UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"DRON DE MONITOREO PARA CULTIVOS EN EL SECTOR SAN ANDRÉS DEL CANTÓN SAN MIGUEL DE URCUQUÍ, UTILIZANDO SENSORES BASADOS EN UNA ARQUITECTURA IOT"

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

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

DELGADO CONGO BRANDO JOSUE

DIRECTOR:

MSC. FABÍAN GEOVANNY CUZME RODRIGUÉZ

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:	DELGADO CONGO BRANDO JOSUE

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"DRON DE MONITOREO PARA CULTIVOS EN EL SECTOR SAN ANDRÉS DEL CANTÓN SAN MIGUEL DE URCUQUÍ, UTILIZANDO SENSORES BASADOS EN UNA ARQUITECTURA IOT"
AUTOR (ES):	DELGADO CONGO BRANDO JOSUE
FECHA: DD/MM/AAAA	23/07/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** □ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
DIRECTOR /ASESOR:	MSC. FABIAN GEOVANNY CUZME RODRIGUEZ MSC. HENRY PATRICIO FARINANGO ENDARA

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 23 días del mes de julio de 2026

EL AUTOR:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
BRANDO JOSUE
DELGADO CONGO

(Firma)……
Nombre: Delgado Congo Brando Josue

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 23 de julio de 2026

MSC. FABIAN GEOVANNY CUZME RODRIGUEZ

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:
FABIAN GEOVANNY CUZME RODRIGUEZ

f) ……

MSC. FABIAN GEOVANNY CUZME RODRIGUEZ

C.C.:1311527012



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a quienes me apoyaron durante todo este trayecto, a quienes que con plena sinceridad y pese al desconocimiento tuvieron fe en algo abstracto, a aquellos que confiaban en un potencial que solo ellos veían, a mi familia, amistades, docentes y aquellos que de alguna manera contribuyeron a mi formación como profesional y como persona de bien.

Delgado Congo Brando Josue



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi yo del pasado por no rendirse ante la adversidad, por haber encontrado fuerza aun en los momentos más difíciles y por continuar avanzando incluso cuando el camino parecía incierto. Agradezco al tiempo por mantenerme con vida, por darme la oportunidad de despertar cada día y enfrentar nuevos desafíos con esperanza, aprendizaje y valentía.

Agradezco a Dios, quien me brindó fe, esperanza y fortaleza cuando más lo necesitaba. A mi familia, gracias por ser mi apoyo constante aun cuando me encontraba al borde del colapso, por acompañarme en este proceso y por darme la fuerza necesaria para no abandonar mis objetivos.

Nombrar a cada una de las personas que aportaron para que pueda cumplir con este mi más grande logro sería imposible, porque la lista es interminable y mi gratitud hacia ellas no tiene final. Por ello, a través de estas palabras, quiero agradecer a todos quienes aparecieron en mi vida para ofrecerme una palabra de aliento, un consejo, una ayuda sincera o simplemente una sonrisa en los días en los que más lo necesitaba.

Delgado Congo Brando Josue



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

RESUMEN

El presente proyecto de titulación se centra en la recolección y análisis de parámetros del suelo en un cultivo de maíz mediante un sistema de telemetría móvil embarcado en un drone. Este sistema integra tecnologías de comunicación estructuradas en una arquitectura IoT, utilizando un nodo sensor multiparamétrico 7 en 1 y tecnología LoRa para garantizar el enlace de largo alcance en áreas de cultivo carentes de cobertura tradicional. La recepción y procesamiento de datos se realiza a través del protocolo MQTT en un entorno virtualizado local, apoyándose en InfluxDB como base de datos temporal y Grafana como plataforma de visualización. La articulación eficiente de estos componentes es fundamental para garantizar un monitoreo eficiente, optimizando la toma de decisiones agrícolas en los cultivos de maíz en el sector San Andrés del cantón San Miguel de Urcuquí.

En cuanto al rendimiento y análisis agronómico, el sistema permitió realizar un mapeo espacial detallado mediante cuadrículas, dividiendo el predio en franjas concéntricas hasta distancias superiores a los 100 metros. El estudio longitudinal comprobó empíricamente la dependencia termodinámica de los nutrientes, demostrando que la disponibilidad de macronutrientes (NPK) requiere umbrales de humedad superiores al 20 % y temperaturas entre 22 °C y 28 °C. Las pruebas revelaron un núcleo altamente fértil entre los 40 y 80 metros, donde se registraron niveles óptimos de Fósforo (hasta 160.5 mg/kg), contrastando drásticamente con

una degradación severa y acidez crítica (pH < 4.0) en las zonas perimetrales y de transición inicial, fuertemente afectadas por el estrés hídrico.

Respecto a la aplicabilidad operativa y la escalabilidad, la red inalámbrica de sensores demostró gran robustez frente a la atenuación del follaje, manteniendo la integridad de las tramas de datos. Ante los parámetros detectados, la plataforma permitió generar mapas de prescripción precisos que sustentan un plan de Agricultura de Precisión. Gracias a la telemetría recolectada, se determinaron acciones como la suspensión inmediata de abono granulado en el núcleo fértil y la aplicación de fertilización y aplicación de cal agrícola en linderos, garantizando un ahorro significativo en insumos agroquímicos y maximizando la sostenibilidad del predio.

Palabras clave: Internet de las Cosas (IoT), LoRa, Telemetría, NPK, ETL (Extract, Transform and Load).

ABSTRACT

This project focuses on the collection and analysis of soil parameters in a corn crop using a mobile telemetry system embedded in a drone. The system integrates communication technologies structured within an IoT architecture, utilizing a 7-in-1 multiparametric sensor node and LoRa technology to ensure a long-range link in agricultural areas lacking traditional network coverage. Data reception and processing are executed via the MQTT protocol in a local virtualized environment, relying on InfluxDB as a time-series database and Grafana as a visualization platform. The seamless articulation of these components is fundamental to ensure effective monitoring and optimize agricultural decision-making for corn crops in the San Andrés sector, San Miguel de Urcuquí canton.

Regarding agronomic performance and analysis, the system enabled detailed spatial mapping through grid patterns, dividing the field into concentric strips extending beyond 100 meters. The longitudinal study empirically verified the thermodynamic dependence of nutrients, demonstrating that the availability of macronutrients (NPK) requires moisture thresholds above 20% and temperatures between 22 °C and 28 °C. Field tests revealed a highly fertile core between 40 and 80 meters, recording optimal Phosphorus levels up to 160.5 mg/kg. This contrasted drastically with severe degradation and critical acidity in the perimeter and initial transition zones, which were heavily affected by water stress.

In terms of operational applicability and scalability, the wireless sensor network demonstrated high robustness against foliage attenuation, successfully maintaining the integrity of data frames. Based on the detected parameters, the platform facilitated the generation of precise prescription maps to support a Precision Agriculture plan. Thanks to the collected telemetry, immediate actions were determined, such as halting granulated fertilizer application in the fertile core and applying targeted fertilization and agricultural lime along the

perimeter boundaries. This approach guarantees significant savings in agrochemical inputs while maximizing the agricultural sustainability of the property.

Keywords: Internet of Things (IoT), LoRa, Telemetry, NPK, ETL (Extract, Transform and Load).

Índice de Contenido

1.1. Tema....21

1.2. Planteamiento del Problema....21

1.3. Objetivos....24

1.3.1. Objetivo general....24

1.3.2. Objetivos específicos....24

1.4. Alcance....24

1.5. Justificación....28

CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA....31

2.1. Uso de Tecnologías en Agricultura....31

2.1.1. Cultivos de Maíz en Ecuador....35

2.1.2. Monitoreo de variables críticas del suelo (humedad, temperatura, pH)..38

2.2. Arquitectura IoT....44

2.2.1. Aplicaciones de IoT en la agricultura....47

2.2.2. Protocolos de comunicación utilizados en IoT....48

2.3. Drones (UAVs)....51

2.3.1. Tipos de drones y características técnicas relevantes para aplicaciones agrícolas. 51

2.3.2. Principales características de los drones: autonomía, capacidad de carga, GPS para geolocalización. 52

2.4. Normativas y Aspectos Legales....52

2.4.1. Regulaciones locales para el uso de drones en agricultura. 53

2.4.2. Requisitos Generales para la Operación de Drones Agrícolas 53

2.4.3. Restricciones y Condiciones de Vuelo 54

2.4.4. Procedimientos Administrativos para la Operación de Drones Agrícolas 55

CAPÍTULO III. DISEÑO DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN 56

3.1. Metodología 56

3.1.1. Modelo Investigación Acción 56

3.2. Análisis 58

3.2.1. Situación Actual 59

3.2.2. Población y Muestra 62

3.2.3. Técnicas de Recolección de Información 64

3.2.4. Encuesta aplicada a los agricultores de la comunidad San Andrés 64

3.3. Descripción del Sistema 66

3.4. Requerimientos del Sistema 66

3.4.1. Nomenclatura de requerimientos 67

3.4.2. Actores Involucrados 68

3.4.3. Requerimientos de Stakeholders 68

3.4.4. Requerimientos Funcionales del Sistema 70

3.4.5. Requerimientos de arquitectura 73

3.5. Elección de Hardware y software para el sistema 77

3.5.1. Hardware destinado para el sistema 78

3.5.2. Software destinado para el sistema 87

3.6. Diseño del Sistema 92

3.6.1. Diagrama de bloques general del sistema 95

3.6.2. Diseño del Esquema de Conexión del Sistema 102

3.7. Implementación del Hardware 130

3.8. Implementación de Software 136

CAPITULO IV PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS 149

Plan de Pruebas y de Evaluación de Resultados 149

4.1. Prueba01_AD: Pruebas de Adquisición de datos 152

4.2. Prueba02_CO: Pruebas de comunicación LoRa (Nodo Sensor – Coordinador) 159

4.3. Prueba03_CONN: Pruebas de conectividad Wi-Fi y publicación MQTT (Coordinador – Broker) 168

4.4. Prueba04_AL: Pruebas de procesamiento y almacenamiento de datos (Backend) 173

4.5. Prueba05_VI: Verificación de datos y visualización (Dashboard) 176

4.6. Prueba06_PC: Pruebas de campo (validación integral del sistema) 179

4.7. Análisis de Costos 236

Conclusiones y Recomendaciones 242

Bibliografía 247

Anexo 1. Encuesta para la recolección de información sobre prácticas agrícolas y necesidades tecnológicas en el cultivo de maíz en la comunidad San Andrés, Cantón San Miguel de Urcuquí 249

Anexo 2. Resultados de la aplicación de la Encuesta 253

Anexo 3. Revisión de Trabajos Relacionados 259

Anexo 4. Código del Sistema 264

Anexo 5. Hoja de datos de la placa y sensores 283

Anexo 6. Fotografías de las pruebas realizadas 297

Índice de Tablas

TABLA 1 DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES. 34

TABLA 2 PRÁCTICAS AGRÍCOLAS Y MANEJO DEL CULTIVO. 36

TABLA 3 *IMPORTANCIA DEL MONITOREO DE LAS VARIABLES DEL SUELO.* 39

TABLA 4 RELACIÓN ENTRE VARIABLES DEL SUELO Y EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS DE MAÍZ 41

TABLA 5 JERARQUÍA DE CAPAS DE LA ARQUITECTURA IOT PROPUESTA POR LA ITU-T 46

TABLA 6 *EN LA TABLA SE EXPLICAN LAS ABREVIATURAS PARA ENTENDER CADA UNO DE LOS REQUERIMIENTOS DE STAKEHOLDERS.* 67

TABLA 7 *ACTORES INVOLUCRADOS* 68

TABLA 8 *TABLA DE REQUERIMIENTOS OPERACIONALES DEL SISTEMA* 70

TABLA 9 *REQUERIMIENTOS SYSR* 70

TABLA 10 *TABLA DE REQUERIMIENTOS DE ARQUITECTURA* 73

TABLA 11 *SELECCIÓN DE PLATAFORMA DE VUELO (DRONE)* 79

TABLA 12 *SELECCIÓN DE PLACA EMBEBIDA* 80

TABLA 13 *SELECCIÓN DE SENSOR DE SUELO* 81

TABLA 14 *SELECCIÓN DE GPS* 82

TABLA 15 *CONSUMO NOMINAL DEL SISTEMA* 84

TABLA 16 *SELECCIÓN DE BATERÍA* 85

TABLA 17 *SELECCIÓN BROKER MQTT* 88

TABLA 18 *SELECCIÓN BASE DE DATOS* 89

TABLA 19 *SELECCIÓN PLATAFORMA DE VISUALIZACIÓN* 90

TABLA 20 *SELECCIÓN API DE IA* 91

TABLA 21 *SELECCIÓN IDE DE PROGRAMACIÓN* 92

TABLA 22 *TABLA DE LIBRERÍAS PARA LA CODIFICACIÓN DEL NODO SENSOR* 103

TABLA 23 *TABLA DE LIBRERÍAS PARA LA PROGRAMACIÓN DEL NODO COORDINADOR* 114

TABLA 24 *PARÁMETROS DE PLANIFICACIÓN DE VUELO* 185

TABLA 25 *MÉTRICAS DE EVALUACIÓN DEL SISTEMA* 191

TABLA 26 *TABLA DE VARIABLES EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA DURANTE LA JORNADA DE MONITOREO DEL 25 DE JUNIO*..... 207

TABLA 27 *TABLA DE VARIABLES EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA DURANTE LA JORNADA DE MONITOREO DEL 27 DE JUNIO*..... 211

TABLA 28 *TABLA DE VARIABLES EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA DURANTE LA JORNADA DE MONITOREO DEL 28 DE JUNIO*..... 215

TABLA 29 *ANÁLISIS DE PUNTOS EN LOS CUADROS CORRESPONDIENTES A LA FRANJA 1* 219

TABLA 30 *ANÁLISIS DE PUNTOS EN LOS CUADROS CORRESPONDIENTES A LA FRANJA 2* 222

TABLA 31 *ANÁLISIS DE PUNTOS EN LOS CUADROS CORRESPONDIENTES A LA FRANJA 3* 225

TABLA 32 *ANÁLISIS DE PUNTOS EN LOS CUADROS CORRESPONDIENTES A LA FRANJA 4* 227

TABLA 33 *ANÁLISIS DE PUNTOS EN LOS CUADROS CORRESPONDIENTES A LA FRANJA 5* 230

TABLA 34 *ANÁLISIS DE PUNTOS EN LOS CUADROS CORRESPONDIENTES A LA FRANJA 6* 232

TABLA 35 *COSTOS DE MATERIALES DE HARDWARE PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA* 237

TABLA 36 *COSTOS DE SOFTWARE* 238

TABLA 37 *COSTOS REFERENCIALES DE INGENIERÍA* 239

TABLA 38 *COSTO TOTAL DEL SISTEMA* 240

Índice de Figuras

Figura 1 Arquitectura del prototipo de dron de monitoreo de cultivos 26

Figura 2 *Ciclo del cultivo del maíz* 38

Figura 3 Arquitectura de capas de la arquitectura IoT propuesta por la ITU. 45

Figura 4 Relación de velocidad frente a alcance de tecnologías de comunicación 49

Figura 5 Diagrama de fases de la Metodología Investigación - Acción 57

Figura 6 *Zona destinada al cultivo de maíz para la realización de pruebas.* 60

Figura 7 Ubicación geográfica del área de estudio en la comunidad San Andrés, cantón San Miguel de Urcuquí ... 62

Figura 8 Arquitectura del Sistema 93

Figura 9 *Diagrama general de bloques del sistema* 96

Figura 10 *Diagrama de flujo del bloque de percepción o sensado* 97

Figura 11 *Diagrama del bloque de Comunicación y transporte* 99

Figura 12 *Diagrama del bloque 3 de procesamiento de los datos* 100

Figura 13 *Diagrama de flujo del bloque de visualización del dashboard y los datos procesados* 101

Figura 14 *Diagrama de conexión del circuito de la placa embebida y el sensor de suelo.* 106

Figura 15 *Diagrama de conexión del circuito de la placa embebida y el módulo GPS* 108

Figura 16 *Diagrama de conexión del circuito de la placa embebida, la batería y el módulo regulador de voltaje.* . 110

Figura 17 *Integración de componentes en el nodo sensor.* 112

Figura 18 *Esquema de comunicación entre las placas embebidas ESP32 LoRa Heltec.* 115

Figura 19 *Diagrama de conexión del circuito del nodo Coordinador que incluye la placa embebida, la batería y la conexión WiFi.* 116

Figura 20 *Esquema de interconexión a la red inalámbrica WiFi e internet por medio del Coordinador.* 118

Figura 21 *Diagrama de Secuencia MQTT entre Coordinador ESP32 y Broker MQTT Mosquitto* 120

Figura 22 *Diagrama de Secuencia del Bloque de Procesamiento* 122

Figura 23 *Diagrama de arquitectura del Docker usando Virtual Box y Ubuntu 22.04* 123

Figura 24 *Descripción de la extracción de datos hacia el dashboard* 124

FIGURA 25 *MAQUETA DE DISTRIBUCIÓN DE GRAFICAS POR VARIABLE EN LA VENTANA DEL DASHBOARD* 125

FIGURA 26 *MAQUETA DEL MAPA DE CALOR EN BASE A LOS DATOS DE POSICIONAMIENTO OFRECIDAS POR EL GPS* 127

FIGURA 27 *DISEÑO DEL MÓDULO DE ANÁLISIS GENERADO CON IA GENERATIVA.* 129

FIGURA 28 *DRON DJI INSPIRE 1* 131

FIGURA 29 *PIEZAS DE SOPORTE PARA LA COLOCACIÓN DE PLACAS Y SENSORES EN EL DRON* 132

FIGURA 30 *PIEZAS DE SOPORTE PARA LA COLOCACIÓN DEL SENSOR NPK EN EL DRON* 133

FIGURA 31 *EMBARQUE DE LOS SOPORTES Y PIEZAS EN EL DRON* 134

FIGURA 32 *IMPLEMENTACIÓN DEL NODO COORDINADOR* 135

FIGURA 33 *CÓDIGO ENCARGADO DEL CONTROL DE FLUJO DE DATOS DEL MÓDULO DE COMUNICACIÓN RS485* 136

FIGURA 34 *PETICIÓN DE DATOS AL SENSOR NPK* 137

FIGURA 35 *VALIDACIÓN Y TRANSFORMACIÓN DE VARIABLES SENSADAS.* 138

FIGURA 36 *PARÁMETROS DE COMUNICACIÓN LORA* 139

FIGURA 37 *ESTRUCTURA DE DATOS SENSADO S* 140

FIGURA 38 *SEÑALIZACIÓN Y ENVÍO DE DATOS POR LORA HACIA EL NODO COORDINADOR.* 140

FIGURA 39 *RECEPCIÓN Y RECONSTRUCCIÓN DE DATOS* 141

FIGURA 40 *PARÁMETROS PARA LA CONEXIÓN WIFI DE LA PLACA HACIA EL AP* 142

FIGURA 41 *TRANSFORMACIÓN DE DATOS DE BINARIO A JSON EN EL COORDINADOR* 143

FIGURA 42 *ARCHIVO DE CONFIGURACIÓN DE TELEGRAF* 144

FIGURA 43 *ALMACENAMIENTO DE VARIABLES Y ETIQUETAS EN LA BASE DE DATOS INFLUXDB* 145

FIGURA 44 *SCRIPT DE PYTHON PARA EL ANÁLISIS POR MEDIO DE IA GENERATIVA.* 147

FIGURA 45 *DASHBOARD DE VISUALIZACIÓN DE DATOS EN GRAFANA* 148

FIGURA 46 *RESULTADOS DE ADQUISICIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS DEL SENSOR NPK EN EL MONITOR SERIAL DEL IDE DE ARDUINO Y EN LA PANTALLA LED DEL NODO SENSOR.* 154

FIGURA 47 *RESULTADOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE GEORREFERENCIACIÓN Y COMPARATIVA DE DATOS VÁLIDOS Y DATOS INVÁLIDO.* 156

FIGURA 48 *REGISTRO EN EL MONITOR SERIAL DE LECTURAS CONSECUTIVAS DEL NODO SENSOR UTILIZADAS PARA VERIFICAR LA PERIODICIDAD DEL MUESTREO.* 157

FIGURA 49 *REGISTRO EN EL MONITOR SERIAL DE LECTURAS CONSECUTIVAS DEL NODO SENSOR UTILIZADAS PARA VERIFICAR LA PERIODICIDAD DEL MUESTREO.* 160

FIGURA 50 *PARÁMETROS DE COMUNICACIÓN LORA EN EL NODO SENSOR Y NODO COORDINADOR.* 161

FIGURA 51 *RECEPCIÓN, VALIDACIÓN Y PUBLICACIÓN DEL PAYLOAD RECIBIDO POR EL NODO COORDINADOR, MOSTRANDO EL EVENTO DE RECEPCIÓN LORA, LOS INDICADORES RSSI Y SNR, Y LA RECONSTRUCCIÓN DEL MENSAJE EN FORMATO JSON PREVIO A SU ENVÍO MEDIANTE MQTT.* 165

FIGURA 52 *CALIDAD DEL ENLACE LORA ENTRE NODO SENSOR Y NODO COORDINADOR: (A) VARIACIÓN DEL RSSI (DBM); (B) VARIACIÓN DEL SNR (DB) DURANTE RECEPCIONES CONSECUTIVAS.* 166

FIGURA 53 *CONEXIÓN DEL NODO COORDINADOR HACIA EL SERVIDOR MQTT* 169

FIGURA 54 *VERIFICACIÓN DE RECEPCIÓN DE TELEMETRÍA EN EL BROKER MOSQUITTO MEDIANTE UN CLIENTE SUSCRIPTOR EN EL TÓPICO AGRICULTURA/SENSOR1, MOSTRANDO EL PAYLOAD JSON.* 170

