado y exigen el registro de un número de teléfono virtual, haciéndolas financieramente inviables para un prototipo académico sin presupuesto continuo (incumplen RSW-17).

Se selecciona Telegram Bot API, ya que es completamente gratuita y sin límite de mensajes documentado. La integración en el Gateway se logra a través de la librería oficial python-telegram-bot instalada mediante pip, la cual expone métodos simples para enviar mensajes que incluyen el identificador del nodo, la variable medida, el valor crítico y la marca de tiempo.

3.5 Diseño del sistema

En esta sección se detalla el diseño del sistema de monitoreo, donde se implementan todos los requerimientos de hardware y software elegidos en la sección anterior. La estructura de este sistema sigue el modelo de referencia IoT de cuatro capas. A lo largo de este apartado se documentan los esquemas de conexión electrónica de cada nodo, el diseño de la red para la transmisión y recepción de datos, la plataforma en la nube donde se almacena la información, y el servicio web utilizado para presentar los datos en un dashboard y gestionar las alertas, además de establecer el esquema de alimentación eléctrica de todos los equipos.

3.5.1 Arquitectura general del sistema

La Figura 20 resume la arquitectura del sistema, organizada en cuatro niveles. Esta división permite separar la lectura física del entorno, la transmisión inalámbrica, el almacenamiento en la nube y la presentación al usuario, facilitando el desarrollo y la futura escalabilidad del prototipo.

Figura 20.

Arquitectura del sistema de monitoreo IoT



Nota. Autoría propia.

- **Capa de dispositivos y gateways:** Comprende todo el hardware desplegado directamente en el área de estudio. Los nodos finales actúan como unidades remotas de adquisición; cada uno utiliza una placa Arduino Uno encargada de leer continuamente las variables físicas del terreno a través de sensores específicos: un sensor capacitivo para medir la humedad del suelo, un sensor ultrasónico para estimar el nivel de lluvia acumulada y un módulo MPU-6050 para detectar cambios de inclinación y vibraciones.

  Toda esta información es enviada hacia el nodo coordinador, implementado sobre una Raspberry Pi 4. Este coordinador funciona como el cerebro local del sistema: centraliza las lecturas de los nodos sensores, evalúa estados de riesgo básicos y gestiona las respuestas físicas en campo a través de los actuadores de alerta. Dado que el sistema está diseñado para operar al aire libre y sin acceso a la red eléctrica convencional, todos

los dispositivos se alimentan de forma exclusiva e independiente mediante bancos de baterías portátiles (power banks), dimensionados para mantener el sistema activo de manera continua.

- **Capa de red:** Define cómo viajan los datos. De forma local, los nodos se comunican mediante módulos XBee S2 en una red Zigbee con topología de estrella. Para la conectividad hacia el exterior, la Raspberry Pi utiliza un módem USB celular 4G LTE.
- **Capa de centro de datos:** Utiliza los servicios en la nube de Firebase. Por un lado, emplea Firebase Realtime Database para almacenar de manera estructurada y en tiempo real todos los datos ambientales transmitidos por los sensores. Por otro lado, hace uso de Firebase Hosting para alojar los archivos que hacen funcionar la aplicación web, asegurando que el dashboard de monitoreo esté disponible de forma continua para los operadores.
- **Capa de servicio de aplicación:** Abarca la interfaz de usuario y las notificaciones. En esta capa se muestra el dashboard en una página web, en donde los usuarios pueden ver en tiempo real los datos que son enviados por los sensores y el nivel de riesgo que se encuentra semaforizado en alerta verde, amarilla y roja. Además, un grupo selectivo de personas tendrá un usuario y una contraseña para que puedan gestionar las alertas desde la página web si es necesario.

3.5.2 Capa de Dispositivos y Gateways

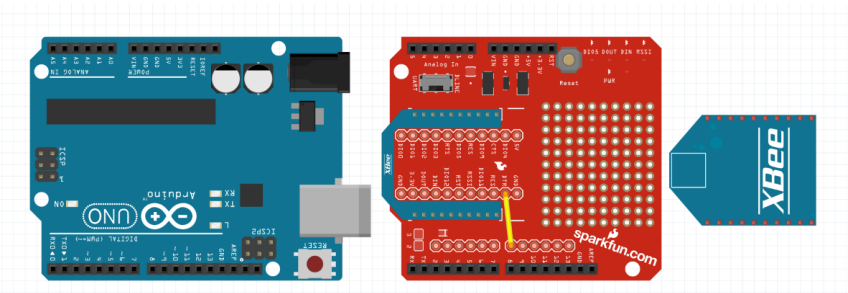
Esta capa abarca el hardware físico que interactúa directamente con el entorno. A continuación se detallan los circuitos, los esquemas de conexión y la configuración de los componentes electrónicos, divididos entre los nodos sensores desplegados en el terreno y el nodo coordinador que centraliza la información.

3.5.2.1 Nodo sensor

El nodo sensor actúa como la unidad de lectura en campo. Dicho nodo está compuesto por una placa Arduino Uno, encargada de recolectar los datos físicos capturados por tres sensores: un módulo capacitivo v1.2 para medir la humedad del suelo, un ultrasónico HC-SR04 para registrar la precipitación, y un MPU-6050 para monitorear la inclinación y el movimiento de la tierra. Para enviar estas lecturas, el nodo incluye un módulo de radio XBee S2 acoplado mediante un Shield. A continuación se describe el principio de funcionamiento de cada pieza y cómo se interconecta con la placa base.

- **Módulo de comunicación XBee S2:** La conexión física de este módulo es directa. Como se muestra en la Figura 21, el XBee S2 se inserta sobre los conectores del Shield, y este ensamble se apila sobre el Arduino Uno haciendo coincidir todos los pines sin necesidad de cableado externo. Al estar apilado de esta manera, las cabeceras hembra superiores del Shield actúan como una extensión directa de los puertos originales del Arduino, permitiendo conectar los demás sensores sin perder el acceso a los pines. Adicionalmente, para este diseño se establece una conexión clave: el pin DTR del XBee se puentea a un pin digital del Arduino, que en este caso es el D8. Esto le otorga al microcontrolador la capacidad de manipular el modo de suspensión (sleep) del módulo de radio.

Figura 21.
Esquema de conexión del Shield XBee al Arduino Uno



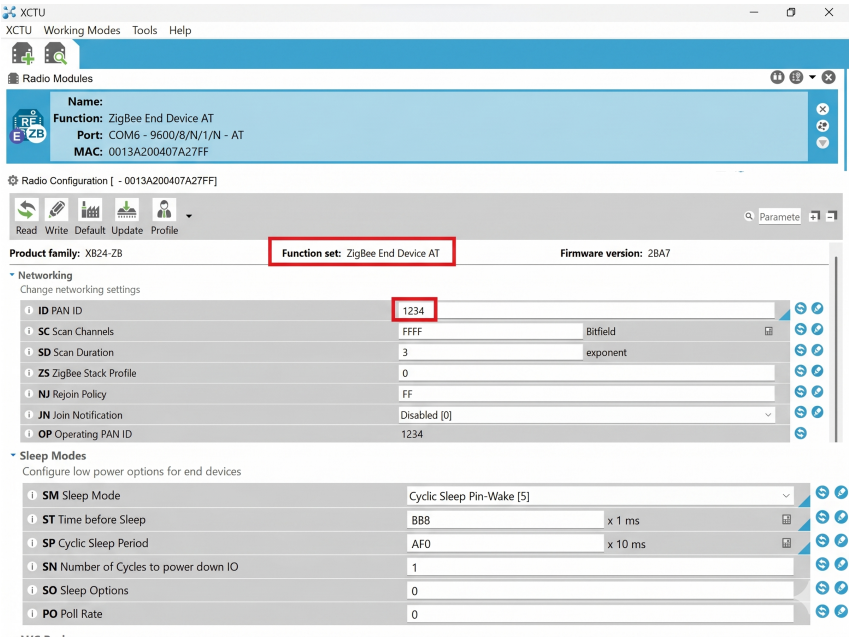
Nota. Autoría propia.

La configuración de red de estos módulos se realiza a través de XCTU, la herramienta

de software de Digi International diseñada para configurar redes Zigbee. La Figura 22 detalla los parámetros cargados. Primero, se establece el rol del módulo como nodo final (End Device). Posteriormente, se le asigna el PAN ID, un identificador numérico que obliga a que el coordinador y todos los sensores pertenezcan a la misma red inalámbrica para poder verse entre sí.

Figura 22.

Configuración de parámetros del módulo XBee S2



Nota. Autoría propia.

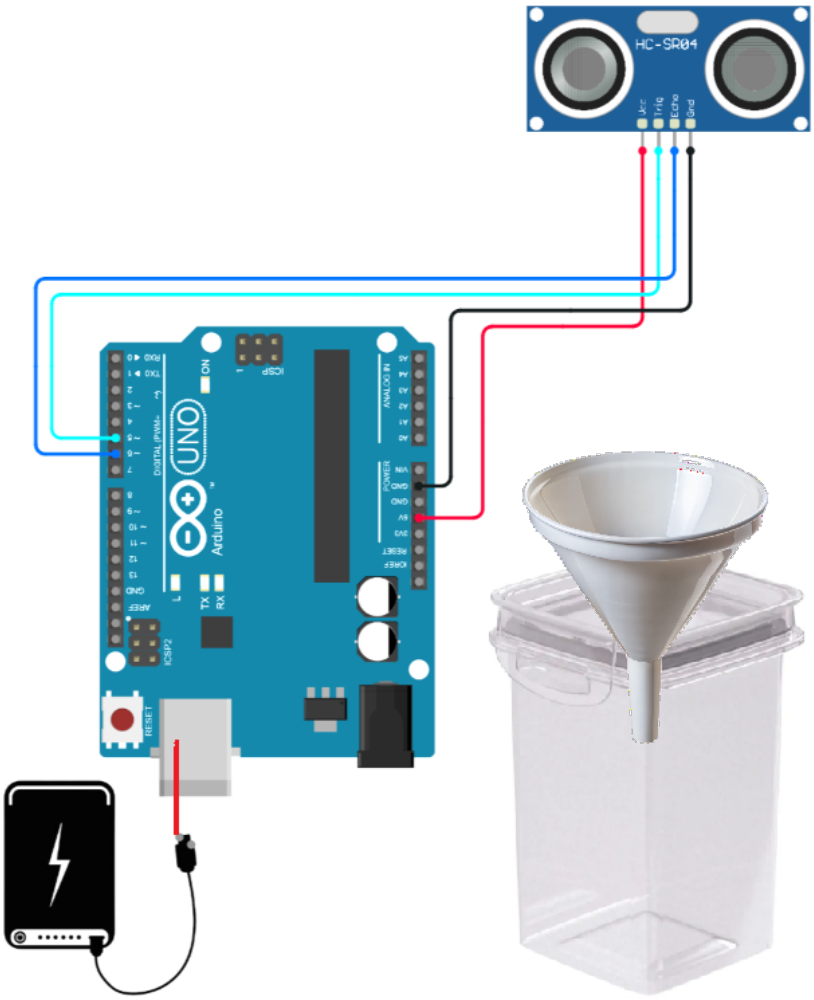
Para reducir el consumo eléctrico de las baterías, el XBee se configura en modo de suspensión cíclica (Cyclic Sleep). El software XCTU requiere que los tiempos de este ciclo se ingresen en formato hexadecimal. El tiempo antes de dormir (Time before sleep) se establece en BB8, equivalente a 3000 milisegundos (3 segundos) en los que la radio permanece activa. El periodo de sueño (Cyclic sleep period) se configura en AF0, que equivale a 2800 en decimal; debido a que el software multiplica este registro por 10 milisegundos, el módulo entra en sueño profundo durante 28 segundos. Este ciclo permite al Arduino administrar la energía de manera estricta, activando la antena solo durante el tiempo necesario para emitir los datos de los sensores.

- **Sensor ultrasónico HC-SR04 (Pluviómetro):** Para el funcionamiento de este

componente, se debe suministrar alimentación de 5V y conexión a tierra (GND). Sus pines de control de datos (Trigger y Echo) se pueden vincular a cualquier puerto digital del microcontrolador, evitando el uso de los pines puramente analógicos y de los puertos D0 y D1, ya que estos últimos están reservados para la comunicación serial del XBee. En este caso, el sensor se ha conectado a los puertos digitales D5 para el pin Trigger y D6 para el pin Echo. La Figura 23 ilustra el esquema completo.

Figura 23.

Esquema de conexión del sensor ultrasónico HC-SR04 al Arduino Uno



Nota. Autoría propia.

A nivel físico, para calibrar la medición de manera correcta, es necesario programar en el software las dimensiones del recipiente recolector que se vaya a usar. El sensor ultrasónico se monta sobre la tapa del recipiente, apuntando hacia abajo, de forma que mide la distancia entre el sensor y la superficie del agua acumulada. En este caso, el

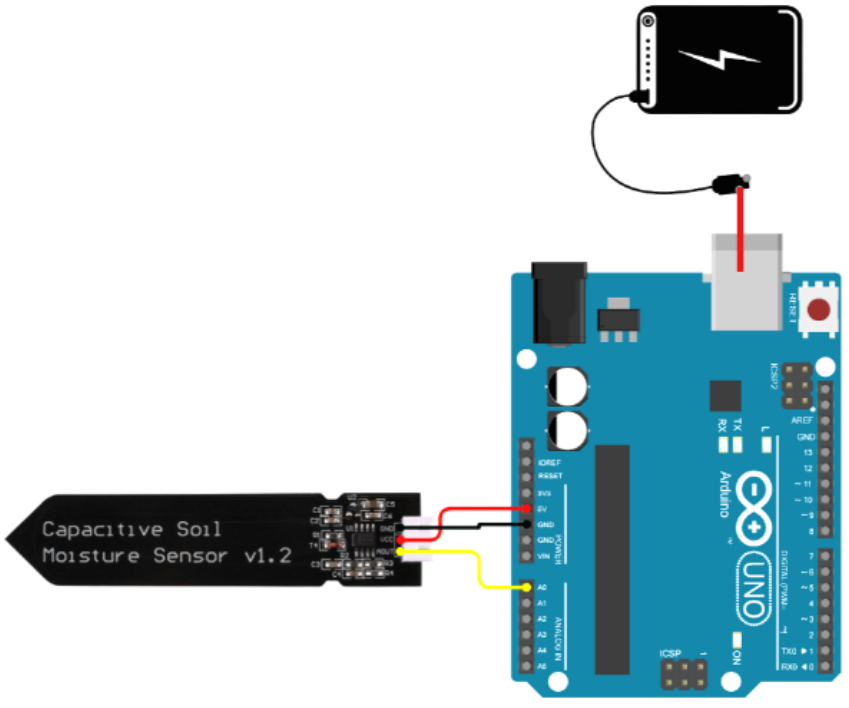
sensor se ha montado sobre un recipiente de base cuadrada ($9{,}86 \times 9{,}86$ cm) con una altura total de $28{,}60$ cm. Asimismo, para captar mayor cantidad de lluvia, se añadió en la boca del contenedor un cono de $11{,}0$ cm de diámetro. Como parte de la calibración, se estableció que la distancia en vacío (desde el sensor hasta el fondo) es de $25{,}16$ cm.

Respecto a la lógica de programación, el sistema emplea una técnica de filtrado para evitar datos falsos generados por ruido acústico o condensación. En lugar de procesar una lectura directa, el microcontrolador toma cinco muestras consecutivas. Estos cinco valores se ordenan matemáticamente mediante el algoritmo de la burbuja para descartar los picos anómalos y extraer la mediana. Posteriormente, el algoritmo calcula el nivel de agua restando la distancia medida de la altura base en vacío. Finalmente, computa el volumen de agua ingresado en el recipiente y lo divide por el área del embudo superior, arrojando como resultado la cantidad de precipitación en milímetros.

- **Sensor capacitivo de humedad del suelo:** Para el funcionamiento de este componente, se debe suministrar alimentación de 5V y conexión a tierra (GND). Es importante mencionar que este sensor se puede conectar al mismo pin de 5V que utiliza el sensor ultrasónico; dado el bajo consumo de corriente de ambos dispositivos, compartir la misma fuente de alimentación no genera ningún problema de caída de tensión. El pin de datos se debe conectar a un puerto analógico del microcontrolador. En este caso, el sensor se ha conectado al pin analógico A0 del Arduino Uno. La Figura 24 muestra el esquema de conexión.

Figura 24.

Esquema de conexión del sensor capacitivo de humedad del suelo al Arduino Uno



Nota. Autoría propia.

Para calibrar la medición de manera correcta, es necesario establecer los límites de lectura analógica del sensor, ya que estos valores varían dependiendo de la densidad del suelo y del propio componente. En este caso, se tomaron lecturas de prueba en dos escenarios: al exponer el sensor al aire libre (ambiente seco) se obtuvo un valor de 770, y al sumergirlo en agua se obtuvo un valor de 369. El software utiliza estos dos valores como referencia para sus cálculos.

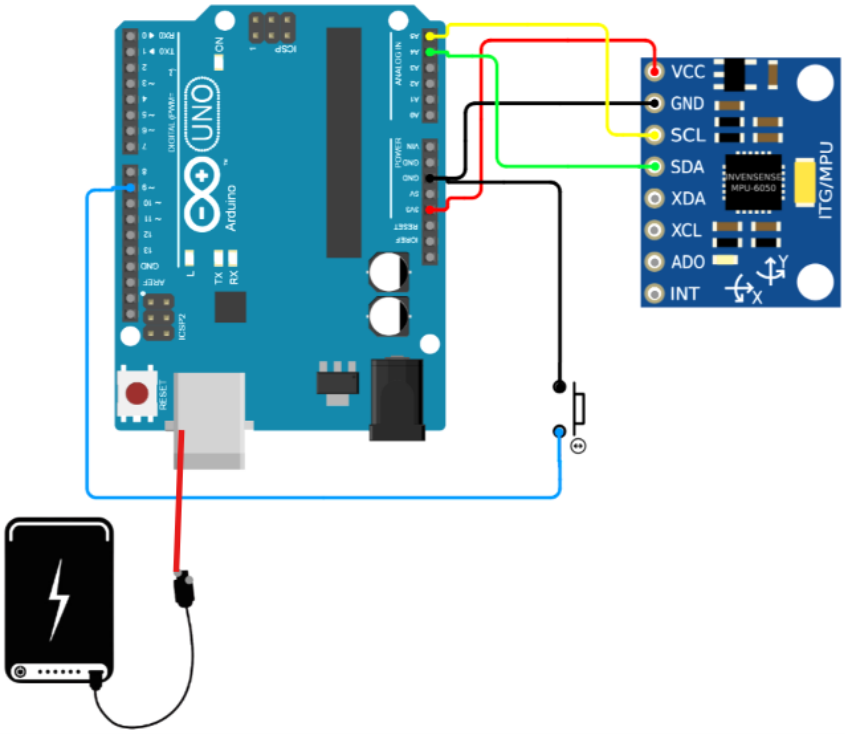
Respecto a la lógica de programación, el sistema emplea un método de promedios para evitar fluctuaciones en los datos analógicos leídos. En lugar de procesar una única lectura, el microcontrolador toma diez muestras consecutivas con pausas de 10 milisegundos entre cada una, y luego calcula el promedio. Posteriormente, el algoritmo interpola matemáticamente este promedio con los valores de calibración (770 y 369) para convertirlo en un porcentaje de 0 % a 100 %. Finalmente, se aplica un límite numérico para asegurar que el porcentaje final no exceda estos márgenes.

- **Módulo acelerómetro y giroscopio MPU-6050:** Para el funcionamiento de este

componente, se debe suministrar alimentación de 3.3V y conexión a tierra (GND). El sensor MPU-6050 se comunica a través del protocolo I2C, por lo que no puede vincularse a cualquier puerto digital libre del microcontrolador; requiere conectarse a los pines dedicados para las líneas de datos y reloj de dicho protocolo (SDA y SCL). En este caso, el sensor se ha conectado a los puertos analógicos A4 (SDA) y A5 (SCL) del Arduino Uno. Adicionalmente, se integró un pulsador en el puerto digital D9 para facilitar el proceso de calibración. La Figura 25 muestra el esquema de conexión.

Figura 25.

Conexiones del sensor MPU-6050 (GY-521) al Arduino Uno



Nota. Autoría propia.

A nivel físico, el MPU-6050 es un dispositivo de medición inercial de seis grados de libertad (6-DOF) que integra un acelerómetro de tres ejes y un giroscopio de tres ejes en un solo microchip. El componente obtiene sus datos mediante sistemas microelectromecánicos (MEMS): el acelerómetro mide la fuerza de la gravedad estática y las aceleraciones dinámicas (movimientos bruscos) en los ejes X, Y y Z, mientras que el giroscopio mide la velocidad de rotación angular sobre esos mismos tres ejes basándose en el efecto físico de Coriolis [78].

Para calibrar la medición de manera correcta, es necesario establecer los puntos cero del sensor para corregir pequeños desvíos de fábrica. En este caso, al presionar el pulsador físico, el sistema ejecuta una rutina que captura 200 muestras con el sensor completamente quieto. Esto permite calcular los errores de medición (offsets) y el nivel de ruido sísmico ambiental de referencia. Estos valores se guardan en la memoria EEPROM del Arduino, garantizando que la configuración no se pierda si el nodo se queda sin energía.

Respecto a la lógica de programación, el sistema efectúa un monitoreo ininterrumpido. Mientras el módulo de comunicación descansa en su ciclo de 26 segundos, el microcontrolador lee los datos del MPU-6050 cada 5 milisegundos. Para calcular los ángulos de inclinación de la tierra de forma estable, el software implementa un filtro complementario, fusionando la rápida respuesta del giroscopio con la referencia absoluta del acelerómetro. En paralelo, el algoritmo calcula el vector de aceleración dinámica (restando el equivalente a la gravedad terrestre (1G)) para detectar vibraciones anormales (picos sísmicos). Al culminar el ciclo de tiempo, el nodo transmite el pico máximo de inclinación y de sismo detectados en ese periodo.

- **Alimentación eléctrica:** El nodo sensor opera mediante una batería portátil USB de 10 000 mAh, una solución que no requiere instalación de cableado en el terreno y permite un reemplazo sencillo durante el mantenimiento. La Tabla 37 detalla el consumo estimado de cada componente del nodo.

Tabla 37.
Consumo estimado de corriente — Nodo Sensor

Componente	Consumo promedio (mA)
Arduino Uno R3 (en operación)	50
Módulo XBee S2 (cyclic sleep de 26 s, promedio ponderado)	3

Sensor HC-SR04 (promedio por ciclo de medición)	2
Sensor capacitivo de humedad del suelo	5
MPU-6050 (activo continuo)	4
Total	**64**

Nota. Valores estimados a partir de las hojas de datos de cada componente. Autoría propia.

Las baterías portátiles de 10 000 mAh tienen una capacidad real de aproximadamente 6 290 mAh a 5 V, descontando la eficiencia del conversor de voltaje interno (boost) y las pérdidas térmicas. Con un consumo total de 64 mA, la autonomía estimada del nodo sensor es de aproximadamente 98 horas, equivalentes a 4 días de operación continua. Lo que resume que se deberia realizar un cambio o recarga de la batería portatil cada 4 días aproximadamente.

3.5.2.2 Nodo coordinador

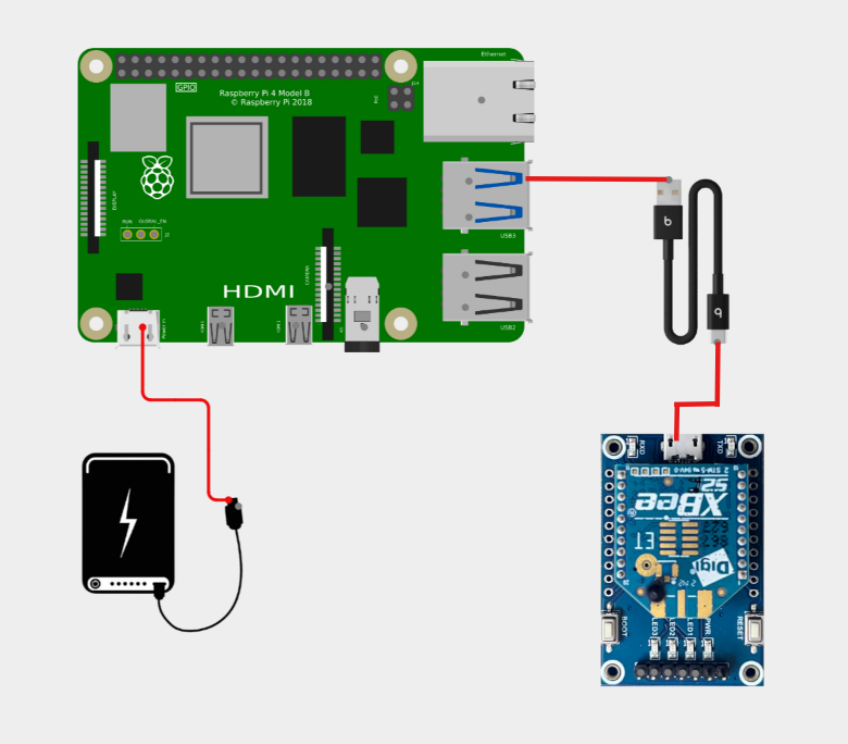
El nodo coordinador es el cerebro central del sistema de monitoreo. A diferencia de los nodos sensores, que se encargan exclusivamente de recopilar parámetros físicos en el entorno, esta unidad tiene la responsabilidad de organizar la red inalámbrica, procesar toda la información entrante y controlar los actuadores físicos de alerta (luces y sirena). Para la evaluación del riesgo, el software requiere la configuración de umbrales críticos iniciales para cada variable. Tal como se analizó en el Capítulo 2 a partir de la revisión bibliográfica, estos valores se definieron tomando en consideración los estándares teóricos y las características del sector el Guadual. Se estableció un umbral del 40 % para la humedad del suelo, justificado por el tipo de suelo arcilloso presente en la zona, el cual tiende a perder cohesión al alcanzar altos niveles de saturación hídrica. Para la inclinación, se fijó un límite de 5°, un ángulo adecuado para discriminar asentamientos naturales de movimientos anómalos. La precipitación se limitó a un

acumulado de 50 mm, nivel que, de acuerdo con el clima local, representa lluvias de alta intensidad capaces de detonar inestabilidades. Por último, para la vibración sísmica se configuró un umbral inicial de 0,05 m/s^2, teniendo en cuenta únicamente el paso de automóviles por la vía aledaña. Es importante destacar que estos valores constituyen una línea base teórica inicial; una vez implementado el sistema y tras la recolección de datos de la zona, se procederá a realizar un ajuste o calibración en todas las variables si es necesario, para adaptarlas con mayor precisión a la dinámica real del entorno. Para lograr todo este procesamiento, el hardware está basado en una microcomputadora Raspberry Pi 4 Modelo B, elegida por su alta capacidad de cómputo y su facilidad para integrarse a bases de datos en la nube. A continuación, se detallan las conexiones y la configuración de los componentes electrónicos que integran este nodo principal.

- **Módulo de comunicación XBee S2:** En el nodo coordinador, la conexión del módulo XBee es diferente a la del nodo sensor. En lugar de apilarse sobre un Shield, el módulo XBee S2 se inserta en un adaptador USB-XBee, el cual convierte la comunicación serial del módulo en una interfaz USB estándar. Esto permite conectar directamente el adaptador a uno de los puertos USB de la Raspberry Pi, como se muestra en la Figura 26. El sistema operativo de la Raspberry Pi reconoce el adaptador como un puerto serie virtual, lo que permite al software leer los mensajes entrantes a través del puerto serie.

Figura 26.

Conexión del adaptador USB-XBee a la Raspberry Pi 4 Model B

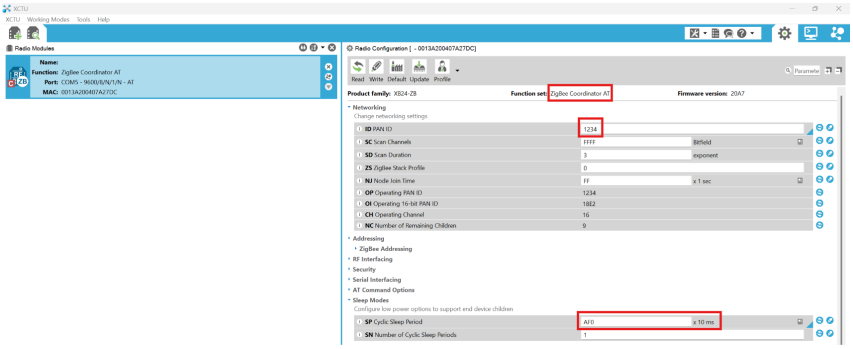


Nota. Autoría propia.

En cuanto a la configuración, el módulo XBee del nodo coordinador se configura igualmente a través del software XCTU de Digi International, como se muestra en la Figura 27. El parámetro fundamental es el rol del módulo, que en este caso debe establecerse como Coordinador. Este rol le otorga la autoridad para formar y gestionar la red Zigbee: es el único nodo que puede inicializarla y asignar direcciones de red a los demás dispositivos. El PAN ID debe ser idéntico al configurado en todos los nodos sensores para que pertenezcan a la misma red. Además, el parámetro de ciclo de sueño debe coincidir con el mismo valor configurado en los nodos finales para que el coordinador esté activo en los momentos en que estos despiertan y transmiten sus datos.

Figura 27.

Configuración del módulo XBee S2 en modo coordinador



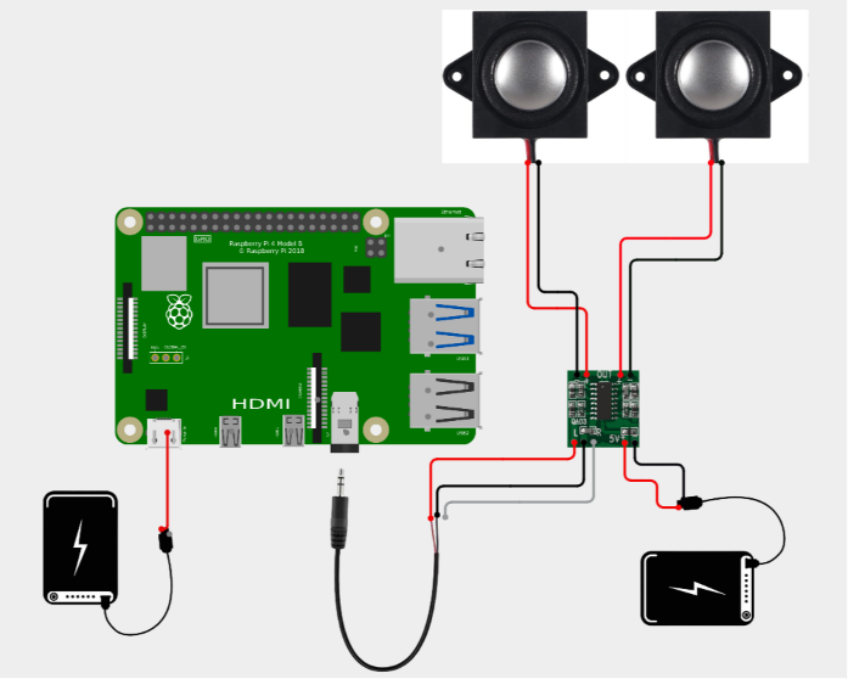
Nota. Autoría propia.

Respecto a la lógica del software, el programa mantiene el puerto serie abierto de forma continua a la espera de mensajes. Cada vez que un nodo sensor despierta y transmite sus datos, el coordinador los recibe a través del XBee y el programa los identifica a qué nodo pertenecen. Una vez que el bloque de variables está completo, el programa lo procesa y lo envía automáticamente a la base de datos en la nube.

- **Alarma sonora:** El sistema de alarma sonora utiliza un miniamplificador de clase D PAM8403 con dos bocinas de 3 W cada una. El amplificador se alimenta con 5 V directamente desde la batería portátil asignada a las alarmas, y recibe la señal de audio a través del conector de 3.5 mm de la Raspberry Pi. Con esta conexión, el audio generado por el programa en la Raspberry Pi llega al amplificador y se reproduce por las bocinas con suficiente potencia para ser escuchado en el exterior. La Figura 28 muestra el esquema de conexión de este sistema.

Figura 28.

Conexión de la alarma sonora a la Raspberry Pi 4



Nota. Autoría propia.

Respecto a la lógica del software, la alarma sonora no puede activarse de forma autómatica: solo puede ser habilitada manualmente por un operador autorizado desde el dashboard web. Para evitar pánico ante una posible falsa alarma, el acceso a esta función requiere que el operador inicie sesión con un usuario y una contraseña registrados en la plataforma. Una vez autenticado, el programa en la Raspberry Pi detecta el cambio de estado en la base de datos, inicia la reproducción del archivo de audio en bucle y lo mantiene activo hasta que el operador lo detenga manualmente desde el mismo panel. Además en la base de datos se guarda un archivo mencionando que usuarios activaron y desactivaron la alarma con la fecha y hora, con el fin de mantener un registro de las acciones realizadas por cada operador.

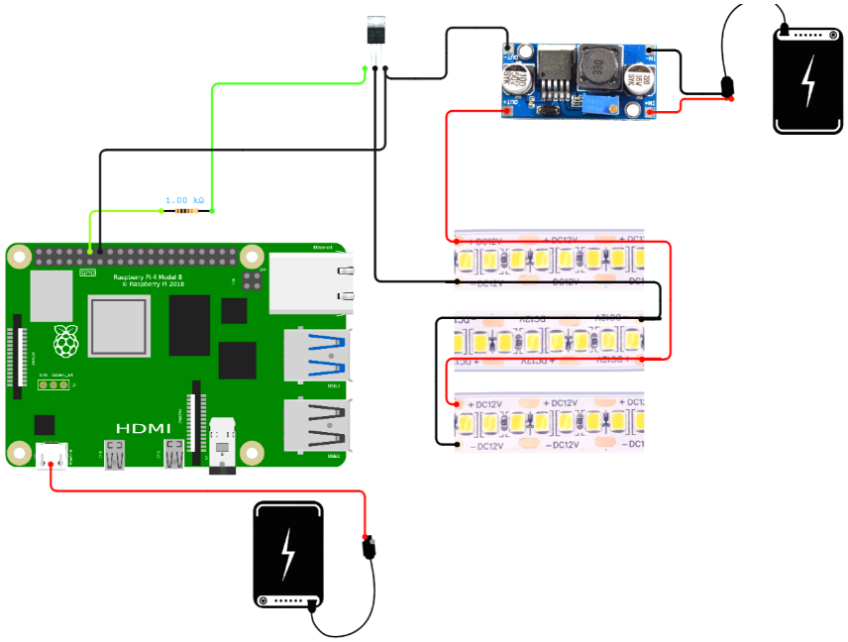
- **Alarma visual:** El sistema de alarma visual está formado por tres módulos LED, cada uno con tres LEDs integrados, conectados en serie y gestionados por la Raspberry Pi a través del MOSFET IRF540N.

  Dado que el power bank de los actuadores entrega 5 V y los módulos LED requieren

12 V para operar, se incorporó un convertidor de voltaje DC-DC elevador entre ambos. La salida del power bank se conecta a la entrada del convertidor, que eleva la tensión hasta 12 V. La salida positiva del convertidor, debe ir conectado al positivo de los módulos LED en serie. La salida negativa del convertidor se conecta al pin Source del MOSFET IRF540N y, de forma común, a un pin GND de la Raspberry Pi, de modo que ambos dispositivos comparten la misma referencia de tierra. El terminal negativo de los módulos LED se conecta al pin Drain del MOSFET. El control del encendido de los modulos led se realiza desde el pin GPIO 18 de la Raspberry Pi, que se conecta al pin Gate del MOSFET a través de una resistencia de 1 kΩ. Cuando el GPIO 18 envía señal alta, el MOSFET conduce y los módulos LED se encienden; cuando el GPIO 18 baja, el MOSFET corta y los LEDs se apagan. Este esquema completo se detalla en la Figura 29.

Figura 29.

Conexión de la alarma visual a la Raspberry Pi 4



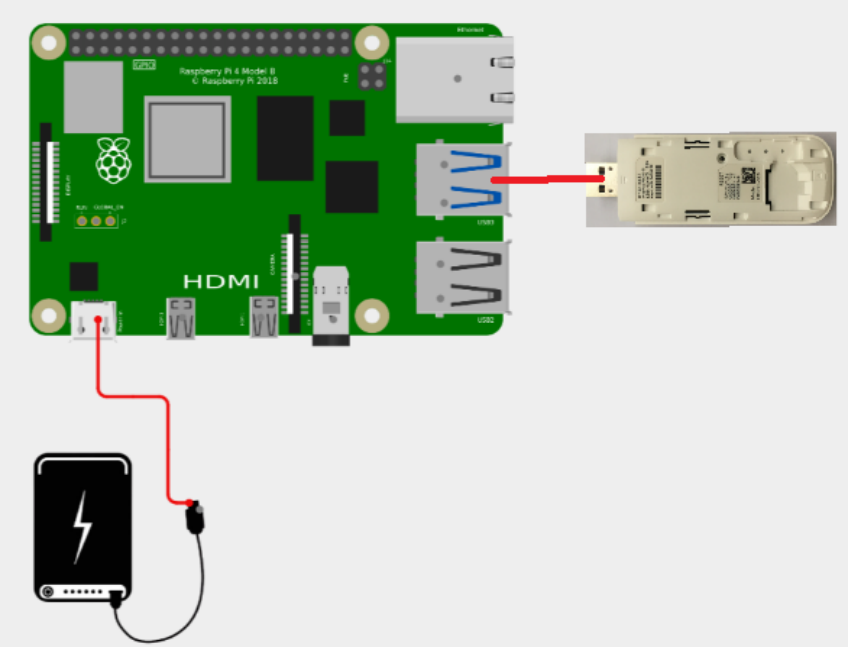
Nota. Autoría propia.

Respecto a la lógica del software, el comportamiento es semaforizado. Cada vez que llega un bloque de datos completo, el sistema calcula el nivel de riesgo comparando cada variable con su umbral establecido. Si alguna variable supera el 85 % de su límite, el sistema entra en alerta amarilla y los LEDs parpadean lentamente. Si alguna variable

iguala o supera el umbral crítico, el estado escala a alerta roja y los LEDs parpadean rápidamente. Si todas las variables se mantienen por debajo del 85 % del umbral, el sistema se encuentra en alerta verde y los LEDs permanecen apagados. Adicionalmente, el operador puede tomar el control manual de la iluminación desde el dashboard web, iniciando sesión con un usuario y una contraseña registrados en la plataforma. El usuario con dichas credenciales podrá usar el modo manual para activar o desactivar la alarma visual o mantenerla en modo automático.

- **Módem USB:** El módem USB es el componente que provee conexión a Internet a la Raspberry Pi a través de la red celular. Su conexión es directa: se inserta en uno de los puertos USB de la Raspberry Pi, como se ilustra en la Figura 30. El sistema operativo lo reconoce automáticamente y establece una ruta de red a través de él.

Figura 30.
Conexión del módem USB a la Raspberry Pi 4



Nota. Autoría propia.

Esta conexión a Internet es necesaria para que el software del nodo coordinador pueda realizar tres tareas en paralelo: enviar los datos de los sensores a Firebase Realtime Database, consultar el estado de la alarma sonora y visual desde la misma base de datos, y transmitir alertas al bot de Telegram cuando alguna variable supera su umbral crítico.

Todas estas comunicaciones se realizan mediante peticiones HTTP hacia las APIs de Firebase y Telegram.

- **Alimentación eléctrica:** El nodo coordinador utiliza dos fuentes de alimentación independientes para aislar eléctricamente la Raspberry Pi de los actuadores de alarma. La Raspberry Pi, junto con el módulo XBee y el módem celular, se alimenta con una batería portátil de 50 000 mAh. Los actuadores de alarma (amplificador PAM8403 y módulos LED) funcionan con una batería portátil independiente de 10 000 mAh. Las Tablas 38 y 39 presentan el consumo estimado de cada grupo de componentes.

Tabla 38.
Consumo estimado de corriente — Raspberry Pi y periféricos

Componente	Consumo promedio (mA)
Raspberry Pi 4 Modelo B (modo consola, servicio activo)	400
Adaptador USB-XBee (con módulo XBee S2 Coordinador)	25
Módem USB Huawei E8372h (LTE conectado)	350
Total	**775**

Nota. Valores estimados a partir de las hojas de datos de cada componente. Autoría propia.

Tabla 39.
Consumo estimado de corriente — Sistema de alarmas

Componente	Reposo (mA)	Alarma activa (mA)
Amplificador PAM8403 con 2 bocinas de 3 W	8	550
Módulos LED 12 V con convertidor DC-DC	0	175
Total	**8**	**725**

Nota. Valores estimados. Autoría propia.

La batería de 50 000 mAh tiene una capacidad real de aproximadamente 31 450 mAh a 5 V. Con un consumo total de 775 mA, la autonomía estimada de la Raspberry Pi y sus periféricos es de aproximadamente 40 horas, equivalentes a 1.7 días de operación continua. La batería de 10 000 mAh destinada a las alarmas (6 290 mAh reales) consume apenas 8 mA en reposo, por lo que su autonomía en condiciones normales supera los 30 días. En el peor escenario, con la sirena y los módulos LED activos de forma continua, el consumo total asciende a 725 mA y la autonomía se reduce a aproximadamente 9 horas.

3.5.2.3 Mantenimiento periódico de la alimentación

El tiempo de autonomía estimada establecen los intervalos mínimos de mantenimiento para garantizar la operación continua del sistema. El nodo sensor requiere un reemplazo o recarga de batería cada 4 días. El nodo coordinador presenta el ciclo de mantenimiento más exigente: la batería de la Raspberry Pi debe recargarse aproximadamente cada 40 horas para evitar interrupciones del servicio de monitoreo. La batería de los actuadores de alarma, al tener un consumo muy bajo en reposo, puede mantenerse por periodos mucho más largos. Para garantizar la disponibilidad continua del sistema, se debe realizar un mantenimiento programado que incluya el reemplazo anticipado de baterías, y si es necesario de los sensores o actuadores de alarma. Este proceso puede resultar complicado debido a que el nodo coordinador y los nodos sensores se encuentran ubicados en zonas de difícil acceso. Asi que si existe la posibilidad de escalabilidad en el prototipo se recomienda utilizar una fuente de energia electrica autosustentable, como el uso de paneles solares, o una red electrica comercial para evitar el mantenimiento periodico.

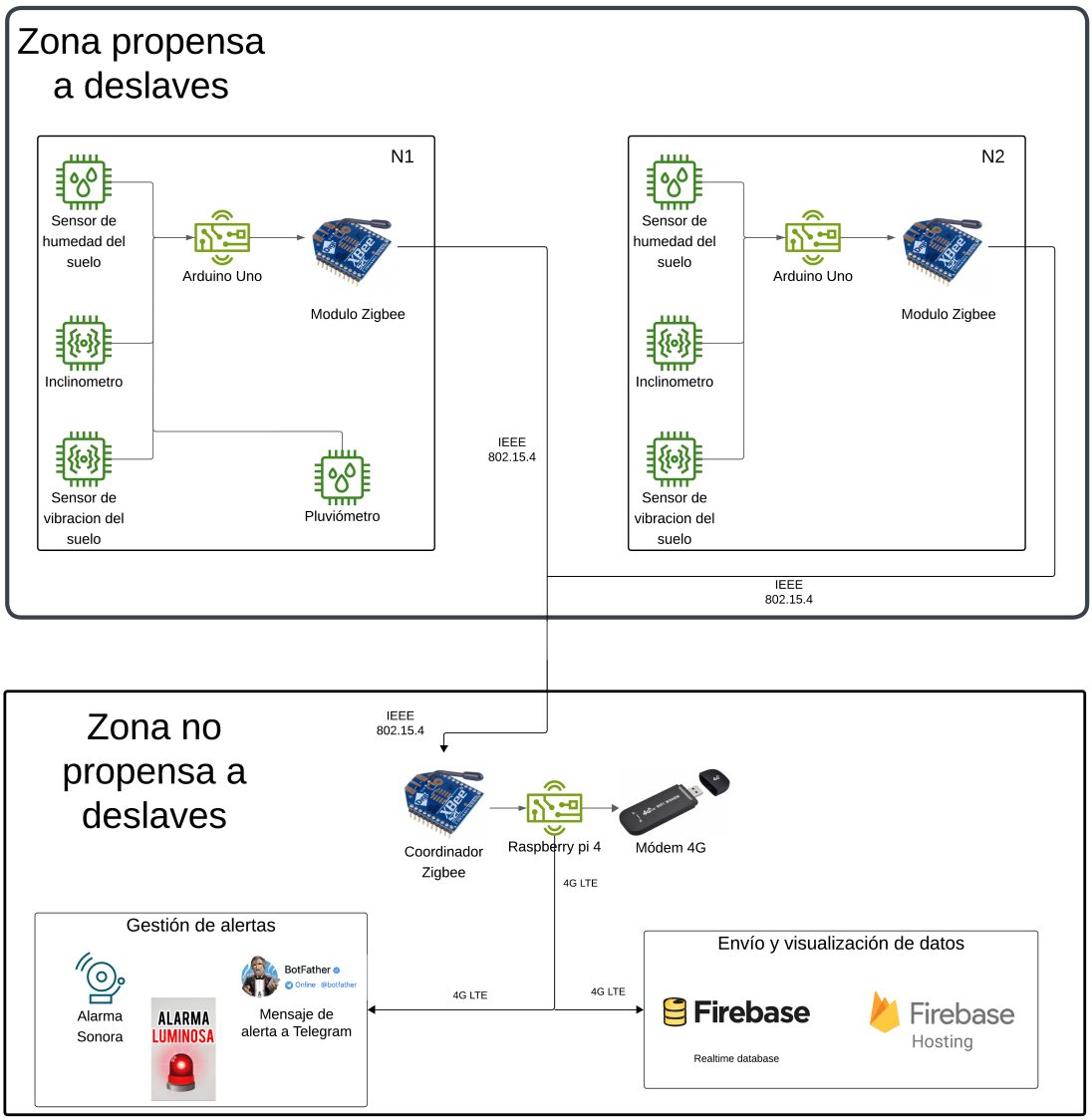
3.5.3 Capa de Red

La capa de red agrupa los mecanismos de comunicación que transportan los datos desde los nodos sensores hasta la plataforma en la nube. Se compone de dos segmentos

complementarios: la red inalámbrica ZigBee que interconecta los nodos sensores con el nodo coordinador, y el enlace 4G LTE que conecta el coordinador con los servicios remotos. La Figura 31 muestra el diagrama de conectividad completo del sistema, incluyendo ambos segmentos de red.

Figura 31.

Arquitectura de red del sistema: enlace ZigBee IEEE 802.15.4 entre nodos sensores y coordinador, y enlace 4G LTE



Nota. Autoría propia.

3.5.3.1 Red inalámbrica de sensores (ZigBee)

El segmento local de comunicación se basa en el protocolo ZigBee 802.15.4 y está formado por dos nodos sensores y un nodo coordinador. La topología adoptada es en estrella: cada nodo sensor transmite sus datos directamente al coordinador sin pasar por otros nodos, lo que simplifica el enrutamiento y mejora la confiabilidad del enlace en el terreno. Los módulos XBee S2 se configuraron en modo AT transparente, de forma que la Raspberry Pi recibe los datos como si fueran texto plano sobre un puerto serial, sin necesidad de gestionar tramas de red de nivel superior.

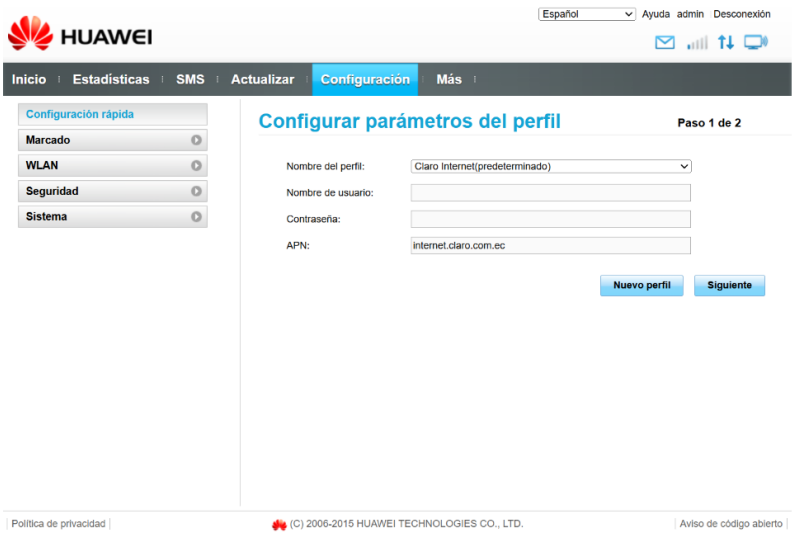
Cada nodo envía su bloque de datos siguiendo un protocolo de mensaje estructurado por líneas. El bloque inicia con la identificación del nodo emisor, seguida de una línea por cada variable medida. Ambos nodos transmiten humedad del suelo, inclinación del terreno y actividad sísmica. La diferencia entre ellos radica en que el nodo N1 incluye adicionalmente la variable de precipitación acumulada, ya que cuenta con un pluviómetro integrado, mientras que el nodo N2 no dispone de ese sensor. El nodo coordinador reconoce esta distinción de forma automática y adapta la recepción esperando los campos correspondientes a cada nodo antes de considerar el bloque como completo. Para ahorrar energía, los nodos sensores permanecen en reposo entre ciclos de medición y se despiertan solo para transmitir, con un intervalo configurado en el firmware del módulo XBee que se mencionó en la explicación de la Figura 22.

3.5.3.2 Red de acceso a Internet (LTE)

El segundo segmento conecta el nodo coordinador con la plataforma en la nube. Para ello se utiliza un módem USB conectado a la Raspberry Pi, que establece la conexión a través de la red celular de la operadora Claro Ecuador. La zona de implementación (sector El Guadual, vía Ibarra-San Lorenzo) cuenta con cobertura de la red de datos 4G de esta operadora, lo que garantiza una latencia suficientemente baja para las necesidades del sistema. Para la operación

continua del sistema, es necesario contratar un paquete de datos con Claro Ecuador y renovarlo de forma mensual, lo que representa un costo operativo recurrente a considerar en el mantenimiento del prototipo. Para habilitar el acceso a la red de datos, el módem fue configurado mediante su interfaz web con los parámetros del APN (Access Point Name) correspondientes a la operadora celular de Claro, tal como se muestra en la Figura 32.

Figura 32.
Configuración del modem USB 4G

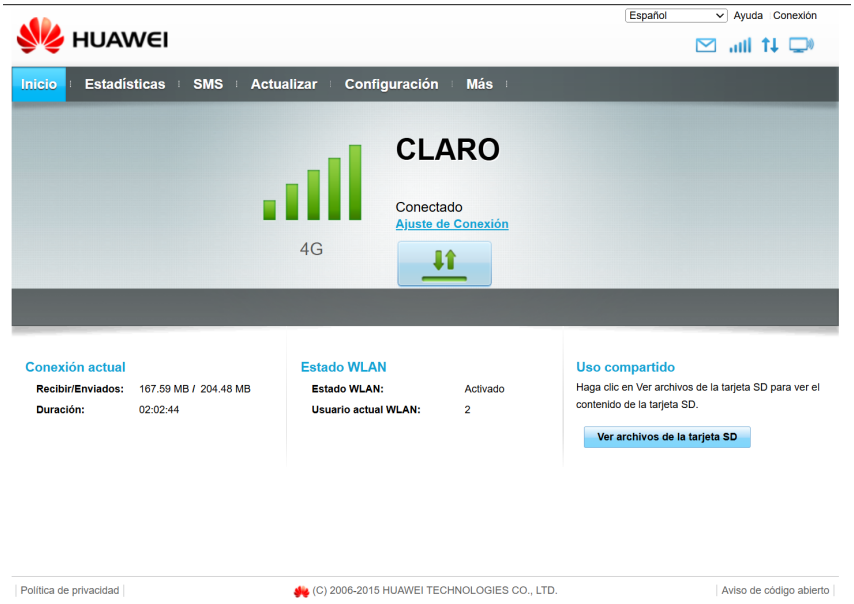


Nota. Autoría propia.