FIGURA 55 *REGISTRO DEL BROKER MOSQUITTO (CONTENEDOR DOCKER) DURANTE LA PRUEBA DE CONECTIVIDAD MQTT, EVIDENCIANDO EL ARRANQUE DEL SERVICIO, LA APERTURA DEL PUERTO 1883 Y LA CONEXIÓN/RECONEXIÓN DE LOS CLIENTES.* 171

FIGURA 56 *CAPTURA DE TRÁFICO MQTT (PUERTO 1883) DONDE SE EVIDENCIA EL ESTABLECIMIENTO DE SESIÓN ENTRE EL NODO COORDINADOR Y EL BROKER MOSQUITTO MEDIANTE EL INTERCAMBIO CONNECT/CONNACK.* 172

FIGURA 57 *PUBLICACIÓN MQTT DE LA TELEMETRÍA EN EL TÓPICO AGRICULTURA/SENSOR1, CAPTURADA CON WIRESHARK, EVIDENCIANDO EL ENVÍO DEL MENSAJE DESDE EL COORDINADOR HACIA MOSQUITTO.* 173

FIGURA 58 *REGISTRO DEL CONTENEDOR TELEGRAF DURANTE LA SUSCRIPCIÓN MQTT Y LA ESCRITURA DE MÉTRICAS HACIA INFLUXDB.* 175

FIGURA 59 *PROCESO DE CONSULTAS REALIZADAS A LA BASE DE DATOS INFLUXDB LAS CUALES MUESTRAN EL ALMACENAMIENTO Y ORGANIZACIÓN CORRECTO DE LOS DATOS.* 176

FIGURA 60 *PANELES DE VISUALIZACIÓN POR VARIABLE EN GRAFANA: TEMPERATURA, HUMEDAD, PH, EC Y NUTRIENTES (NPK) CONSULTADOS DESDE INFLUXDB PARA EL MONITOREO DEL ESTADO DEL SUELO.* 178

FIGURA 61 *VALIDACIÓN DEL DASHBOARD EN GRAFANA: ORGANIZACIÓN DE PANELES, LEGIBILIDAD DE RESULTADOS Y USO DEL FILTRO TEMPORAL ("LAST 5 MINUTES") PARA CONSULTA DE REGISTROS RECIENTES.* 179

FIGURA 62 *SISTEMA IOT DE MONITOREO DE CULTIVOS* 181

FIGURA 63 *ÁREA DE MONITOREO, PLAN DE VUELO Y SENSADO* 181

FIGURA 64 *DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE MONITOREO DEL CULTIVO* 183

FIGURA 65 *DISEÑO PLAN DE RUTA DE MONITOREO DEL TERRENO* 184

FIGURA 66 *PANEL EN MODO EDICIÓN DE GRAFANA DONDE SE REALIZA LA CONSULTA INFLUXQL Y PREVIEW DEL RESULTADO OBTENIDO.* 187

FIGURA 67 *FASE DE ESTABLECIMIENTO DE COMUNICACIÓN DEL NODO COORDINADOR* 188

FIGURA 68 *INICIALIZACIÓN DEL SCRIPT DE PYTHON PARA RECEPCIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS DE IA* 189

FIGURA 69 *VISUALIZACIÓN PANELES DEL DASHBOARD EN LA ZONA DE ANÁLISIS EN TIEMPO REAL* 190

FIGURA 70 *ESTABILIDAD Y ATENUACIÓN DE LA SEÑAL (RSSI) POR RANGOS DE DISTANCIA CON POTENCIA DE 14DBM* 192

FIGURA 71 *ESTABILIDAD Y ATENUACIÓN DE LA SEÑAL (RSSI) POR RANGOS DE DISTANCIA CON POTENCIA DE 22DBM* 193

FIGURA 72 *COMPORTAMIENTO DEL SNR VS DISTANCIA CON POTENCIA DE 14DBM* 195

FIGURA 73 *COMPORTAMIENTO DEL SNR VS DISTANCIA CON POTENCIA DE 22DBM* 195

FIGURA 74 *TASA DE PERDIDA DE PAQUETES EN PROPORCIÓN A LA DISTANCIA* 198

FIGURA 75 *TIEMPO DE RESPUESTA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA* 200

FIGURA 76 *COMPORTAMIENTO DEL CONSUMO DE MEMORIA DE LA PLACA DEL NODO COORDINADOR DURANTE LA TRANSMISIÓN DE DATOS* 202

FIGURA 77 *ESTADO DE LAS VARIABLES TEMPERATURA Y HUMEDAD DURANTE LA PRIMERA JORNADA DE MONITOREO EN CAMPO EL DÍA 25 DE JUNIO* 203

FIGURA 78 *MAPA DE CALOR REPRESENTATIVA DE LA VARIABLE PH EN LA ZONA DE CULTIVO* 204

FIGURA 79 *MAPAS DE CALOR CORRESPONDIENTE A MACRONUTRIENTES TALES COMO NITRÓGENO, FOSFORO, POTASIO* 205

FIGURA 80 *RESUMEN DE LOS RESULTADOS Y CONSEJOS PROPORCIONADOS POR LA IA GENERATIVA* 206

FIGURA 81 *ESTADO DE LAS VARIABLES TEMPERATURA Y HUMEDAD DURANTE LA PRIMERA JORNADA DE MONITOREO EN CAMPO EL DÍA 27 DE JUNIO* 208

FIGURA 82 *MAPA DE CALOR REPRESENTATIVA DE LA VARIABLE PH EN LA ZONA DE CULTIVO* 209

FIGURA 83 *MAPAS DE CALOR CORRESPONDIENTE A MACRONUTRIENTES TALES COMO NITRÓGENO, FOSFORO, POTASIO EN EL MONITOREO REALIZADO EL 27 DE JUNIO* 210

FIGURA 84 *REPORTE DE CONSEJOS PROPORCIONADOS POR LA IA GENERATIVA DURANTE EL MONITOREO* 211

FIGURA 85 *ESTADO DE LAS VARIABLES TEMPERATURA Y HUMEDAD DURANTE LA PRIMERA JORNADA DE MONITOREO EN CAMPO EL DÍA 28 DE JUNIO* 213

FIGURA 86 *MAPA DE CALOR REPRESENTATIVA DE LA VARIABLE PH EN LA ZONA DE CULTIVO* 213

FIGURA 87 *MAPAS DE CALOR CORRESPONDIENTE A MACRONUTRIENTES TALES COMO NITRÓGENO, FOSFORO, POTASIO EN EL MONITOREO REALIZADO EL 28 DE JUNIO* 214

FIGURA 88 *REPORTE DE CONSEJOS PROPORCIONADOS POR LA IA GENERATIVA DURANTE EL MONITOREO* 215

FIGURA 89 MAPA DE SECTORIZACIÓN DEL TERRENO 218

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. Tema

Dron de Monitoreo para Cultivos en el Sector San Andrés del Cantón San Miguel de Urcuquí, utilizando Sensores Basados en una Arquitectura IoT.

1.2. Planteamiento del Problema

La implementación de sistemas de monitoreo basados en sensores y tecnologías basadas en la arquitectura IoT permite recopilar información precisa en tiempo real sobre variables críticas del suelo, como la humedad. Estos sistemas, al integrar comunicación inalámbrica de largo alcance y plataformas de visualización, ofrecen herramientas prácticas para mejorar la toma de decisiones en el manejo agrícola. Sin embargo, estos enfoques suelen centrarse en parámetros puntuales y no contemplan soluciones integrales que incluyan otras variables clave, como temperatura y niveles de pH del suelo, no aprovechan tecnologías móviles como drones para ampliar la cobertura y eficiencia del monitoreo. En este contexto la productividad y calidad de los cultivos dependen en gran medida de las condiciones del suelo y el entorno, las cuales suelen presentar variaciones significativas en el área de cultivo (Gonzálo P, 2021).

Por lo tanto, se evidencia la necesidad de desarrollar un sistema más completo e innovador que permita monitorear múltiples variables del suelo y del cultivo mediante una plataforma móvil como un dron, utilizando sensores y comunicación eficiente para transmitir y procesar los datos.

Actualmente, la productividad agrícola en muchas comunidades rurales depende en gran medida de prácticas tradicionales y conocimientos empíricos transmitidos de generación en generación. Los saberes ancestrales, aunque valiosos, carecen de precisión y no permiten un manejo eficiente de los recursos, afectando la productividad y la sostenibilidad a largo plazo (Moreno, 2017). Es el caso de la comunidad San Andres en donde la mayor parte de la

población se dedican a la agricultura como actividad económica principal, razón por la cual es necesario implementar técnicas que permitan obtener una mejor rentabilidad a los cultivos. Este contexto refleja una problemática generalizada en la agricultura rural, donde la ausencia de tecnologías adaptadas y la dependencia de métodos rudimentarios limitan la capacidad de los agricultores para identificar las necesidades específicas del suelo y del entorno. Como resultado, el uso ineficiente de insumos como agua y fertilizantes genera costos adicionales y reduce el rendimiento de los cultivos. Frente a este escenario, es necesario implementar soluciones innovadoras, como sistemas tecnológicos basados en drones y sensores IoT, que permitan recopilar datos precisos sobre parámetros críticos como humedad, temperatura y pH del suelo, optimizando así la toma de decisiones y mejorando la eficiencia en el manejo de los cultivos.

Actualmente, la agricultura enfrenta desafíos significativos debido a la falta de herramientas tecnológicas que permitan monitorear de manera precisa las condiciones del suelo y el entorno. El uso de métodos tradicionales, basados en la observación visual y la experiencia empírica, limita la capacidad de los agricultores para identificar las necesidades específicas de sus cultivos, lo que conduce a un manejo ineficiente de los recursos como agua y fertilizantes. La implementación del Internet de las Cosas (IoT) en la agricultura ofrece soluciones innovadoras mediante el uso de sensores para la recolección y análisis de datos, optimizando la productividad y fomentando la agricultura de precisión. Sin embargo, su adopción en América Latina es lenta, principalmente por la falta de acceso a tecnologías adaptadas al contexto local, lo que resalta la necesidad de desarrollar sistemas accesibles y eficientes, como el propuesto en este proyecto, que permita medir variables críticas del suelo mediante drones equipados con sensores IoT (Tovar, 2019).

Por lo tanto, existe una necesidad urgente de implementar tecnologías avanzadas que permitan un monitoreo eficiente y preciso de las condiciones del suelo en cultivos agrícolas. El desarrollo de un sistema basado en un drone equipado con sensores basados en una arquitectura IoT representa una solución innovadora, ya que permitiría la recopilación de datos, la generación de análisis detallados y la presentación de resultados en forma de mapas de calor. Este enfoque proporcionara a los agricultores información clave para mejorar la gestión de sus cultivos, optimizando recursos y aumentando la productividad de manera sostenible.

Un término que será muy usado durante el desarrollo de este trabajo es la agricultura de precisión, esta permite gestionar eficientemente los recursos agrícolas, ayudando a mejorar el manejo del suelo y de los cultivos (Sanchez, 2024). Utilizan tecnologías de información espacial como sistemas de posicionamiento global, sistemas de información geográfica, sensores remotos y drones, los cuales permiten realizar levantamientos topográficos, fertilizaciones, fumigaciones y riego de cultivos, facilitando el uso racional de los insumos agrícolas, optimizando la productividad y evitando pérdidas económicas. La falta de implementación de estas técnicas en los cultivos del país y especialmente en sectores rurales como el sector de San Andres es un ejemplo claro de el problema que hay al no tener acceso a estas herramientas derivando en la perdida de recursos tanto económicos como también de recursos naturales como el agua o abonos empleados de forma ineficiente en los cultivos.

Según datos del Ministerio de agricultura y ganadería desde el año 2021 se están llevando a cabo campañas de capacitación sobre el uso de la tecnología en la producción agrícola, en lo que mencionan son temas realmente importantes e inevitables. (MAG, 2021). Uno de los objetivos que busca el ministerio de agricultura y ganadería con la creación de estos talleres es que pretende que los jóvenes se enamoren y retomen el agro a través del manejo de

nuevas herramientas para lograr mayor eficiencia al momento de hacer aplicaciones en los cultivos de arroz, maíz, cacao, y otros productos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Implementar un dron equipado con sensores basados en una arquitectura IoT para monitorear de manera eficiente las condiciones del suelo en cultivos agrícolas, proporcionando información precisa que permita mejorar el manejo de los recursos y la productividad en los cultivos de la zona.

1.3.2. Objetivos específicos

- Investigar los requerimientos tecnológicos necesarios para integrar sensores basados en una arquitectura IoT en un dron agrícola.
- Establecer los requerimientos necesarios que permitan levantar una arquitectura de monitoreo basado en la IEEE 802.11.
- Diseñar una arquitectura para el funcionamiento del dron con los sensores de monitoreo y la plataforma de gestión.
- Evaluar la calidad y precisión de los datos transmitidos por el prototipo del sistema desde los sensores hacia la plataforma central, garantizando la fiabilidad de la información obtenida para la toma de decisiones en el manejo agrícola.

1.4. Alcance

El presente proyecto se desarrollará aplicando la metodología de investigación-acción, la cual permite un enfoque práctico y cíclico para abordar la problemática identificada en la comunidad de San Andrés. El alcance en base a la metodología investigación-acción incluye las fases de: Identificación y descripción del problema en la que se describirán las acciones a realizar en base a los objetivos 1 y 2, Desarrollo del plan de acción en el cual se enfoca en los

objetivos 2 y 3, Las siguientes fases de la metodología estarán centradas en el objetivo 4, en estas fases se realiza: Recopilación de datos, Análisis de datos y formación de conclusiones, Evaluación de resultados, Ajuste y mejora continua.

1. Identificación y Descripción del Problema

En esta fase, se abordan los objetivos 1 y 2 mediante la identificación de los requerimientos tecnológicos y los estándares IEEE necesarios para implementar el sistema de monitoreo basado en una arquitectura IoT. Se determinan los parámetros críticos del suelo, como humedad, temperatura y pH, y se analiza el contexto agrícola del sector para establecer las bases del diseño del sistema.

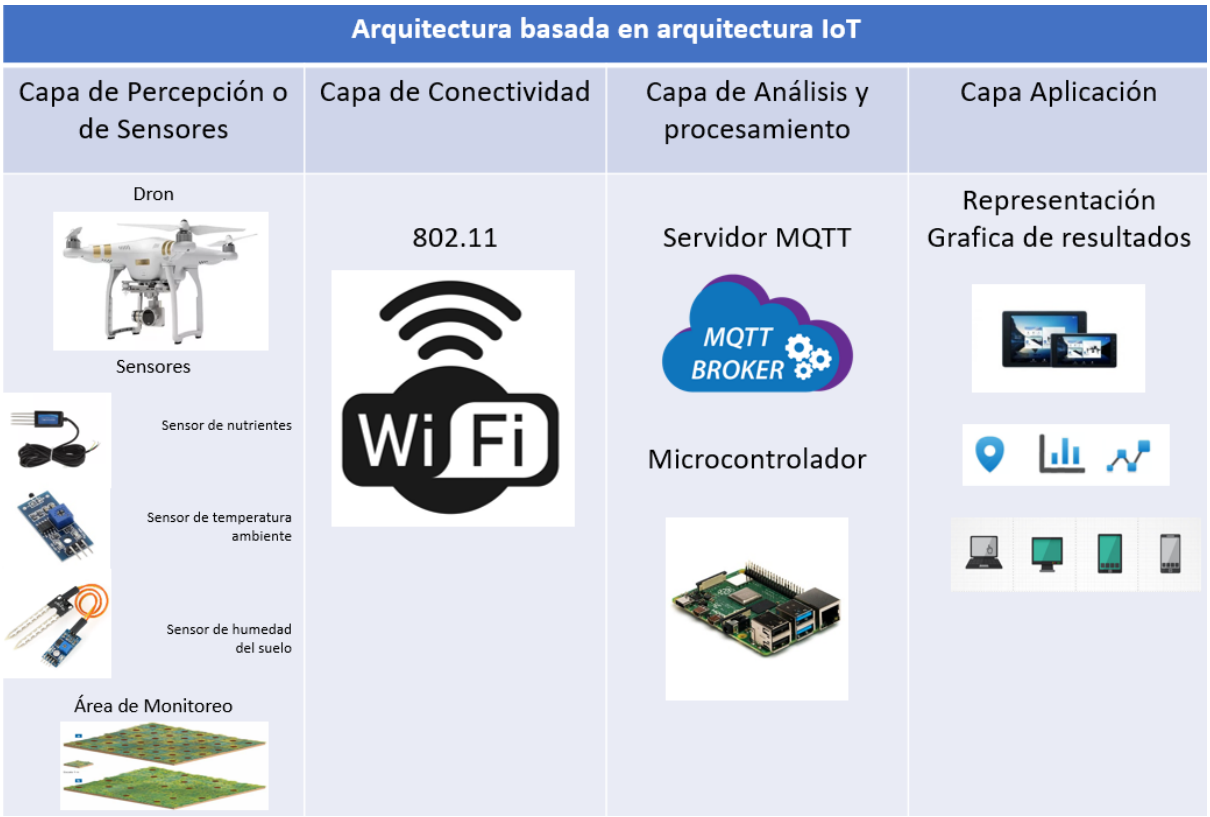
2. Desarrollo del Plan de Acción

Centrada en los objetivos 2 y 3, esta fase comprende la planificación técnica y estratégica del proyecto. Se diseña la arquitectura del sistema, detallando el funcionamiento del dron, los sensores integrados y la plataforma de gestión. Incluye la especificación de componentes, el diseño de flujos de datos y la estructura de comunicación entre los dispositivos y la plataforma central.

En esta etapa, se definirán los requerimientos técnicos y el diseño de la arquitectura del sistema que permita cumplir con los objetivos planteados tal como se muestra en la Figura 2.

Figura 1

Arquitectura del prototipo de dron de monitoreo de cultivos



Nota. *El gráfico muestra de manera detallada y precisa los componentes y su interacción en la arquitectura del proyecto.*

Fuente: Autoría propia.

En la fase del desarrollo del plan de acción se procederá a realizar el diseño del sistema el cual se basa en un dron prefabricado el cual estará equipado con un microcontrolador y múltiples sensores especializados, incluidos sensores de temperatura, humedad del suelo y concentración de elementos, que recopilan datos relevantes sobre las condiciones agrícolas en varios puntos clave del área de cultivo. Los sensores estarán ubicados en la parte inferior del dron, los cuales incluirán un mecanismo electrónico que permitirá que los sensores sean insertados en el suelo cuando el dron se coloque en un punto estratégico. La delimitación del área de cultivo se realiza por medio de un GPS ubicado sobre el dron, de tal manera que se realiza un vuelo en el que el dron sobrevuela toda el área que se vaya a monitorear, mediante

esos datos se realiza el mapeo del área y se determinan los puntos críticos donde se recolectaran datos por medio de los sensores. Los datos recolectados serán procesados por el microcontrolador, que también gestiona la conectividad del sistema. Usando una conexión Wi-Fi 802.11ac y el protocolo MQTT, los datos se transmiten a un servidor remoto para su análisis y almacenamiento. Adicionalmente, el dron cuenta con una cámara que permite capturar imágenes del terreno, complementando los datos recopilados. El servidor analiza los datos recibidos y genera representaciones gráficas en base a los resultados obtenidos de los sensores, posteriormente mediante algoritmos aplicados en el microcontrolador también se podrán obtener resultados en forma de mapas de calor que muestren de manera resumida el estado general del terreno, de modo que estos resultados puedan ser visualizados en una interfaz accesible desde dispositivos cliente como computadoras, tablets o smartphones. Esto permite a los usuarios monitorear las condiciones del terreno y tomar decisiones con mayor conocimiento de las condiciones del suelo para optimizar el manejo de los productos o fertilizantes que puedan ser aplicados en los cultivos.

3. Implementación y Recopilación de Datos

Orientada al objetivo 4, esta fase incluye la integración de los sensores en el dron y la ejecución de vuelos en el área de estudio. Se recolectan datos de campo sobre las condiciones del suelo y se almacenan en la plataforma central para su análisis. El dron, equipado con una cámara y GPS, genera un mapeo del terreno, identificando puntos críticos para un monitoreo detallado.

4. Análisis de Datos y Generación de Conclusiones

Los datos recolectados son procesados y analizados para generar representaciones gráficas, como mapas de calor, que sintetizan las condiciones del suelo. Esta fase busca

proporcionar información confiable y de fácil interpretación para optimizar la toma de decisiones en el manejo agrícola.

5. Evaluación de Resultados

Se evalúa la precisión y calidad de los datos transmitidos por los sensores, garantizando la fiabilidad del sistema. Se identifican áreas de mejora y se analiza el impacto del sistema en términos de beneficios para los agricultores de San Andrés.

6. Ajuste y Mejora Continua

Con base en los resultados obtenidos, se realizan ajustes al sistema para optimizar su desempeño en condiciones reales de operación. Se consideran futuras expansiones y adaptaciones, asegurando la sostenibilidad y escalabilidad del sistema en otros contextos agrícolas.

1.5. Justificación

La agricultura enfrenta múltiples desafíos relacionados con la gestión eficiente de recursos como agua, fertilizantes y nutrientes del suelo. En el sector agrícola de San Andrés, Cantón San Miguel de Urcuquí, las prácticas tradicionales limitan la capacidad de los agricultores para identificar y atender las necesidades específicas de sus cultivos, lo que reduce la productividad y aumenta los costos. Según (Pino, 2019), el uso de tecnologías como los drones equipados con sensores avanzados ha revolucionado la agricultura de precisión, permitiendo recopilar datos precisos en tiempo real y optimizando la toma de decisiones en el manejo agrícola. En concordancia con esta idea, el presente proyecto propone una solución innovadora basada en el uso de drones equipados con sensores, que permitirá monitorear las condiciones del suelo de manera precisa, mejorando así la gestión de recursos y promoviendo una agricultura más sostenible.