Una vez que el coordinador recibe y valida un bloque de datos completo, abre una conexión HTTPS hacia la interfaz REST de Firebase para subir la información. La misma conexión celular también es el canal por el que se envían los mensajes de alerta hacia Telegram cuando alguna variable supera su umbral crítico; ambos flujos de salida comparten el mismo enlace LTE. El software implementa tiempos máximos de espera por solicitud y reconexión automática: si la señal celular falla en un ciclo, el sistema registra el error y retoma las transmisiones en el ciclo siguiente, sin interrumpir el monitoreo local ni el control de las alarmas. La viabilidad de este enlace continuo se respalda con la cobertura de la operadora para la zona de implementación, ilustrado en la Figura 33.

Figura 33.

Cobertura 4G LTE en la zona de implementación



Nota. Autoría propia.

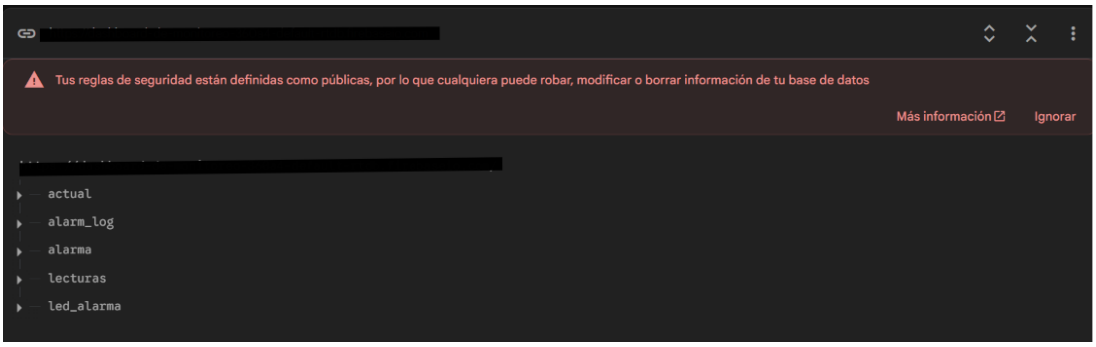
3.5.4 Capa de Centro de Datos

La capa de centro de datos es la encargada de recibir, almacenar y poner a disposición toda la información generada por los nodos del sistema. El servicio utilizado es Firebase Realtime Database, una base de datos NoSQL alojada en la nube de Google que sincroniza los datos en tiempo real con todos los clientes conectados. Su modelo de almacenamiento basado en un árbol JSON resultó conveniente para representar la estructura de datos del sistema de forma directa y eficiente.

3.5.4.1 Estructura de datos en Firebase

La base de datos se organiza en cinco ramas, cada una con un propósito específico dentro del sistema. La estructura general del árbol JSON resultante se ilustra en la Figura 34.

Figura 34.
Estructura general de la base de datos en Firebase



Nota. Autoría propia.

- **Historial de lecturas (/lecturas):** Almacena el registro cronológico plano de todas las mediciones de todos los nodos. Cada vez que el coordinador sube un nuevo bloque, Firebase genera automáticamente una clave única como identificador del registro. Cada entrada incluye el identificador del nodo emisor, los valores de las variables monitoreadas para ese nodo y la marca de tiempo de la lectura, como se observa en la Figura 35.

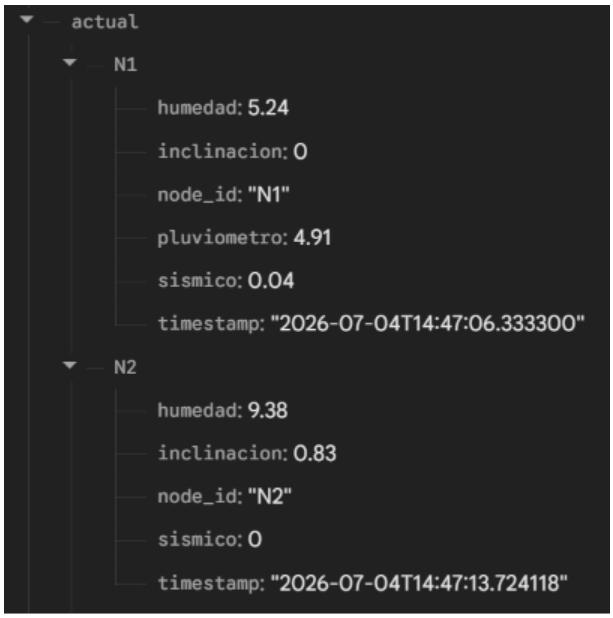
Figura 35.
Rama de historial de lecturas en Firebase



Nota. Autoría propia.

- **Estado actual por nodo (/actual/N1 y /actual/N2):** A diferencia del historial, esta rama mantiene el último bloque de datos de cada nodo en un subnodo independiente. Cuando llega información del nodo N1, se sobreescribe únicamente en /actual/N1; cuando llega del nodo N2, en /actual/N2. De este modo, el panel de control puede consultar el estado en vivo de cada nodo de forma individual sin recorrer el historial completo, tal como se muestra en la Figura 36.

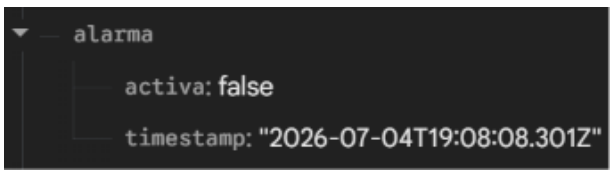
Figura 36.
Rama de estado actual por nodo en Firebase



Nota. Autoría propia.

- **Control de la alarma sonora (/alarma):** Rama que indica si la sirena debe estar activa o apagada. El panel web escribe en esta ruta cuando un operador autorizado presiona el botón de activación, y el nodo coordinador la consulta periódicamente para iniciar o detener la reproducción del audio (véase la Figura 37).

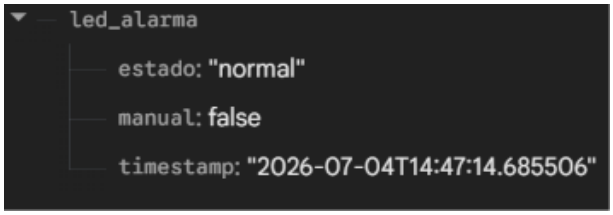
Figura 37.
Rama de control de alarma sonora en Firebase



Nota. Autoría propia.

- **Control del semáforo visual (/led_alarma):** Almacena el estado del semáforo (verde, amarilla o roja) y una bandera que indica si el control proviene del sistema automático o fue forzado manualmente por un operador desde el panel web. El coordinador actualiza esta rama después de cada ciclo de datos, y el panel web la escucha en tiempo real para reflejar visualmente el estado del LED físico, como se ilustra en la Figura 38.

Figura 38.
Rama de control del semáforo visual en Firebase



Nota. Autoría propia.

- **Registro de auditoría (/alarm_log):** Cada vez que un operador autenticado activa o desactiva la sirena desde el panel de control, el sistema crea una nueva entrada en esta rama con el nombre de usuario, la acción realizada y la marca de tiempo (Figura 39). El nodo coordinador lee periódicamente este registro y lo replica en un archivo local de texto en el escritorio de la Raspberry Pi.

Figura 39.
Rama de registro de auditoría en Firebase



Nota. Autoría propia.

Para la fase de desarrollo y pruebas del prototipo, las reglas de acceso de la base de datos se

configuraron de forma abierta. En una implementación de producción se recomienda restringir el acceso mediante políticas de autenticación que limiten la escritura únicamente a los clientes autorizados del sistema.

3.5.5 Capa de Servicio de Aplicación

La capa de servicio de aplicación constituye el punto de interacción entre el sistema y sus usuarios. Comprende el panel de control web desde el que los operadores pueden visualizar las variables monitoreadas y gestionar las alarmas, y el sistema de notificaciones que alerta de forma automática ante cualquier situación de peligro.

3.5.5.1 Panel de control web

El panel de control es una aplicación desarrollada con tecnologías web (HTML, CSS y JavaScript) y publicada a través del servicio Firebase Hosting, que garantiza su disponibilidad continua sin requerir infraestructura de servidor propia.

La interfaz central permite al operador seleccionar el nodo que desea monitorear (N1 o N2). A partir de esa selección, se muestran cuatro tarjetas de estado con las variables activas para ese nodo: humedad del suelo, inclinación del terreno, actividad sísmica y, exclusivamente para el nodo N1, nivel de precipitación. Cada tarjeta muestra el valor actual de la variable, el umbral crítico configurado y una etiqueta de estado que cambia de color según el nivel de riesgo: verde en condición normal, amarillo en alerta (entre el 85 % y el 100 % del umbral) y rojo en peligro (umbral superado). Debajo de las tarjetas, gráficas de línea trazan el comportamiento histórico de cada variable activa; el operador puede navegar por el historial mediante botones de paginación que muestran veinte registros por pantalla. Cuando se visualiza el nodo N2, la gráfica de precipitación se oculta de forma automática dado que ese nodo no dispone de pluviómetro. La vista principal de monitoreo se presenta en la Figura 40.

Figura 40.

Vista principal de monitoreo en el panel de control web

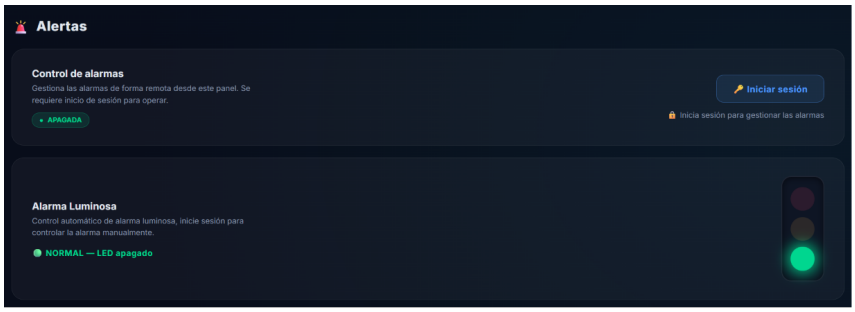


Nota. Autoría propia.

El panel incluye además una sección de control de alarmas. Desde allí, el operador puede consultar el estado actual del semáforo visual instalado en el nodo coordinador. Para interactuar con los actuadores, el operador debe iniciar sesión con sus credenciales registradas, como se ilustra en la Figura 41.

Figura 41.

Autenticación de usuario para gestión de alertas

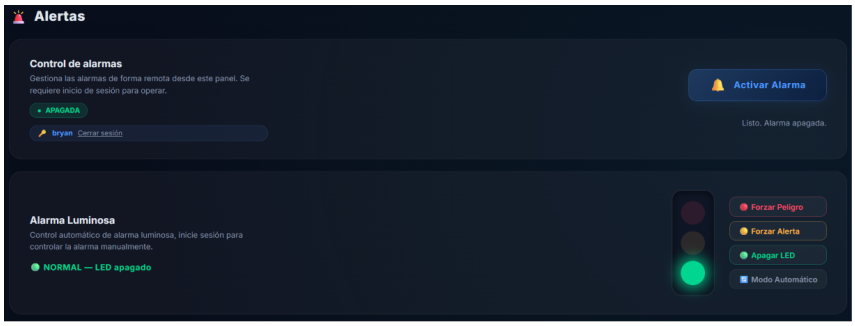


Nota. Autoría propia.

Una vez autenticado, el usuario puede forzar manualmente el estado del semáforo (modo manual o modo automático) o activar y desactivar la sirena sonora, tal como se muestra en la Figura 42. Cada acción de activación queda registrada en la rama de auditoría de Firebase, con

el nombre de usuario, la acción y la hora exacta.

Figura 42.
Interfaz de gestión manual de alarmas sonora y visual



Nota. Autoría propia.

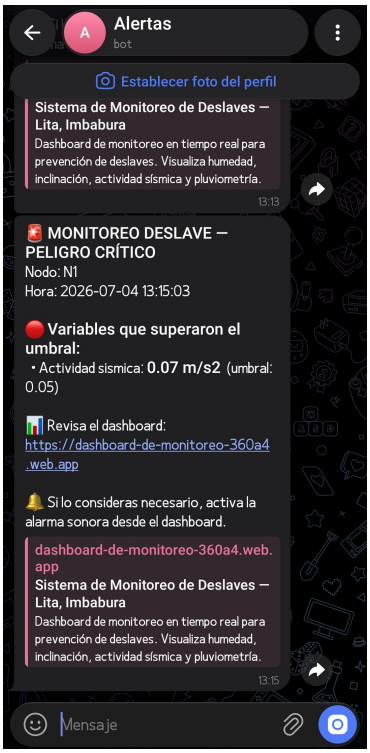
3.5.5.2 Sistema de notificaciones por Telegram

Para garantizar que los operadores sean informados de una situación de peligro incluso cuando no están consultando activamente el panel web, el sistema integra un bot de mensajería construido con la interfaz de programación de Telegram.

La lógica de notificación corre en segundo plano dentro del nodo coordinador. Después de cada ciclo de datos, el software evalúa si alguna variable ha alcanzado o superado su umbral crítico. En ese caso, el estado del sistema escala a peligro y se envía automáticamente un mensaje al chat configurado (Figura 43). El mensaje incluye las variables que superaron el límite, sus valores actuales y un enlace al panel de control para facilitar la supervisión.

Figura 43.

Mensaje automático de alerta enviado a Telegram



Nota. Autoría propia.

El diseño propuesto constituye un prototipo funcional, en el que cada componente de hardware y software opera de forma coordinada para cumplir con los requisitos de monitoreo continuo, detección de condiciones de riesgo y emisión oportuna de alertas. Con el sistema completamente desarrollado, como siguiente paso se procederá con las pruebas de funcionamiento del prototipo.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

El presente capítulo expone el proceso de evaluación del prototipo desarrollado, con el propósito de validar su funcionamiento. Para garantizar un análisis, las pruebas se han estructurado en dos etapas. La primera comprende una validación funcional en un entorno controlado, enfocada en comprobar la respuesta de cada sensor ante la emulación de condiciones de peligro, así como la correcta transmisión de datos a través de las redes ZigBee y 4G LTE, y la activación automática de las alarmas. Por su parte, la segunda etapa corresponde a la validación operativa en campo, en la cual el sistema es instalado en el sector El Guadual para funcionar de forma continua y autónoma. El objetivo principal de esta fase final es evaluar la estabilidad del hardware, la fiabilidad de las comunicaciones y el comportamiento del sistema de alerta al enfrentar las condiciones ambientales reales para las que el equipo fue diseñado.

4.1 Metodología de pruebas

La primera etapa consiste en pruebas por emulación realizadas en laboratorio. En lugar de esperar condiciones naturales extremas, cada sensor se estimula manualmente para reproducir el escenario que se quiere evaluar. Esto permite verificar, de forma controlada y repetible, que el sistema detecta correctamente las condiciones de alerta y peligro, transmite los datos por la red ZigBee al nodo coordinador, los sube a Firebase y activa las alarmas según corresponde. Las pruebas se organizan en cuatro escenarios, uno por cada variable monitorizada: lluvia intensa, humedad alta del suelo, vibración del suelo y movimiento del terreno.

La segunda etapa traslada el sistema al sector El Guadual. Una vez instalados los nodos en los puntos definidos en el Capítulo 3, el prototipo opera de forma continua con todas las variables

activas al mismo tiempo. Aquí no se fuerza ninguna condición: se registran las lecturas tal como el terreno las produce. El objetivo es evaluar la estabilidad del sistema en su entorno real, la calidad de la comunicación ZigBee en campo, la subida de datos por el enlace 4G LTE y el comportamiento de las alarmas ante condiciones naturales.

La Tabla 40 resume los escenarios evaluados, el sensor involucrado, el umbral crítico definido y el método utilizado en cada caso.

Tabla 40.
Resumen de la metodología de pruebas

Etapa	**Escenario**	**Variable**	**Umbral**	**Método**
Emulación	Lluvia intensa	Precipitación	50 mm	Verter agua al recipiente del pluviómetro
Emulación	Humedad alta del suelo	Humedad del suelo	40 %	Saturar el suelo con agua
Emulación	Vibración del suelo	Actividad sísmica	0,05 m/s²	Agitar manualmente el acelerómetro MPU-6050
Emulación	Movimiento del terreno	Inclinación	5°	Inclinar manualmente el sensor MPU-6050
Campo	Todas las variables (N1 + N2)			Operación continua en el sector el Guadual

Nota. Autoría propia.

4.2 Ensamblaje de los nodos de la red Zigbee

Una vez concluida la fase de diseño y selección de componentes detallada en el capítulo anterior, se determinó el costo total de los elementos de hardware requeridos para la construcción del prototipo. La Tabla 41 detalla el presupuesto de los componentes electrónicos y materiales de ensamblaje, sumando un costo total de $ 581.85, lo que representa la inversión realizada para el despliegue del sistema de monitoreo.

Tabla 41.
Presupuesto estimado de componentes de hardware

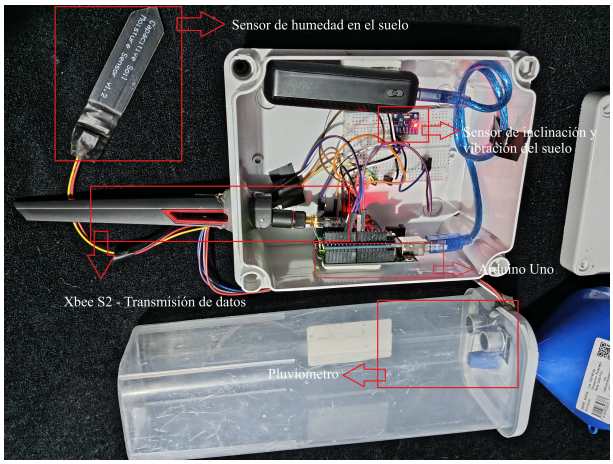
Componente / Material	Cantidad	Costo Unit. (USD)	Costo Total (USD)
Raspberry Pi 4 Model B (Nodo Coordinador)	1	120.00	120.00
Cable de HDMI a micro HDMI	1	6.00	6.00
Arduino Uno R3 (Nodos Sensores)	2	20.00	40.00
Shield XBee para Arduino	2	12.60	25.20
Adaptador USB a XBee	1	9.75	9.75
Cables USB de alimentación para Adaptador USB Xbee	1	5.00	5.00
Módulo ZigBee XBee S2 (Tx/Rx)	3	40.00	120.00
Antenas RP-SMA 10 db para XBee	3	2.30	6.90
Sensor MPU-6050 (Vibración/Inclinación)	2	4.50	9.00
Sensor Ultrasónico HC-SR04 (Pluviómetro)	1	3.00	3.00
Recipiente + Embudo para pluviómetro	1	5.00	5.00
Sensor capacitivo V1.2 (Humedad del suelo)	2	3.50	7.00

Amplificador de audio PAM8403 (Alarma sonora)	1	2.50	2.50
Bocinas de 3W 8 ohmios	2	5.00	10.00
Cable jack de audio de 3.5 mm	1	2.50	2.50
Módulos LED 12V (Baliza visual)	3	1.50	4.50
Módulo elevador DC-DC (a 12V)	1	4.00	4.00
Transistor MOSFET IRF540N + Disipador de calor	1	3.00	3.00
Módem Celular USB Huawei E8372h LTE	1	28.00	28.00
Chip de operadora Claro + Paquete de datos	1	10.00	10.00
Power bank de 10000 mAh	2	15.00	30.00
Power bank de 50000 mAh	1	50.00	50.00
Cajas de protección (Grado IP65)	3	20.00	60.00
Cables de conexión + Estaño	1	8.00	8.00
Protoboards pequeños	3	2.50	7.50
Materiales adicionales (Taipe, silicona, cinta doble faz)	1	5.00	5.00
Costo Total Estimado			**$ 581.85**

Nota. Autoría propia.

Posterior a la adquisición del hardware, se procedió al ensamblaje de los tres dispositivos que integran el sistema. La Figura 44 muestra el nodo sensor 1 en su estado final: los sensores han sido correctamente montados y calibrados, y el conjunto de componentes detallado en la fase de diseño se encuentra completamente integrado y operativo.

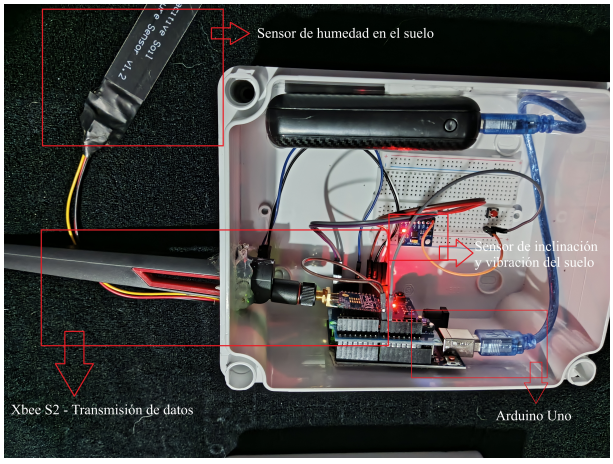
Figura 44.
Nodo 1 ensamblado



Nota. Autoría propia.

De manera similar, la Figura 45 presenta el nodo sensor 2 completamente ensamblado. En este dispositivo se pueden apreciar los sensores de humedad del suelo, vibración e inclinación montados en el interior, junto con las carcasas de protección que garantizan la integridad del equipo durante su operación continua en campo.

Figura 45.
Nodo 2 ensamblado

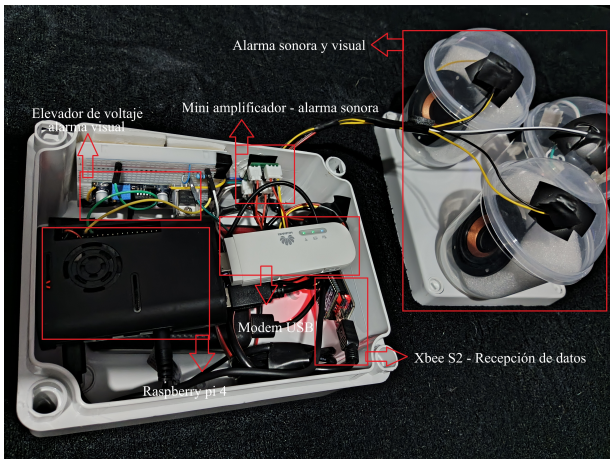


Nota. Autoría propia.

Finalmente, la Figura 46 muestra el nodo coordinador en su versión final. Este equipo actúa como el núcleo de comunicación del sistema: recibe los datos enviadas por los nodos sensores a través de la red ZigBee, gestiona la transmisión de esa información hacia la nube de Firebase

y controla la activación del sistema de alarmas físicas.

Figura 46.
Nodo coordinador ensamblado



Nota. Autoría propia.

4.3 Pruebas por emulación

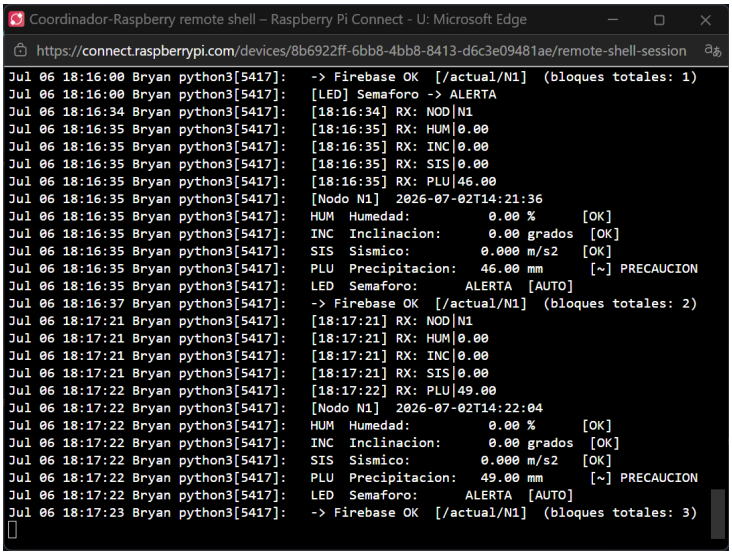
El objetivo principal de esta etapa es validar la respuesta del sistema frente a condiciones ambientales extremas en un ambiente controlado. Para lograrlo, se procedió a estimular manualmente cada sensor, forzando que las mediciones alcancen y superen los umbrales críticos previamente establecidos. La metodología de prueba se estructuró mediante escenarios independientes, dedicando un análisis específico para cada variable monitorizada. En cada uno de estos escenarios se evaluó la integridad del flujo de la información en toda su trayectoria: comenzando desde la lectura y procesamiento en los microcontroladores y la posterior transmisión inalámbrica mediante la red ZigBee, hasta su recepción en la placa base (Raspberry Pi). En instancias superiores de la red, se verificó la correcta sincronización de los datos hacia la nube de Firebase, su respectiva representación en el panel de control web y, finalmente, la emisión automática de notificaciones de alerta a través del bot de Telegram.

4.3.1 Escenario 1 — Lluvia intensa

El primer escenario de prueba tuvo como objeto verificar la respuesta del sistema ante condiciones de lluvia intensa. La variable de precipitación es gestionada por el nodo sensor 1, el cual incorpora un pluviómetro que está configurado con un umbral crítico de 50 mm de lluvia acumulada.

La metodología consistió en verter agua de manera progresiva directamente sobre el recipiente colector del pluviómetro, permitiendo controlar con exactitud el incremento de la lectura. Durante el proceso se verificó la integridad de la cadena de transmisión: se comprobó que el microcontrolador procesara la lectura del sensor, construyera el paquete de datos y lo enviara, mediante el protocolo ZigBee, hacia el nodo coordinador. La correcta recepción de este bloque de datos se evidencia en la Figura 47.