Una de las razones que impulsa el desarrollo del proyecto se da en base que uno de los productos principales que se producen en el sector es el maíz duro también conocido como “morochillo” constituye un elemento fundamental en el sector por su amplia variedad de aplicaciones, al ser un sector rural el maíz duro es usado como alimento principal de animales de granja como pollos o también en la elaboración de alimentos balanceados para el ganado, en ese contexto el proyecto estará enfocado a analizar las condiciones en base a este tipo de cultivo debido a su relevancia en la comunidad.

Una de las razones que impulsa el desarrollo del proyecto se basa en que uno de los productos principales que se cultivan en el sector es el maíz duro, también conocido como “morochillo”, el cual constituye un elemento fundamental en la comunidad debido a su amplia variedad de aplicaciones. Al ser un sector rural, el maíz duro es utilizado principalmente como alimento para animales de granja o en la elaboración de alimentos balanceados para el ganado, siendo un insumo esencial en la producción de proteína animal (Minervet, 2021). En este contexto, el proyecto estará enfocado en analizar las condiciones del suelo para este tipo de cultivo debido a su relevancia en la comunidad.

Este proyecto está alineado con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Sanahuja, 2015) como el ODS 2: Hambre cero, al contribuir a la seguridad alimentaria que al ayudar a los agricultores a gestionar de mejor manera sus cultivos aumentan significativamente la producción de productos alimentarios. Otro Objetivo con el que está vinculado el proyecto es el ODS 9 referente a Industria, innovación e infraestructura, al introducir tecnologías avanzadas como drones y sensores en el sector agrícola. Así mismo otro de los principales enfoques del proyecto está relacionado con el ODS 13: Acción por el clima, al promover prácticas sostenibles que reducen el impacto ambiental optimizando el uso de insumos como agua y fertilizantes. La viabilidad del sistema se respalda en el uso de hardware accesible como

la Raspberry Pi y sensores de bajo costo, lo que lo hace adaptable a diferentes contextos agrícolas. Este proyecto representa un paso importante hacia la modernización de la agricultura local y global. Al combinar innovación tecnológica y sostenibilidad, este proyecto busca generar un impacto positivo tanto en el ámbito local como en el global, fortaleciendo la resiliencia de los sistemas agrícolas y mejorando la calidad de vida de la población que habita en la comunidad rural San Andres.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En el presente capítulo se analizarán a fondo los aspectos técnicos y tecnológicos necesarios para el monitoreo eficiente de variables del suelo en cultivos agrícolas del sector San Andrés, en el cantón Urcuquí. Se considerarán factores como el tipo de suelo, las condiciones climáticas y geográficas, así como las características específicas de los cultivos predominantes en la región. El enfoque estará en la implementación de soluciones tecnológicas, como la integración de sensores IoT y la agricultura de precisión, para abordar los retos asociados al monitoreo del pH, la humedad y la temperatura del suelo, con el fin de optimizar la productividad agrícola. Además, se realizará un análisis comparativo de protocolos de comunicación IoT, como LoRa y LoRaWAN, para garantizar la conectividad eficiente en zonas rurales. Finalmente, se presentarán herramientas para la recolección, procesamiento y visualización de datos, incluyendo la generación de mapas de calor que permitan la identificación de áreas críticas, logrando así una gestión óptima de los recursos y un desarrollo uniforme de los cultivos.

2.1. Uso de Tecnologías en Agricultura

La evolución tecnológica ha transformado la agricultura al integrar herramientas avanzadas que optimizan la producción, mejoran la seguridad alimentaria y aumentan la competitividad en el mercado. La aplicación de tecnologías como la mecanización, automatización y las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) ha permitido una gestión más eficiente de los cultivos, aunque su adopción en países en vías de desarrollo, como Ecuador, aún es limitada debido a barreras económicas y de conocimiento.(Katherine & Santos, 2018)

Impacto de la Tecnología en la Agricultura

El uso de tecnología en la agricultura ha generado mejoras significativas en la productividad y sostenibilidad del sector. Según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y agricultura), el 42% de la población mundial depende directamente de la agricultura, lo que resalta la necesidad de modernizar el sector para responder al crecimiento demográfico y a la demanda de alimentos.(Katherine & Santos, 2018)

Beneficios de la Tecnología en la Agricultura.

En la actualidad se puede evidenciar que la implementación de tecnologías agrícolas puede aumentar la producción entre un 15% y 20% en los suelos fértiles, lo que mejora la eficiencia de las explotaciones (Robles, 2023). Por ende, se debe de usar los instrumentos adecuados como son las TIC y el GPS, lo que optimiza la utilización de los diversos insumos, disminuyendo la variabilidad y los costos en la producción. A continuación, se va a nombrar los diversos beneficios según (De León & Victorino, 2024):

- **Mejoramiento de la competitividad:** Las diversas innovaciones tecnológicas van a permitir que los agricultores sean más competitivos dentro de los mercados que estén globalizados, incrementando la calidad y las cantidades de los diferentes productos.
- **Incremento de las productividades:** Optimizar el uso de los materiales como son el pesticida, el agua y el fertilizante, logrando mayores rendimientos por cada hectárea.
- **Disminución de los costos:** La agricultura de precisión va a ayudar en la identificación de las áreas que requiere una mayor atención, lo que va a evitar la utilización innecesaria de los insumos.
- **Defender el medio ambiente:** Al momento de aplicar los diversos productos químicos de forma más precisa, se va reduciendo las contaminaciones a nivel del suelo y del agua.

- **Mejoramiento de la calidad de los productos:** Al observar de cerca las diversas condiciones de crecimiento, se puede adquirir los productos más saludables y con las mejores características organolépticas.

Desafíos y Oportunidades.

La implementación de tecnologías en la agricultura va presentando desafíos como es la inversión inicial, las necesidades de capacitarse y la conectividad en algunas zonas rurales. No obstante, las oportunidades son grandes, porque la tecnología va a permitir a los agricultores que se adapten a los desafíos de los cambios climáticos y se garantice la seguridad alimentaria a nivel mundial.

Tabla 1

Desafíos y Oportunidades.

Desafíos y Oportunidades	Definición
Desafíos	**Accesos a las Tecnologías:** Existen dificultades para los accesos a las tecnologías avanzadas debido a la limitación económica y fallo en las capacitaciones. **Redes Sociales Complejas:** Al adoptar una innovación va a existir varios problemas en el aspecto técnico y en las relaciones sociales y estructuras comunitarias las cuales pueden ser complicadas. **Sostenibilidad:** La necesidad de equilibrar las producciones con la práctica sostenible y los cuidados dentro del medio ambiente el que es un reto constante.

Oportunidades	**Innovaciones Inclusivas:** Las promociones de la tecnología se adaptan a las diversas necesidades de la comunidad en específico, lo que puede mejorar las participaciones y los desarrollos locales.
	Mejoramiento de la Productividad: Al integrar las tecnologías se puede incrementar la eficiencia y la calidad de los diversos productos agrícolas, lo que impulsa la economía rural.
	Política Pública: El fortalecimiento de las políticas apoyan las investigaciones y el desarrollo tecnológico pueden ayudar a la adopción de las innovaciones dentro de los sectores agrícolas.

Nota. La tabla anterior muestra los desafíos y oportunidades del uso de las tecnologías en la agricultura. Adaptado de (Zayas, 2020).

En resumen, las tecnologías están transformando el área de la agricultura, lo que hace que estas sean más eficientes, sostenibles y productivas. Al momento que se adopte estas herramientas, donde los agricultores pueden ir mejorando los ingresos, protegiendo el medio ambiente y garantizando el futuro más seguro para todos.

2.1.1. Cultivos de Maíz en Ecuador

El maíz es un cultivo fundamental en la Sierra del Ecuador, no solo por la gran superficie cultivada, sino también por su papel en la alimentación y la economía agrícola. Se han identificado 29 razas de maíz en Ecuador, de las cuales 17 pertenecen a la Sierra. Gracias a la diversidad genética, el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) ha desarrollado variedades mejoradas adaptadas a las condiciones agroclimáticas de la región. (Yánez G., 2007)

Condiciones de Cultivo

El maíz en la Sierra tiene un ciclo de cultivo de 215 a 270 días desde la siembra hasta la cosecha. Requiere temperaturas promedio de 15°C y suelos profundos, ricos en materia orgánica y con buen drenaje. La disponibilidad de agua es crucial, especialmente durante la floración, que es la fase más crítica del crecimiento.(Yánez G., 2007)

Prácticas Agrícolas y Manejo del Cultivo

Tabla 2

Prácticas Agrícolas y Manejo del Cultivo.

Fase de Cultivo	Características
Siembra	En la Sierra, la siembra se realiza entre septiembre y enero, dependiendo de la disponibilidad de riego. Se emplean sistemas de siembra sola o asociada con fréjol trepador.
Fertilización	Se recomienda el uso de fertilizantes químicos y orgánicos para garantizar una nutrición adecuada. Se pueden emplear compost, humus de lombriz y estiércol bien descompuesto.
Control de Malezas y Plagas	Se recomienda el uso de herbicidas selectivos en infestaciones severas y el control biológico para minimizar el daño por

	plagas como el gusano del choclo y la mosca del maízin.
Cosecha y Almacenamiento	La cosecha se realiza en dos etapas: • **En choclo**: Se cosecha cuando los granos tienen un aspecto lechoso y los pelos del choclo pasan de dorado a castaño. • **En seco**: Se cosecha cuando el grano ha alcanzado madurez fisiológica, reduciendo la humedad para evitar pudriciones. El almacenamiento se realiza en lugares frescos y secos para evitar la proliferación de plagas como el gorgojo del maíz

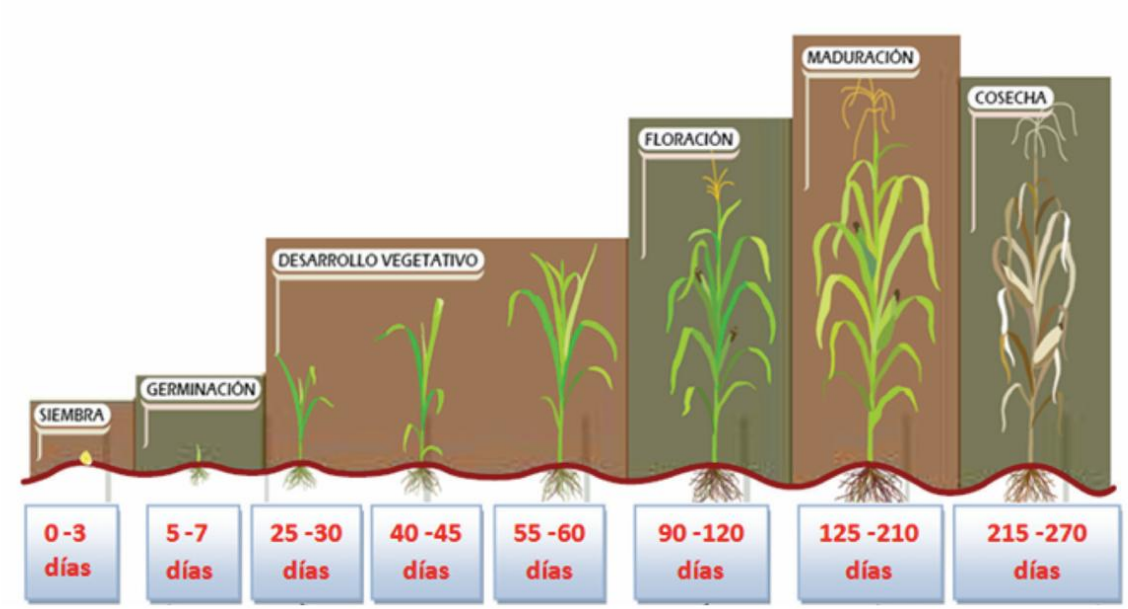
Nota. La tabla anterior muestra algunas de las fases del manejo del cultivo de maíz desde su siembra hasta la cosecha y el almacenamiento del producto. Adaptado de (Yánez G., 2007)

Usos y Valor Nutricional

El maíz en la Sierra se utiliza para consumo humano y animal, en productos como choclo, mote, harinas y bebidas. También se emplea para la producción de chulpi tostado y conservas. Además, es utilizado en la industria agroalimentaria como base para alimentos balanceados para animales de granja y avícolas. Estudios del INIAP indican que algunas variedades presentan un alto contenido de proteína y almidón, siendo una fuente esencial de nutrientes en la dieta ecuatoriana.(Yánez G., 2007)

Figura 2

Ciclo del cultivo del maíz



Nota: El ciclo de vida de la planta de maíz desde su siembra tiene como promedio en condiciones ideales una duración de 270 días en los cuales se desarrollarán cada una de las etapas que se muestran en la figura. Imagen recuperada de (Yánez G., 2007)

2.1.2. Monitoreo de variables críticas del suelo (humedad, temperatura, pH).

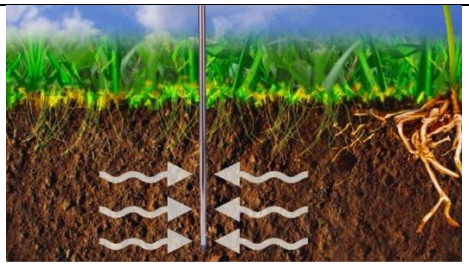
El monitoreo de variables críticas del suelo, como la humedad, temperatura y pH, es una práctica esencial en la agricultura de precisión, ya que permite optimizar el manejo de los cultivos y mejorar la productividad agrícola. La humedad del suelo influye directamente en la disponibilidad de agua para las plantas, afectando su crecimiento y desarrollo, mientras que la temperatura regula la actividad microbiana y la absorción de nutrientes esenciales. Por otro lado, el pH del suelo determina la disponibilidad de elementos químicos fundamentales para el crecimiento vegetal, impactando la fertilidad y calidad del suelo. La implementación de sensores y tecnologías avanzadas para el monitoreo en tiempo real de estas variables permite

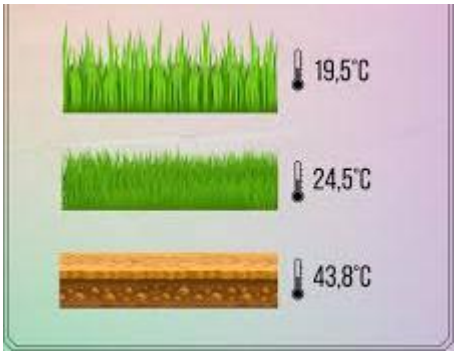
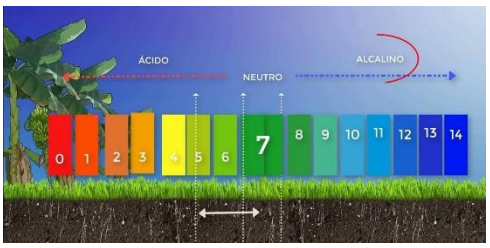
una gestión más eficiente de los recursos hídricos y la aplicación precisa de fertilizantes, minimizando el impacto ambiental y mejorando la sostenibilidad agrícola.(Serna, 2021)

Según Aguirre (2020) es importante el monitoreo de las variables del suelo porque ayuda a la identificación de las deficiencias en los nutrientes y de las condiciones de los suelos, facilitando los manejos adecuados de los cultivos, esto optimiza la aplicación de los fertilizantes y de otros insumos agrícolas, disminuyendo los costos y reduciendo los impactos ambientales, lo que permite la evaluación y los tratamientos de suelos degradados, originando las sostenibilidades agrícolas.

Tabla 3

Importancia del monitoreo de las variables del suelo.

Variable del suelo	Definición	Imagen
Humedad	Son las cantidades de agua que se encuentran presentes en el suelo lo que influye en las disponibilidades de los diversos nutrientes para las plantas, las actividades microbianas y las estructuras de los suelos. Este monitoreo de la humedad va a permitir la optimización de los riegos, previniendo las patologías de las plantas y así poder evitar las erosiones del suelo.	

Temperatura	La temperatura del suelo va a afectar las germinaciones de las semillas, los crecimientos de las diversas raíces y las actividades que realizan los microorganismos. El monitoreo de la temperatura va a ayudar en la determinación de los momentos óptimos para sembrarlos y los trasplantes, así como para las evaluaciones del impacto de los cambios climáticos en los suelos.	
pH	El pH del suelo va a permitir la medición de la acidez o alcalinidad, lo cual influye en las disponibilidades de los nutrientes para las plantas y las actividades de los microorganismos. El monitoreo del pH ayuda a que se ajuste la utilidad de los fertilizantes y enmiendas	

	para que se mantenga los rangos óptimos para los crecimientos de las plantas.

Nota. La tabla anterior muestra la importancia del monitoreo de las variables del suelo. Adaptado de (Chicaiza, 2022).

Relación entre las variables del suelo y el rendimiento de los cultivos de maíz.

La relación entre las variables del suelo posee grandes relaciones con el rendimiento del cultivo del maíz, esta interacción entre las variables del suelo y el maíz es compleja, por ende, se debe de comprender para la optimización de las producciones. Aquí se va a presentar una visión detallada de estas relaciones:

Tabla 4

Relación entre variables del suelo y el rendimiento de los cultivos de maíz

Variables del suelo	Estrategias	Rendimiento de los cultivos de maíz
Humedad del suelo	Disponibilidad de agua	El agua ayuda de forma significativa para que crezca el maíz de manera correcta. La humedad del suelo va a influir dentro de la capacidad de la planta para que absorba de manera correcta el agua y nutrientes, lo que afecta de forma directa en el desarrollo y rendimiento.
	Rango óptimo	El cultivo del maíz requiere rangos de humedad específicos para que exista un crecimiento óptimo, por otra parte, el exceso del agua puede provocar que se pudra las raíces y la falta de oxígeno, mientras que la insolvencia de agua

		puede que limite el crecimiento y reduzca su rendimiento.
	Monitoreo y manejo	Es fundamental monitoreo de la humedad del suelo y así poder ajustar el riego según la necesidad que posee el cultivo. La utilización de los sensores de humedad y técnicas de un riego eficiente para el mejoramiento de la productividad del maíz.
Temperatura del suelo	Germinación y crecimiento	La temperatura del suelo va a influir en las germinaciones de las semillas de maíz y a la vez en el desarrollo de la raíz y la parte aérea de las plantas.
	Rango óptimo	El maíz es un cultivo que prefiere temperaturas de suelo que sean cálidas para que posea un crecimiento óptimo, la temperatura demasiado fría o caliente pueden que retrase el desarrollo y la reducción del rendimiento.
	Influencia del clima	La temperatura del suelo también está influenciada por el clima, radiación solar y cobertura del suelo. La utilidad de la práctica como el acolchado puede que ayude en la regularización de la temperatura del suelo.
pH del suelo	Disponibilidad de nutrientes	El pH del suelo va a afectar la disponibilidad de los nutrientes que son esenciales para el maíz, estos son el nitrógeno, potasio y fósforo.

Rango óptimo	El maíz es el que prefiere un pH de suelo ligeramente ácido a neutro para que se optimice las absorciones de los nutrientes.
Enmiendas y fertilizantes	Es importante que se monitoree el pH del suelo y se aplique enmiendas y fertilizantes según sean necesarios para que se mantengan los rangos óptimos y se asegure la nutrición adecuada para el maíz.

Nota. La tabla anterior muestra la relación entre variables del suelo y el rendimiento de los cultivos de maíz. Adaptado de (Sánchez et al., 2020).

El rendimiento de los cultivos de maíz está influenciado por diversas combinaciones de los factores del suelo, los cuales son la humedad, la temperatura y el pH. Monitorear y manejar estas variables de manera adecuada son cruciales para la optimización de las producciones del cultivo del maíz.

Problemas actuales en el monitoreo de cultivos de maíz (productividad, sostenibilidad).

El monitoreo de los cultivos de maíz es importante para que se asegure la productividad y la sostenibilidad de la producción. No obstante, existen diferentes problemas en la actualidad que dificulta estos procesos y limitando la eficacia. A continuación, se van a mencionar algunos de los principales desafíos, según (Zambrano et al., 2021):

- **Variabilidad espacial y temporal:** Hace mención al suelo, ya que en los campos de maíz debe de existir una gran variación en la textura, fertilidad, retención del agua, capacidad y la estructura. Porque todo esto puede afectar el desarrollo y evolución del cultivo, lo que requieren un monitoreo detallado. Aquí interviene a la vez las condiciones climáticas las cuales varían a lo largo del tiempo y el espacio, lo que va a

influir en la disponibilidad de la temperatura, del sol y el agua, lo que puede causar incidencia de plagas y enfermedades, lo que va a impedir su crecimiento y desarrollo.

- **Plagas y enfermedades:** La detección temprana de plagas y enfermedades son cruciales para que se prevengan las pérdidas significativas en el rendimiento. No obstante, a menudo es difícil la identificación de los primeros síntomas, lo que va a retrasar la aplicación de medidas de control y reducir su eficacia, por ende, es importante la identificación precisa de las plagas y enfermedades son esenciales para aplicar el tratamiento adecuado.
- **Disponibilidad de información:** En diversos casos, el agricultor no posee accesibilidad de la información que es suficiente y oportuna sobre los estados de sus cultivos. Esto dificulta la toma de decisiones que sean informadas y que pueden llevar a un manejo no adecuado. A la vez de la falta de instrumentos y tecnologías que son adecuadas para los monitoreos de cultivos que limitan las capacidades de los agricultores para que se detecte los problemas y así tomar medidas preventivas o correctivas.

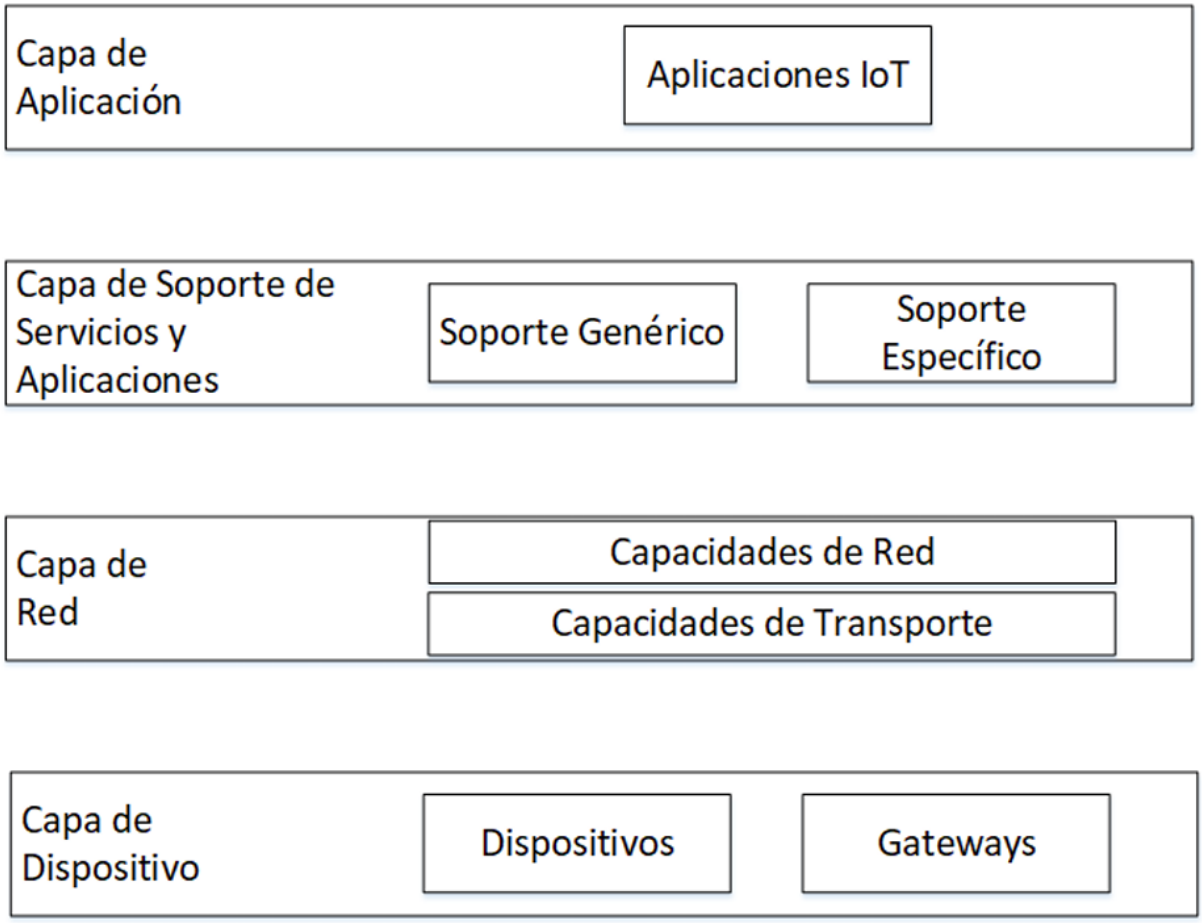
2.2. Arquitectura IoT

Basado en el libro Internet de las Cosas de (Santiago Silvestre & Jordi Salazar, 2017) hoy en día, la arquitectura de la información basada en Internet permite el intercambio de bienes y servicios entre todos los elementos, equipos y objetos conectados a la red. La IoT se refiere a la interconexión en red de todos los objetos cotidianos, que a menudo están equipados con algún tipo de inteligencia.

IoT (Internet of things/Internet de las cosas) es una arquitectura emergente basada en la Internet global que facilita el intercambio de bienes y servicios entre redes de la cadena de suministro y que tiene un impacto importante en la seguridad y privacidad de los actores involucrados.(Santiago Silvestre & Jordi Salazar, 2017)

Figura 3

Arquitectura de capas de la arquitectura IoT propuesta por la ITU.



***Nota*:** La imagen representa el modelo referencial para la arquitectura de capas IoT propuesta por la ITU-T. Imagen Recuperada de (Quiroga Montoya et al., 2017)

Tabla 5

Jerarquía de Capas de la arquitectura IoT propuesta por la ITU-T

Capa	Función
Capa de Aplicación	Su principal función es permitir la interacción del sistema IoT con sus usuarios finales y poder así cumplir con el propósito para el cual fue diseñado.
Capa de Soporte de Servicios y Aplicaciones	Tiene como función brindar soporte a los servicios y aplicaciones para los cuales el sistema IoT fue implementado. Debe ser capaz de cumplir con dos grupos de capacidades: soporte genérico y soporte específico.
Capa de Red	Permite la comunicación entre la capa de Dispositivos y las capas superiores, para la transmisión de los datos obtenidos y envío de órdenes a los dispositivos.
Capa de Dispositivo	Se encarga de la gestión de dispositivos que forman parte del sistema IoT, mismos que deben recolectar la información del medio.

Nota. La tabla anterior muestra la distribución de capas de la arquitectura IoT conforme a lo establecido por la ITU con su respectiva función. Adaptado de (Tonato Chuquimarca & Sinche Maita, 2022)

2.2.1. Aplicaciones de IoT en la agricultura

La incorporación del IoT en el ámbito agrícola ha transformado significativamente los métodos tradicionales de producción y gestión de cultivos. Estas tecnologías permiten la interconexión de dispositivos, sensores y plataformas digitales que facilitan la recolección, análisis y transmisión de datos en tiempo real, de manera que al ser aplicados en el ámbito agrícola ha logrado optimizar procesos como el riego, el control de plagas, la fertilización y la supervisión ambiental. Gracias a estas aplicaciones, los agricultores pueden tomar decisiones más informadas, reducir el uso de recursos naturales y aumentar la productividad de manera sostenible, posicionando al IoT como un eje clave en el desarrollo de la agricultura inteligente.

Actualmente se continúan desarrollando investigaciones y proyectos en base IoT con el fin de mejorar la productividad y rentabilidad de los cultivos, ofreciendo soluciones efectivas y accesibles para los agricultores. Algunos ejemplos de estas soluciones se resumen a continuación:

Sistema de monitoreo agrícola

La arquitectura de un sistema de monitoreo agrícola se refiere al diseño estructural que integra diversos componentes tecnológicos, como sensores, drones, dispositivos IoT y plataformas de análisis de datos, para recopilar, procesar y analizar información sobre el estado de los cultivos y el entorno agrícola (Narvaez, 2020).

Monitoreo y control del riego

Un ejemplo representativo de la aplicación del Internet de las Cosas (IoT) en la agricultura basado en el artículo (Laverde Mena & Laverde Mena, 2021) es la implementación de sistemas automatizados de riego, diseñados para optimizar el uso del agua en los cultivos.

2.2.2. Protocolos de comunicación utilizados en IoT

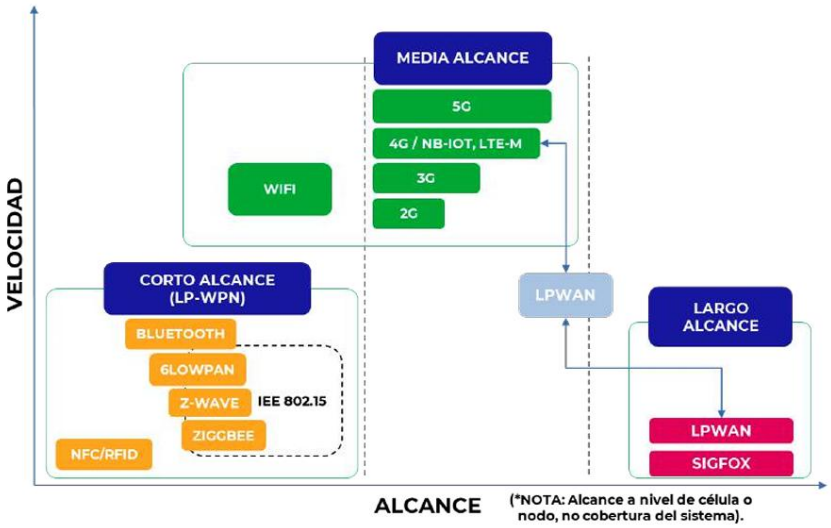
Los protocolos y redes de comunicación han evolucionado para adaptarse a las necesidades específicas del Internet de las Cosas (IoT), optimizando la conectividad entre dispositivos con recursos limitados. Estas redes están diseñadas para operar con baja velocidad y frecuencia de transmisión de datos, lo que permite una comunicación eficiente sin sobrecargar el ancho de banda. Además, integran características clave como movilidad y servicios de localización, facilitando la conectividad en entornos dinámicos. La seguridad es otro aspecto fundamental, garantizando conexiones bidireccionales seguras que protejan la integridad de la información transmitida. Asimismo, estos protocolos priorizan un bajo consumo de energía, lo que los hace ideales para dispositivos alimentados por batería y aplicaciones de larga duración. Finalmente, ofrecen un largo alcance de comunicación, permitiendo la conectividad en áreas extensas sin necesidad de infraestructuras complejas, lo que resulta esencial en sectores como la agricultura inteligente, la industria y las ciudades conectadas.(COITAOC, 2021)

2.2.2.1.Protocolos de comunicación Inalámbrica

Existen una gran variedad de protocolos y tecnologías empleadas para la comunicación inalámbrica en IoT. Estos permiten el intercambio de datos entre dispositivos sin necesidad de cables físicos. Actualmente estas tecnologías son indispensables para la transferencia de datos y la automatización de sistemas, en donde se clasifican dependiendo de sus características de señal tal y como se muestra en la **Figura 4**.

Figura 4

Relación de velocidad frente a alcance de tecnologías de comunicación



Nota: La imagen muestra una clasificación de tecnologías de comunicación IoT según su velocidad y alcance. Imagen recuperada de (COITAOC, 2021)

IEEE 802.15.4

Es un protocolo inalámbrico de bajo consumo energético y baja velocidad de transmisión, ideal para redes de sensores en aplicaciones IoT. Alcanza hasta 250 Kbps y opera en las bandas 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz, con un rango de comunicación de varios metros entre dispositivos.(COITAOC, 2021)

Bluetooth (BLE) Bluetooth de baja energía

BLE es una tecnología inalámbrica de bajo consumo, ampliamente utilizada en diversos dispositivos. Ha sido clave en implementaciones IoT, destacando por su eficiencia energética. Además, su modo de baja energía y la disponibilidad de componentes bajo licencia GPL y código abierto han facilitado su adopción en múltiples aplicaciones.(COITAOC, 2021)

WiFi, WiFi6

Wi-Fi es un estándar inalámbrico que permite conectar casi cualquier dispositivo a Internet, incluyendo nodos IoT como electrodomésticos y señales de tráfico. Sin embargo, su alto consumo energético lo hace menos eficiente para dispositivos alimentados por batería. Con la llegada de Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), esta limitación se reduce, optimizando el consumo y mejorando su aplicación en IoT.(COITAOC, 2021)

2.2.2.2.Protocolos Utilizados en IoT a Nivel de Capa Aplicación

Protocolo MQTT

MQTT es un protocolo de mensajería ligero diseñado para la comunicación eficiente entre dispositivos IoT y servicios en la nube. Su arquitectura permite la transmisión de datos en un modelo de publicación/suscripción, facilitando el intercambio y análisis de información en sistemas back-end. Esta capacidad mejora la interoperabilidad entre plataformas al permitir la agregación de datos de múltiples dispositivos en la nube. Gracias a su bajo consumo de ancho de banda y eficiencia en entornos de red inestables, MQTT se ha convertido en una de las opciones más utilizadas para la comunicación IoT en la nube.(COITAOC, 2021)

Protocolo CoAP

CoAP se define como el protocolo especializado para el uso en nodos inalámbricos, restringidos y limitados por su baja potencia; se comunica con un modelo cliente/servidor de forma asíncrona lo que le da mayor interactividad a través de internet. Una de las principales características de este protocolo es que funciona mucho mejor en comparación con HTTP, MQTT, ecc, proporcionando comunicación confiable entre los nodos inalámbricos entre otras características tales como menor pérdida de datos en redes CoAP de alto tráfico. (Ganazhapa Malla, Tiupul Urquizo, & Chamba Romero, 2024)

2.3. Drones (UAVs)

Los drones, o vehículos aéreos no tripulados (UAVs), son aeronaves que pueden volar de manera autónoma o ser controladas a distancia, equipadas con tecnología para realizar diversas tareas. En el sector agrícola, se utilizan para la monitorización de cultivos, evaluación de la salud de las plantas, y la aplicación de insumos, mejorando la eficiencia y reduciendo costos. Los drones están equipados con cámaras y sensores que recopilan datos visuales y ambientales (Andrade, 2022).

2.3.1. Tipos de drones y características técnicas relevantes para aplicaciones agrícolas.

Se va a detallar a continuación los tipos de drones y características técnicas relevantes para aplicaciones agrícolas de acuerdo (Torrecillas et al., 2024):

Drones Multirrotor: Tienen múltiples hélices (generalmente 4 a 8) que les permiten despegar y aterrizar verticalmente. Ideales para tareas de monitoreo de cultivos y aplicación de pesticidas, gracias a su maniobrabilidad y capacidad para volar a baja altitud.

Drones de ala fija: Cuentan con una distribución similar a un avión, con alas fijas que les permiten cubrir grandes distancias y volar a mayor velocidad. Son adecuados para la cartografía de grandes áreas agrícolas y la recopilación de datos a gran escala, gracias a su mayor autonomía de vuelo.

Drones Híbridos: Combinan características de drones multirrotor y de ala fija, permitiendo despegue y aterrizaje vertical, así como vuelos de larga distancia. Ofrecen versatilidad en aplicaciones agrícolas, como la monitorización de cultivos y la recolección de datos en terrenos extensos.

Drones Equipados con Sensores: Incorporan cámaras multiespectrales, térmicas o de alta resolución para la recopilación de datos específicos. Permite la valoración de los cultivos

con respecto a la salud de las plantas como: detección de enfermedades y de plagas, y análisis del suelo, mejorando la gestión agrícola.

2.3.2. Principales características de los drones: autonomía, capacidad de carga, GPS para geolocalización.

Autonomía: Se refiere al tiempo o distancia que un drone puede volar sin necesidad de recargar su batería. Una mayor autonomía permite cubrir áreas más extensas en una sola misión, lo que es crucial para la monitorización de grandes campos agrícolas.

Capacidad de Carga: Es la cantidad de peso que un drone puede transportar, incluyendo sensores, cámaras y otros equipos. Una mayor capacidad de carga permite equipar al drone con tecnología avanzada, como cámaras multiespectrales o sistemas de pulverización, mejorando su funcionalidad en aplicaciones agrícolas.

GPS para Geolocalización: Los drones utilizan sistemas de posicionamiento global (GPS) para determinar su ubicación exacta durante el vuelo. La geolocalización precisa permite la planificación de rutas de vuelo, la recopilación de datos geoespaciales y la creación de mapas detallados de las siembras, suministrando la toma de decisiones adecuadas (OACI, 2020).

2.4. Normativas y Aspectos Legales

Existen normativas y reglamentos en cuanto al manejo de drones en base a las características de hardware, la aplicación y el entorno donde va a ser usado el presente trabajo se rige a los estatutos determinados por el estado ecuatoriano el cual muestra pautas para que el proyecto pueda operar sin problemas cumpliendo los requisitos de ley determinados por La Dirección de Aviación Civil.

2.4.1. Regulaciones locales para el uso de drones en agricultura.

En Ecuador existe un reglamento que regula el uso de drones agrícolas. La Dirección General de Aviación Civil (DGAC) emitió la Resolución Nro. DGAC-DGAC-2020-0074-R, que establece el "Reglamento que norma la Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAs)". Este reglamento ha sido modificado en varias ocasiones para adaptarse a las necesidades del sector agrícola.

Una de las reformas más significativas se realizó el 14 de abril de 2023 mediante la Resolución Nro. DGAC-DGAC-2023-0037-R. Esta modificación permitió, entre otras cosas, la operación de drones con un peso máximo de despegue (MTOW) superior a 150 kilogramos para uso agrícola, eliminando restricciones previas que limitaban su utilización en este sector.(CIVIL, 2020)

Es importante destacar que, para operar drones en Ecuador, es necesario obtener una licencia oficial. Esto implica inscribirse en un curso de capacitación reconocido por la autoridad aeronáutica y registrar el dron ante la DGAC. Además, dependiendo del peso del dron, se requiere contar con un seguro de responsabilidad civil que cubra posibles daños a terceros.(CIVIL, 2020)

2.4.2. Requisitos Generales para la Operación de Drones Agrícolas

Según el Reglamento que norma la Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAs) (CIVIL, 2020)para operar un dron agrícola en Ecuador, se deben cumplir con los siguientes requisitos establecidos en la normativa vigente:

- **Peso permitido:** Se permite la operación de drones con un MTOW superior a 150 kg únicamente para fines agrícolas. Para otras actividades aéreas, el peso permitido oscila entre 0.5 kg y 150 kg.

- **Permiso de operación:** La operación de drones para trabajos aéreos agrícolas, como la fumigación o monitoreo de cultivos, requiere la obtención de un permiso de operación conforme a la normativa vigente. En ciertos casos, se deberá gestionar un Certificado de Operador Aéreo (AOC).
- **Registro del dron:** Todos los drones deben estar registrados ante la DGAC y cumplir con los requisitos de certificación aeronáutica.
- **Capacitación del operador:** El piloto del dron debe contar con una certificación oficial que lo habilite para operar la aeronave de manera segura y conforme a la normativa.

2.4.3. Restricciones y Condiciones de Vuelo

Para garantizar la seguridad en las operaciones con drones agrícolas, la normativa establece las siguientes restricciones y condiciones:

- **Contacto visual:** El operador debe mantener contacto visual con el dron durante toda la operación, excepto en casos donde la aeronave disponga de sistemas autónomos de vuelo.
- **Operación simultánea:** No está permitido operar más de un dron simultáneamente, salvo que el fabricante certifique que la operación es segura.
- **Zonas restringidas:** Se prohíbe la operación de drones en las siguientes áreas, salvo autorización expresa de la DGAC:
    - A menos de 9 km de aeropuertos controlados y 0.5 km de aeródromos no controlados o helipuertos.
    - En zonas de seguridad del Estado.
- **Lanzamiento y rociado:** El uso de drones para dispersión de productos químicos, fertilizantes o cualquier otra sustancia requiere autorización expresa de la DGAC.
- **Operación desde vehículos en movimiento:** No está permitido operar manualmente un dron desde un vehículo en movimiento.

2.4.4. Procedimientos Administrativos para la Operación de Drones Agrícolas

Para operar un dron agrícola en Ecuador dentro del marco legal, es fundamental cumplir con los siguientes procedimientos administrativos:

- Registro y certificación del dron ante la DGAC.
- Obtención del permiso de operación en caso de realizar trabajos aéreos agrícolas.
- Capacitación del operador en una entidad certificada.
- Solicitud de autorización especial si se requiere operar en zonas restringidas o realizar actividades de dispersión de sustancias desde el dron.

La normativa vigente busca garantizar la seguridad en la operación de drones agrícolas, promoviendo su uso eficiente dentro del marco legal y evitando riesgos para la aviación y la población.

CAPÍTULO III. DISEÑO DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

En el presente capitulo se describe la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto titulado “Dron de Monitoreo para Cultivos en el Sector San Andrés del Cantón San Miguel de Urcuquí, utilizando Sensores Basados en una Arquitectura IoT” detallando cada una de las fases que lo componen y las actividades asociadas a su ejecución, incluyendo el análisis de los requisitos para seleccionar el Hardware y Software necesarios para la implementación del sistema. Asimismo, se presentan el diseño y los diagramas del sistema.

3.1. Metodología

La metodología utilizada en este proyecto se fundamenta en el enfoque de Investigación-Acción, complementado con principios de la ingeniería de requisitos señalados en el estándar (IEEE 29148) y el diseño iterativo de sistemas embebidos señalados. Este enfoque resulta adecuado porque combina la investigación aplicada con la intervención práctica, permitiendo diagnosticar la problemática en el campo agrícola, diseñar una solución tecnológica adecuada y validar su funcionamiento en condiciones reales de operación. La metodología se acopla al proyecto mediante fases claramente definidas: la primera fase es la Identificación y Descripción del Problema; la segunda, Desarrollo del Plan de Acción; la tercera, Implementación y Recopilación de Datos; la cuarta, Análisis de Datos y Generación de Conclusiones; la quinta, Evaluación de Resultados; y, finalmente, la fase de Ajuste y Mejora Continua. De esta forma, la metodología adoptada asegura un proceso riguroso, participativo y adaptable, que garantiza que el desarrollo tecnológico responda de manera efectiva a los objetivos planteados y a las necesidades del sector agrícola.

3.1.1. Modelo Investigación Acción

La metodología de la investigación de acción se considera un proceso de vinculación entre la teoría y la práctica, en el que los científicos exploran una situación social formulando

preguntas, reuniendo datos y poniendo a prueba una hipótesis a través de múltiples ciclos de acción. El propósito más común de la investigación de la acción es orientar a los profesionales en la búsqueda de respuestas a problemas complejos en distintas áreas incluida la ingeniería. **(Arteaga. G 2020)**

En la Figura se muestra como está estructurada cada una de sus fases y posteriormente se explica cómo están relacionadas con los objetivos del presente proyecto:

Figura 5

Diagrama de fases de la Metodología Investigación - Acción



La imagen muestra un diagrama secuencial de las fases que conforman la metodología "Investigación-Acción" explicando la principal actividad que se realiza en cada fase. Imagen recuperada de ***(Arteaga. G 2020)***

La primera fase, Identificación y Descripción del Problema, se enfoca en determinar y comprender a fondo la problemática a resolver. En la fase de Desarrollo del Plan de Acción, se diseñan estrategias y acciones específicas para abordar el problema identificado.