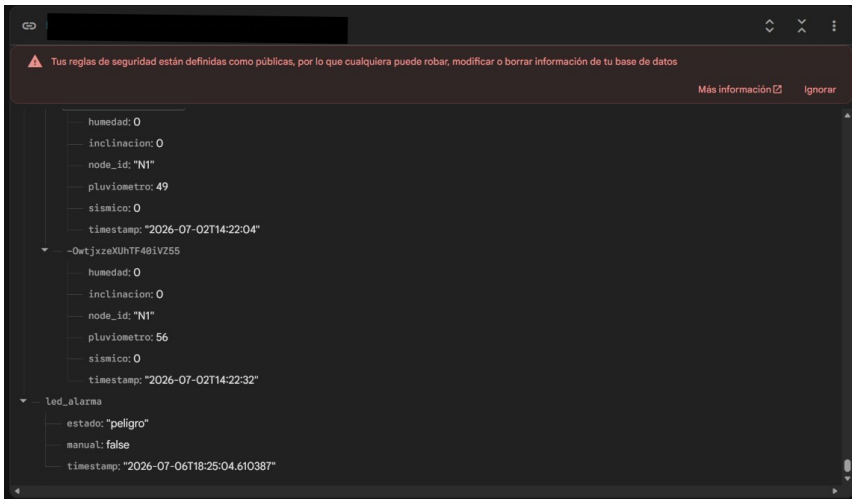
Figura 47.
Bloque de datos recibido por el coordinador



Nota. Autoría propia.

Una vez recibido el paquete de datos en el nodo coordinador, se verificó que la Raspberry Pi publicara correctamente la información en la base de datos de Firebase, actualizando en tiempo real los registros correspondientes al nodo sensor 1, tal como se muestra en la Figura 48.

Figura 48.
Registro en la base de datos de Firebase



Nota. Autoría propia.

Al incrementar el volumen de agua de forma progresiva hasta superar aproximadamente el 85 % del umbral establecido (alrededor de 42,5 mm), el sistema identificó la condición de alerta. Como se aprecia en la Figura 49, el estado del nodo en el panel de control cambió automáticamente al estado de alerta amarilla.

Figura 49.
Estado de alerta amarilla en el dashboard

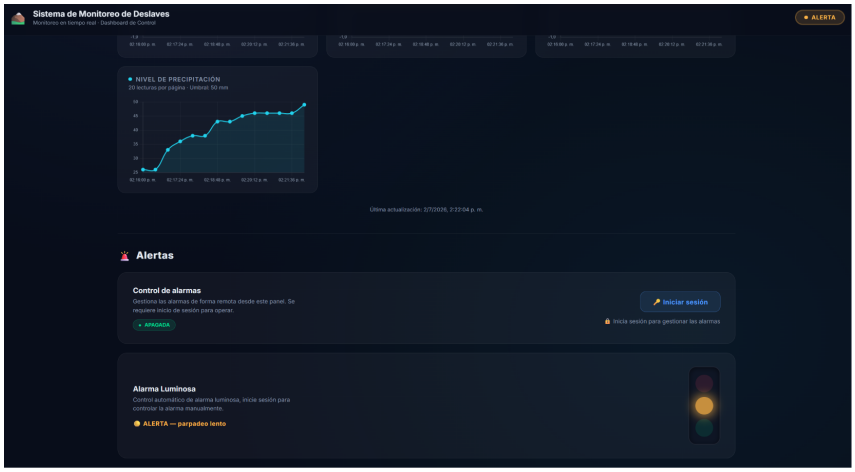


Nota. Autoría propia.

De manera simultánea al cambio de estado, el dashboard desplegó una advertencia visual para notificar al usuario sobre la condición de riesgo. En la Figura 50 se puede observar esta alerta

visual amarilla activa en la interfaz web. De forma paralela, en el plano físico los módulos LED conectados al nodo coordinador iniciaron un ciclo de parpadeo lento, actuando como indicador de precaución en el entorno local.

Figura 50.
Activación de alarma visual en estado de alerta amarilla



Nota. Autoría propia.

Al continuar vertiendo agua hasta superar el límite crítico de 50 mm, el sistema entró en el estado de peligro inminente. Como respuesta, el nodo sensor 1 en el panel de control web cambió al estado de alerta roja, indicando que el nivel de precipitación representa un riesgo real para el área monitoreada (Figura 51).

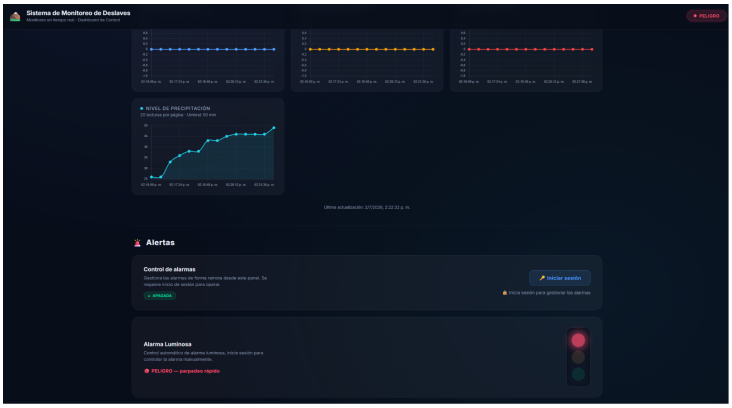
Figura 51.
Estado de alerta roja en el dashboard



Nota. Autoría propia.

Junto con el cambio de estado, el dashboard desplegó automáticamente la advertencia visual. En la Figura 52 se aprecia esta alerta roja activa en la interfaz web, la cual permanece visible hasta que el operador la confirme o la variable descienda por debajo del umbral.

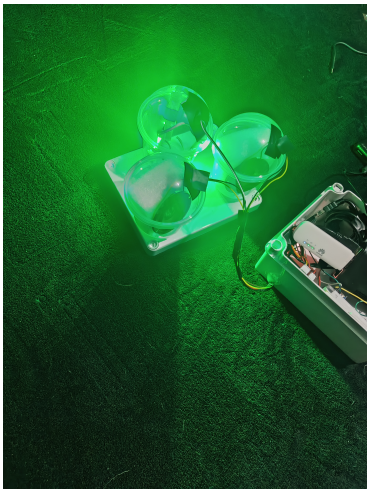
Figura 52.
Activación de alarma visual en estado de alerta roja



Nota. Autoría propia.

En el plano físico, los módulos LED conectados al nodo coordinador operaron de forma diferenciada según el nivel de alerta activo: durante el estado de alerta amarilla, los módulos iniciaron un ciclo de parpadeo lento como señal de precaución; al escalar al estado de alerta roja, la frecuencia de parpadeo aumentó a un ritmo rápido para indicar peligro inminente. La Figura 53 evidencia la activación de la alarma luminosa durante la prueba.

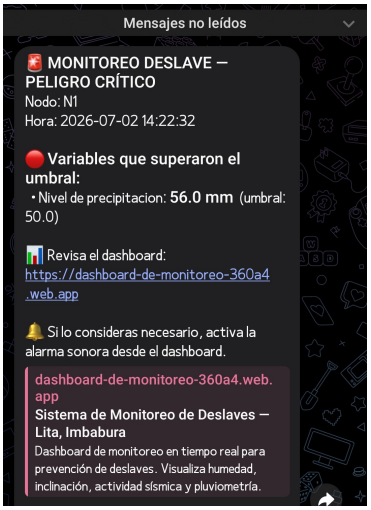
Figura 53.
Alarma visual activada



Nota. Autoría propia.

Para completar la validación del escenario, se confirmó que, en el instante en el que la lectura de precipitación superó el umbral de peligro, el sistema generara de forma automática una notificación al bot de Telegram. Como se ilustra en la Figura 54, el mensaje detalló el identificador del nodo afectado y el nivel exacto de lluvia registrado en ese momento, garantizando una comunicación inmediata de la alerta hacia los usuarios.

Figura 54.
Mensaje automático de alerta enviado a Telegram



Nota. Autoría propia.

Una vez concluida la secuencia de prueba, al retirar el agua del recipiente colector el nivel de precipitación descendió por debajo de los umbrales configurados, y el sistema retornó automáticamente al estado normal. Como se observa en la Figura 55, el indicador del nodo sensor 1 recuperó su color verde en el panel de control, confirmando que el sistema es capaz de restablecer su estado base de forma autónoma una vez que la condición de riesgo ha desaparecido.

Figura 55.

Retorno al estado normal en el dashboard tras el escenario de lluvia

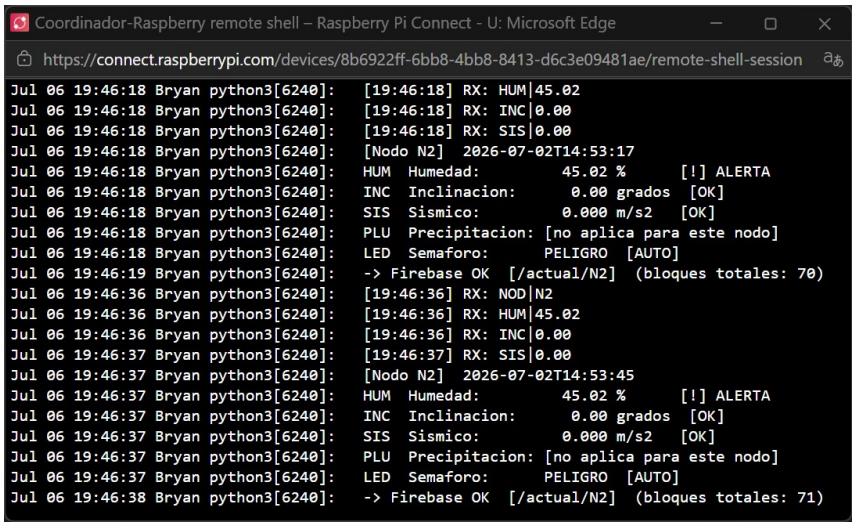


Nota. Autoría propia.

4.3.2 Escenario 2 — Alto nivel de humedad del suelo

El segundo escenario de evaluación tuvo como objetivo verificar la respuesta del sistema ante condiciones extremas de humedad en el suelo. Esta variable es crítica para anticipar deslizamientos, dado que un terreno saturado incrementa significativamente la inestabilidad de la ladera. Para esta prueba se activaron de manera simultánea los sensores capacitivos de humedad de ambos nodos (N1 y N2), ambos configurados con un umbral crítico del 40 % de humedad. La metodología consistió en humedecer de forma independiente y controlada el suelo donde estaba ubicado cada sensor para reproducir distintos niveles de riesgo. En primera instancia, se comprobó que los microcontroladores adquirieran correctamente las lecturas capacitivas y las enviaran, vía ZigBee, hacia el nodo coordinador; la recepción de una trama representativa de datos se ilustra en la Figura 56.

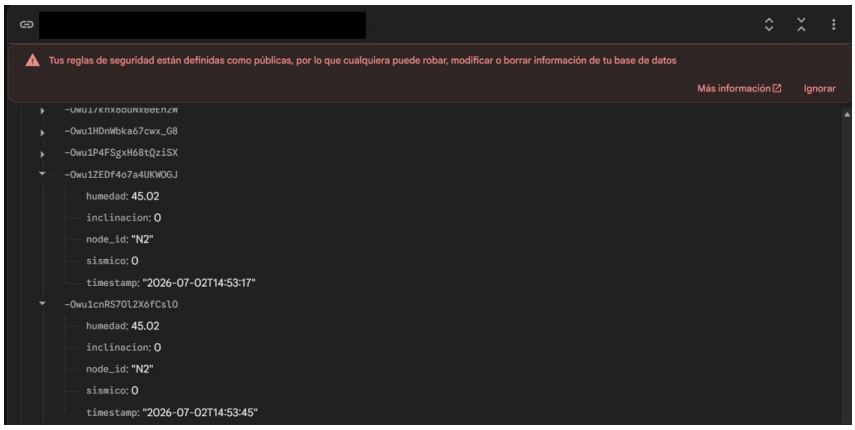
Figura 56.
Bloque de datos recibido por el coordinador



Nota. Autoría propia.

A continuación, se verificó que el nodo coordinador publicara correctamente las mediciones de humedad de ambos nodos en la base de datos de Firebase, asegurando la trazabilidad histórica de las lecturas. Los registros actualizados en tiempo real se pueden observar en la Figura 57.

Figura 57.
Registro en la base de datos de Firebase



Nota. Autoría propia.

En la siguiente fase, se incrementó progresivamente la humedad en el suelo donde estaba ubicado el nodo N1 hasta que su lectura superó el 85 % del umbral establecido, condición que

activó el estado de alerta temprana. En respuesta, el indicador del nodo N1 en el panel de control cambió al estado de alerta amarilla. Dado que esta condición representa un nivel de precaución y no de peligro inminente, en este estado el sistema no emite notificaciones a Telegram; la advertencia se limita al cambio visual en la interfaz y a la activación física de los módulos LED con un parpadeo lento. La Figura 58 muestra el estado del dashboard con el nodo N1 en alerta amarilla.

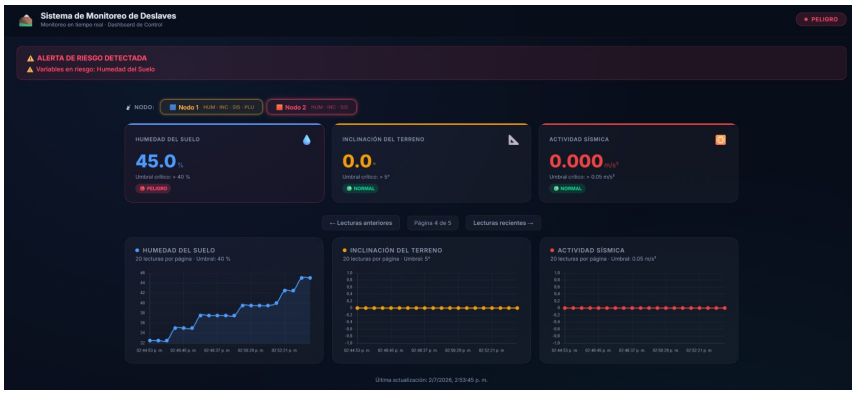
Figura 58.
Estado de alerta amarilla en el dashboard



Nota. Autoría propia.

Para reproducir el estado de alerta roja, se humedeció el suelo del nodo N2 hasta saturarlo completamente, forzando su lectura por encima del límite crítico del 40 %. Ante esta condición, el estado del nodo N2 en el panel de control cambió a alerta roja. La Figura 59 muestra el estado del dashboard con el nodo N1 en alerta amarilla y el nodo N2 en alerta roja de forma simultánea, lo que demuestra la capacidad del sistema para gestionar distintos niveles de riesgo en los dos nodos de forma independiente.

Figura 59.
Estado de alerta roja en el dashboard



Nota. Autoría propia.

En conjunto con la actualización del estado del nodo N2, el dashboard desplegó automáticamente la advertencia de alerta roja, visible en la Figura 60. En el plano físico, los módulos LED escalaron su frecuencia a un parpadeo rápido, reforzando la advertencia de peligro inminente en el entorno local. De igual forma, tanto en el estado de alerta amarilla como en el de alerta roja, la alarma visual se activó en el plano físico: parpadeo lento en alerta amarilla y parpadeo rápido en alerta roja.

Figura 60.
Activación de alarma visual en estado de alerta roja

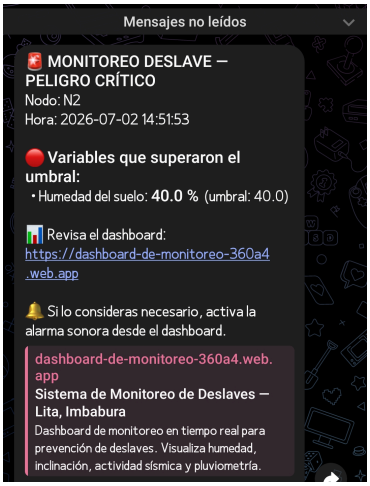


Nota. Autoría propia.

Finalmente, en el instante en el que la lectura del nodo N2 excedió el umbral de peligro, el sistema ejecutó automáticamente el envío de una notificación al bot de Telegram. Como se

muestra en la Figura 61, el mensaje identificó el nodo afectado, el porcentaje crítico de humedad registrado y el nivel de alerta activo, proporcionando a los usuarios remotos la información necesaria para tomar decisiones de forma oportuna.

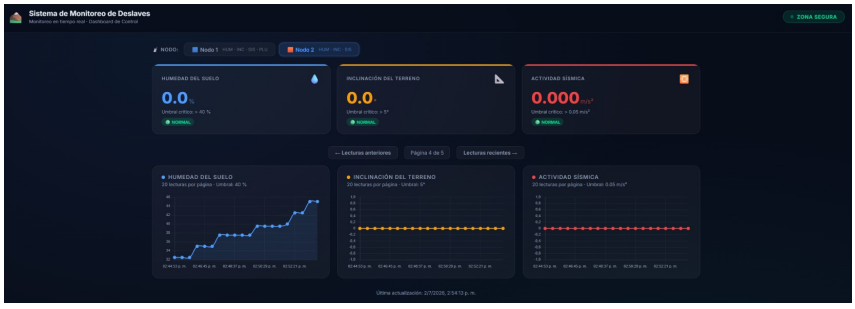
Figura 61.
Mensaje automático de alerta enviado a Telegram



Nota. Autoría propia.

Tras concluir la secuencia de prueba y el nivel de humedad descendiera por debajo de los umbrales configurados, el sistema retornó automáticamente al estado normal. Como se observa en la Figura 62, ambos indicadores de humedad en el panel de control recuperaron su color verde, y la alarma visual física se apagó, confirmando la capacidad del sistema para restablecer su estado base de forma autónoma.

Figura 62.
Retorno al estado normal en el dashboard tras el escenario de humedad



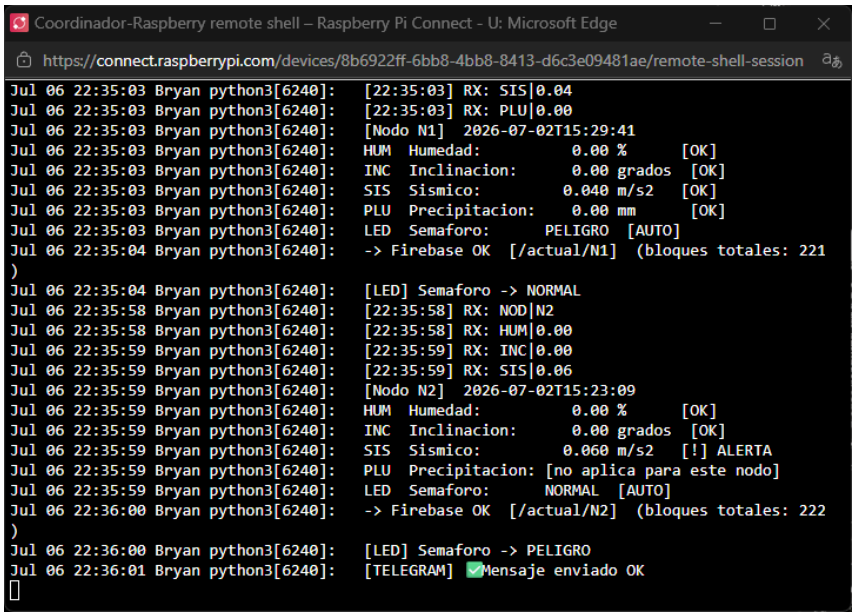
Nota. Autoría propia.

4.3.3 Escenario 3 — Vibración del suelo

El tercer escenario de evaluación se enfocó en la variable de vibración del suelo, una señal indicativa de actividad sísmica que puede preceder a eventos de deslizamiento. Para su medición, los nodos sensorres incorporan un acelerómetro MPU-6050, el cual convierte en el Arduino las lecturas crudas del sensor a unidades de aceleración en m/s^2 y las compara con un umbral crítico de 0.05 m/s^2.

La metodología consistió en mover manualmente el sensor con distintos niveles de intensidad. No se realizaron prubas con ultrasonidos, dado que el umbral crítico tiene una magnitud muy pequeña, cualquier perturbación perceptible provoca que la lectura transite directamente al estado de peligro, sin que el sistema permanezca de forma sostenida en el estado de alerta amarilla. Esta particularidad es inherente a la naturaleza impulsiva de las vibraciones sísmicas. Durante la prueba, se verificó que el microcontrolador procesara la lectura del acelerómetro, construyera el paquete de datos y lo enviara, mediante el protocolo ZigBee, hacia el nodo coordinador; la recepción de este bloque de datos se ilustra en la Figura 63.

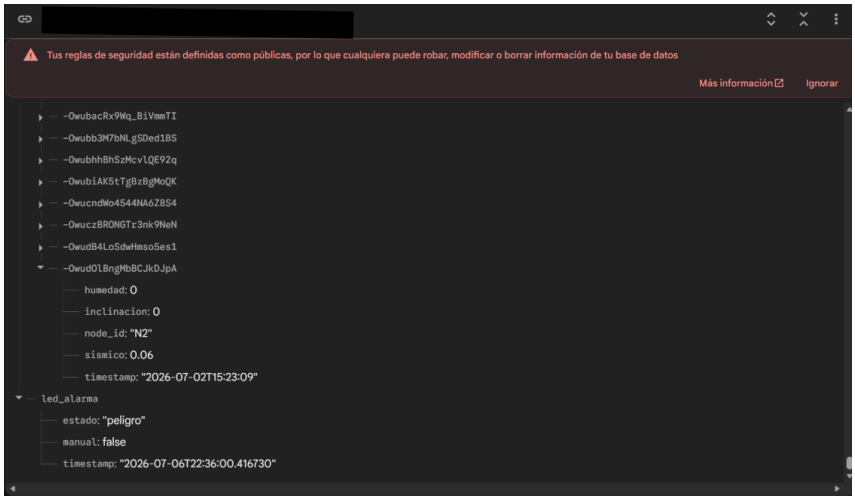
Figura 63.
Bloque de datos recibido por el coordinador



Nota. Autoría propia.

Una vez recibido el paquete en el nodo coordinador, se verificó que la Raspberry Pi publicara correctamente la información en la base de datos de Firebase, actualizando los registros en tiempo real, tal como se muestra en la Figura 64.

Figura 64.
Registro en la base de datos de Firebase

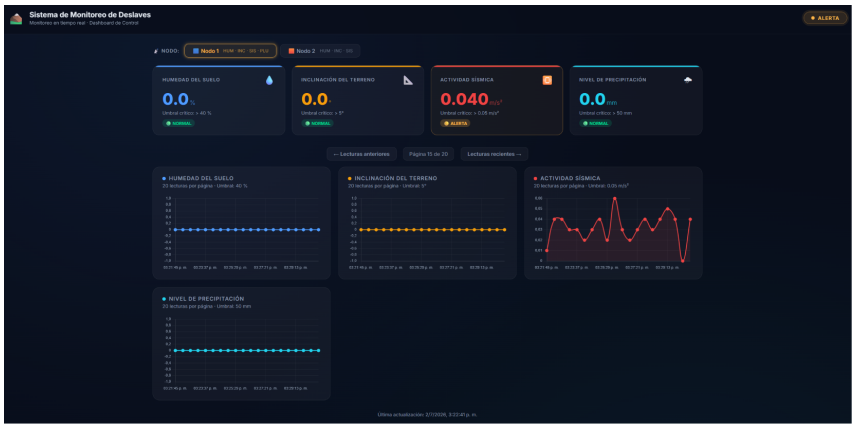


Nota. Autoría propia.

Al incrementar gradualmente la intensidad de la perturbación hasta aproximar la lectura de vibración al 85 % del umbral crítico, el sistema activó el estado de alerta amarilla para el nodo 1. Dado que el rango operativo de la variable de vibración sísmica es muy reducido, el umbral de alerta temprana se configuró en 0,04 m/s^2 (frente al umbral crítico de 0,05 m/s^2), de modo que el sistema pueda distinguir entre ambos estados antes de alcanzar el peligro inminente. La Figura 65 muestra el panel de control con el nodo 1 en estado de alerta amarilla.

Figura 65.

Estado de alerta amarilla en el dashboard — vibración del nodo 1

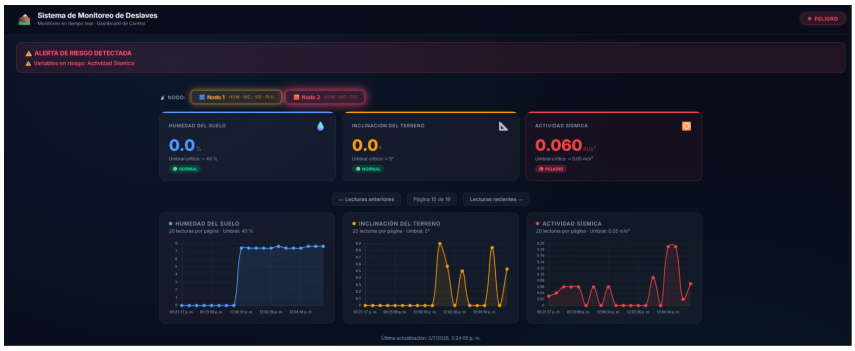


Nota. Autoría propia.

Al incrementar la perturbación hasta superar el límite crítico de 0,05 m/s^2, el sistema escaló al estado de peligro inminente. En consecuencia, el indicador del nodo en el panel de control cambió al estado de alerta roja, como se evidencia en la Figura 66. Simultáneamente, en el plano físico los módulos LED del nodo coordinador escalaron a su frecuencia máxima de parpadeo rápido, señalizando el peligro en el entorno local.

Figura 66.

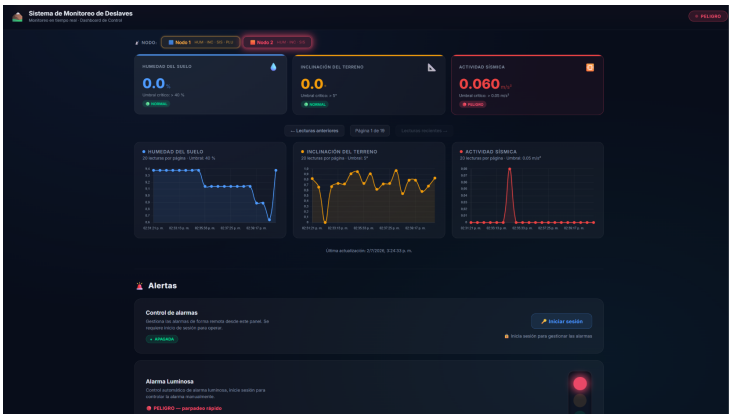
Estado de alerta roja en el dashboard — vibración del nodo 2



Nota. Autoría propia.