Posteriormente, en la fase de Implementación y Recopilación de Datos, se lleva a cabo la ejecución de las acciones y la recolección de la información necesaria para el análisis. La fase de Análisis de Datos y Generación de Conclusiones permite interpretar los resultados obtenidos y generar representaciones graficas de los datos obtenidos que guíen la toma de decisiones. A continuación, en la Evaluación de Resultados, se evalúa el impacto de las acciones implementadas en relación con los objetivos iniciales. Finalmente, la fase de Ajuste y Mejora Continua se enfoca en realizar los ajustes necesarios para optimizar el sistema, asegurando que se logre una mejora constante durante todo el proceso.

3.2. Análisis

En esta sección se presenta el análisis que sustenta el diseño del dron de monitoreo para cultivos de maíz. El proceso inicia con la revisión de la situación actual en el manejo de cultivos de maíz en la comunidad de San Andrés, identificando las limitaciones de los métodos tradicionales de control y la necesidad de contar con herramientas tecnológicas que optimicen la recolección de datos. Para obtener información directa del contexto agrícola y de las prácticas actuales de los productores, se aplicó una revisión bibliográfica detallada para definir los requerimientos de diseño del sistema, además también se realizó un cuestionario estructurado señalado en el **(Anexo 1),** diseñado con el fin de recopilar datos sobre el manejo de cultivos, los métodos de monitoreo, las dificultades enfrentadas y la disposición de los agricultores a incorporar nuevas tecnologías.

El estudio se desarrolla en base a un caso práctico desarrollado en una propiedad ubicada en la comunidad de San Andrés, perteneciente al cantón San Miguel de Urcuquí, provincia de Imbabura. Este predio representa de manera adecuada las condiciones agrícolas típicas de la zona, lo que la hace idóneo para definirlo como sitio de pruebas. Para los fines del análisis y las pruebas del sistema, se delimitó un área de aproximadamente 500 m² dentro de

un terreno de 2.5 hectáreas, seleccionado por su fácil acceso y condiciones ideales para del cultivo de maíz.

3.2.1. Situación Actual

En la comunidad de San Andrés, perteneciente al cantón San Miguel de Urcuquí en la región Sierra del Ecuador, los cultivos de maíz constituyen una actividad agrícola importante debido a las condiciones climáticas templadas y a la altitud que se encuentra alrededor de los 2000 m.s.n.m., factores que favorecen su producción. Según el último censo realizado por el INEC del año 2022 en esta comunidad viven alrededor de 23 familias de las cuales mediante un primer acercamiento se logró determinar que 18 de estas familias se dedican a cultivo de maíz. Estos cultivos son gestionados principalmente por pequeños productores, con parcelas que no superan las tres hectáreas y que se destinan tanto al autoconsumo (alimentación de aves de corral) y plantas procesadoras de balanceado. Dada la limitada extensión de los terrenos, el rendimiento del cultivo se vuelve un factor determinante para la sostenibilidad económica de los agricultores, quienes dependen en gran medida de obtener una producción estable y de calidad a lo largo del ciclo de cultivo de aproximadamente cuatro meses.

Figura 6

Zona destinada al cultivo de maíz para la realización de pruebas.



Fuente: Autoría Propia

En la actualidad, el monitoreo de estos cultivos se realiza casi exclusivamente mediante inspección visual, apoyada en los conocimientos empíricos de los agricultores, sin el uso de sensores ni herramientas tecnológicas. De manera aislada se ha empleado drones con fines de fumigación, no de monitoreo. Los métodos tradicionales presentan múltiples limitaciones: la subjetividad de las observaciones, la baja precisión para determinar el estado del suelo y de las plantas, el tiempo que demanda la inspección manual y el desperdicio de recursos como agua y fertilizantes al no contar con mediciones objetivas. Esto ocasiona decisiones tardías o erróneas, un uso ineficiente de insumos, variabilidad en la producción dentro de una misma parcela e incluso pérdidas económicas significativas.

Las necesidades detectadas en este contexto se centran en disponer de información confiable, rápida y georreferenciada sobre variables clave como la humedad del suelo, la temperatura, el pH y el nivel de nutrientes. Conocer estos parámetros permitiría optimizar la

gestión del riego y la fertilización, reducir costos de operación y mejorar el rendimiento de los cultivos. Frente a esta realidad, la utilización de un dron equipado con sensores especializados se presenta como una alternativa viable y accesible, ya que proporciona movilidad, cobertura integral del terreno y precisión en la captura de datos sin necesidad de desplazar al agricultor a cada punto de muestreo. Además, la capacidad de georreferenciar la información recolectada ofrece un valor agregado al permitir la generación de mapas de calor del cultivo, lo que constituye una herramienta de apoyo fundamental para la toma de decisiones en la agricultura de precisión.

Ubicación Geográfica

El terreno seleccionado pertenece a un pequeño productor local y representa fielmente las condiciones típicas de los cultivos de la zona, tanto en características del suelo como en el manejo tradicional del maíz. La parcela elegida ofrece accesibilidad para la operación del dron y una extensión adecuada para la toma de mediciones representativas. Las coordenadas geográficas aproximadas del punto central del área de estudio son **Latitud: 0.4038° N** y **Longitud: -78.1527° O**, tal como se muestra en la **Figura 7**, donde se observa el perímetro del terreno marcado en color rojo. Esta localización forma parte de un entorno agrícola diverso, con cultivos aledaños y caminos de acceso que facilitan la ejecución de las pruebas de campo.

Figura 7

Ubicación geográfica del área de estudio en la comunidad San Andrés, cantón San Miguel de Urcuquí



Fuente: Recuperado de (Google Maps, 2025).

3.2.2. Población y Muestra

Población

Para la aplicación de la encuesta se consideró a los agricultores de la comunidad San Andrés, perteneciente al cantón San Miguel de Urcuquí, quienes se dedican al cultivo de maíz en pequeñas parcelas que generalmente no superan las 3 hectáreas. En relación a la información recabada en la situación actual acerca del número de habitantes que se dedican al cultivo de maíz en esta comunidad, así como también se realizó la agrupación e identificación de los perfiles idóneos para el estudio basándonos la información proporcionada por el presidente de la junta de agua: Acequia Madre de Coñaqui perteneciente a la comunidad San Andres. Estos

productores representan el perfil predominante en la zona, caracterizado por prácticas agrícolas tradicionales, manejo manual del cultivo y ausencia de herramientas tecnológicas para el monitoreo del suelo y la planta.

Muestra

Debido al tamaño reducido de la población y al enfoque descriptivo y exploratorio del proyecto, se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia, considerando como muestra a los agricultores que son representantes de cada familia en base al último censo. Ellos aceptaron participar voluntariamente en el estudio. Este tipo de muestreo es adecuado para investigaciones de campo en comunidades rurales donde la accesibilidad, la disponibilidad y la disposición de los participantes son factores determinantes.

Para el levantamiento de información mediante el cuestionario estructurado **(ver Anexo 1)**, se encuestó a n = 20 agricultores, los cuales representan más del 90% de la población total identificada, lo que permite obtener un panorama confiable de las prácticas agrícolas y las necesidades tecnológicas presentes en el sector.

La encuesta realizada permitió obtener datos suficientes para establecer ciertos parámetros y tener un panorama más claro de la situación actual. Algunos de los aspectos predominantes fueron:

- Identificar patrones de manejo del cultivo.
- Determinar limitaciones en las prácticas de monitoreo.
- Evaluar la percepción frente al uso de tecnologías como drones y sensores.
- Alimentar el proceso de levantamiento de requerimientos del sistema dentro de la metodología de Investigación-Acción.

3.2.3. Técnicas de Recolección de Información

Para el desarrollo del presente proyecto se emplearon diversas técnicas de recolección de información que permitieron comprender la problemática existente y definir los requerimientos del sistema. En primer lugar, se aplicaron entrevistas y conversaciones informales con agricultores de la comunidad de San Andrés, con el fin de identificar sus prácticas actuales de monitoreo de cultivos de maíz, las dificultades que enfrentan y las expectativas en torno al uso de nuevas tecnologías. Estas entrevistas se complementaron con la técnica de observación directa en campo, la cual permitió constatar las condiciones de los terrenos, los métodos tradicionales de inspección visual y las limitaciones en el control de variables críticas como la humedad, la temperatura y el pH del suelo. Asimismo, se realizó una revisión documental de investigaciones previas, normativas y proyectos relacionados con el uso de drones e IoT en la agricultura, lo que aportó un marco teórico y comparativo para sustentar la propuesta. La combinación de estas técnicas aseguró la obtención de información cualitativa y cuantitativa confiable, que sirvió de base para estructurar los requerimientos y orientar el diseño del prototipo.

3.2.4. Encuesta aplicada a los agricultores de la comunidad San Andrés

Para la recolección de información se seleccionó la encuesta como herramienta de recolección de información crítica debido a su capacidad para obtener de manera estructurada y sistemática datos directamente de los agricultores de la comunidad de San Andrés. Esta técnica resulta adecuada para el proyecto porque permite recopilar opiniones, experiencias y necesidades de un grupo representativo de productores, garantizando así que el diseño del sistema responda a las condiciones reales de los agricultores de la comunidad. El cuestionario facilita la obtención de información tanto cualitativa como cuantitativa sobre prácticas actuales de monitoreo, frecuencia de inspecciones, recursos utilizados y percepción frente a la

incorporación de nuevas tecnologías. Las preguntas y temas planteados en el cuestionario se detallan en el **Anexo 1**.

Con base en la información recolectada mediante en la encuesta, en términos generales, los resultados evidencian que el cultivo de maíz en la zona se desarrolla principalmente en parcelas de pequeña y mediana extensión, gestionadas mediante prácticas tradicionales y con un alto componente de experiencia empírica. El análisis del manejo del cultivo muestra que las decisiones relacionadas con el riego, la fertilización y el control de plagas se basan mayoritariamente en la observación visual, la experiencia previa del agricultor y, en menor medida, en asesoría técnica. La ausencia de instrumentos de medición sistemática limita la precisión de estas decisiones, lo que puede derivar en un uso ineficiente de recursos y en pérdidas de producción. En cuanto al uso actual de tecnologías, se evidencia un bajo nivel de adopción de herramientas digitales para el monitoreo agrícola. Si bien algunos agricultores han tenido contacto con tecnologías como drones, su uso ha estado orientado principalmente a actividades puntuales como la fumigación, más que al monitoreo preventivo de variables agrícolas. No obstante, a pesar de este bajo nivel de adopción, los resultados muestran una actitud favorable y una alta expectativa frente a la incorporación de tecnologías de monitoreo. Los agricultores manifiestan interés en contar con sistemas que les permitan acceder a información confiable sobre el estado de su cultivo, y reconocen que el uso de tecnología podría contribuir significativamente a mejorar la toma de decisiones y la eficiencia en el manejo agrícola. Este análisis constituye, por tanto, un paso fundamental que garantiza que el desarrollo del prototipo responda de manera coherente a los objetivos del proyecto y a las demandas reales del sector agrícola.

3.3. Descripción del Sistema

El sistema propuesto consiste en una plataforma de monitoreo agrícola basada en el uso de un dron equipado con sensores de humedad, temperatura, pH y nutrientes del suelo, diseñado para atender las necesidades de pequeños productores de maíz en la comunidad de San Andrés. El propósito principal del sistema es recopilar información precisa, rápida y georreferenciada del estado de los cultivos, con el fin de optimizar la gestión del riego y la fertilización, reduciendo costos y mejorando la productividad.

El sistema se compone de tres bloques principales: el bloque de percepción, conformado por el dron y los sensores encargados de la captura de datos; el bloque de transporte, que incluye los módulos de comunicación inalámbrica y georreferenciación que permiten transmitir la información en tiempo real; y el bloque de aplicación, integrado por la estación base, la base de datos y la interfaz de usuario donde se procesan, almacenan y visualizan los resultados en forma de reportes y gráficos comprensibles para el agricultor.

El funcionamiento del sistema sigue una secuencia clara: el dron realiza un recorrido planificado sobre el cultivo, durante el cual los sensores capturan datos en diferentes puntos del terreno. Esta información es transmitida a la estación base, donde se procesa y se almacena en una base de datos. Posteriormente, la aplicación genera reportes georreferenciados que permiten al agricultor identificar zonas críticas del cultivo y tomar decisiones oportunas sobre riego y fertilización. Con este enfoque, el sistema ofrece una alternativa accesible y de alto impacto para la modernización de la agricultura en pequeñas parcelas.

3.4. Requerimientos del Sistema

En esta etapa se introduce la segunda fase de la metodología de Investigación-Acción referente al desarrollo del plan de acción vinculada al levantamiento y gestión de requerimientos, la recolección sistemática de información mediante las técnicas de recolección

de información como la encuesta realizada ayudan a obtener un panorama más claro de los posibles requerimientos del sistema y la formulación del plan de acción que guiará el diseño técnico. La propuesta integra sensores de suelo (humedad, temperatura y pH), georreferenciación y transmisión IoT para obtener datos precisos y oportunos que apoyen decisiones de riego y fertilización. A partir de un análisis de la situación actual y de los requerimientos levantados con productores locales, el proyecto plantea una arquitectura por capas (adquisición, comunicación, procesamiento y visualización) y valida su desempeño en una parcela piloto delimitada dentro del predio de estudio.

3.4.1. Nomenclatura de requerimientos

Tabla 6

En la tabla se explican las abreviaturas para entender cada uno de los requerimientos de stakeholders.

Descripción	Abreviatura
Requerimientos de Stakeholders	StSR
Requerimientos Funcional del sistema	SySR
Requerimientos de Arquitectura	SrSH

Fuente: Autoría Propia

La **Tabla 6** resume las abreviaturas empleadas en la especificación de requisitos y su alcance dentro del proyecto. StSR identifica los requerimientos de stakeholders (necesidades de los actores); SyRS, los requerimientos del sistema derivados de esas necesidades; y SRSH, los requerimientos de arquitectura que materializan el diseño (componentes e interfaces). Esta tabla estandariza la nomenclatura y facilita la trazabilidad entre necesidades, funciones del sistema y decisiones de arquitectura.

3.4.2. Actores Involucrados

Tabla 7

Actores Involucrados

Actores Involucrados

N°	Actor	Función
1	Sr. Josue Delgado	Desarrollador
2	Msc. Fabián Cuzme	Director
3	Msc. Henry Farinango	Asesor
4	Sr. Jorge Quilca	Presidente de la Junta de agua Acequia Madre de Coñaqui

Fuente: Autoría Propia

3.4.3. Requerimientos de Stakeholders

Los stakeholders son las personas y entidades que intervienen directa o indirectamente en el sistema y cuya necesidad guía el diseño: Los agricultores de la comunidad de San Andrés como usuarios finales, el operador del dron que desarrolla y mantienen el prototipo, así como las autoridades aeronáuticas que regulan la operación (DGAC). Su identificación no es solo nominal: implica levantar y priorizar sus necesidades, traducirlas en requerimientos verificables y mantener trazabilidad entre lo que piden los actores (StSR), lo que debe hacer el sistema (SyRS) y cómo se materializa en la arquitectura (SRSH). En la práctica, esto significa definir qué información requiere el agricultor para decidir riego y fertilización, qué condiciones de operación necesita el operador, qué restricciones técnicas asume el equipo de diseño y qué normas se deben cumplir para volar en la parcela piloto.

Tabla de Requerimientos StSR

N°	Requerimiento	Prioridad		
		Alta	Media	Baja
Requerimientos Operacionales				
StSR 1	El sistema debe implementarse en un cultivo de maíz ubicado en la comunidad de San Andrés.	X		
StSR 2	El sistema debe contar con sensores capaces de medir humedad, temperatura, pH y nutrientes del suelo.	X		
StSR 3	El sistema debe integrar un módulo de georreferenciación para asociar los datos obtenidos con su ubicación exacta en la parcela.	X		
StSR 4	El sistema debe transmitir los datos de forma inalámbrica hacia la estación base.		X	
StSR 5	El sistema debe tener autonomía suficiente para cubrir el área de monitoreo establecida de 500 m².	X		
StSR 6	El suelo debe estar húmedo para obtener una mayor veracidad de los datos.		X	
Requerimientos de Usuario				
StSR 7	El sistema debe presentar los resultados de manera clara, visual y comprensible, mostrando mapas, recomendaciones y promedios por variable.	X		

StSR 8	El sistema debe ser portátil de forma que permita su transporte e instalación sencilla en campo.		X
StSR 9	El sistema debe resistir condiciones ambientales moderadas (temperatura, polvo y humedad).		X
StSR 10	El sistema debe reducir el tiempo de monitoreo en comparación con los métodos manuales.	X	
StSR 11	El costo de adquisición de la plataforma de vuelo no debe superar los USD 1000, con el fin de garantizar la viabilidad económica del sistema para su implementación en el contexto agrícola local.	X	
StSR 12	El servicio/API de IA seleccionado deberá presentar una relación costo-beneficio adecuada para el desarrollo y validación del sistema, considerando la disponibilidad de créditos o cuotas gratuitas, así como el costo por consumo de tokens, con el fin de minimizar gastos operativos del prototipo.		X

Tabla 8

Tabla de Requerimientos Operacionales del Sistema

3.4.4. Requerimientos Funcionales del Sistema

Tabla 9

Requerimientos SySR

N°	Requerimiento	Prioridad			Requerimiento Relacionado
		Alta	Media	Baja	
Requerimientos de comunicación y compatibilidad					
SySR 1	Compatibilidad con módulos de tecnología inalámbrica (Wi-Fi - LoRa).	X			StSR 4
SySR 2	Un lenguaje de programación compatible con las placas embebidas y las tecnologías involucradas en el proyecto.		X		StSR 9 y StSR 7
SySR 3	Debe establecerse una comunicación entre el nodo sensor y el Coordinador previa a la obtención de datos que contemple un rango ≥ 100m.		X		StSR 4
Requerimientos de adquisición y envío de datos					
SySR 4	El nodo sensor ubicado en el dron debe recolectar los datos de humedad, temperatura y pH y enviarlos al nodo coordinador.	X			StSR 2

SySR 5	El sistema debe registrar timestamp (fecha y hora) en cada medición obtenida durante la misión.		X		
SySR 6	El sistema debe sincronizar automáticamente las mediciones con coordenadas GPS del dron.	X			StSR 3
SySR 7	El Coordinador debe operar en modo de escucha para recibir paquetes LoRa enviados por el nodo sensor antes de su procesamiento y retransmisión hacia el servidor.	X			StSR 4
SySR 8	Los sensores deben estar correctamente calibrados para que los datos obtenidos sean lo más preciso posible.	X			StSR 2
SySR 9	El sistema debe permitir filtrar los datos por cada variable monitoreada.			X	StSR 7
SySR 10	El Coordinador debe transmitir los datos recibidos del nodo sensor mediante protocolo MQTT hacia el servidor.		X		StSR 4

SySR 11	Comprobar la integridad de los mensajes recibidos.	X

3.4.5. Requerimientos de arquitectura

Los Requerimientos de Arquitectura (SRSH) definen la estructura del sistema de monitoreo, especificando los componentes de hardware y software, las interfaces de comunicación y la organización por capas necesaria para cumplir los requerimientos funcionales definidos previamente (SySR). Estos requerimientos concretan la arquitectura IoT propuesta para el dron de monitoreo de cultivos de maíz, indicando la plataforma de vuelo, los nodos de sensado, el esquema de comunicaciones inalámbricas, el servidor de datos y el dashboard de visualización, de manera que se garantice la integración adecuada entre el dron, los sensores de suelo, el backend y la interfaz de usuario.

Tabla 10

Tabla de Requerimientos de arquitectura

Tabla de Requerimientos SrSH

Requerimientos de Arquitectura del Sistema

Requerimientos de vuelo y sensado

N°	Requerimiento	Prioridad			Requerimiento Relacionado
		Alta	Media	Baja	
SrSH 1	El sistema debe utilizar un dron multirrotor con capacidad de carga suficiente para transportar el módulo de sensado de suelo y el sistema de comunicación.	X			
SrSH 2	El nodo sensor embarcado debe estar basado en un microcontrolador que permita la lectura de sensores y la conexión inalámbrica.		X		StSR 4
SrSH 3	El sistema debe integrar sensores de humedad, temperatura y pH del suelo conectados al microcontrolador mediante		X		StSR 2 SySR 1

	interfaces analógicas/digitales apropiadas.		
SrSH 4	El dron debe incorporar un módulo GPS para obtener coordenadas geográficas que se asocien a cada medición de los sensores.	X	StSR 3
	Requerimientos de comunicación e IoT		
SrSH 5	El sistema debe implementar una arquitectura IoT multicapa que permita la transmisión inalámbrica de datos desde el nodo sensor hacia un Coordinador intermedio, el cual actuará como punto de enlace hacia la infraestructura de red y servicios en la nube.	X	StSR 4, SySR 10, SySR 7, SySR 4, SySR 1
SrSH 6	El sistema debe emplear el protocolo MQTT como capa de mensajería para la transmisión de datos de telemetría.	X	SySR 10

SrSH 7	Debe existir un Coordinador o punto de acceso que reciba los mensajes MQTT provenientes del dron y los redireccione al servidor de aplicaciones.	X		
	Requerimientos de backend y almacenamiento			
SrSH 8	El servidor debe contar con un broker MQTT configurable en Docker para gestionar la publicación y suscripción de tópicos de datos.		X	SySR 10
SrSH 9	Debe implementarse un módulo de procesamiento que se encargue de generar mapas de calor y agregaciones a partir de los datos recibidos.		X	
	Requerimientos de frontend y visualización			
SrSH 10	La visualización de los datos debe implementarse mediante un dashboard web, accesible desde navegador en PC o dispositivo móvil.		X	

SrSH 11	Debe existir un módulo de generación de reportes que permita exportar los resultados en formatos PDF y/o CSV.	X
SrSH 12	El sistema debe ser compatible con herramientas que permitan la visualización y procesamiento de los datos.	X
SrSH 13	El backend debe incorporar una base de datos orientada a series temporales (p. ej., InfluxDB) para almacenar mediciones con marca de tiempo.	X

3.5. Elección de Hardware y software para el sistema

En esta sección del documento se detallan los elementos de hardware y software seleccionados para el desarrollo del proyecto en base a los requerimientos ya mencionados, se enlista cada uno de los componentes y se detalla las principales características del mismo con el fin de determinar si el dispositivo o herramienta es adecuado para el proyecto.