De manera simultánea al cambio de estado de alerta, el dashboard desplegó automáticamente la advertencia visual en alerta roja, la cual se puede apreciar en la Figura 67.

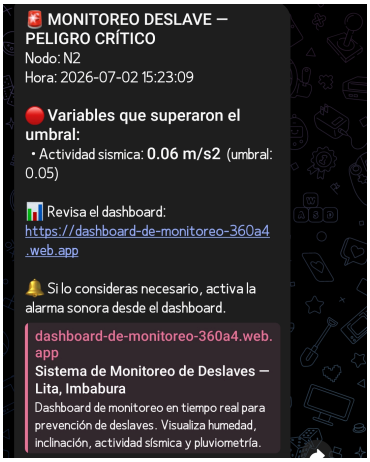
Figura 67.
Activación de alarma visual en estado de alerta roja



Nota. Autoría propia.

Para concluir la validación del escenario, se confirmó que el sistema generara de forma automática una notificación al bot de Telegram en el instante en el que la lectura de vibración excedió el umbral de peligro. Como se ilustra en la Figura 68, el mensaje identificó el nodo afectado, la variable involucrada y el valor exacto registrado, confirmando la operatividad del canal de comunicación externo en condiciones de emergencia.

Figura 68.
Mensaje automático de alerta enviado a Telegram



Nota. Autoría propia.

Al cesar la perturbación, los valores de vibración descendieron por debajo del umbral y el sistema retornó automáticamente al estado normal. La Figura 69 muestra el panel de control

con el nodo sensor 2 de nuevo en color verde, verificando que el sistema restablece su estado base de forma autónoma una vez que la condición de riesgo desaparece.

Figura 69.
Retorno al estado normal en el dashboard tras el escenario de vibración



Nota. Autoría propia.

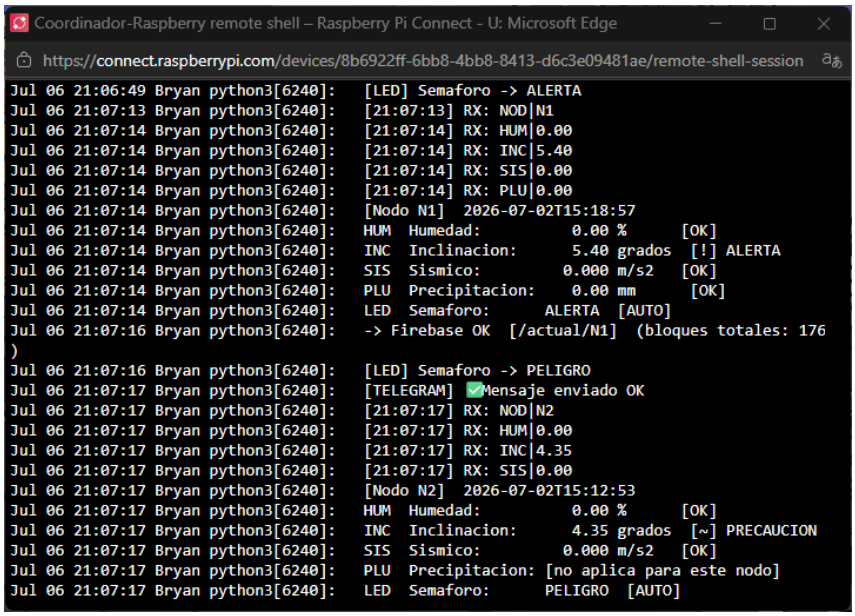
4.3.4 Escenario 4 — Inclinación del terreno

El cuarto y último escenario de la fase de emulación se enfocó en la variable de inclinación, la cual es crítica para detectar desplazamientos graduales del terreno que pueden anticipar un deslizamiento. El mismo acelerómetro MPU-6050 empleado en el escenario anterior opera en este caso como inclinómetro, calculando el ángulo de inclinación respecto a su posición de calibración y comparándolo con un umbral crítico de 5°.

La metodología consistió en inclinar manualmente el sensor con distintos ángulos para simular el desplazamiento progresivo del terreno. Durante la prueba, se verificó que el microcontrolador calculara correctamente el ángulo de inclinación y lo enviara, mediante el protocolo ZigBee, hacia el nodo coordinador; la recepción de este bloque de datos se ilustra en la Figura 70.

Figura 70.

Bloque de datos recibido por el coordinador

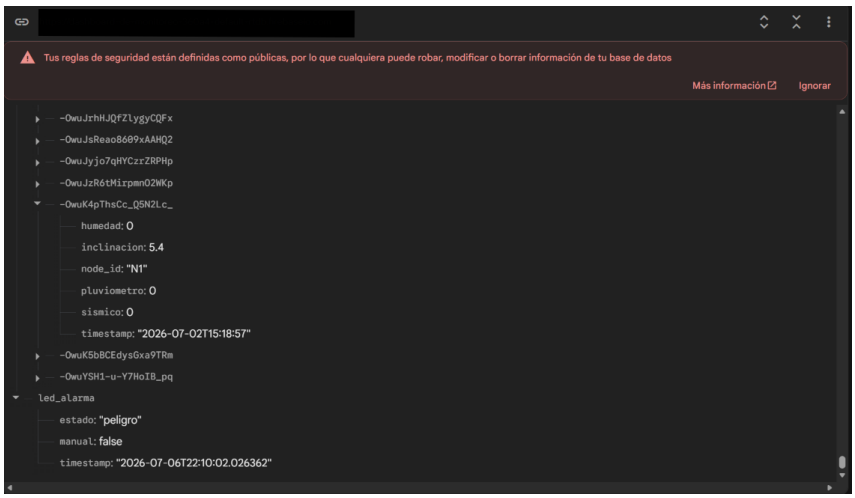


Nota. Autoría propia.

Una vez recibido el paquete en el nodo coordinador, se verificó que la Raspberry Pi publicara los ángulos de inclinación medidos en la base de datos de Firebase, actualizando los registros en tiempo real, como se muestra en la Figura 71.

Figura 71.

Registro en la base de datos de Firebase

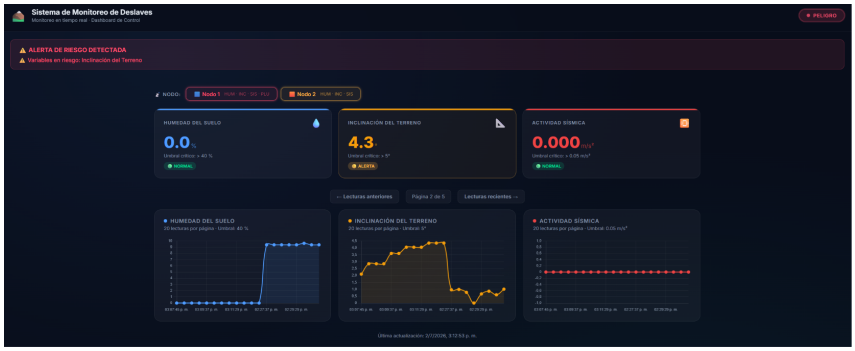


Nota. Autoría propia.

Al inclinar el sensor de forma progresiva hasta superar el 85 % del umbral establecido

(aproximadamente 4,25°), el sistema identificó la condición de alerta temprana. En respuesta, el estado del nodo 2 en el panel de control cambió automáticamente al estado de alerta amarilla, como se ilustra en la Figura 72. En el plano físico, los módulos LED del nodo coordinador iniciaron un ciclo de parpadeo lento como señal de precaución, mientras que, en este estado, el sistema no emite aún notificaciones al bot de Telegram.

Figura 72.
Estado de alerta amarilla en el dashboard



Nota. Autoría propia.

Al continuar incrementando la inclinación hasta superar el límite crítico de 5°, el sistema entró en el estado de peligro inminente. Como respuesta, el indicador del nodo 1 en el panel de control cambió al estado de alerta roja, señalando que el desplazamiento angular detectado representa un riesgo real en el área monitoreada (Figura 73). Simultáneamente, los módulos LED escalaron su frecuencia a un parpadeo rápido, reforzando la advertencia de peligro inminente en el entorno local.

Figura 73.
Estado de alerta roja en el dashboard



Nota. Autoría propia.

Junto con el cambio de estado, el dashboard desplegó automáticamente la advertencia visual, la cual permanece visible hasta que el operador la confirme o la variable descienda por debajo del umbral (Figura 74).

Figura 74.
Activación de alarma visual en estado de alerta roja

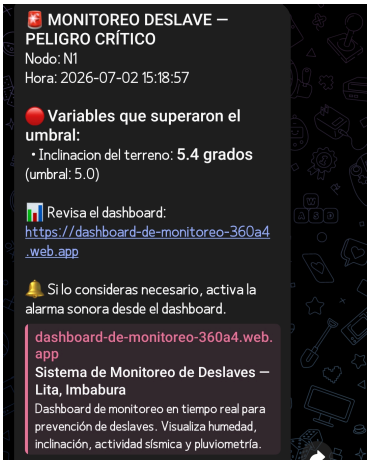


Nota. Autoría propia.

Para completar la validación de la secuencia, se confirmó que en el instante en el que la inclinación excedió el umbral de peligro, el sistema generara de forma automática una notificación al bot de Telegram. Como se ilustra en la Figura 75, el mensaje identificó el nodo

afectado, la variable de inclinación y el ángulo exacto registrado, garantizando la comunicación inmediata de la alerta hacia los usuarios.

Figura 75.
Mensaje automático de alerta enviado a Telegram



Nota. Autoría propia.

Al devolver el sensor a su posición de calibración, el ángulo de inclinación descendió por debajo de los umbrales y el sistema retornó automáticamente al estado normal. Como se aprecia en la Figura 76, la tarjeta del nodo sensor 2 recuperó su color verde en el panel de control, confirmando que el sistema es capaz de restablecer su estado base de forma autónoma una vez que el terreno vuelve a condiciones seguras.

Figura 76.
Retorno al estado normal en el dashboard tras el escenario de inclinación



Nota. Autoría propia.

Los resultados obtenidos en los cuatro escenarios de emulación demuestran que el prototipo responde de manera efectiva ante condiciones controladas. En cada prueba, el sistema detectó correctamente los cambios en la variable monitorizada, los transmitió a través de la red ZigBee y los sincronizó con la base de datos de Firebase sin pérdida de información. El panel de control web reflejó en tiempo real los distintos niveles de riesgo, las alarmas físicas respondieron de forma diferenciada según la severidad del evento, y las notificaciones al bot de Telegram se emitieron únicamente al superar el umbral de peligro. En conjunto, esta fase valida la arquitectura del sistema en un entorno controlado y sienta las bases para su evaluación en condiciones reales de operación.

4.4 Pruebas en campo

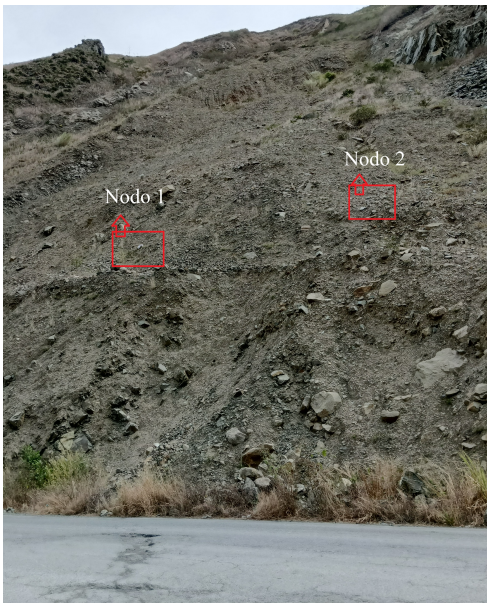
Una vez validado el comportamiento del sistema en condiciones controladas, se procedió a instalarlo en el sector el Guadual, zona catalogada como propensa a deslizamientos. A diferencia de la etapa de emulación, en la que cada variable se evaluó de forma independiente, en esta fase el sistema operó de manera continua y autónoma en el entorno real, monitorizando todas las variables de forma simultánea. El objetivo de esta etapa fue verificar el comportamiento integrado del prototipo bajo condiciones ambientales reales: la estabilidad del enlace de comunicación ZigBee entre los nodos sensores y el coordinador, la transmisión ascendente de datos hacia la nube a través de la conectividad 4G LTE, la actualización del panel de control web y la emisión oportuna de alertas a través del bot de Telegram ante eventos detectados en el terreno.

4.4.1 Instalación

Para llevar a cabo las pruebas en campo, los dispositivos del sistema fueron instalados en el sector el Guadual. El primer paso consistió en seleccionar y delimitar las zonas de ubicación de los nodos. La Figura 77 muestra el mapa de la ladera en el que se indica la posición asignada a cada nodo sensor.

Figura 77.

Ubicación de los nodos finales en el zona propensa a deslaves



Nota. Autoría propia.

Una vez definidas las posiciones, se procedió a la instalación física del nodo sensor 1 en la ladera. Como se observa en la Figura 78, el nodo fue fijado al terreno, con el pluviómetro correctamente orientado para captar la precipitación, el sensor de humedad enterrado en el suelo y el sensor MPU-6050 instalado dentro de la caja de protección.

Figura 78.

Instalación del nodo sensor 1 en la ladera



Nota. Autoría propia.

De manera similar, la Figura 79 ilustra la instalación del nodo sensor 2 en su posición designada dentro de la ladera. En este caso, el sensor capacitivo de humedad fue insertado directamente en el suelo, y el acelerómetro MPU-6050 quedó instalado correctamente para medir las variaciones de inclinación y vibración del terreno.

Figura 79.
Instalación del nodo sensor 2 en la ladera



Nota. Autoría propia.

El nodo coordinador, en cambio, fue ubicado en una zona segura alejada de la ladera, desde donde puede mantener el enlace ZigBee con los nodos sensores sin riesgo de daño ante un eventual deslizamiento. La Figura 80 muestra la posición definitiva del coordinador en dicha zona segura.

Figura 80.
Ubicación del nodo coordinador en la zona segura



Nota. Autoría propia.

Finalmente, la Figura 81 muestra el nodo coordinador ya instalado y en operación. Este

equipo, equipado con la Raspberry Pi, el módem USB 4G y el módulo ZigBee, quedó listo para recibir los datos de los nodos sensores, publicarlos en Firebase y gestionar el sistema de alarmas de manera completamente autónoma.

Figura 81.
Nodo coordinador instalado y en operación



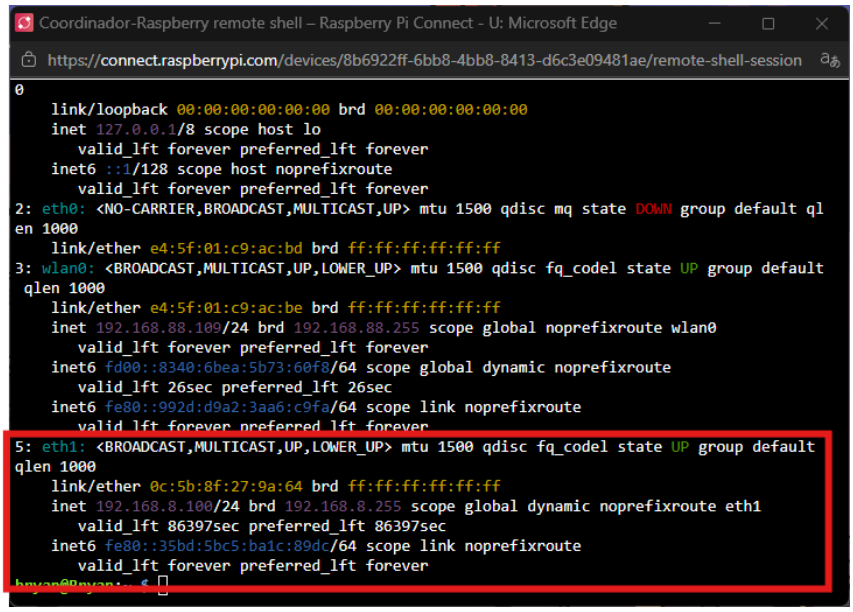
Nota. Autoría propia.

4.4.2 Prueba de comunicación ZigBee y 4G LTE

El primer aspecto que se verificó una vez instalado el sistema fue el establecimiento del enlace de conectividad 4G LTE. Al conectar el módem USB al puerto USB de la Raspberry Pi, el sistema operativo Linux lo reconoció automáticamente como una interfaz de red adicional y le asignó una dirección IP dinámica a través de DHCP. Este comportamiento confirma que el módem fue correctamente identificado como dispositivo de red, habilitando la conectividad a internet necesaria para la transmisión de datos hacia Firebase. La dirección IP asignada se puede verificar en la Figura 82.

Figura 82.

Direccion IP que le asigna el modem USB al nodo coordinador

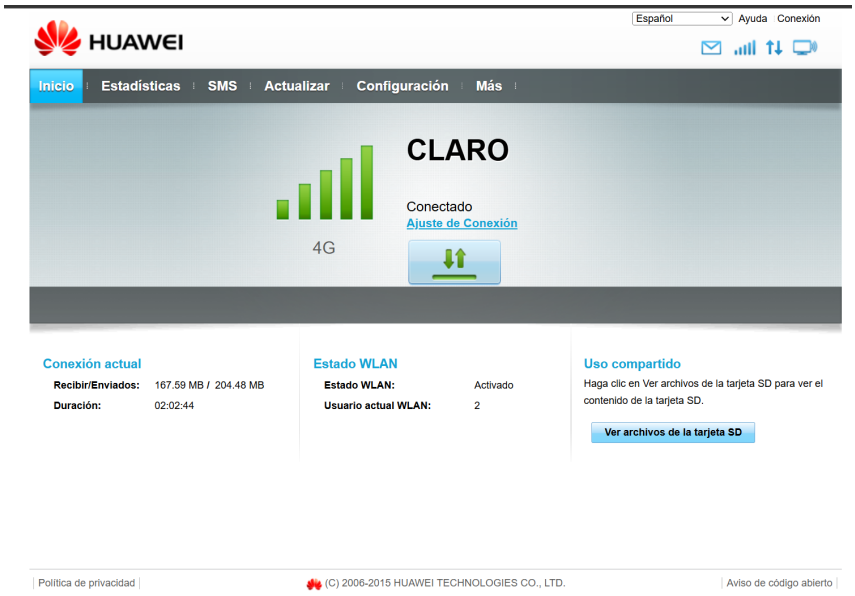


Nota. Autoría propia.

Además de proveer conectividad celular a la Raspberry Pi, el módem USB cuenta con la capacidad de generar una red Wi-Fi local, a la que es posible conectar otros dispositivos para acceder a internet desde el entorno de campo. Esta funcionalidad resultó útil durante la instalación, ya que permitió conectar una computadora portátil a dicha red para monitorizar el sistema de forma remota desde el sitio. Desde Windows, se pudo consultar el nivel de cobertura disponible de la operadora Claro en el sector el Guadual, confirmando una señal suficiente para la transmisión estable de datos. La Figura 83 muestra el nivel de cobertura disponible, junto con los dispositivos conectados a la red Wi-Fi del módem.

Figura 83.

Nivel de cobertura de Claro en el sector el Guadual y dispositivos conectados a la red Wi-Fi del módem USB

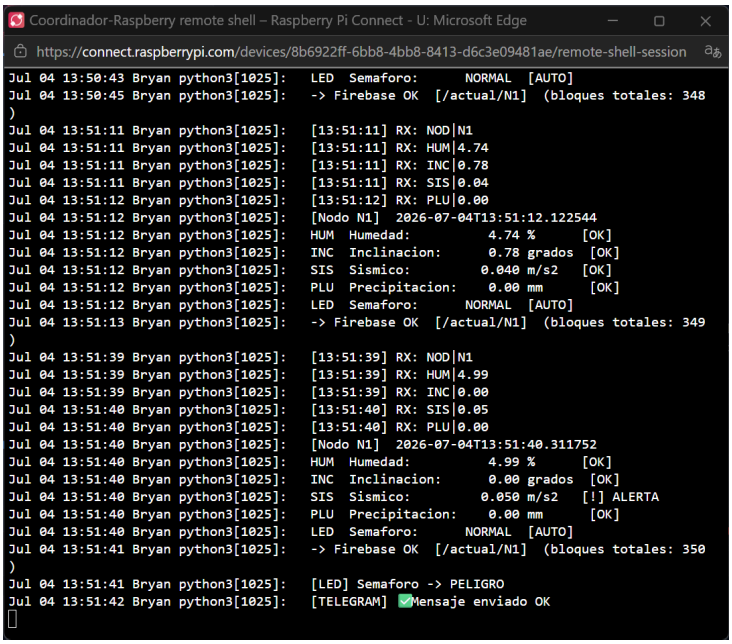


Nota. Autoría propia.

En paralelo, se verificó el correcto funcionamiento del enlace ZigBee entre los nodos sensores y el coordinador. Tras activar el sistema, el nodo coordinador comenzó a recibir de forma periódica los bloques de datos provenientes de ambos nodos sensores. Como se puede apreciar en la Figura 84, el monitor serial del coordinador muestra el bloque de datos recibido, donde se identifica el id del nodo emisor y los valores de cada variable monitorizada.

Figura 84.

Bloque de datos recibidos por el nodo coordinador desde los nodos sensores

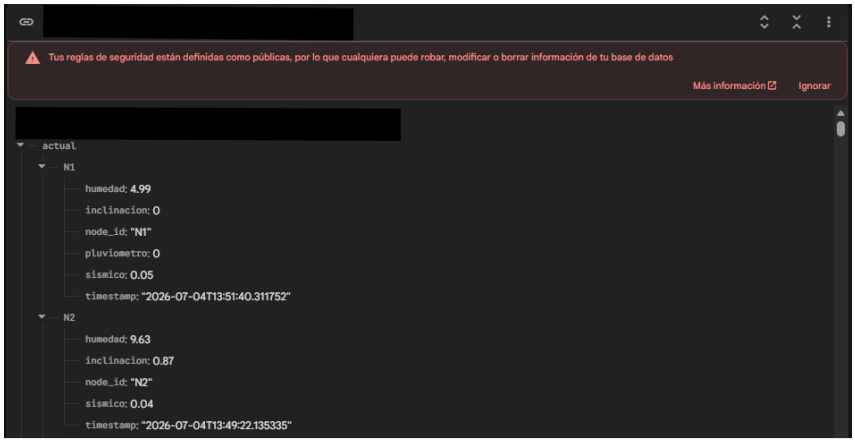


Nota. Autoría propia.

Una vez procesados los datos, el nodo coordinador publicó los datos recibidos en la base de datos de Firebase en tiempo real. La Figura 85 muestra el panel de administración de Firebase con los registros actualizados, donde se puede verificar la estructura de los nodos /lecturas y /actual, con las lecturas de N1 y N2 almacenadas de forma ordenada y con marca de tiempo.

Figura 85.

Registros actualizados en la base de datos de Firebase durante las pruebas en campo



Nota. Autoría propia.

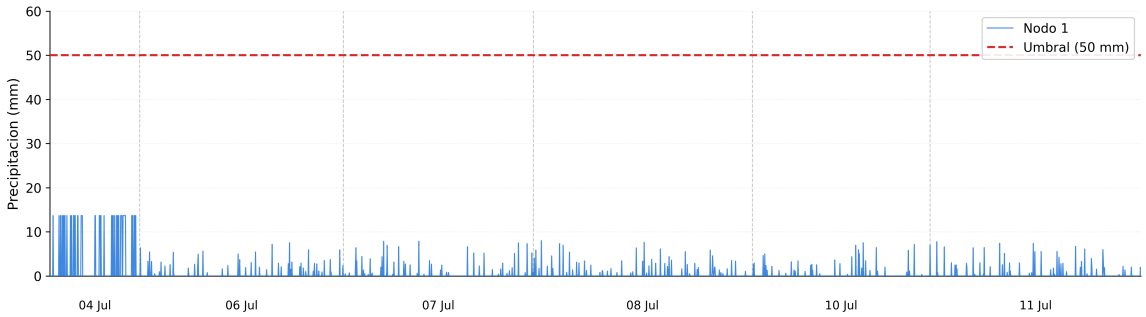
Los resultados de esta prueba confirman que ambas capas de comunicación operan de manera correcta en el entorno real. La red ZigBee garantizó la transmisión confiable de datos entre los nodos sensores y el coordinador sin pérdida de paquetes, mientras que la conectividad 4G LTE a través del módem USB con la cobertura de Claro permitió la sincronización fluida y continua de la información hacia la nube, sin interrupciones durante el periodo de monitoreo.

4.4.3 Comportamiento del sistema ante condiciones reales

El sistema operó de forma continua y autónoma durante las distintas sesiones de monitoreo en el sector el Guadual, registrando el comportamiento de todas las variables en tiempo real. En lo que respecta a la variable de precipitación, es importante destacar que no se registraron eventos reales de lluvia a lo largo del estudio. No obstante, durante las primeras etapas del despliegue, el pluviómetro del nodo N1 generó diversas lecturas erróneas, reportando niveles de precipitación cuando el clima se mantenía seco. Este comportamiento anómalo se atribuyó a la vulnerabilidad del sensor ultrasónico frente a la acumulación de partículas de polvo y a la incidencia de ráfagas de viento, las cuales generaban turbulencia dentro del recipiente colector y alteraban la medición acústica. Para solucionar este inconveniente, se colocó un filtro físico en la entrada del embudo, diseñado para bloquear el ingreso de partículas de polvo. Si bien esta adecuación logró estabilizar gran parte de las mediciones al impedir el paso de sólidos, el sensor continuó registrando lecturas erróneas esporádicas, presumiblemente a causa de que los vientos más intensos de la zona seguían generando turbulencia en la columna de aire interior del recipiente. Como se observa en la Figura 86, a pesar de estas perturbaciones residuales, los valores registrados se mantuvieron bajo control y no superaron en ningún momento el umbral crítico de 50 mm, garantizando que el sistema no activara advertencias injustificadas por esta variable.

Figura 86.

Comportamiento de la precipitación medida por el nodo 1 en campo

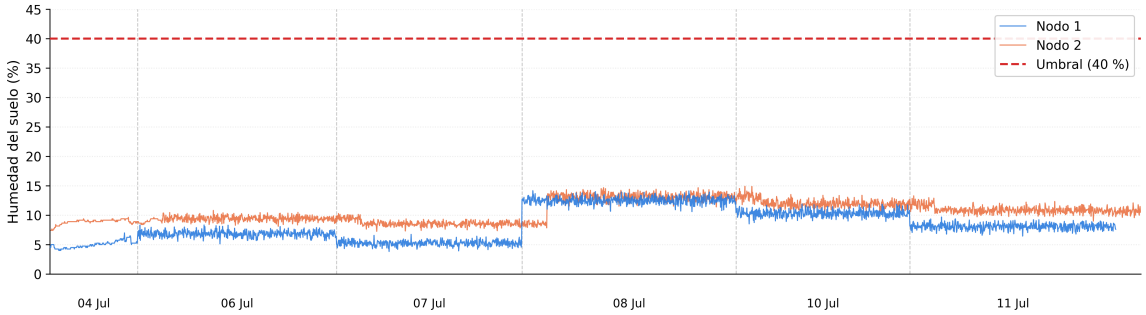


Nota. Autoría propia.

La variable de humedad del suelo registró variaciones leves entre sesiones de monitoreo, con valores que oscilaron entre aproximadamente el 5 % y el 13 % en ambos nodos, manteniéndose en todo momento muy por debajo del umbral crítico del 40 %. Este comportamiento refleja que el terreno se encontraba en condiciones de baja saturación hídrica durante el periodo evaluado, por lo que el sistema permaneció en estado normal para esta variable sin activar ningún nivel de alerta. La Figura 87 ilustra los datos de la humedad en el suelo a lo largo de las distintas sesiones de campo, evidenciando un margen de seguridad amplio respecto al umbral establecido.

Figura 87.

Niveles de humedad del suelo registrados por los nodos en campo



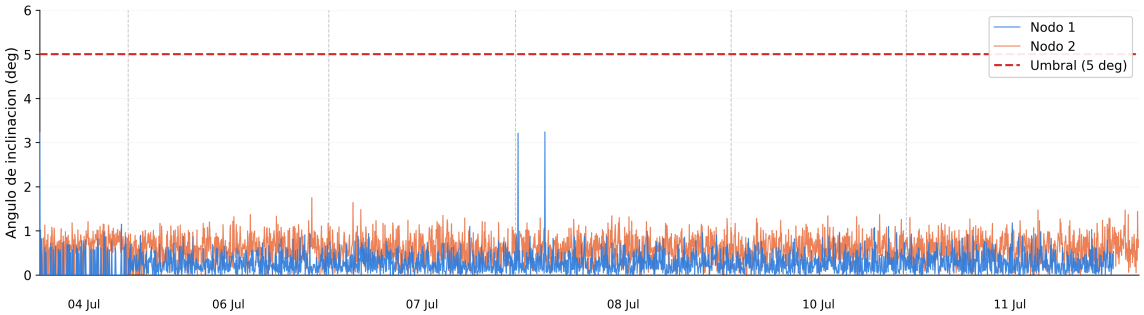
Nota. Autoría propia.

La variable de inclinación presentó valores estables durante el monitoreo, con fluctuaciones menores atribuibles a perturbaciones mecánicas del entorno, como el paso de vehículos y las ráfagas de viento. En algunas ocasiones se registraron valores que superaron los 3°, aunque

sin acercarse al umbral crítico de 5°, por lo que el sistema no activó ninguna alerta por esta variable. La Figura 88 muestra el comportamiento de la inclinación a lo largo de las sesiones de campo, donde se aprecian dichas variaciones.

Figura 88.

Fluctuaciones del ángulo de inclinación del terreno medidas en campo

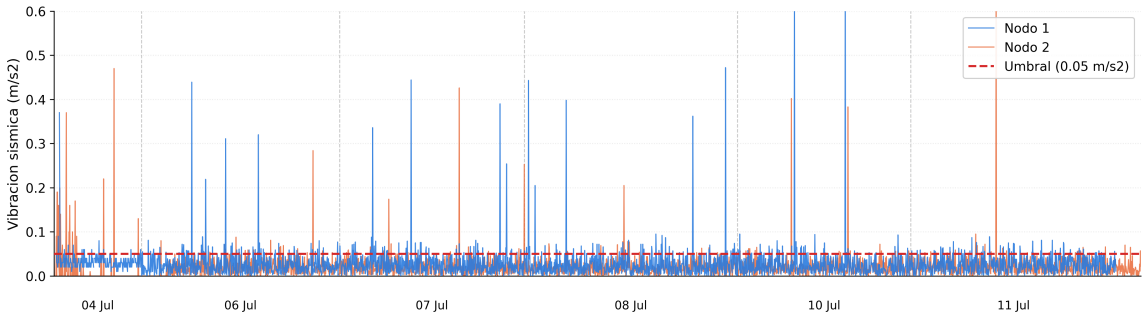


Nota. Autoría propia.

La variable de mayor actividad durante el monitoreo fue la vibración sísmica. El tránsito habitual de vehículos livianos por las vías aledañas generó una línea base de vibración que osciló frecuentemente por debajo de 0,09 m/s^2, superando de forma sistemática el umbral inicial de 0,05 m/s^2 y provocando activaciones no asociadas a riesgo real. Adicionalmente, dado que la vía ubicada frente a la ladera es de doble sentido, el paso simultáneo de vehículos pesados y livianos produjo perturbaciones mecánicas de mayor intensidad que se propagaron por el suelo hasta los sensores. Estas condiciones de tráfico concurrente generaron múltiples eventos que alcanzaron valores cercanos a 0,5 m/s^2 y, de manera esporádica, picos aislados que lograron superar esta marca, constituyendo los eventos de mayor energía captados durante la evaluación en campo. La Figura 89 presenta los datos de la vibración registradosa lo largo de las sesiones de monitoreo, ilustrando claramente estas alteraciones producidas por el tránsito vehicular.

Figura 89.

Registros de vibración sísmica en campo con superaciones del umbral inicial



Nota. Autoría propia.

Al detectar estas condiciones continuas de superación del umbral, el sistema activó correctamente el estado de alerta roja en el dashboard web. La Figura 90 muestra el panel de control con el nodo N1 en estado de alerta roja.

Figura 90.

Estado de alerta roja del nodo 1 en el panel de control web

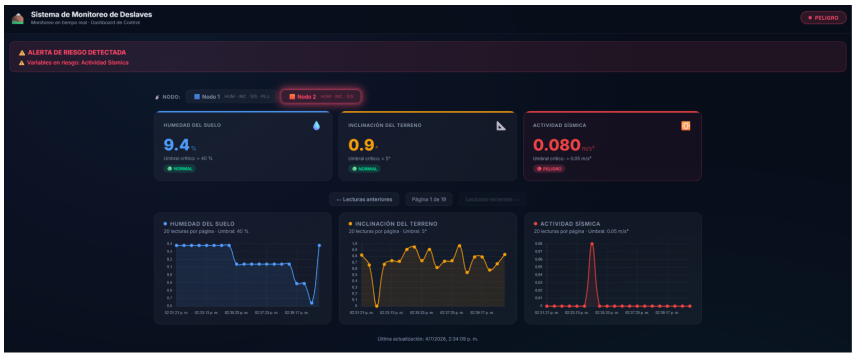


Nota. Autoría propia.

De igual manera, el nodo N2 reportó valores de vibración que excedieron el umbral en múltiples ocasiones durante el periodo de monitoreo, provocando la activación del estado de alerta roja de forma independiente. La Figura 91 muestra el panel de control con el nodo N2 en dicho estado.

Figura 91.

Estado de alerta roja del nodo 2 en el panel de control web



Nota. Autoría propia.

De forma simultánea a la activación de la alerta en el dashboard, el nodo coordinador accionó la alarma visual física. Como se aprecia en la Figura 92, los módulos LED escalaron a su frecuencia de parpadeo rápido, señalizando el estado de peligro en el entorno local de instalación.

Figura 92.

Activación de la alarma visual física en estado de alerta roja

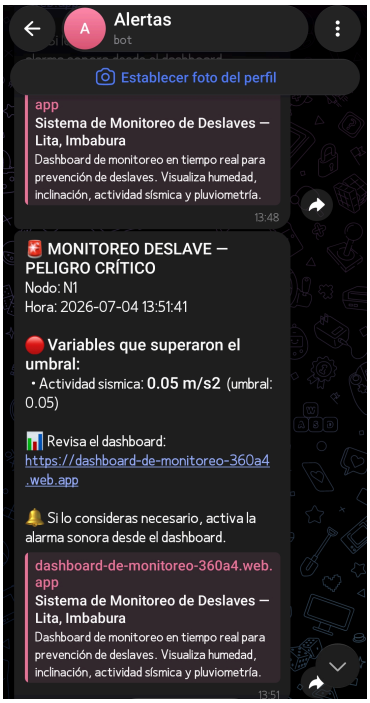


Nota. Autoría propia.

Paralelamente, el sistema emitió de forma automática notificaciones al bot de Telegram para ambos nodos. Las Figuras 93 y 94 muestran los mensajes recibidos, en los que se detalla el

identificador del nodo afectado, la variable de vibración y el valor exacto registrado en el momento de la alerta, confirmando la operatividad del canal de comunicación.

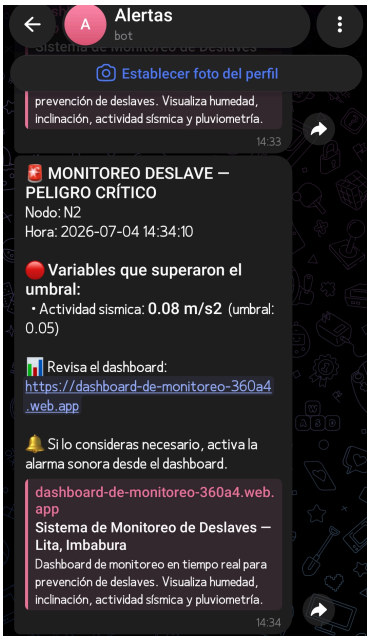
Figura 93.
Alerta de vibración enviada al bot de Telegram — Nodo 1



Nota. Autoría propia.

El mensaje correspondiente al nodo N2 incluyó de igual forma el identificador del nodo, la variable de vibración y su valor registrado. Ambas notificaciones llegaron en el instante en que la lectura superó el umbral de peligro, corroborando la rápidez de la notificación de alertas ante eventos críticos, como se muestra en la Figura 94.

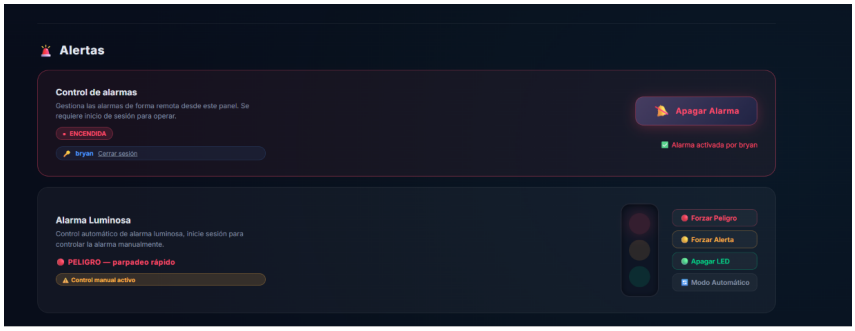
Figura 94.
Alerta de vibración enviada al bot de Telegram — Nodo 2



Nota. Autoría propia.

Adicionalmente, durante la prueba se verificó la funcionalidad de gestión manual de alarmas desde el panel de control web. Un operador inició sesión en el dashboard y ejecutó la activación y desactivación de la alarma sonora del nodo coordinador de forma remota. Como se muestra en la Figura 95, la interfaz permite controlar el estado de la alarma.

Figura 95.
Gestión manual de alarmas desde el panel de control web

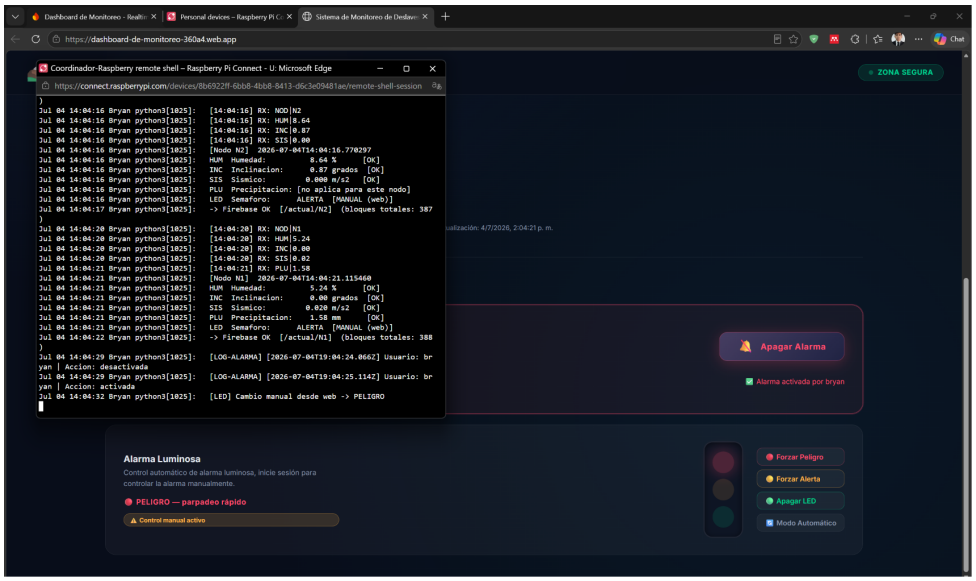


Nota. Autoría propia.

Cada acción de control generó una notificación en el monitor serial del nodo coordinador, registrando el nombre del usuario que realizó la operación y el estado resultante de la alarma.

La Figura 96 muestra esta notificación en el terminal del coordinador, confirmando que el sistema identifica y registra correctamente al operador responsable de cada intervención.

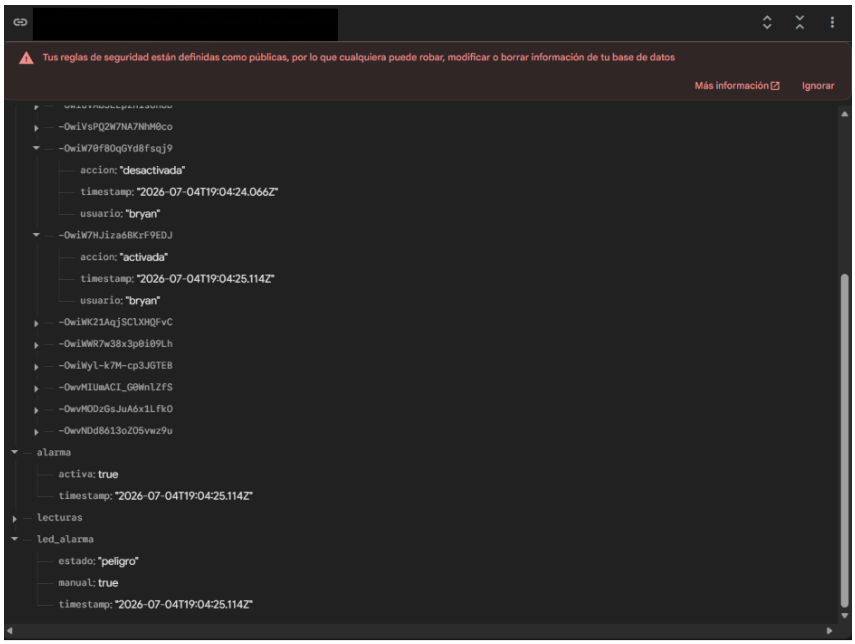
Figura 96.
Registro en el nodo coordinador del usuario que activó la alarma



Nota. Autoría propia.

Finalmente, se verificó que cada acción de gestión de alarmas quedara registrada en la base de datos de Firebase, actualizando el estado de la alarma y almacenando la información del usuario que realizó la operación. La Figura 97 muestra estos registros de actividad en el panel de administración de Firebase, lo cual permite evidenciar las intervenciones sobre el sistema.

Figura 97.
Registro de actividad del usuario en Firebase durante la gestión de alarmas



Nota. Autoría propia.

4.5 Análisis de resultados

Las pruebas realizadas en ambas etapas de validación (emulación controlada y operación en campo real) confirmaron el funcionamiento del prototipo. La cadena completa de adquisición, transmisión, procesamiento y alerta operó de forma correcta en todos los escenarios evaluados. Sin embargo, el proceso de validación también permitió identificar un conjunto de oportunidades de mejora que deberán abordarse en versiones futuras del sistema para optimizar su desempeño, confiabilidad y viabilidad operativa en un entorno real de largo plazo.

El prototipo desarrollado incorpora dos nodos sensores, configuración suficiente para validar la arquitectura del sistema en una zona acotada. No obstante, para un monitoreo efectivo de una ladera de mayor extensión, es necesario ampliar la red con más nodos finales distribuidos estratégicamente en los puntos de mayor riesgo. La arquitectura ZigBee adoptada favorece esta expansión de manera natural, ya que el protocolo está diseñado para operar en redes de

malla con múltiples dispositivos sin requerir cambios fundamentales en la infraestructura existente. Incrementar la densidad de la red permitiría obtener una caracterización espacial más detallada de las variables monitorizadas, reducir los puntos ciegos y mejorar la capacidad de detección temprana ante eventos de deslizamiento.

Una de las limitaciones más relevantes del prototipo en su configuración actual es la dependencia de una fuente de alimentación externa, lo que implica la necesidad de realizar visitas periódicas al sitio para el mantenimiento de las baterías. Para un despliegue permanente en campo, resulta mucho más viable incorporar un sistema de energía autónomo en los nodos sensores, siendo la energía solar la alternativa más adecuada dado el perfil de consumo del sistema. Los nodos finales operan con microcontroladores de bajo consumo que alternan entre ciclos de actividad corta y periodos prolongados en modo de bajo consumo, lo que hace que su demanda energética sea lo suficientemente reducida como para ser cubierta con un panel solar de pequeña escala y una batería de respaldo. En cambio, el nodo coordinador, que opera de forma continua como receptor y concentrador de datos, podría conectarse directamente a la red eléctrica convencional si se encuentra disponible en el sitio de instalación, o bien incorporar también un sistema solar de mayor capacidad. Esta configuración garantizaría la autonomía del sistema sin depender de intervenciones manuales frecuentes.

Durante las pruebas en campo se evidenció que el diseño actual del pluviómetro, basado en la medición de nivel con un sensor ultrasónico HC-SR04, presenta una limitación significativa frente a las condiciones ambientales del entorno. Si bien se instaló un filtro físico en el embudo para mitigar el ingreso de polvo, el viento continuó generando perturbaciones en la columna de aire del recipiente colector que produjeron datos de precipitación sin que existiera lluvia real. Esta situación pone de manifiesto que la solución de medición por ultrasonido es inherentemente susceptible a las condiciones de viento en exteriores, independientemente de las adecuaciones físicas realizadas. Para futuras versiones del sistema, se recomienda sustituir este módulo por un sensor de cubeta basculante, cuyo principio de funcionamiento mecánico lo hace insensible a las perturbaciones aerodinámicas y proporciona una medición directa| del volumen de lluvia acumulado.

El sistema de alarmas implementado en el prototipo actual, tanto en su componente visual como sonoro, opera mediante alimentación a batería con bajo voltaje, lo que condiciona su potencia y, en consecuencia, su alcance y perceptibilidad en entornos exteriores. Si bien esta solución resulta adecuada para la validación funcional del prototipo, presenta limitaciones evidentes para un despliegue permanente en campo, donde las alarmas deben ser perceptibles a mayor distancia y bajo condiciones adversas de luz o ruido ambiental. En versiones futuras del sistema, si el nodo coordinador cuenta con acceso a la red eléctrica convencional, sería viable incorporar alarmas de mayor potencia alimentadas directamente desde la red: sirenas o bocinas de alta intensidad para la alerta sonora, y señalizadores visuales industriales como balizas estroboscópicas o luces giratorias de alta luminosidad para la alerta visual. Esta mejora incrementaría significativamente la efectividad del sistema de advertencia local, reduciendo el riesgo de que una alerta pase inadvertida ante la comunidad o los operarios presentes en la zona de riesgo.

Los umbrales de alerta establecidos inicialmente se definieron con base en referencias técnicas y criterios de diseño previos a la instalación en campo. El monitoreo realizado durante las distintas sesiones de campo permitió evaluar si dichos valores resultan adecuados para las condiciones ambientales reales del sector el Guadual. La Tabla 42 resume los umbrales originales, las observaciones obtenidas y los valores ajustados.

Tabla 42.
Revisión y ajuste de umbrales de alerta

Variable	**Umbral inicial**	**Observación en campo**	**Umbral ajustado**
Humedad del suelo	40 %	Valores que oscilaron entre 5 % y 13 % con variaciones entre sesiones.	40 % (sin cambio)

Inclinación	5°	Valores generalmente entre 0° y 2°, con eventos que superaron los 3°.	5° (sin cambio)
Vibración sísmica	0,05 m/s^2	El paso de autos livianos generó vibraciones de hasta 0,09 m/s^2. El tráfico pesado simultáneo en la doble vía produjo picos frecuentes de hasta 0,5 m/s^2, superando los 0,5 m/s^2 en varias ocasiones.	0,6 m/s^2
Precipitación	50 mm	No se registró lluvia.	No evaluado

Nota. Autoría propia.

El único umbral que requirió ajuste fue el de vibración sísmica. Los datos registrados durante las sesiones de monitoreo demostraron que el paso de automóviles livianos genera vibraciones de hasta 0,09 m/s^2. Además, debido a que la carretera frente a la ladera es de doble vía, la circulación simultánea de tráfico liviano y vehículos pesados produjo perturbaciones que oscilaron frecuentemente entre 0,10 y 0,5 m/s^2, llegando en ocasiones puntuales a superar los 0,5 m/s^2. Mantener el umbral original de 0,05 m/s^2 provocaría activaciones constantes por esta dinámica vehicular ordinaria, lo que no representa un riesgo geológico real. Por esta razón, se propone ajustar el umbral a 0,6 m/s^2, valor que actúa como un filtro eficaz frente a las perturbaciones máximas del tráfico, estableciendo que únicamente las lecturas consistentes que lo superen corresponderán a eventos de mayor energía asociados a un potencial deslizamiento de tierra. Los umbrales de humedad e inclinación se validaron como adecuados y no requieren modificación.

En cuanto a la precipitación, no fue posible validar el umbral de 50 mm en condiciones reales dado que no se registró lluvia durante el periodo de monitoreo. Adicionalmente, las lecturas

erróneas generadas por la turbulencia del viento, aun con el filtro físico implementado en el embudo, sugieren que el principio de medición por ultrasonido no es el más adecuado para este tipo de entorno. En términos generales, este proceso evidencia que la calibración de umbrales es una etapa iterativa que debe realizarse con datos reales del entorno de despliegue, y que los valores definidos teóricamente constituyen únicamente un punto de partida que debe refinarse con la experiencia operativa.

CONCLUSIONES

- La investigación realizada sobre los deslizamientos de tierra determinó que la vía Ibarra - San Lorenzo presenta una alta recurrencia de estos fenómenos, debido a la inestabilidad geológica y las condiciones climáticas de la zona. Ante este escenario, quedó en evidencia la necesidad de implementar un sistema de monitoreo continuo. Contar con esta herramienta tecnológica no solo permite comprender mejor el comportamiento del terreno, sino que resulta útil para alertar de forma oportuna a la comunidad y a las autoridades, de forma que ayude a agilizar la ayuda de las instituciones de primera respuesta ante emergencias y mitigar los riesgos sobre la infraestructura vial.

- A partir de las necesidades del entorno, se establecieron requerimientos técnicos rigurosos con el propósito de que el sistema opere de manera continua y con un mínimo margen de error, evitando imprevistos en su funcionamiento. Para lograr este objetivo, se determinó que no solo era indispensable garantizar la funcionalidad operativa de los componentes, sino que también resultaba fundamental evaluar las condiciones del lugar de instalación. Esta evaluación física asegura la seguridad del prototipo frente a los factores climáticos y topográficos a los que estará expuesto.

- Durante la etapa de despliegue y recolección de datos, se comprobó que la implementación de una red de sensores basada en la tecnología ZigBee es viable para el monitoreo in situ. Esta tecnología demostró ser eficiente en la gestión del consumo energético de los nodos finales, un factor crítico para dispositivos que operan en áreas de difícil acceso. Además, la arquitectura de red en malla proporciona un alto grado de escalabilidad, lo que permite la incorporación futura de nuevos nodos sensores de manera sencilla y sin alterar la infraestructura principal, fortaleciendo así la cobertura del monitoreo.

- Las pruebas de funcionamiento respaldaron la efectividad del prototipo, validando su comportamiento tanto en escenarios de emulación controlada como durante su operación en un entorno real. El sistema demostró un buen funcionamiento en toda la

cadena de transmisión: desde la recolección de los bloques de datos en los nodos, pasando por el envío y el procesamiento en el nodo coordinador, hasta su correcta sincronización en la nube. Esta fluidez técnica garantizó la visualización ininterrumpida de la información y la ejecución oportuna de las alertas.

- Finalmente, la validación en campo permitió concluir que la definición de los umbrales críticos de alerta no debe limitarse a referencias teóricas. Los datos recolectados in situ demostraron que es imperativo realizar un ajuste o calibración de los umbrales en función del comportamiento real del entorno, tal como se evidenció al adaptar el umbral de vibración para evitar interferencias por el ruido ambiental local. Esta calibración empírica es fundamental para minimizar las falsas alertas y asegurar la total confiabilidad del sistema ante situaciones de riesgo real.