3.5.1. Hardware destinado para el sistema

En este apartado se realiza una comparativa y determinación de las herramientas de hardware definidas para el desarrollo del presente proyecto en base a las necesidades de sensado y extensión del terreno, por lo que se realiza la tabla en la cual se enlista las características requeridas para el proyecto y se señala con un 1 en caso de que si cumple con el requerimiento o un 0 en caso de que no lo haga.

- **Plataforma de vuelo (Drone)**

Debido a que el sistema será operado en entornos agrícolas abiertos, el dron debe ofrecer estabilidad en vuelo, capacidad de carga adecuada, autonomía suficiente y el mecanismo adecuado para posicionar correctamente el sensor en el suelo garantizando la correcta ejecución de las misiones de monitoreo sobre la parcela de estudio.

Entre las principales características requeridas para la selección del dron se consideran:

Capacidad de carga útil para transportar sensores, placa embebida, batería y módulos adicionales.

- Estabilidad y precisión de vuelo para la toma confiable de datos.
- Autonomía de vuelo adecuada para cubrir la parcela piloto definida.
- Integración con sistemas de posicionamiento (GPS).

Tabla 11

Selección de Plataforma de vuelo (Drone)

	Requisitos						
	StSR 1	**StSR 5**	**StSR 10**	**SySR 3**	**SrSH 1**	**SrSH 4**	**Suma**
Dji Phantom 4	1	0	1	1	0	1	4
Dji Inspire 1	1	1	1	1	1	1	6
Dji Matrice 400	1	1	0	1	1	1	5

Elección: El drone dji inspire 1 es el más adecuado para el desarrollo del proyecto debido a sus características de autonomía, carga y precio siendo más equilibrado en estos aspectos en comparación con las otras opciones.

- **Selección de Placa Embebida**

Para el desarrollo del sistema de monitoreo agrícola propuesto es indispensable contar con una placa embebida que permita la adquisición, procesamiento y transmisión de los datos provenientes de los sensores de suelo y de los módulos auxiliares integrados al dron. Esta placa constituye el núcleo del sistema, ya que se encarga de gestionar la lectura de variables agrícolas, la sincronización de la información con las coordenadas de posicionamiento y el envío de los datos hacia el nodo Coordinador para su posterior procesamiento y visualización.

Debido a que la placa embebida será instalada a bordo de la plataforma aérea y operará en entornos agrícolas abiertos, esta debe ofrecer bajo consumo energético, capacidad de procesamiento suficiente, compatibilidad con tecnologías de comunicación inalámbrica y

facilidad de integración con sensores y módulos externos, garantizando la correcta operación del sistema durante las misiones de monitoreo definidas.

Tabla 12

Selección de Placa Embebida

	Requisitos						
	SrSH 2	**StSR 5**	**SySR 1**	**SySR 3**	**SrSH 2**	**SrSH 5**	**Suma**
Raspberry Pi 4	1	0	1	1	1	1	5
Arduino Uno	1	0	0	1	1	0	3
ESP32 Dev Module	1	1	0	1	1	1	5
ESP32 LoRa Heltec V3	1	1	1	1	1	1	6

Elección: La placa embebida seleccionada es la ESP32 LoRa Heltec V3, debido a que cumple con la totalidad de los requerimientos evaluados. Esta placa integra conectividad Wi-Fi y LoRa, presenta bajo consumo energético, y está basada en un microcontrolador adecuado para aplicaciones de sensado y transmisión de datos en arquitecturas IoT.

- **Selección de Sensores de Suelo**

Los sensores de suelo son parte fundamental del proyecto debido a que son las herramientas que proporcionan los datos necesarios para el análisis, en base a esta necesidad se buscan sensores que puedan cumplir con todas las necesidades para el proyecto, siendo compactos, que tengan la capacidad de precisión adecuada al medir parámetros, además deben ser resistentes a los entornos climáticos propios de zonas agrícolas y medir las variables principales para determinar el estado del suelo.

Tabla 13

Selección de Sensor de Suelo

	Requisitos						
	SrSH 2	**StSR 5**	**SySR 1**	**SySR 3**	**SrSH 2**	**SrSH 5**	**Suma**
Sensor de humedad YL-69	0	0	1	0	1	1	3
Sensor pH de suelo analógico	0	0	1	1	1	1	4
Sensor DHT11 + humedad suelo	0	0	1	0	1	1	3
Sensor NPK 7 in 1	1	1	1	1	1	1	6

Elección: El sensor de suelo seleccionado es el sensor NPK 7 in 1, debido a que cumple con la totalidad de los requerimientos evaluados. Este sensor permite la medición integrada de nutrientes del suelo (Nitrógeno, Fósforo y Potasio), así como humedad, temperatura y pH, proporcionando una visión más completa del estado del suelo en comparación con sensores de medición individual.

Además, su compatibilidad con microcontroladores, su robustez para uso en campo y su facilidad de integración dentro de una arquitectura IoT lo convierten en una opción adecuada para el sistema de monitoreo agrícola mediante dron propuesto en el proyecto.

- **Selección de GPS**

El GPS es una herramienta critica ya que permite determinar el área de sensado y posteriormente elaborar correctamente un mapa de calor para cada una de las variables medidas, con el fin de no sobrecargar el sistema el GPS debe ser compacto y adaptable para que sea fácil de adaptar o acoplar al dron, además debe tener una buena precisión ya que es información que necesitamos depurar y mostrar de forma clara.

Tabla 14

Selección de GPS

Requisitos

	StSR 3	StSR 7	SySR 6	SrSH 4	SrSH 2	SrSH 5	Suma
GPS genérico TTL	1	1	0	1	1	1	5
u-blox NEO-6M	1	1	1	1	1	1	6
GPS SIM808 (GSM + GPS)	1	0	1	1	0	1	4

Elección: El módulo GPS seleccionado es el u-blox NEO-6M, debido a que es el módulo que mejor se adapta a los requerimientos solicitados. Este módulo ofrece una precisión adecuada para aplicaciones agrícolas, bajo consumo energético y una integración sencilla con la placa embebida seleccionada.

Otros aspectos importantes acerca de este módulo es que presenta buena estabilidad en entornos abiertos, amplia documentación técnica y compatibilidad con sistemas IoT, lo que lo convierte en una opción idónea para la georreferenciación de las mediciones realizadas por el dron durante las misiones de monitoreo agrícola.

- **Selección de Batería**

La fuente de energía para el sistema debe ser capaz de alimentar a todas las herramientas del sistema sin fallas, además esta fuente de energía debe ser capaz de mantener energizado el

sistema el suficiente tiempo para que puedan tomarse las muestras y enviarse al Coordinador para su procesamiento, tomando en cuenta que hay varios elementos conectados al nodo sensor como: placa embebida, gps y sensor npk, se debe calcular el valor de energía necesario para todos estos dispositivos en conjunto.

En base a los requerimientos definidos, se ha realizo el cálculo energético en cada uno de los componentes del sistema, de forma que primero se recopilaron los datos de consumo de energía de cada componente directamente de su datashet y posteriormente se realiza el cálculo de la energía necesaria para todo el sistema:

Tabla 15

Consumo nominal del sistema

Consumo Nominal por Componente			
#	**Componente**	**Voltaje (Vc)**	**Corriente Pico (Ic)**
1	**ESP32 LoRa V3**	**3.3 V**	**230.00 mA**
2	**Sensor NPK**	**11.0 V**	**45.45 mA**
3	**Módulo RS485**	**5.0 V**	**100.00 mA**
4	**GPS NEO-6M**	**3.3 V**	**37.00 mA**

Cálculo para cada elemento en base a una batería de 11V

Para realizar el cálculo debemos usar la relación de transformación de los voltajes y aplicar la eficiencia del regulador que es de 85% de eficiencia y está representado por: $n = 0.85$ la cual reemplazamos en la formula:

$$I_{bateria} = I_{componente} * \left(\frac{V.Componente}{V.Bateria}\right) * \left(\frac{1}{n}\right)$$

1) Calculo para el ESP32 LoRa Heltec

$$I_{bat_esp32} = 230mA * \left(\frac{3.3\ V}{11.1V}\right) * \left(\frac{1}{0.85}\right) = 80.44mAh$$

2) Calculo para el GPS:

$$I_{gps} = 37mA * \left(\frac{3.3\ V}{11.1V}\right) * \left(\frac{1}{0.85}\right) = 12.94mAh$$

3) Calculo para el Módulo RS485:

$$I_{RS485} = 100mA * \left(\frac{5\ V}{11.1V}\right) * \left(\frac{1}{0.85}\right) = 53mAh$$

4) Calculo para el Sensor NPK

$$I_{NPK} = 45.45mA * \left(\frac{11.0\ V}{11.1V}\right) * \left(\frac{1}{0.85}\right) = 45.04mAh$$

5) Suma Total de Corriente Real

$$I_{total} = 80.44mAh + 12.94mAh + 53mAh + 45.04mAh$$

$$I_{total} = 191.42mAh$$

Tabla 16

Selección de Batería

	Requisitos					
	StSR 4	**StSR 5**	**StSR 8**	**StSR 9**	**SySR 4**	**Suma**

LiFePO4 9.9V 3S 1500mAh	0	1	0	1	1	3
Li-ion 11.1V 3S (18650) 2600mAh	1	1	0	1	1	4
LiPo 11.1V 3S 35C 1100mAh	1	1	1	1	1	5
LiPo 11.1V 3S 25C 2200mAh	1	1	0	1	1	4

Elección: En base a los cálculos realizados se selecciona la opción más adecuada a los requerimientos planteados, siendo así la batería LiPo 11V a 1100mAh añadiendo además cálculos referentes a la autonomía y rendimiento de la misma como se muestra a continuación.

Cálculo de autonomía del sistema

$$Autonomia_{continua} = \left(\frac{Capacidad\ de\ la\ Bateria}{Consumo\ del\ Sistema}\right)$$

$$Autonomia_{continua} = \left(\frac{1100mA}{191.42mA}\right) = 5.74 \text{ Horas}$$

Como resultado obtenemos que para que el sistema funcione debe contar con un mínimo de 191.42mA siendo así, la batería de 11.1V a 1100mAh cumple con creces ese requerimiento, proporcionando así una autonomía de hasta 5 horas seguidas suficiente para la obtención de los datos durante largas jornadas de sensado.

La elección de la batería LiPo de 11.1V a 1100mAh es la más eficiente y estable para este diseño, principalmente porque su voltaje nominal permite alimentar directamente al sensor NPK sin necesidad de añadir circuitos elevadores (Boost), lo que reduce significativamente las pérdidas de energía y evita el ruido electromagnético que podría interferir con el GPS o la transmisión LoRa. Además, al exigirle al sistema un pico máximo de corriente de apenas 191 mA, la batería opera con una tasa de descarga sumamente baja (0.17C), eliminando el estrés térmico y maximizando la vida útil de sus celdas.

3.5.2. Software destinado para el sistema

En esta sección se presentan los requerimientos de software necesarios para el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo agrícola mediante dron propuesto en el presente proyecto. Estos requerimientos se derivan del análisis de la situación actual del cultivo de maíz en la comunidad San Andrés, de los resultados obtenidos a partir de la encuesta aplicada a los agricultores y de los requerimientos de stakeholders, funcionales y de arquitectura definidos previamente. El software constituye un elemento clave del sistema, ya que permite integrar los distintos componentes tecnológicos y transformar los datos recolectados en información útil para la toma de decisiones agrícolas.

A continuación, se enlista cada una de las herramientas de software empleadas para la elaboración del proyecto:

- **Selección de Broker MQTT**

El bróker MQTT es fundamental para poder transmitir los datos desde el Coordinador hacia la plataforma de gestión para que los datos sean procesados, para este caso debe ser un bróker que tenga buena compatibilidad con bases de datos y dashboard que permitan el almacenamiento y visualización de los datos.

Tabla 17

Selección Broker MQTT

	Requisitos					
	SySR 10	**SySR 11**	**SrSH 6**	**SrSH 9**	**SrSH 12**	**Suma**
Mosquitto MQTT	1	1	1	1	1	5
EMQX	1	1	1	1	0	4
HiveMQ	1	1	1	1	0	4

Elección: Se selecciona Mosquitto MQTT debido a que cumple la totalidad de los requerimientos establecidos, es de código abierto, ligero, ampliamente documentado y adecuado para sistemas IoT de pequeña y mediana escala como el propuesto.

- **Selección de Base de Datos**

La selección de la base de datos se realizó considerando la necesidad de almacenar, consultar y procesar datos provenientes de sensores agrícolas, los cuales se generan de manera periódica durante las misiones de monitoreo. Se priorizaron soluciones capaces de manejar información asociada a marcas de tiempo, que permitan el filtrado por variables y faciliten el análisis histórico del cultivo. Adicionalmente, se tomó en cuenta la compatibilidad con herramientas de visualización, la escalabilidad del sistema y su integración dentro de la arquitectura backend definida para el proyecto.

Tabla 18

Selección Base de Datos

	Requisitos					
	SySR 9	**SySR 11**	**SrSH 8**	**SrSH 9**	**SrSH 12**	**Suma**
MySQL	1	1	1	0	1	4
InfluxDB	1	1	1	1	1	5
PostgreSQL	1	1	1	0	1	4

Elección: Se selecciona InfluxDB por su orientación a series temporales, siendo asi también una base de datos no relacional lo que la hace adecuada para el almacenamiento y análisis de datos provenientes de sensores agrícolas.

- **Selección de Plataforma de Visualización**

Para la selección de la plataforma de visualización se consideraron aspectos relacionados con la presentación clara, visual y comprensible de los datos, de acuerdo con los requerimientos de los usuarios finales. La herramienta debe permitir la generación de

dashboards interactivos, facilitar el análisis de las variables monitoreadas y ofrecer opciones de filtrado y exportación de resultados. Asimismo, se valoró la accesibilidad desde navegadores web o dispositivos móviles, así como la posibilidad de representar información georreferenciada que apoye la toma de decisiones en el manejo del cultivo.

Tabla 19

Selección Plataforma de visualización

	Requisitos					
	StSR 7	**SySR 9**	**SrSH 9**	**SrSH 10**	**SrSH 11**	**Suma**
Power BI	1	1	0	1	1	4
Kibana	1	1	0	1	1	4
Grafana	1	1	1	1	1	5

Elección: Se selecciona Grafana debido a su capacidad para generar dashboards interactivos, mapas de calor y su compatibilidad directa con InfluxDB.

- **Selección de API de Inteligencia Artificial (IA)**

La selección de la API de inteligencia artificial se basó en la necesidad de contar con una herramienta capaz de analizar los datos recolectados por el sistema y apoyar la generación de recomendaciones orientadas al manejo del cultivo de maíz. Se consideró que la API permita procesar información proveniente de distintas variables agrícolas y que pueda integrarse fácilmente con el backend del sistema. Además, se evaluó su flexibilidad, capacidad de adaptación a distintos escenarios y compatibilidad con las plataformas de software utilizadas en el proyecto.

Tabla 20

Selección API de IA

	Requisitos					
	StSR 7	**SySR 9**	**SrSH 9**	**SrSH 12**	**StSR 12**	**Suma**
OpenAI	1	1	1	1	0	4
Azure	1	1	1	1	0	4
Gemini	1	1	1	1	1	5
Grok	1	1	1	0	0	3
DeepSeek	1	1	1	1	0	4

Elección: Se selecciona la API Gemini por obtener el mejor resultado en la matriz de evaluación, al cumplir con los requerimientos técnicos considerados para el proyecto y presentar una mejor relación costo-beneficio en el uso de la API (incluyendo condiciones favorables para pruebas mediante beneficios gratuitos). Esta selección permite asegurar la integración de la IA al sistema con criterios de funcionalidad, compatibilidad y viabilidad económica.

- **Selección de Entorno de Desarrollo**

Para el entorno de desarrollo del software embebido se consideraron criterios como la compatibilidad con las placas utilizadas, el soporte para lenguajes de programación adecuados y la disponibilidad de librerías para sensores y comunicaciones inalámbricas. El entorno debe facilitar la implementación, depuración y mantenimiento del código encargado de la adquisición y transmisión de datos. Asimismo, se valoró la facilidad de uso, la documentación

disponible y la amplia adopción de la herramienta en proyectos similares, lo que contribuye a un desarrollo más eficiente y confiable.

Tabla 21

Selección IDE de programación

	Requisitos				
	SySR 2	**SySR 3**	**SySR 5**	**SrSH 2**	**Suma**
PlatformIO	0	1	1	1	3
MicroPython	1	1	0	1	3
Arduino IDE	1	1	1	1	4

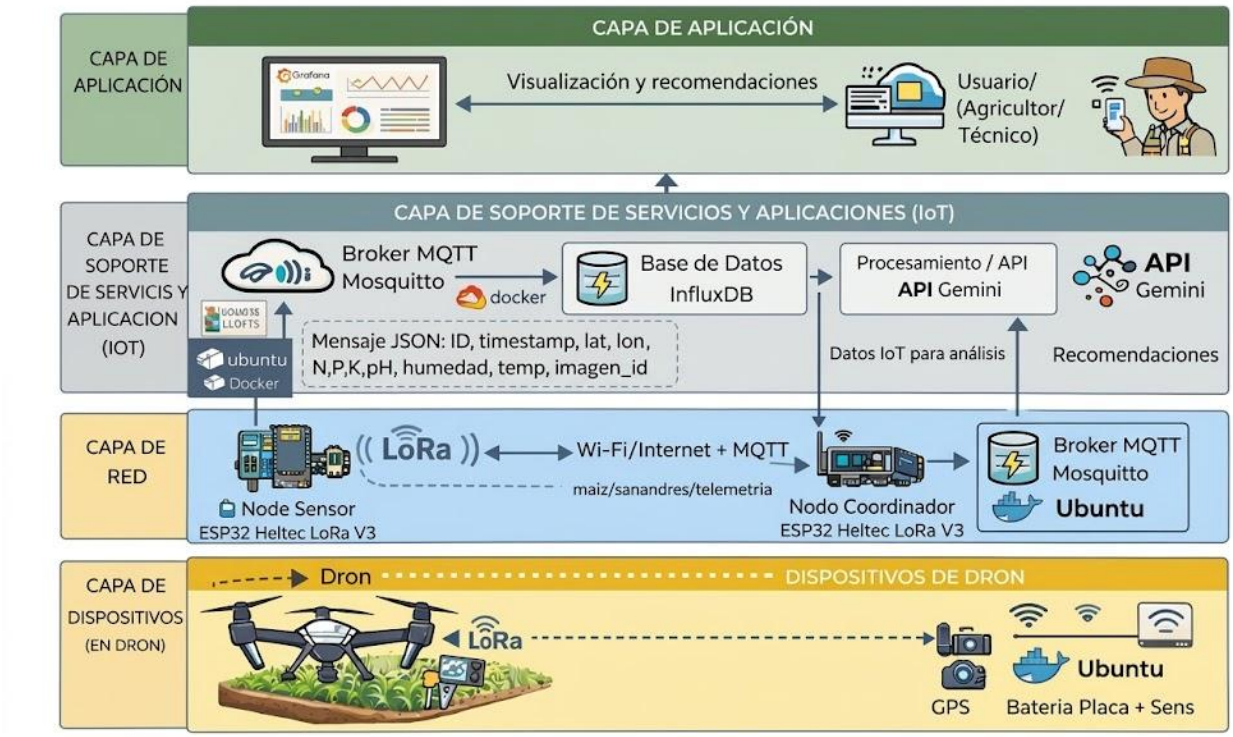
Elección: Se selecciona Arduino IDE debido a su compatibilidad con la placa ESP32 Heltec LoRa V2 y su facilidad de uso en el desarrollo de firmware embebido.

3.6. Diseño del Sistema

Una vez concluida la fase de análisis de requerimientos y realizada la selección de los componentes de hardware y software, se procede al diseño del sistema de monitoreo agrícola mediante dron propuesto en el presente proyecto. Esta etapa tiene como finalidad definir la estructura general del sistema, así como la interacción entre sus distintos módulos, garantizando que la solución planteada responda de manera adecuada a los requerimientos identificados y al contexto agrícola de la comunidad San Andrés.

Figura 8

Arquitectura del Sistema



En la **Figura 8** se presenta la arquitectura del sistema de monitoreo agrícola mediante dron, la cual se estructura conforme al modelo de referencia IoT propuesto por la UIT, dividiéndose en 4 capas las cuales son: dispositivo, red, soporte de servicios y aplicaciones, Y al final la capa de aplicación. Esta arquitectura permite organizar de manera clara los componentes del sistema y el flujo de información desde la adquisición de los datos en campo hasta su visualización por parte del usuario final.