RECOMENDACIONES

- Para futuras expansiones del sistema de monitoreo, se recomienda realizar la transición de la actual topología de red en estrella a una topología en malla (mesh) soportada nativamente por el protocolo ZigBee. Implementar esta arquitectura permitirá configurar nodos estratégicos para que actúen como enrutadores (routers), facilitando la instalación de nuevos sensores finales a mayores distancias y sorteando los obstáculos naturales de la ladera. Sin embargo, se debe considerar que los nodos enrutadores no pueden entrar en modo de suspensión, ya que deben estar siempre activos para retransmitir la información. Por lo tanto, estos dispositivos requerirán un suministro de energía constante, equivalente al del nodo coordinador.

- Para garantizar el funcionamiento ininterrumpido del prototipo y reducir la necesidad de realizar mantenimientos manuales por desgaste de baterías, se sugiere implementar un sistema de energía autónomo. La adopción de paneles solares de pequeña escala resulta ideal para los nodos finales debido a su bajo consumo energético; por otro lado, considerando que existe cableado eléctrico a través de postes en el sector, el nodo coordinador podría conectarse directamente a la red local. Esta configuración dotaría al sistema de la autonomía operativa indispensable para funcionar de forma permanente en campo.

- Con el fin de mejorar la fiabilidad y precisión en las mediciones de precipitación, se recomienda sustituir el diseño actual del pluviómetro por un sensor de tipo báscula (tipping-bucket). Las pruebas realizadas evidenciaron que el método de medición actual es susceptible a registrar lecturas erróneas generadas por viento y la interferencia del particulas de polvo. La implementación de un pluviómetro de báscula resolvería esta vulnerabilidad, ya que su mecanismo mecánico cerrado es significativamente más resistente a estos factores ambientales.

- Es importante considerar que el prototipo actual ejecuta las alarmas utilizando componentes de bajo voltaje alimentados por batería, lo que limita su alcance visual y sonoro en un entorno abierto. Para alcanzar una mayor eficiencia y asegurar que la

advertencia llegue a toda la comunidad, se recomienda utilizar alarmas de mayor potencia (como sirenas y balizas industriales). Esto se podría lograr si se tiene acceso directo a la red eléctrica desde el nodo coordinador, o bien, buscando puntos estratégicos con suministro eléctrico donde se puedan instalar y activar las alarmas de forma remota.

- Se recomienda integrar al sistema las alertas sísmicas emitidas por organismos como el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) o el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), los cuales disponen de interfaces de programación (APIs) de acceso público. Dado que el nodo coordinador ya cuenta con conectividad a internet y ejecuta un script Python, resulta factible añadir a dicho script una consulta periódica a estas fuentes. De esta forma, al detectarse un sismo de magnitud relevante en la zona, el sistema podría activar de forma inmediata las alarmas locales del talud sin necesidad de esperar a que los sensores propios registren la vibración, lo que ampliaría la capacidad de respuesta ante uno de los principales detonantes de los deslizamientos de tierra en la región.

BIBLIOGRAFÍA

[1] C. A. Minda Suriaga y J. M. Montiel Castillo, “Evaluación del riesgo a deslizamientos en la parroquia Lita-Ibarra, Ecuador,” Repositorio UTN, código 03/RNR/506. Accedido: 2025, Trabajo de Titulación – Ingeniería en Recursos Naturales, Universidad Técnica del Norte, 2025. dirección: https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/16886

[2] El Universo, *Deslizamiento de tierra en la vía San Lorenzo-Ibarra interrumpe el retorno de turistas luego del feriado*, Portal de Noticias Web, Publicado el 2 de enero de 2023. Accedido: 2025, ene. de 2023. dirección: https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/deslizamiento-de-tierra-en-la-via-san-lorenzo-ibarra-interrumpe-el-retorno-de-turistas-nacionales-y-extranjeros-a-sus-destinos-luego-del-feriado-nota/

[3] Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, “Reporte de monitoreo nacional No. 0609 – Evento adverso sector Granada, vía Alto Tambo–Lita E10, provincia de Esmeraldas,” SNGRE, inf. téc., nov. de 2023, Accedido: 2025. dirección: https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2023/11/Reporte-de-Monitoreo-Nacional-0609-01112023-09H00.pdf

[4] Diario La Hora, *Trabajos emergentes en la vía Ibarra–San Lorenzo, dos años después del derrumbe en El Guadual*, Portal de Noticias Web, Publicado el 12 de abril de 2024. Accedido: 2025, abr. de 2024. dirección: https://www.lahora.com.ec/imbabura-carchi/trabajos-emergentes-via-ibarra-san-lorenzo-dos-anos-despues-derrumbe-guadual/

[5] El Universo, *Deslizamiento afecta circulación en la vía Ibarra-San Lorenzo*, Portal de Noticias Web, Publicado el 25 de abril de 2025. Accedido: 2025, abr. de 2025. dirección: https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/deslizamiento-afecta-circulacion-en-la-via-ibarra-san-lorenzo-nota/

[6] P. K. Indukala, U. G. Gosh y M. Vinodini Ramesh, “IoT-driven microseismic sensing system and monitoring platform for landslide detection,” *IEEE Access*, vol. 12, págs. 97 787-97 805, 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3427386

[7] Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, “SitRep No. 15 – Lluvias, del 01 de enero de 2025 a la fecha, provincia de Imbabura,” SNGRE, Reporte de situación, 2025, Incluye registro del deslizamiento del 22 de diciembre de 2023, km 114, sector El Guadual, vía Salinas–Lita (E10), afectación de 125 metros lineales de vía.

[8] S. Kapoor, H. Pahuja y B. Singh, “Real time monitoring & alert system for landslide,” en *Proceedings of the 2016 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I 2016)*, IEEE, 2016, págs. 584-589. DOI: 10.1109/IC3I.2016.7918030

[9] S. Sreelakshmi, S. S. Vinod Chandra y E. Shaji, “Landslide identification using machine learning techniques: review, motivation, and future prospects,” *Earth Science Informatics*, vol. 15, n.º 4, págs. 2063-2090, 2022, ISSN: 1865-0481. DOI: 10.1007/s12145-022-00889-2

[10] M. Ragnoli, A. Leoni, G. Barile, G. Ferri y V. Stornelli, “LoRa-based wireless sensors network for rockfall and landslide monitoring: a case study in Pantelleria Island with portable LoRaWAN access,” *Journal of Low Power Electronics and Applications*, vol. 12, n.º 3, pág. 47, 2022. DOI: 10.3390/jlpea12030047

[11] C. Wang, W. Guo, K. Yang, X. Wang y Q. Meng, “Real-time monitoring system of landslide based on LoRa architecture,” *Frontiers in Earth Science*, vol. 10, pág. 899 509, 2022, ISSN: 2296-6463. DOI: 10.3389/feart.2022.899509

[12] G. Vargas Cuervo, “Criterios para la clasificación y descripción de movimientos en masa,” *Boletín de Geología*, vol. 22, n.º 37, 2000.

[13] E. A. Keller y R. H. Blodgett, *Natural Hazards: Earth’s Processes as Hazards, Disasters, and Catastrophes*, 2.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2004.

[14] J. Suárez Díaz, *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 1998.

[15] D. M. Cruden y D. J. Varnes, "Landslide types and processes," en *Landslides: Investigation and Mitigation*, ép. Transportation Research Board Special Report, A. K. Turner y R. L. Schuster, eds., vol. 247, Washington, DC: National Academy Press, 1996, págs. 36-75.

[16] Ministerio de Educación del Perú, *Movimientos en masa: cartilla informativa*, Cartilla informativa institucional, Repositorio MINEDU, Dirección de Gestión del Riesgo. Accedido: 2025, 2021. dirección: https://repositorio.minedu.gob.pe/handle/20.500.12799/10238

[17] L. M. Highland y P. Bobrowsky, "The Landslide Handbook — A Guide to Understanding Landslides," U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, inf. téc. Circular 1325, 2008. DOI: 10.3133/cir1325 dirección: https://pubs.usgs.gov/circ/1325/

[18] E. Intrieri, T. Carlà y G. Gigli, "Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale: a literature review," *Engineering Geology*, vol. 239, págs. 29-51, 2018. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.03.024

[19] S. L. Gariano y F. Guzzetti, "Landslides in a changing climate," *Earth-Science Reviews*, vol. 162, págs. 227-252, 2016. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.08.006

[20] O. Hungr, S. Leroueil y L. Picarelli, "The Varnes classification of landslide types, an update," *Landslides*, vol. 11, n.º 2, págs. 167-194, 2014. DOI: 10.1007/s10346-013-0436-y

[21] J. Corominas et al., "Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 73, n.º 2, págs. 209-263, 2014. DOI: 10.1007/s10064-013-0538-8

[22] M. J. Auflič et al., "Landslide monitoring techniques in the geological surveys of Europe," *Landslides*, vol. 20, págs. 951-965, 2023. DOI: 10.1007/s10346-022-02007-1

[23] T. D. Stark y H. Choi, “Slope inclinometers for landslides,” *Landslides*, vol. 5, n.º 3, págs. 339-350, 2008. DOI: 10.1007/s10346-008-0126-3

[24] M. Bordoni, C. Meisina, R. Valentino, N. Lu, M. Bittelli y S. Chersich, “Hydrological factors affecting rainfall-induced shallow landslides: from the field monitoring to a simplified slope stability analysis,” *Catena*, vol. 128, págs. 73-89, 2015. DOI: 10.1016/j.catena.2015.01.026

[25] M. Jaboyedoff et al., “Use of LIDAR in landslide investigations: a review,” *Natural Hazards*, vol. 61, n.º 1, págs. 5-28, 2012. DOI: 10.1007/s11069-010-9634-2

[26] V. K. Pandey, M. C. Sharma, A. Patel y S. K. Sharma, “Optical remote sensing-based landslide mapping in the Chamoli disaster zone,” *Remote Sensing*, vol. 12, n.º 18, pág. 2933, 2020. DOI: 10.3390/rs12182933

[27] N. Casagli et al., “Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning,” *Geoenvironmental Disasters*, vol. 4, n.º 1, pág. 9, 2017. DOI: 10.1186/s40677-017-0073-1

[28] J. Wasowski y F. Bovenga, “Investigating landslides and unstable slopes with satellite multi temporal interferometry: current issues and future perspectives,” *Engineering Geology*, vol. 174, págs. 103-138, 2014. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.03.003

[29] S. Bianchini, F. Raspini, A. Ciampalini, C. Del Ventisette, S. Moretti y N. Casagli, “Mapping and monitoring of the Esarco landslide (Central Italy) through persistent scatterers interferometry,” *European Journal of Remote Sensing*, vol. 46, n.º 1, págs. 421-437, 2013. DOI: 10.5721/EuJRS20134625

[30] A. Al-Rawabdeh, F. He, A. Moussa, N. El-Sheimy y A. Habib, “Using an unmanned aerial vehicle-based digital imaging system to derive a 3D point cloud for landslide scarp recognition,” *Remote Sensing*, vol. 9, n.º 6, pág. 561, 2017. DOI: 10.3390/rs9060561

[31] G. Herrera et al., “Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: the Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees),” *Remote Sensing of Environment*, vol. 128, págs. 31-43, 2013. DOI: 10.1016/j.rse.2012.09.020

[32] S. Bernardie, N. Desramaut, J.-P. Malet, M. Gourlay y G. Grandjean, “Prediction of changes in landslide rates induced by rainfall,” *Landslides*, vol. 12, n.º 2, págs. 481-494, 2015. DOI: 10.1007/s10346-014-0507-y

[33] D. J. Jeyakumar et al., “Q-learning based forecasting early landslide detection in internet of thing wireless sensor network,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2025.

[34] H. Klaina et al., “IIoT low-cost ZigBee-based WSN implementation for enhanced production efficiency in a solar protection curtains manufacturing workshop,” *Sensors*, vol. 24, n.º 2, pág. 712, 2024. DOI: 10.3390/s24020712

[35] J. A. Leal Afanador, Y. Medina Cárdenas y J. Rodríguez Rodríguez, “Análisis comparativo de tecnologías inalámbricas para implementación de IoT en zonas rurales,” *Respuestas*, vol. 23, n.º 2, págs. 6-13, 2018. DOI: 10.22463/0122820X.1506

[36] U. Raza, P. Kulkarni y M. Sooriyabandara, “Low Power Wide Area Networks: an overview,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, n.º 2, págs. 855-873, 2017. DOI: 10.1109/COMST.2017.2652320

[37] S. Farahani, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Burlington, MA: Newnes, 2008, ISBN: 978-0-7506-8393-7. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8393-7.X0001-5

[38] A. Lavric y V. Popa, “Internet of Things and LoRa Low-Power Wide-Area Networks: a survey on current status and future trends,” en *2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, IEEE, 2017, págs. 1-4. DOI: 10.1109/ISSCS.2017.8034915

[39] F. Guzzetti, S. Peruccacci, M. Rossi y C. P. Stark, “Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe,” *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 98, n.º 3-4, págs. 239-267, 2007. DOI: 10.1007/s00703-007-0262-7

[40] M. Sharma y S. Laskar, “An IoT Based Landslide Monitoring and Early Warning System for Guwahati City,” *International Journal on Applied Physics and Engineering*, vol. 4, págs. 11-19, mayo de 2025. DOI: 10.37394/232030.2025.4.2

[41] A. Wicki, P. Lehmann, C. Hauck y M. Stähli, "Assessing the potential of soil moisture measurements for regional landslide early warning," *Landslides*, vol. 17, n.º 8, págs. 1881-1896, 2020. DOI: 10.1007/s10346-020-01400-y

[42] J. Salazar y S. Silvestre, "Internet of things," en *European Virtual Learning Platform for Electrical and Information Engineering*, Prague: Czech Technical University, 2017, ISBN: 978-80-01-06232-6.

[43] D. Benítez Machado, C. E. Anías Calderón y L. Plasencia Moreno, "Propuesta de arquitectura para Internet de las Cosas," *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, vol. 10, n.º 2, págs. 27-41, 2016.

[44] J. D. Castel Tapia, "Implementación de protocolos de enrutamiento para redes de sensores inalámbricos fijos basadas en ZigBee, utilizando dimensionamiento óptimo de redes," Tesis de mtría., Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2022.

[45] M. Ragnoli, C. Barile, C. Casavola y G. Vitucci, "Wireless Sensor Network-Based Rockfall and Landslide Monitoring Systems: A Review," *Sensors*, vol. 23, n.º 15, pág. 6891, 2023. DOI: 10.3390/s23156891

[46] F. J. Velasco Iglesias, "Sistema IoT basado en el control y monitoreo de una red ZigBee. Aplicación en servicio domótico," Proyecto Fin de Grado, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2021. dirección: https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/93759/fichero/TFG-3759%2BVELASCO%2BIGLESIAS%2C%2BFRANCISCO%2BJOS%C3%89.pdf

[47] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam y E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, n.º 8, págs. 102-114, 2002. DOI: 10.1109/MCOM.2002.1024422

[48] D. Gislason, *Zigbee Wireless Networking*. Newnes, 2008, ISBN: 978-0-7506-8597-9.

[49] *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*, IEEE, 2020. DOI: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691

[50] J. Bravo-Arrabal, P. Zambrana, J. J. Fernandez-Lozano y A. Garcia, “Realistic Deployment of Hybrid Wireless Sensor Networks Based on ZigBee and LoRa for Search and Rescue Applications,” *IEEE Access*, vol. 10, págs. 65 243-65 256, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3184643

[51] S. Okeke y K. Oriaku, “Software Development Methodologies: Agile Model Vs V-Model,” *International Journal of Engineering and Technical Research*, vol. 2, n.º 11, págs. 1-5, 2014.

[52] M. McHugh, F. McCaffery y V. Casey, “Integrating Agile Practices with Plan-Driven Medical Device Software Development,” en *XP 2012 Doctoral Symposium*, 2012.

[53] S. Kumar, “Reviewing Software Testing Models and Optimization Techniques: An Analysis of Efficiency and Advancement Needs,” *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, vol. 9, n.º 4, 2023. DOI: 10.32628/CSEIT2390466

[54] B. S. Alotaibi, “Context-Aware Smart Energy Management System in IoT,” *Frontiers in Energy Research*, 2025.

[55] P. Chaudhary y A. A. Waoo, “Wireless Sensor Network for Environmental Monitoring,” *International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science*, vol. 5, n.º 11, 2023.

[56] Gobernación de Imbabura, *Mesa técnica de trabajo para la intervención en el sector El Guadual*, Comunicado Oficial, 2022.

[57] Ministerio de Transporte y Obras Públicas, “Informe técnico de estado de la red vial estatal E10: Tramo Ibarra - San Lorenzo,” Gobierno de la República del Ecuador, inf. téc., 2022.

[58] Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, “Evaluación de riesgos por movimientos en masa en la zona norte del país,” SNGRE, inf. téc., 2022.

[59] Diario El Norte, *Trabajos de estabilización y detonación controlada en la vía Ibarra-San Lorenzo*, Noticia Web, 2024.

[60] Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, “Informe Sísmico Especial: Actividad en la falla del Río Mira y Otavalo,” IGEPN, inf. téc., 2023.

[61] Instituto Nacional de Estadística y Censos, “VIII Censo de Población y VII de Vivienda,” INEC Ecuador, inf. téc., 2022.

[62] GAD Parroquial La Carolina, “Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT),” Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial La Carolina, inf. téc., 2020.

[63] Hoy en Imbabura, *Siniestros recurrentes en la ruta E10 exigen atención urgente*, Reportaje, 2025.

[64] Hoy en Imbabura, *Colapso de la vía en el km 114 aísla a pobladores del norte*, Reportaje, 2024.

[65] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd. Prentice Hall, 2002.

[66] CONECEL S.A., *Mapa de Cobertura Móvil - Claro Ecuador*, `https://www.claro.com.ec/personas/servicios/servicios-moviles/cobertura/`, 2024.

[67] *ISO/IEC/IEEE 29148: Systems and software engineering – Life cycle processes – Requirements engineering*, ISO/IEC/IEEE, 2018.

[68] J. del Castillo Guevara y D. Torres Ponjuán, “Metodología para la especificación de requisitos en sistemas de información,” *Revista Interamericana de Bibliotecología*, vol. 45, n.º 2, 2022.

[69] Raspberry Pi Ltd., *Raspberry Pi 4 Model B Datasheet*, Rev. 1.1, 2024. dirección: `https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf`

[70] Raspberry Pi Ltd. “Raspberry Pi 3 Model B+ Product Brief. ”dirección: `https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/`

[71] Shenzhen Xunlong Software Co., Ltd. “Orange Pi 3 LTS User Manual. ”dirección: http://www.orangepi.org/html/hardWare/computerAndMicrocontrollers/details/orange-pi-3-LTS.html

[72] Arduino S.r.l. “Arduino Uno Rev3 — Datasheet and Technical Specifications. ”dirección: https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/

[73] Arduino S.r.l. “Arduino Nano — Technical Specifications. ”dirección: https://docs.arduino.cc/hardware/nano/

[74] Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet*, Versión 4.4, Accedido: 2025, 2024. dirección: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

[75] *XBee/XBee-PRO ZB RF Modules — Product Manual*, Document No. 90000976_P. Accedido: 2025, Digi International Inc., 2014. dirección: https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90000976.pdf

[76] *XBee-PRO ZB RF Modules — Product Manual*, Document No. 90000976_P. Accedido: 2025, Digi International Inc., 2014. dirección: https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90000976.pdf

[77] *CC2530 — A True System-on-Chip Solution for 2.4-GHz IEEE 802.15.4 and ZigBee Applications*, Document SWRS081B. Accedido: 2025, Texas Instruments, 2015. dirección: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2530.pdf

[78] InvenSense Inc., *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification — Revision 3.4*, 2013. dirección: https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf

[79] *LSM6DS3: iNEMO Inertial Module — Always-On 3D Accelerometer and 3D Gyroscope*, Document ID: DS10496. Accedido: 2025, STMicroelectronics, 2017. dirección: https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm6ds3.pdf

[80] *BNO055 Intelligent 9-Axis Absolute Orientation Sensor — Datasheet*, Document Revision 1.4. Accedido: 2025, Bosch Sensortec, 2016. dirección: https://www.bosch-

sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bno055-ds000.pdf

[81] Elecfreaks, *Ultrasonic Ranging Module HC-SR04 – Datasheet*, 2011. dirección: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf

[82] DFRobot, *Analog Water Level Sensor — Datasheet and Usage Guide*, Accedido: 2025, 2018. dirección: https://wiki.dfrobot.com/Water_Level_Sensor_SKU_SEN0189

[83] Joy-IT, *Rain Sensor Module FC-37 — Technical Reference*, Accedido: 2025, 2018. dirección: https://joy-it.net/files/files/Produkte/SEN-Regensensor/SEN-Regensensor_Datasheet_2020-12-15.pdf

[84] Diodes Incorporated, *PAM8403 – 3W, Class-D Audio Amplifier, Datasheet*, 2015. dirección: https://www.mouser.com/datasheet/2/115/PAM8403-247318.pdf

[85] Murata Manufacturing Co., Ltd., *Piezoelectric Sound Components – Application Manual*, Accedido: 2025, 2021. dirección: https://www.murata.com/~/media/webrenewal/support/library/catalog/products/sound/p15e.ashx

[86] Joy-IT, *KY-012 Active Buzzer Module – Technical Reference*, Accedido: 2025, 2021. dirección: https://joy-it.net/en/products/COM-KY012APR

[87] Vishay Semiconductors, *TLHR540, TLHG540, TLHY540 – 5 mm LED Lamps, Tinted Diffused, Datasheet*, Accedido: 2025, 2017. dirección: https://www.vishay.com/docs/83012/tlhr540.pdf

[88] QLight Co., Ltd., *QLight Industrial Signal & Warning Lights – Product Catalog*, Balizas estroboscopicas industriales de 110/220 V AC. Accedido: 2025, 2023. dirección: https://www.qlight.com

[89] OMC – Optoelectronic Manufacturing Corporation, *LED Module, 12 V DC, 3 LEDs per Module, IP67 – Product Datasheet*, Modulo LED de 12 V con tres LEDs integrados por modulo. Accedido: 2025, 2012. dirección: https://www.farnell.com/datasheets/90815.pdf

[90] Huawei Technologies Co., Ltd., *HUAWEI E8372 Wingle LTE Universal 4G USB Modem WiFi – User Guide*, 2020. dirección: https://consumer.huawei.com/en/routers/e8372/

[91] Huawei Technologies Co., Ltd., *HUAWEI E3372 LTE USB Stick – Product Description*, 2016. dirección: https://consumer.huawei.com/en/routers/e3372/

[92] ZTE Corporation, *ZTE MF823 LTE USB Modem – Technical Specifications*, Accedido: 2025, 2014. dirección: https://www.zte.com.cn/global/products/terminal/201612/t20161202_448121.html

[93] I. Buchmann, *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*, 3.ª ed. Richmond, BC, Canada: Cadex Electronics, 2011. dirección: https://batteryuniversity.com

[94] Arduino S.r.l., *Arduino Uno Rev3 – Technical Specifications and Datasheet*, Corriente de operación: 40–50 mA (placa base); los pines digitales aportan hasta 40 mA por pin. Accedido: 2025, 2023. dirección: https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/

[95] "Anker Power Banks – Product Specifications and Technical Data." Especificaciones técnicas de baterías portátiles USB de alta capacidad. Accedido: 2025, Anker Innovations. dirección: https://www.anker.com/collections/portable-chargers-power-banks

[96] Raspberry Pi Ltd., *Raspberry Pi 4 Model B – Product Brief and Mechanical Specification*, Consumo técnico: 600 mA en reposo, hasta 1.8 A bajo carga con periféricos USB activos. Accedido: 2025, 2022. dirección: https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4-model-b/raspberry-pi-4-product-brief.pdf

[97] "Firebase Realtime Database Documentation," Google LLC. dirección: https://firebase.google.com/docs/database

[98] “InfluxDB Cloud Documentation – Time Series Data Platform,” InfluxData Inc. dirección: https://docs.influxdata.com/influxdb/cloud/

[99] “AWS IoT Core Developer Guide,” Amazon Web Services. dirección: https://docs.aws.amazon.com/iot/latest/developerguide/

[100] “Firebase Hosting Documentation – Fast and Secure Web Hosting,” Google LLC. dirección: https://firebase.google.com/docs/hosting

[101] “Grafana Documentation – Open Source Analytics and Monitoring,” Grafana Labs. dirección: https://grafana.com/docs/grafana/latest/

[102] “Node-RED Documentation – Low-Code Programming for Event-Driven Applications,” OpenJS Foundation. dirección: https://nodered.org/docs/

[103] “Python 3.x Official Documentation,” Python Software Foundation. dirección: https://docs.python.org/3/

[104] “Node.js – JavaScript Runtime Built on Chrome V8 Engine,” OpenJS Foundation. dirección: https://nodejs.org/en/docs

[105] Arduino S.r.l. “Arduino IDE 2 – Official Download and Documentation. ”dirección: https://www.arduino.cc/en/software

[106] “PlatformIO: Professional Collaborative Platform for Embedded Development,” PlatformIO Labs. dirección: https://platformio.org/

[107] “Telegram Bot API Documentation,” Telegram FZ-LLC. dirección: https://core.telegram.org/bots/api

[108] “Twilio Messaging API – WhatsApp and SMS Documentation,” Twilio Inc. dirección: https://www.twilio.com/docs/whatsapp

[109] “Vonage SMS API Documentation,” Vonage. dirección: https://developer.vonage.com/en/messages/overview

ANEXOS

Anexo A. Datasheet de la Raspberry Pi 4

5 Peripherals

5.1 GPIO Interface

The Pi4B makes 28 BCM2711 GPIOs available via a standard Raspberry Pi 40-pin header. This header is backwards compatible with all previous Raspberry Pi boards with a 40-way header.

5.1.1 GPIO Pin Assignments

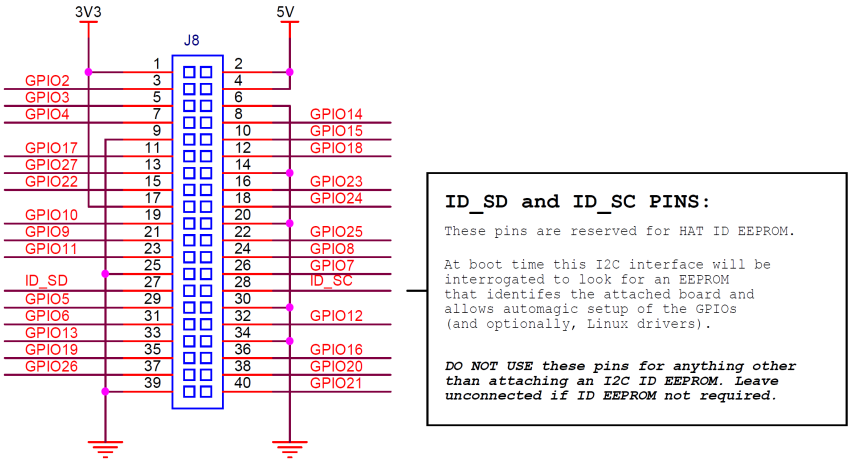


Figure 3: GPIO Connector Pinout

As well as being able to be used as straightforward software controlled input and output (with programmable pulls), GPIO pins can be switched (multiplexed) into various other modes backed by dedicated peripheral blocks such as I2C, UART and SPI.

In addition to the standard peripheral options found on legacy Pis, extra I2C, UART and SPI peripherals have been added to the BCM2711 chip and are available as further mux options on the Pi 4. This gives users much more flexibility when attaching add-on hardware as compared to older models.

5.1.2 GPIO Alternate Functions

GPIO	Default Pull	ALT0	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5
0	High	SDA0	SA5	PCLK	SPI3_CE0_N	TXD2	SDA6
1	High	SCL0	SA4	DE	SPI3_MISO	RXD2	SCL6
2	High	SDA1	SA3	LCD_VSYNC	SPI3_MOSI	CTS2	SDA3
3	High	SCL1	SA2	LCD_HSYNC	SPI3_SCLK	RTS2	SCL3
4	High	GPCLK0	SA1	DPI_D0	SPI4_CE0_N	TXD3	SDA3
5	High	GPCLK1	SA0	DPI_D1	SPI4_MISO	RXD3	SCL3
6	High	GPCLK2	SOE_N	DPI_D2	SPI4_MOSI	CTS3	SDA4
7	High	SPI0_CE1_N	SWE_N	DPI_D3	SPI4_SCLK	RTS3	SCL4
8	High	SPI0_CE0_N	SD0	DPI_D4	-	TXD4	SDA4
9	Low	SPI0_MISO	SD1	DPI_D5	-	RXD4	SCL4
10	Low	SPI0_MOSI	SD2	DPI_D6	-	CTS4	SDA5
11	Low	SPI0_SCLK	SD3	DPI_D7	-	RTS4	SCL5
12	Low	PWM0	SD4	DPI_D8	SPI5_CE0_N	TXD5	SDA5
13	Low	PWM1	SD5	DPI_D9	SPI5_MISO	RXD5	SCL5
14	Low	TXD0	SD6	DPI_D10	SPI5_MOSI	CTS5	TXD1
15	Low	RXD0	SD7	DPI_D11	SPI5_SCLK	RTS5	RXD1
16	Low	FL0	SD8	DPI_D12	CTS0	SPI1_CE2_N	CTS1
17	Low	FL1	SD9	DPI_D13	RTS0	SPI1_CE1_N	RTS1
18	Low	PCM_CLK	SD10	DPI_D14	SPI6_CE0_N	SPI1_CE0_N	PWM0
19	Low	PCM_FS	SD11	DPI_D15	SPI6_MISO	SPI1_MISO	PWM1
20	Low	PCM_DIN	SD12	DPI_D16	SPI6_MOSI	SPI1_MOSI	GPCLK0
21	Low	PCM_DOUT	SD13	DPI_D17	SPI6_SCLK	SPI1_SCLK	GPCLK1
22	Low	SD0_CLK	SD14	DPI_D18	SD1_CLK	ARM_TRST	SDA6
23	Low	SD0_CMD	SD15	DPI_D19	SD1_CMD	ARM_RTCK	SCL6
24	Low	SD0_DAT0	SD16	DPI_D20	SD1_DAT0	ARM_TDO	SPI3_CE1_N
25	Low	SD0_DAT1	SD17	DPI_D21	SD1_DAT1	ARM_TCK	SPI4_CE1_N
26	Low	SD0_DAT2	TE0	DPI_D22	SD1_DAT2	ARM_TDI	SPI5_CE1_N
27	Low	SD0_DAT3	TE1	DPI_D23	SD1_DAT3	ARM_TMS	SPI6_CE1_N

Table 5: Raspberry Pi 4 GPIO Alternate Functions

Table 5 details the default pin pull state and available alternate GPIO functions. Most of these alternate peripheral functions are described in detail in the BCM2711 Peripherals Specification document which can be downloaded from the hardware documentation section of the website.

5.1.3 Display Parallel Interface (DPI)

A standard parallel RGB (DPI) interface is available the GPIOs. This up-to-24-bit parallel interface can support a secondary display.

5.1.4 SD/SDIO Interface

The Pi4B has a dedicated SD card socket which supports 1.8V, DDR50 mode (at a peak bandwidth of 50 Megabytes / sec). In addition, a legacy SDIO interface is available on the GPIO pins.

5.2 Camera and Display Interfaces

The Pi4B has 1x Raspberry Pi 2-lane MIPI CSI Camera and 1x Raspberry Pi 2-lane MIPI DSI Display connector. These connectors are backwards compatible with legacy Raspberry Pi boards, and support all of the available Raspberry Pi camera and display peripherals.

5.3 USB

The Pi4B has 2x USB2 and 2x USB3 type-A sockets. Downstream USB current is limited to approximately 1.1A in aggregate over the four sockets.

5.4 HDMI

The Pi4B has 2x micro-HDMI ports, both of which support CEC and HDMI 2.0 with resolutions up to 4Kp60.

5.5 Audio and Composite (TV Out)

The Pi4B supports near-CD-quality analogue audio output and composite TV-output via a 4-ring TRS 'A/V' jack.

The analog audio output can drive 32 Ohm headphones directly.

5.6 Temperature Range and Thermals

The recommended ambient operating temperature range is 0 to 50 degrees Celsius.

To reduce thermal output when idling or under light load, the Pi4B reduces the CPU clock speed and voltage. During heavier load the speed and voltage (and hence thermal output) are increased. The internal governor will throttle back both the CPU speed and voltage to make sure the CPU temperature never exceeds 85 degrees C.

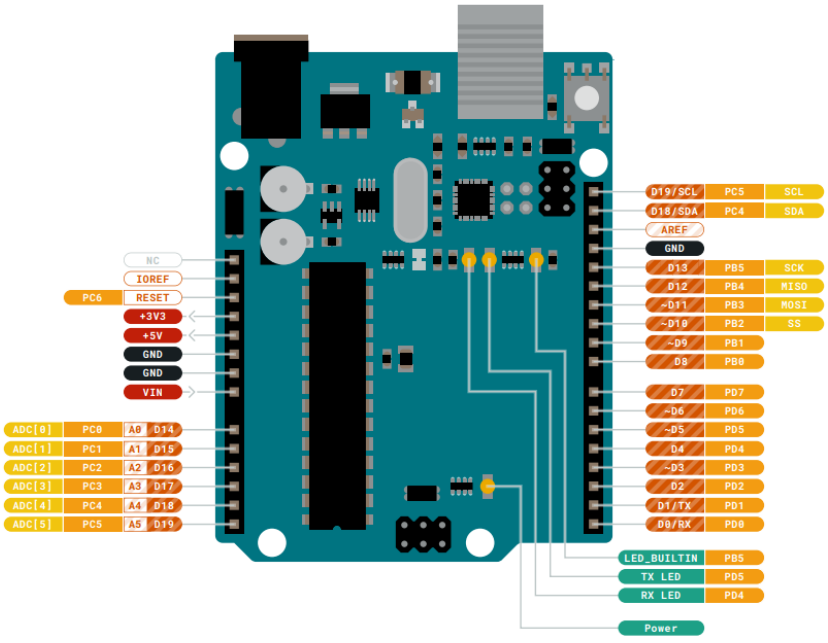
The Pi4B will operate perfectly well without any extra cooling and is designed for sprint performance - expecting a light use case on average and ramping up the CPU speed when needed (e.g. when loading a webpage). If a user wishes to load the system continually or operate it at a high temperature at full performance, further cooling may be needed.

6 Availability

Raspberry Pi guarantees availability of the Pi4B until at least January 2031.

Anexo B. Datasheet del Arduino Nano

5 Connector Pinouts



Pinout

5.1 JANALOG

Pin	Function	Type	Description
1	NC	NC	Not connected
2	IOREF	IOREF	Reference for digital logic V - connected to 5V
3	Reset	Reset	Reset
4	+3V3	Power	+3V3 Power Rail
5	+5V	Power	+5V Power Rail
6	GND	Power	Ground
7	GND	Power	Ground
8	VIN	Power	Voltage Input
9	A0	Analog/GPIO	Analog input 0 /GPIO
10	A1	Analog/GPIO	Analog input 1 /GPIO
11	A2	Analog/GPIO	Analog input 2 /GPIO
12	A3	Analog/GPIO	Analog input 3 /GPIO
13	A4/SDA	Analog input/I2C	Analog input 4/I2C Data line
14	A5/SCL	Analog input/I2C	Analog input 5/I2C Clock line

5.2 JDIGITAL

Pin	Function	Type	Description
1	D0	Digital/GPIO	Digital pin 0/GPIO
2	D1	Digital/GPIO	Digital pin 1/GPIO
3	D2	Digital/GPIO	Digital pin 2/GPIO
4	D3	Digital/GPIO	Digital pin 3/GPIO
5	D4	Digital/GPIO	Digital pin 4/GPIO
6	D5	Digital/GPIO	Digital pin 5/GPIO
7	D6	Digital/GPIO	Digital pin 6/GPIO
8	D7	Digital/GPIO	Digital pin 7/GPIO
9	D8	Digital/GPIO	Digital pin 8/GPIO
10	D9	Digital/GPIO	Digital pin 9/GPIO
11	SS	Digital	SPI Chip Select
12	MOSI	Digital	SPI1 Main Out Secondary In
13	MISO	Digital	SPI Main In Secondary Out
14	SCK	Digital	SPI serial clock output
15	GND	Power	Ground
16	AREF	Digital	Analog reference voltage
17	A4/SD4	Digital	Analog input 4/I2C Data line (duplicated)
18	A5/SD5	Digital	Analog input 5/I2C Clock line (duplicated)

Anexo C. Datasheet del Sensor de Humedad Capacitivo

深圳市海王传感器有限公司

Shenzhen haiwang sensor co., LTD HC-SR501 PIR SENSOR MODULE

Features

1. New soil moisture sensor. This capacitive soil moisture sensor is different from most resistive sensors on the market. It uses the principle of capacitive sensing to detect soil moisture. The problem that the resistance sensor is easily corroded is avoided, and its working life is greatly extended.

2. The sensor has a built-in voltage regulator chip, which supports a 3.3~5.5V wide voltage working environment, which means that it can work normally even on the 3.3V Arduino main control board. The iconic DFRobot-Gravity interface ensures the compatibility of the interface and can be directly connected to the Gavity IO expansion board.

3. A micro PC such as a Raspberry Pi only needs an external ADC (analog signal to digital signal) conversion module to work.

4. With an external screen and a motherboard, you can talk to your plant to see if the beloved one is thirsty, and whether it needs a little more water.

Product parameters

Working voltage: 3.3 ~ 5.5 VDC

Output voltage: 0 ~ 3.0 VDC

Interface: PH2.54-3P

Size: 98 x 23mm (LxW)

Instructions

Prepare

Hardware

- UNO control board x1
- Soil moisture sensor x1
- PH2.54-3P wiring x1

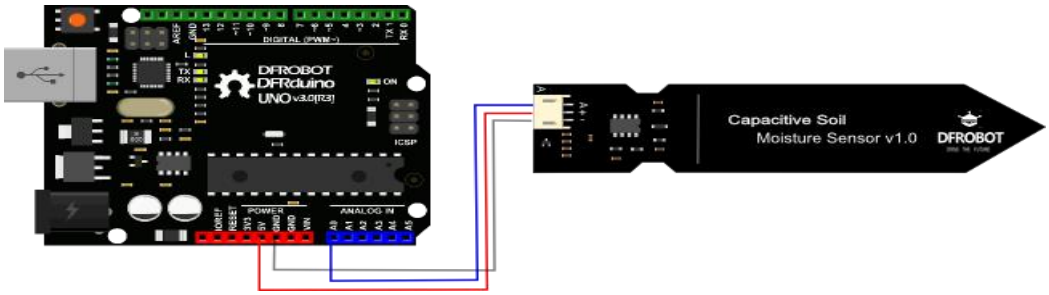
Software

- Arduino IDE V1.6.5

Wiring diagram

1. Connect the sensor and the main control board as shown

Cindy: haiwang5@szhaiwang.com Mobile:+86-18682200597 Skype:szhaiwang4@hotmail.com WeChat: wyxwater



Calibration code

1. Before officially testing the soil moisture, a calibration process is required;

2. Burn in the calibration code to the Arduino main control board;

3. Open the serial monitoring assistant.

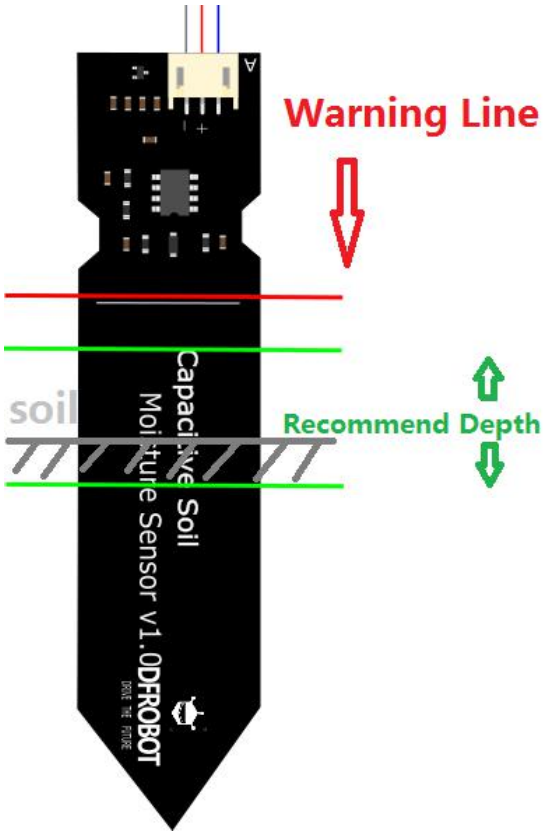
```
void setup() {
  Serial.begin(9600); // open serial port, set the baud rate to 9600 bps
}
void loop() {
  int val;
  val = analogRead(0); //connect sensor to Analog 0
  Serial.print(val); //print the value to serial
  delay(100);
}
```

Calibration procedure

Dry humidity calibration

Calibration instructions: define a measurement range by reading the sensor values in air and water respectively.
Open the serial monitor and set the baud rate to 9600 according to the program.

First, place the sensor in the air to read the analog value, which represents the reading when dry. Then take a glass of water, insert the sensor into the water to a certain depth (make a mark, this depth is the depth you will insert into the soil), must not exceed the red warning line! And record the analog value read at this time, which represents 100% humidity. (The output data is inversely proportional to the humidity, and the output in the water is the smallest.) The insertion depth is recommended as shown in the figure.



Interval setting

Because the sensor value will be affected by the depth of the soil and the tightness of the soil, only the relative humidity of the soil can be detected. We divide the range of humidity into three equal parts, which means dry, humid, and very humid. The two data recorded before are the humidity interval. For example: the reading in the air is 520, and the reading in the water is 260, so it can be divided into (520,430), (430,350], (350,260). These three sections represent dry, wet, and very humid.

Note: Since this sensor will monitor soil moisture based on the principle of capacitive sensing, placing it in different places with different soil moisture, different tightness, and different insertion depth will reflect different humidity, even in the same place, at the same depth, at During the second insertion, since the first extraction has caused loosening of the soil, the humidity may be lower than the first reading. A

Note: Humidity is inversely proportional to the reading.

Test code

Bring the two sets of data just recorded into your test code.

```
/*************************************************
 This example reads Capacitive Soil Moisture Sensor.

 Created 2015-10-21
 By berinie Chen <bernie.chen@dfrobot.com>
```

Anexo D. Datasheet del Sensor MPU-6050

101 (/)

199 Likes

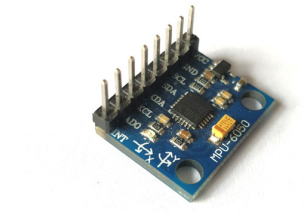
Need electronics solutions?

New application guides covering TDK group technologies, come and get the most suitable one

TDK Corporation

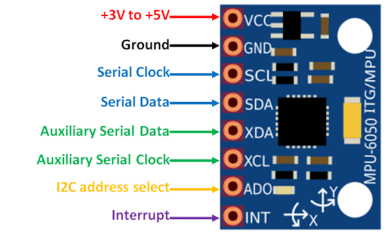
MPU6050 - Accelerometer and Gyroscope Module

17 March 2018 - 0 Comments



(/sites/default/files/components/MPU6050-Module.jpg)

MPU6050 Module



(/sites/default/files/component_pin/MPU6050-Pinout.png)

MPU6050 Pinout

[Click the image to enlarge it]

SPONSORED SEARCHES

circuit schematics

mpu6050 datasheet

MPU6050 Pin Configuration

Pin Number	Pin Name	Description
1	Vcc	Provides power for the module, can be +3V to +5V. Typically +5V is used
2	Ground	Connected to Ground of system
3	Serial Clock (SCL)	Used for providing clock pulse for I2C Communication
4	Serial Data (SDA)	Used for transferring Data through I2C communication
5	Auxiliary Serial Data (XDA)	Can be used to interface other I2C modules with MPU6050. It is optional
6	Auxiliary Serial Clock (XCL)	Can be used to interface other I2C modules with MPU6050. It is optional
7	AD0	If more than one MPU6050 is used a single MCU, then this pin can be used to vary the address
8	Interrupt (INT)	Interrupt pin to indicate that data is available for MCU to read.

MPU6050 Features

Anexo E. Datasheet del Sensor Ultrasónico HC-SR04

HC-SR04 Ultrasonic Sensor

Elijah J. Morgan

Nov. 16 2014

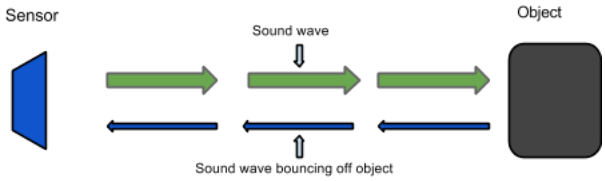
The purpose of this file is to explain how the HC-SR04 works. It will give a brief explanation of how ultrasonic sensors work in general. It will also explain how to wire the sensor up to a microcontroller and how to take/interpret readings. It will also discuss some sources of errors and bad readings.



1. **How Ultrasonic Sensors Work**
2. **HC-SR04 Specifications**
3. **Timing chart, Pin explanations and Taking Distance Measurements**
4. **Wiring HC-SR04 with a microcontroller**
5. **Errors and Bad Readings**

1. How Ultrasonic Sensors Work

Ultrasonic sensors use sound to determine the distance between the sensor and the closest object in its path. How do ultrasonic sensors do this? Ultrasonic sensors are essentially sound sensors, but they operate at a frequency above human hearing.



The sensor sends out a sound wave at a specific frequency. It then listens for that specific sound wave to bounce off of an object and come back (Figure 1). The sensor keeps track of the time between sending the sound wave and the sound wave returning. If you know how fast something is going and how long it is traveling you can find the distance traveled with equation 1.

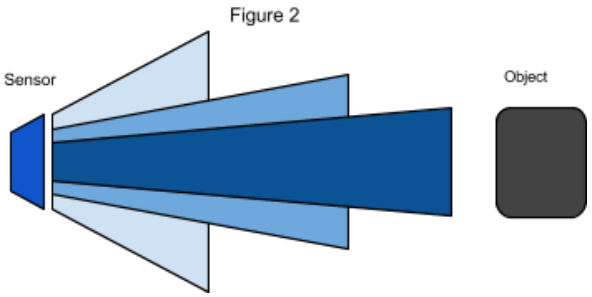
Equation 1. $d = v \times t$

The speed of sound can be calculated based on the a variety of atmospheric conditions, including temperature, humidity and pressure. Actually calculating the distance will be shown later on in this document.

It should be noted that ultrasonic sensors have a cone of detection, the angle of this cone varies with distance, Figure 2 show this relation. The ability of a sensor to

detect an object also depends on the objects orientation to the sensor. If an object doesn't present a flat surface to the sensor then it is possible the sound wave will bounce off the object in a way that it does not return to the sensor.

Figure 2



2. HC-SR04 Specifications

The sensor chosen for the Firefighting Drone Project was the HC-SR04. This section contains the specifications and why they are important to the sensor module. The sensor modules requirements are as follows.

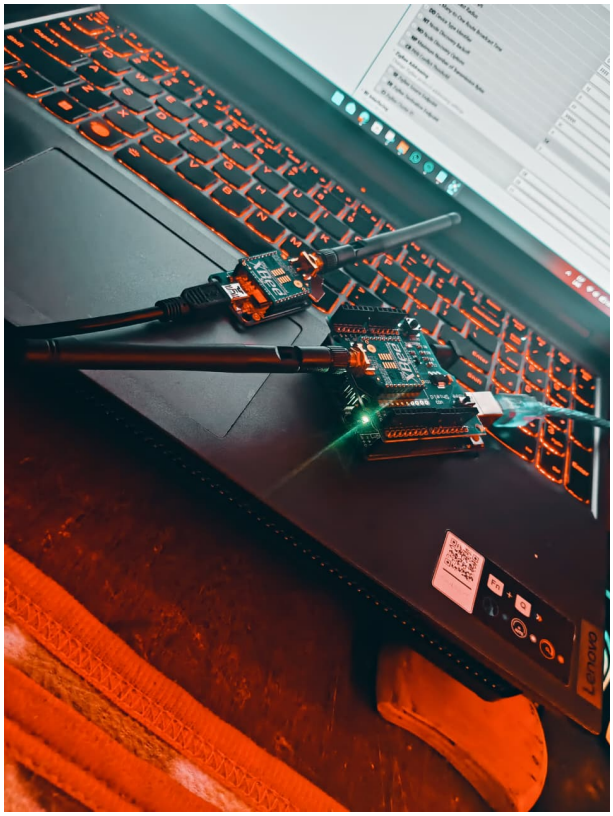
- Cost
- Weight
- Community of hobbyists and support
- Accuracy of object detection
- Probability of working in a smoky environment
- Ease of use

The HC-SR04 Specifications are listed below. These specifications are from the Cytron Technologies HC-SR04 User's Manual (source 1).

- Power Supply: +5V DC
- Quiescent Current: <2mA
- Working current: 15mA
- Effectual Angle: <15º
- Ranging Distance: 2-400 cm
- Resolution: 0.3 cm
- Measuring Angle: 30º
- Trigger Input Pulse width: 10uS
- Dimension: 45mm x 20mm x 15mm
- Weight: approx. 10 g

The HC-SR04's best selling point is its price; it can be purchased at around $2 per unit.

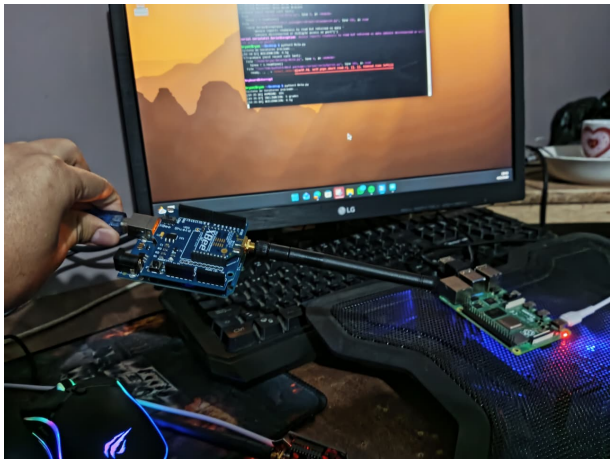
Anexo F. Asignación de roles en la red ZigBee



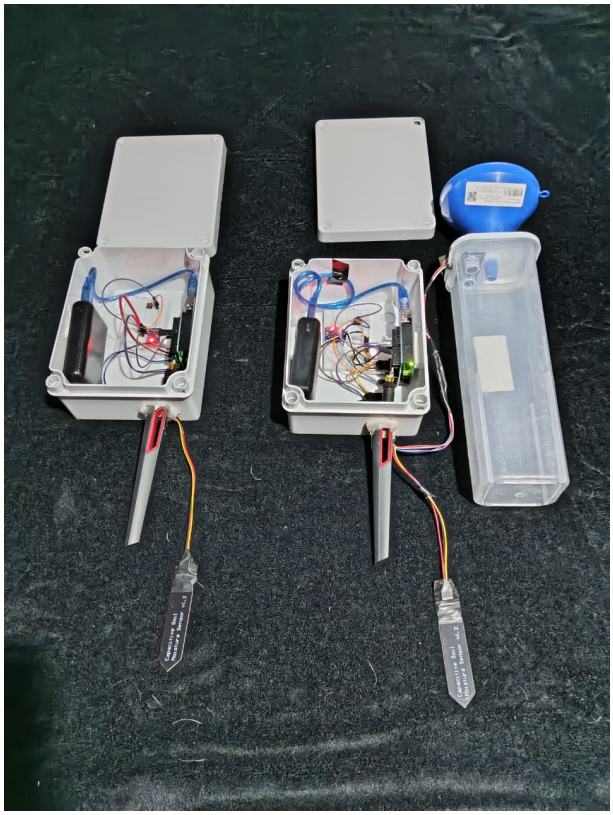
Anexo G. Ensamblaje y calibración de sensores



Anexo H. Comunicación de la red ZigBee



Anexo I. Nodos sensores versión final



Anexo J. Nodo coordinador versión final