El sistema de monitoreo inicia su funcionamiento en la capa de dispositivo o percepción, donde se emplea un dron como plataforma de vuelo para el transporte del nodo sensor y los dispositivos de sensado. En esta capa, el nodo sensor está conformado por una placa ESP32 LoRa Heltec, a la cual se conectan el sensor de suelo NPK 7 en 1, encargado de medir variables como humedad, temperatura, pH, conductividad eléctrica, además de nutrientes del suelo

como: nitrógeno, fosforo y potasio. El módulo GPS para la obtención de coordenadas geográficas, y una cámara para la captura de información visual del cultivo. Estos dispositivos permiten recolectar información directamente desde la parcela de estudio durante las misiones de monitoreo realizadas por el dron.

Durante esta fase se realiza un proceso denominado ETL (Extract, Transform and Load) constituyen una tecnología de integración de datos este proceso es el que permite identificar, transformar y cargar los datos procedentes de diferentes fuentes en un data warehouse, de manera que se obtenga una visión única, consistente y útil de la información para apoyar el análisis de los datos y la toma de decisiones. (Díaz, 2013)

Una vez adquiridos, los datos son procesados de manera preliminar por el nodo sensor y transmitidos de forma inalámbrica hacia el nodo Coordinador mediante tecnología LoRa, la cual proporciona un enlace de comunicación de largo alcance y bajo consumo energético, adecuado para entornos agrícolas. Este proceso corresponde a la capa de red, donde el Coordinador, también basado en una placa ESP32 LoRa Heltec, actúa como punto de enlace entre los dispositivos de campo y la infraestructura de red, reenviando la información hacia el servidor a través de una conexión Wi-Fi con acceso a Internet.

En la capa de soporte de servicios y aplicaciones, los datos transmitidos por el Coordinador son gestionados mediante un broker MQTT, implementado sobre un servidor con sistema operativo Ubuntu y contenedores Docker, lo que facilita la orquestación de los distintos servicios. La información recibida es almacenada en una base de datos InfluxDB, optimizada para el manejo de datos temporales provenientes de sensores. Adicionalmente, los datos almacenados pueden ser procesados por una API de inteligencia artificial (Gemini), la cual permite generar recomendaciones y análisis orientados al manejo del cultivo de maíz.

Finalmente, en la capa de aplicación, los datos procesados son presentados al usuario final a través de un dashboard web desarrollado con Grafana, el cual permite la visualización de las variables monitoreadas, la generación de gráficos y la representación de mapas de calor asociados a la parcela de estudio. De esta manera, el agricultor o técnico puede acceder a la información de forma clara y comprensible, apoyando la toma de decisiones relacionadas con el riego, la fertilización y el control del cultivo.

3.6.1. Diagrama de bloques general del sistema

En la **Figura 9** se presenta el diagrama general de bloques del sistema de monitoreo de cultivos de maíz propuesto, en el cual se describe de manera estructurada la arquitectura funcional del proyecto y la interacción entre sus principales componentes. El sistema se organiza en cuatro bloques fundamentales: adquisición de datos, comunicación, procesamiento y almacenamiento, y visualización de la información. Cada bloque cumple una función específica dentro del flujo de operación, iniciando con la captura de variables de suelo mediante el sensor NPK embarcado en el dron, seguido de la transmisión inalámbrica de los datos hacia la infraestructura de red, el procesamiento y almacenamiento en el servidor, y finalmente la presentación de resultados a través de plataformas de visualización.

Figura 9

Diagrama general de bloques del sistema



3.6.1.1.Diagrama de flujo del Bloque 1

Este diagrama de flujo del primer bloque correspondiente a la adquisición de datos constituye la etapa inicial del sistema y corresponde a la capa de percepción dentro de la arquitectura IoT. Su función principal es la captura directa de información desde el entorno agrícola, específicamente del cultivo de maíz.

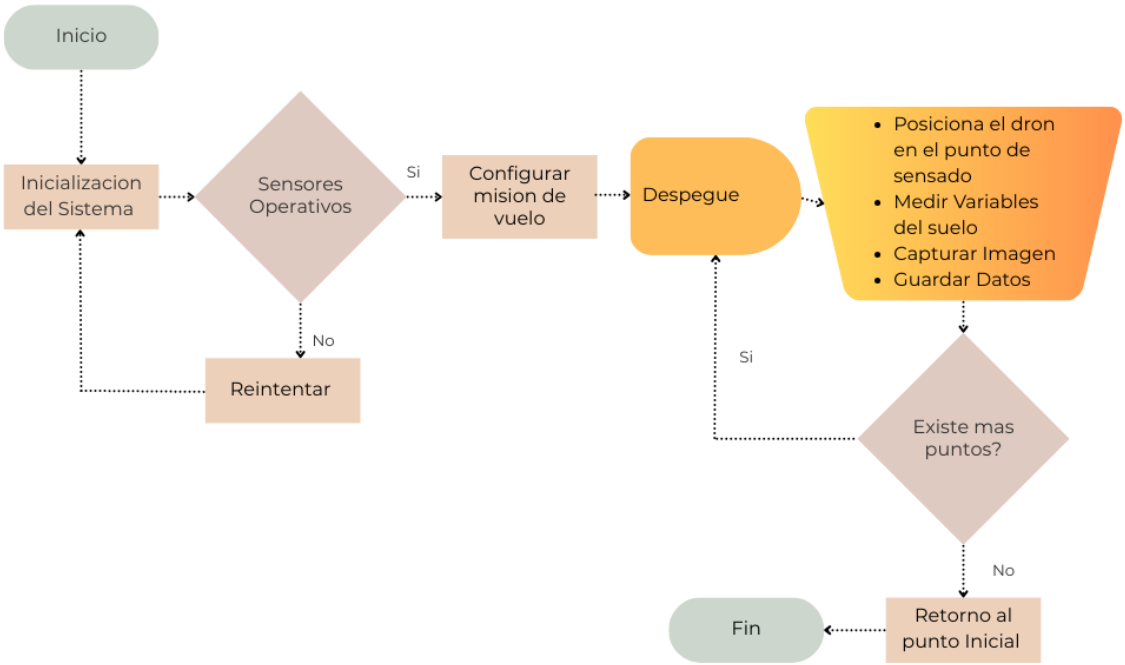
En este bloque, el drone actúa como plataforma de movilidad, permitiendo transportar el nodo sensor hacia los diferentes puntos de muestreo definidos dentro de la parcela de estudio. El nodo sensor, basado en la placa ESP32 LoRa Heltec, se encuentra integrado con sensores de suelo capaces de medir variables como humedad, pH y nutrientes (NPK), además de un

módulo GPS para la georreferenciación de las mediciones y una cámara para la captura de imágenes del cultivo.

El proceso de adquisición inicia con la verificación del correcto funcionamiento de los sensores y del sistema embebido. Posteriormente, el drone emprende vuelo y se posiciona en el punto establecido para recopilar los datos, una vez en el punto el drone desciende y coloca el sensor en el suelo de manera que a partir de ahí se realizan lecturas de los sensores. Este proceso se repite en puntos específicos del terreno, asociando cada medición a coordenadas geográficas y a un instante de tiempo. Esta información es validada de forma básica y permanece temporalmente en el nodo sensor, garantizando la integridad de los datos antes de su transmisión.

Figura 10

Diagrama de flujo del bloque de percepción o sensado



3.6.1.2.Diagrama de Flujo del Bloque 2

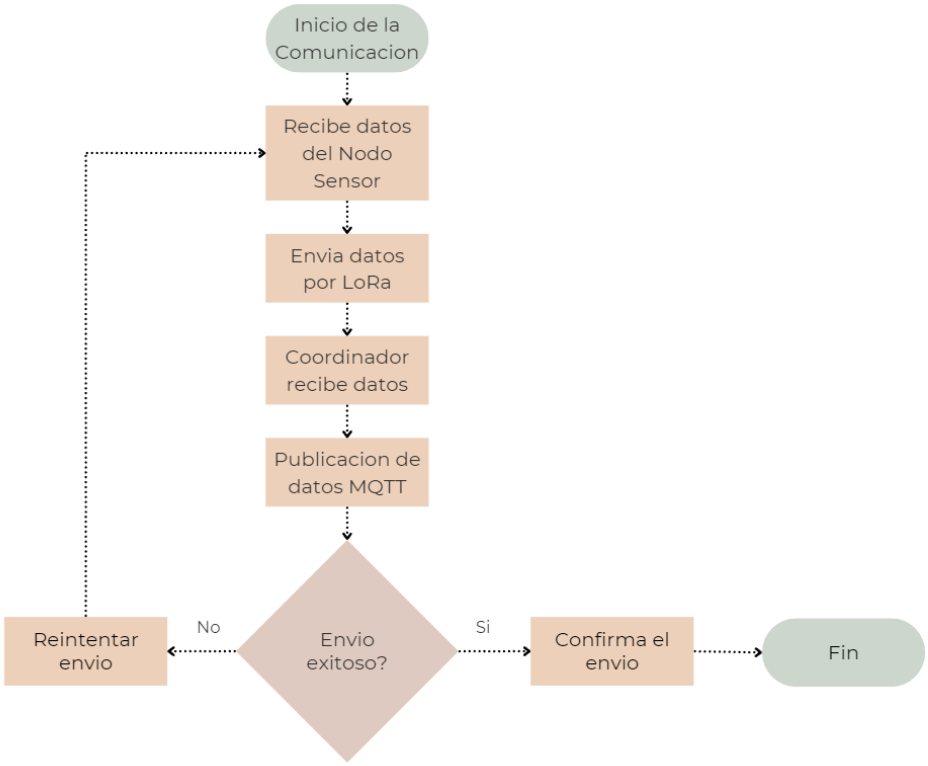
El diagrama de flujo de comunicación se encarga de garantizar el transporte confiable de los datos adquiridos en campo hacia las capas superiores del sistema. Este bloque conecta físicamente el entorno agrícola con la infraestructura de procesamiento y almacenamiento.

La comunicación entre el nodo sensor montado en el drone y el Coordinador se realiza mediante tecnología LoRa, lo cual permite transmitir información a largas distancias con bajo consumo energético, una característica clave para entornos rurales y agrícolas. Una vez que el Coordinador recibe los datos, estos son enviados al servidor a través de una conexión Wi-Fi, utilizando Internet como medio de transporte.

Durante este proceso, los datos son empaquetados y enviados mediante el protocolo MQTT, el cual proporciona un mecanismo ligero y eficiente para la transmisión de información en sistemas IoT. El bloque de comunicación también contempla la verificación de la integridad de los mensajes y la posibilidad de reintentos en caso de fallos en la transmisión.

Figura 11

Diagrama del bloque de Comunicación y transporte



3.6.1.3.Diagrama de Flujo del Bloque 3

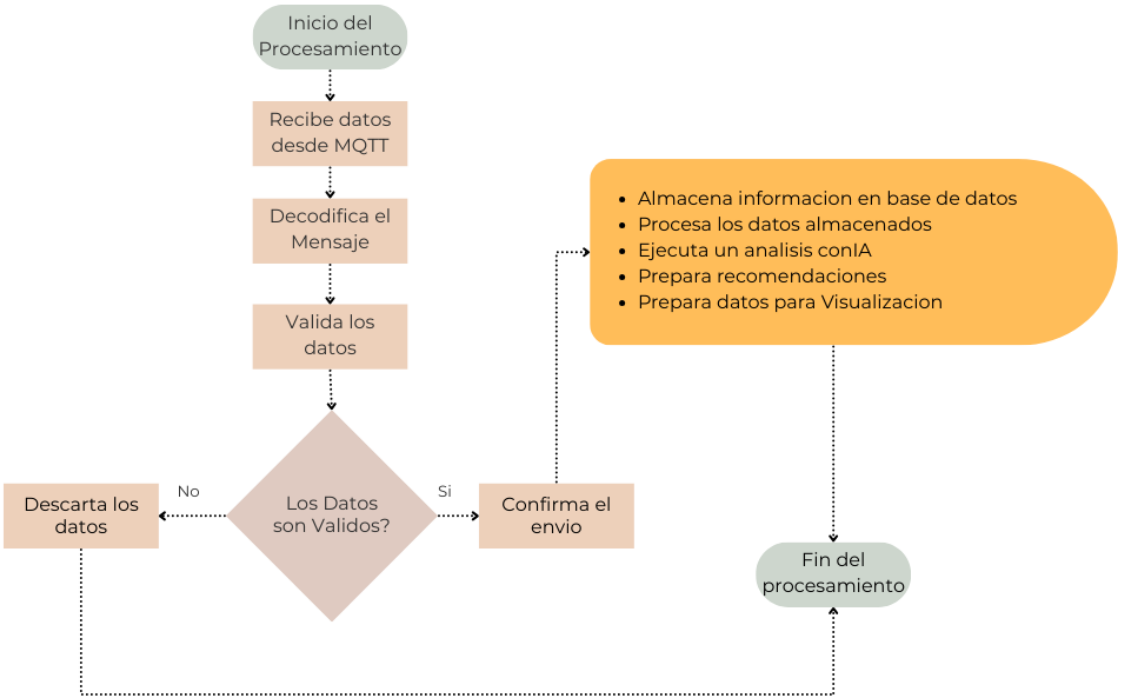
El diagrama de flujo correspondiente al bloque de procesamiento y almacenamiento representa el núcleo lógico del sistema, donde los datos recibidos son organizados, analizados y transformados en información útil para la toma de decisiones.

En esta etapa, el servidor recibe los mensajes enviados por el Coordinador a través del broker MQTT, los decodifica y los almacena en una base de datos diseñada para gestionar información de tipo temporal. Posteriormente, los datos son procesados para generar indicadores, tendencias y patrones relacionados con el estado del cultivo.

Adicionalmente, se integra un módulo de inteligencia artificial, el cual analiza los valores registrados y genera recomendaciones orientadas al manejo agrícola, como ajustes en el riego, la fertilización o la prevención de plagas. Este procesamiento permite convertir datos crudos en conocimiento accionable.

Figura 12

Diagrama del bloque 3 de procesamiento de los datos



3.6.1.4.Diagrama de Flujo del Bloque 4

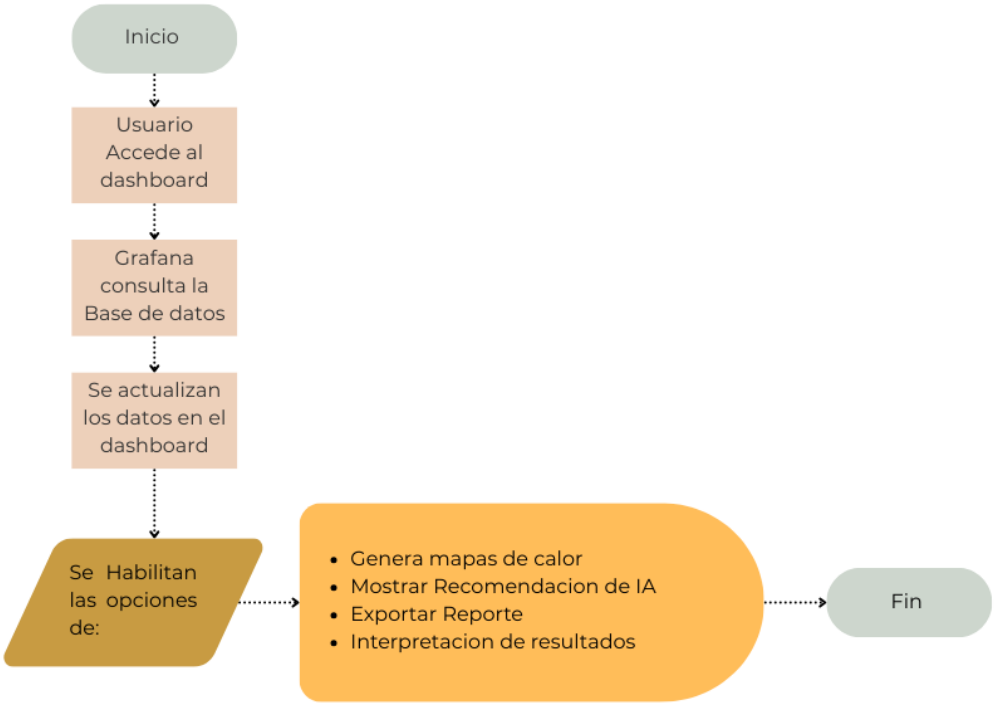
El diagrama de flujo del bloque de visualización y usuario corresponde a la etapa final del sistema y es el punto de interacción directa con el agricultor o técnico responsable del cultivo.

En este bloque, los datos procesados son presentados mediante dashboards desarrollados en Grafana, los cuales permiten visualizar gráficos, indicadores y mapas de calor que representan la variabilidad espacial del suelo dentro de la parcela. Asimismo, se muestran las recomendaciones generadas por la API de inteligencia artificial, facilitando la interpretación de la información.

El usuario puede acceder a la plataforma desde un dispositivo móvil o un computador, consultar el estado del cultivo en tiempo casi real y utilizar los resultados para planificar acciones correctivas o preventivas. De esta manera, el sistema contribuye a mejorar la eficiencia en el uso de recursos y a optimizar el rendimiento del cultivo.

Figura 13

Diagrama de flujo del bloque de visualización del dashboard y los datos procesados



3.6.2. Diseño del Esquema de Conexión del Sistema

En la presente sección se describe de forma conceptual la conexión de los componentes electrónicos del circuito, incluyendo la integración de la placa embebida, los sensores, los módulos de comunicación y su instalación sobre la plataforma de vuelo, garantizando una disposición adecuada para el correcto funcionamiento del sistema en condiciones de campo. Asimismo, se detallan las consideraciones técnicas tomadas en cuenta durante la conexión eléctrica, la alimentación de los dispositivos y la protección de los componentes frente a factores ambientales.

3.6.2.1.Diseño del Bloque de Sensado

Este primer bloque del sistema corresponde a la etapa de sensado y adquisición de datos, la cual constituye la base del sistema de monitoreo agrícola propuesto. En esta fase se realiza el armado e integración del circuito electrónico conformado por la placa embebida ESP32 LoRa Heltec y el sensor de suelo NPK 7 en 1, encargados de capturar las variables físicas y químicas del cultivo de maíz directamente desde el entorno.

La placa ESP32 LoRa Heltec actúa como nodo sensor, siendo responsable de la lectura, procesamiento inicial y transmisión de los datos obtenidos. Esta placa fue seleccionada debido a su capacidad de procesamiento, bajo consumo energético y compatibilidad con tecnologías de comunicación inalámbrica de largo alcance, lo que la hace adecuada para aplicaciones IoT en entornos agrícolas.

Durante la fase de diseño del código correspondiente al bloque de sensado se emplearon diversas librerías que permiten integrar la adquisición, visualización y transmisión

de datos dentro del nodo sensor, estas se detallan en la Tabla 20 donde se especifica cada una de las librerías utilizadas. La librería LoRaWan_APP.h se utiliza para la configuración y control de la comunicación LoRa, haciendo posible el envío inalámbrico de la información hacia el nodo Coordinador. Para la lectura del sensor de suelo NPK 7 en 1 se emplea ModbusMaster.h, la cual permite establecer la comunicación mediante el protocolo Modbus RTU sobre RS485 y obtener los valores de las variables. De igual manera, la librería HT_TinyGPS++.h permite procesar los datos recibidos desde el módulo GPS y obtener las coordenadas geográficas del punto monitoreado. Para la visualización local del estado del sistema y de las variables medidas se utilizan las librerías Wire.h y HT_SSD1306Wire.h, encargadas del manejo de la pantalla OLED integrada en la placa. Finalmente, Arduino.h proporciona las funciones básicas necesarias para la programación del microcontrolador. En conjunto, estas librerías permiten el funcionamiento coordinado del bloque de sensado , facilitando la captura, visualización y transmisión de la información del cultivo.

Tabla 22

Tabla de Librerías para la codificación del nodo sensor

Librería	Función principal	Módulo asociado
LoRaWan_APP.h	Configura y controla la comunicación LoRa para la transmisión inalámbrica.	Módulo LoRa integrado en la Heltec WiFi LoRa 32 V3
Arduino.h	Proporciona las funciones básicas de programación del microcontrolador	Microcontrolador ESP32

Librería	Función principal	Módulo asociado
ModbusMaster.h	Permite la comunicación Modbus RTU para la lectura de registros del sensor de suelo	Sensor NPK 7 en 1 mediante RS485
Wire.h	Habilita la comunicación I2C entre la placa y dispositivos periféricos	Bus I2C / pantalla OLED
HT_SSD1306Wire.h	Controla la pantalla OLED para mostrar el estado del sistema y los datos medidos	Pantalla OLED integrada
HT_TinyGPS++.h	Procesa los datos del GPS y obtiene latitud y longitud del punto monitoreado	Módulo GPS Neo-6M

Sensor NPK 7 en 1

El sensor de suelo NPK 7 en 1 es un dispositivo de medición multiparámetro diseñado para aplicaciones agrícolas, capaz de medir variables como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), pH, humedad, conductividad eléctrica y temperatura del suelo. Este tipo de sensor emplea comúnmente el protocolo de comunicación RS485, el cual es robusto frente al ruido eléctrico y adecuado para entornos industriales y agrícolas. Este sensor dispone generalmente de los siguientes pines o líneas de conexión:

- VCC: Pin de alimentación del sensor. Normalmente opera a 12 V DC, aunque algunos modelos admiten rangos menores dependiendo del fabricante.
- GND: Pin de referencia a tierra, común tanto para la alimentación como para la comunicación.
- A+ (D+): Línea diferencial positiva del bus RS485.
- B− (D−): Línea diferencial negativa del bus RS485.

Estas dos últimas líneas (A+ y B−) permiten la transmisión de datos digitales mediante comunicación diferencial, lo que mejora la inmunidad al ruido y garantiza la integridad de la información transmitida.

Modulo RS485

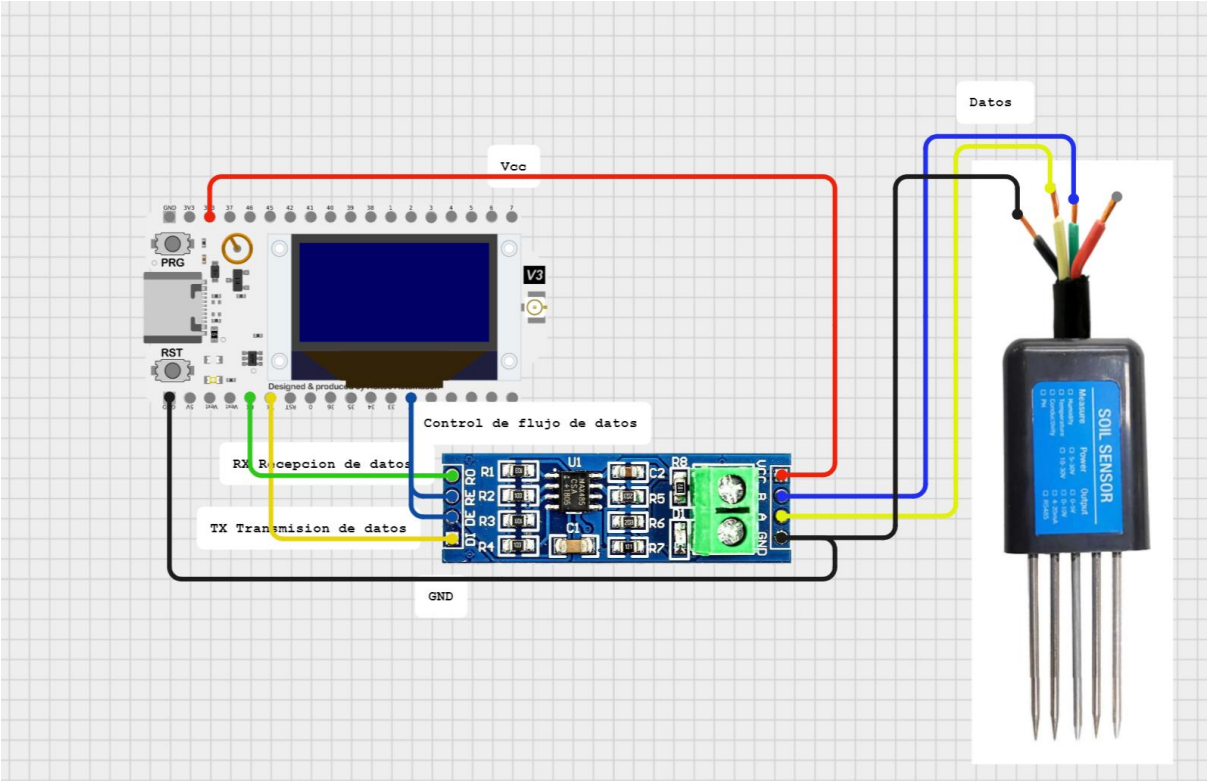
Dado que la ESP32 LoRa Heltec no soporta directamente comunicación RS485, es necesario emplear un módulo convertidor RS485 a UART. Este módulo actúa como intermediario entre el sensor y la placa embebida.

Los pines principales del módulo RS485 son:

- VCC: Alimentación del módulo (generalmente 5 V o 3.3 V según el modelo).
- GND: Tierra común.
- DI (Data In): Entrada de datos UART desde la ESP32 hacia el bus RS485.
- RO (Receiver Out): Salida de datos UART desde el bus RS485 hacia la ESP32.
- DE (Driver Enable): Habilita el modo transmisión del módulo.
- RE (Receiver Enable): Habilita el modo recepción del módulo (normalmente activo en bajo).

Figura 14

Diagrama de conexión del circuito de la placa embebida y el sensor de suelo.



Autoría propia

A+ / B−: Pines de salida RS485 que se conectan directamente al sensor.

Tal y como se muestra en la **Figura 14** los pines DE y RE se conectan juntos al pin GPIO 47 de la ESP32 LoRa Heltec para controlar dinámicamente si el módulo está transmitiendo o recibiendo datos.

Modulo GPS

El módulo GPS u-blox NEO-6M-0-001 es un dispositivo de posicionamiento global ampliamente utilizado en aplicaciones de navegación y georreferenciación, gracias a su alta precisión, bajo consumo energético y compatibilidad con microcontroladores. En el presente

proyecto, este módulo cumple la función de obtener las coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud) asociadas a cada medición realizada por el dron durante las misiones de monitoreo.

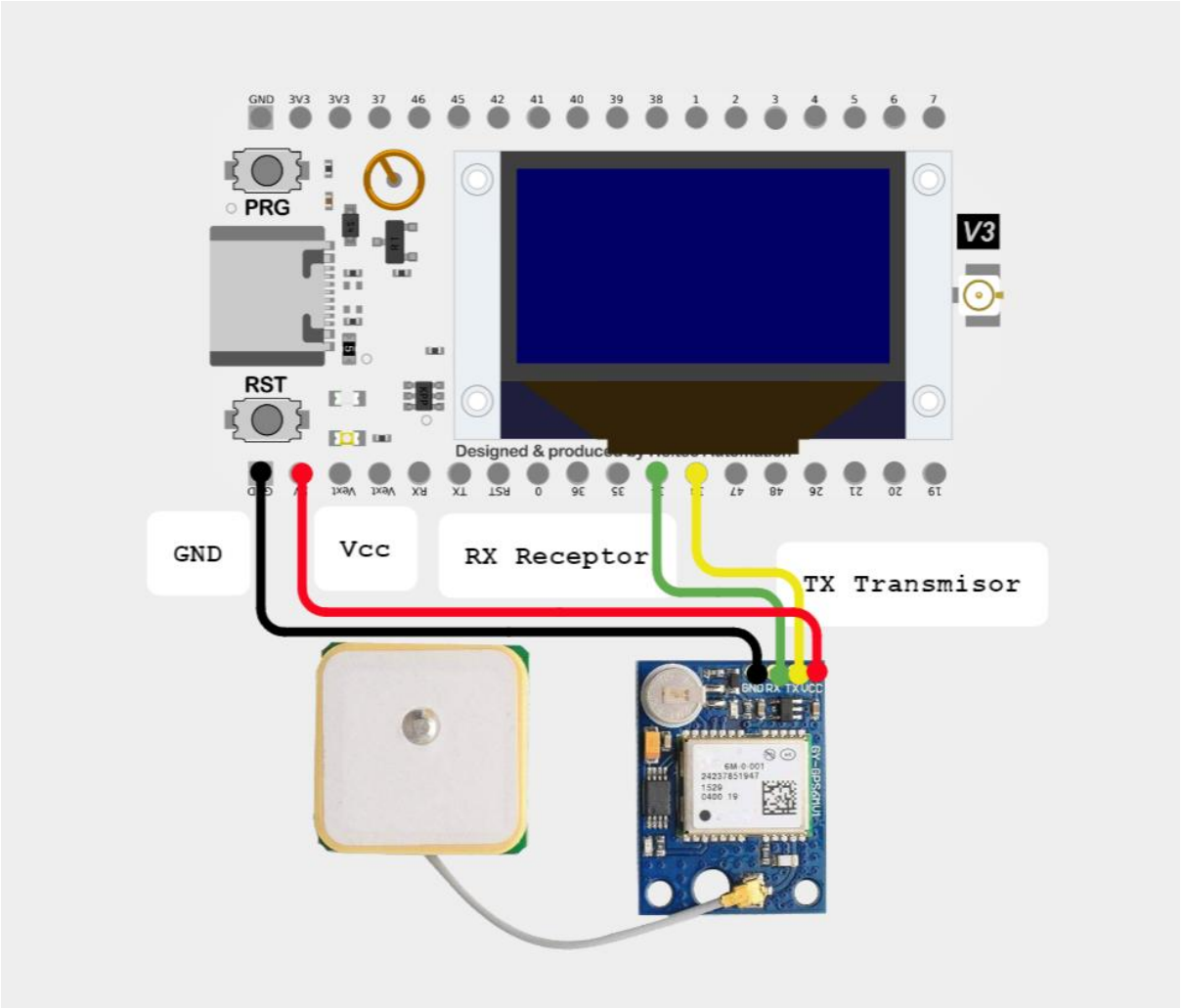
El módulo GPS cuenta con los siguientes pines principales:

- VCC: Pin de alimentación del módulo. Generalmente opera a 3.3 V o 5 V, dependiendo de la versión del módulo y del regulador integrado.
- GND: Pin de referencia a tierra.
- TX (Transmit): Pin de transmisión de datos seriales desde el módulo GPS hacia el microcontrolador.
- RX (Receive): Pin de recepción de datos seriales desde el microcontrolador hacia el módulo GPS.
- PPS (Pulse Per Second) (opcional): Pin que genera una señal de pulso por segundo para aplicaciones de sincronización de alta precisión (no indispensable para este proyecto).

La interconexión con la placa ESP32 LoRa Heltec es relativamente sencilla ya que se comunica directamente por sus pines de TX y RX y se alimenta directamente de la placa de la manera que se muestra la conexión de la **Figura 15**.

Figura 15

Diagrama de conexión del circuito de la placa embebida y el módulo GPS



Autoría propia

Alimentación con la Batería Lipo 11V 1100mAh

La batería LiPo (Lithium Polymer) de 11.1 V, configuración 3S, 35C y capacidad de 1100 mAh es utilizada como fuente principal de alimentación para el sistema electrónico embarcado en el dron, encargado del sensado y adquisición de datos. Este tipo de batería se caracteriza por su alta densidad energética, bajo peso y capacidad de entregar corrientes elevadas, lo que la hace adecuada para aplicaciones móviles y circuitos basados en varios tipos de sensores.

La batería LiPo proporciona la energía necesaria para alimentar los siguientes componentes del sistema de monitoreo:

- Placa ESP32 LoRa Heltec (nodo sensor).
- Sensor de suelo NPK 7 en 1.
- Módulo GPS u-blox NEO-6M.
- Módulo RS485 y demás periféricos electrónicos.

Dado que todos los dispositivos a excepción del sensor npk 7 en 1 operan a niveles de voltaje inferiores a los suministrados directamente por la batería, se requiere un sistema de regulación que permita adaptar el voltaje de forma segura y estable. Como se muestra en la **Figura 16** el sensor NPK se encuentra conectado directamente a la batería mientras que para la placa y demás componentes se utiliza un módulo regulador de voltaje con el fin de reducir el voltaje de la batería a un valor aceptable para la placa.

Para ello se emplea un módulo regulador de voltaje el cual lo configuraremos para que entregue únicamente 5v.

Módulo regulador de voltaje (12 V a 5 V / 3.3 V)

Para adecuar el voltaje de salida de la batería LiPo a los niveles requeridos por los distintos componentes electrónicos, se emplea un módulo regulador de voltaje DC-DC, el cual reduce el voltaje de entrada de aproximadamente 11.1–12 V a valores estables de 5 V o 3.3 V, según las necesidades del sistema.

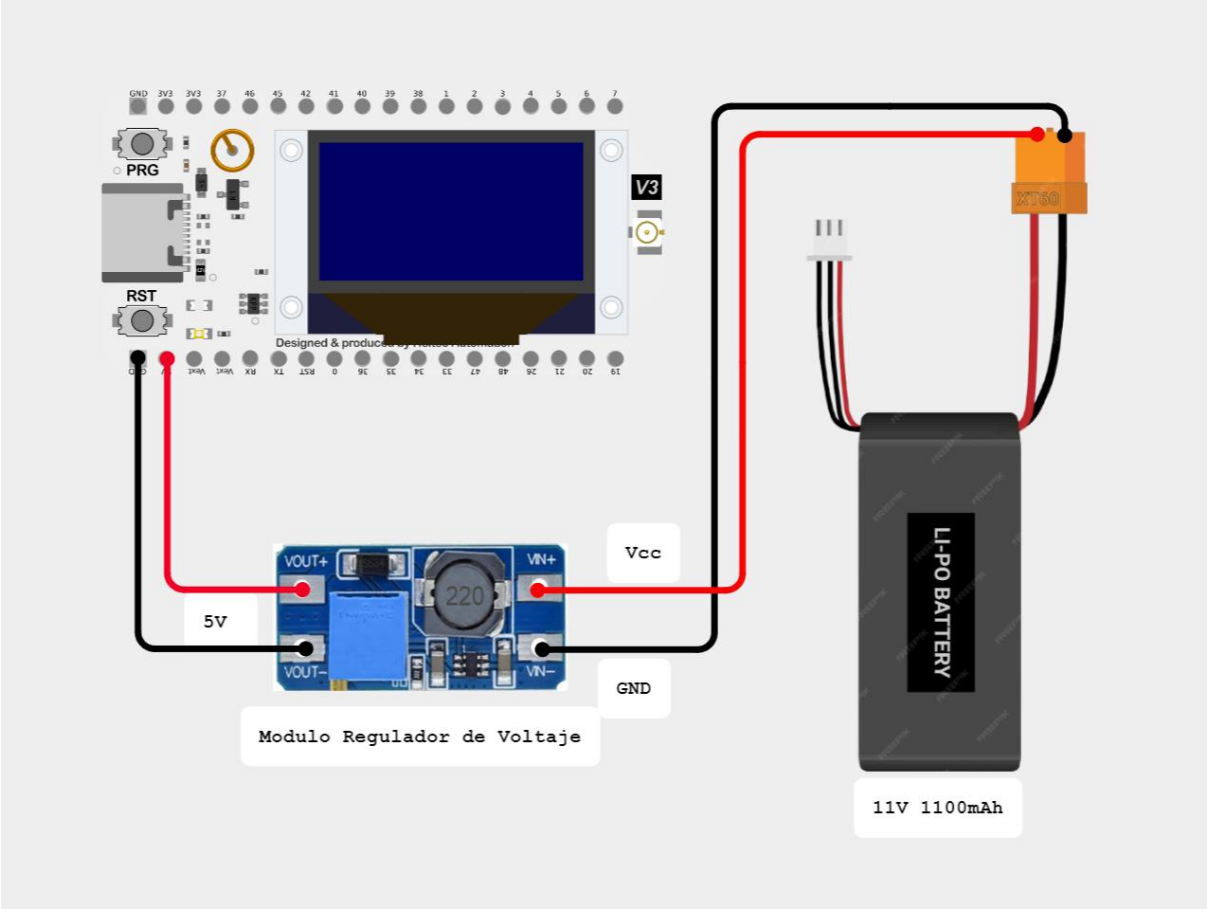
Este regulador cumple la función de:

- Proteger los componentes electrónicos frente a sobrevoltajes.

- Garantizar una alimentación estable durante toda la operación.
- Mejorar la eficiencia energética del sistema.
- Reducir pérdidas de energía en forma de calor.

Figura 16

Diagrama de conexión del circuito de la placa embebida, la batería y el módulo regulador de voltaje.



Autoría propia

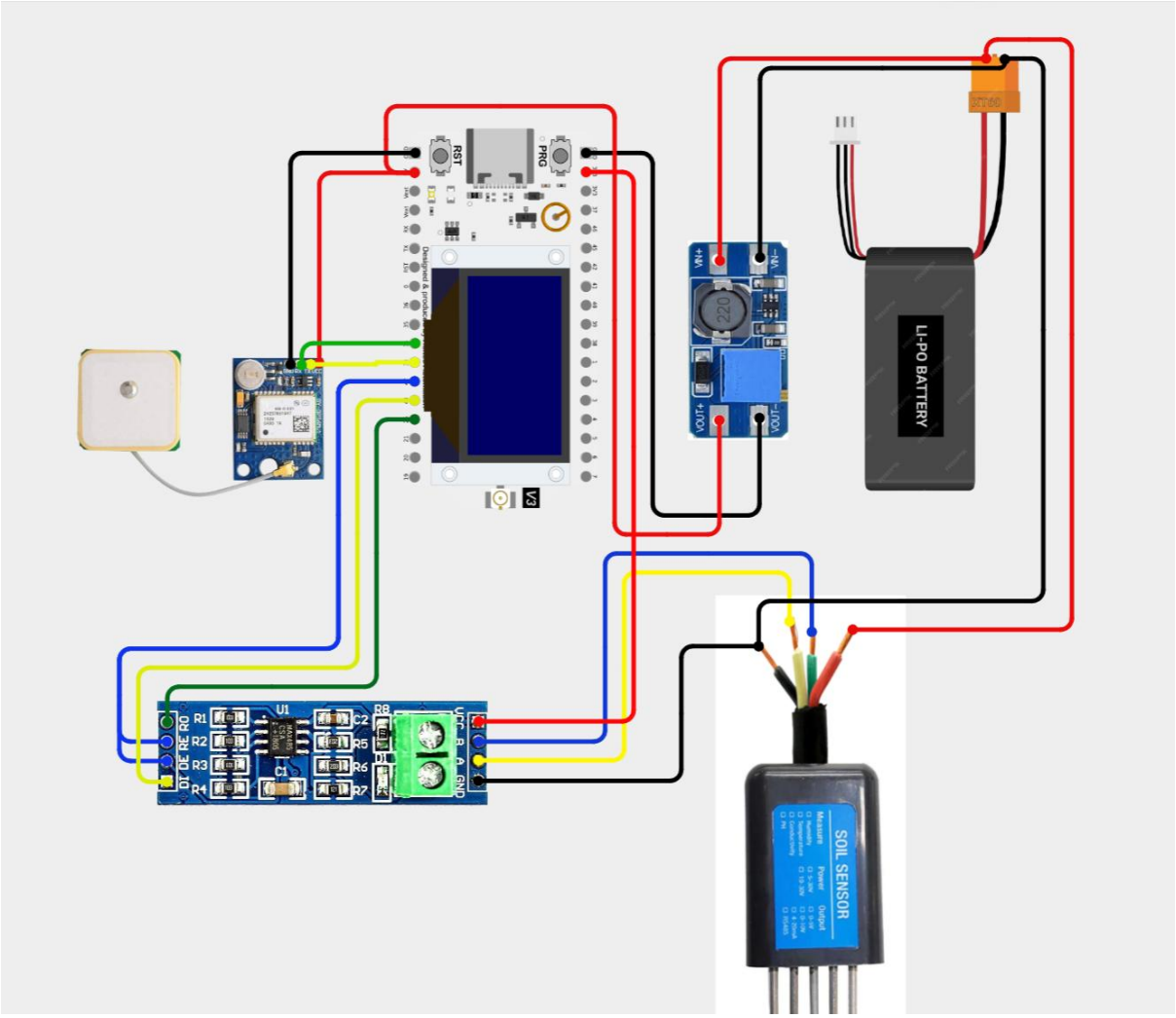
Una vez finalizado el armado del circuito y la configuración de los dispositivos electrónicos, el nodo sensor es integrado físicamente en el dron, conformando un sistema compacto y funcional para el monitoreo agrícola. El conjunto como se puede observar en la **Figura 17** está compuesto por la placa ESP32 LoRa Heltec, el sensor de suelo NPK 7 en 1, el

módulo GPS u-blox NEO-6M, el módulo RS485, el sistema de regulación de voltaje y la batería LiPo, los cuales se disponen de manera segura sobre la estructura del dron sin interferir con su estabilidad ni capacidad de vuelo.

El nodo sensor es fijado al dron mediante soportes adecuados que permiten amortiguar vibraciones y proteger los componentes electrónicos durante la operación en campo. El sensor de suelo se posiciona de forma que facilite el contacto con el terreno en los puntos de muestreo, mientras que el módulo GPS se ubica en una zona despejada para garantizar una correcta recepción de señal satelital. La placa ESP32 LoRa Heltec actúa como unidad central de control, gestionando la adquisición de datos, la georreferenciación y la transmisión de la información.

Figura 17

Integración de componentes en el nodo sensor.



Autoría propia

3.6.2.2.Diseño del Bloque de comunicación

El diseño del sistema de comunicación tiene como objetivo garantizar la transmisión confiable, eficiente y oportuna de los datos adquiridos por el nodo sensor embarcado en el dron hacia las capas superiores del sistema de monitoreo. Esta etapa resulta fundamental, ya que permite enlazar el proceso de adquisición de datos en campo con las fases de procesamiento, almacenamiento y visualización, asegurando la continuidad del flujo de información dentro de la arquitectura IoT propuesta.

Para el presente proyecto, el sistema de comunicación se estructura en dos niveles principales. En el primer nivel, se establece un enlace inalámbrico de largo alcance y bajo consumo energético entre el nodo sensor y el Coordinador mediante tecnología LoRa, lo que permite transmitir los datos recolectados durante las misiones de vuelo del dron sin depender de infraestructura de red local en la parcela. En el segundo nivel, el Coordinador actúa como intermediario entre el nodo sensor y el AP, reenviando la información hacia el servidor a través de una conexión Wi-Fi con acceso a Internet, utilizando el protocolo MQTT como mecanismo de mensajería.

Este diseño permite separar la comunicación de campo de la comunicación hacia la plataforma de servicios, mejorando la escalabilidad y flexibilidad del sistema. Además, el uso de protocolos ligeros y tecnologías ampliamente adoptadas en sistemas IoT garantiza una comunicación robusta, adecuada para entornos agrícolas y alineada con los requerimientos funcionales y de arquitectura definidos para el proyecto.

El diseño de la programación del nodo Coordinador se apoya en un conjunto de librerías que permiten implementar el flujo completo de recepción y reenvío de datos, las librerías usadas y su razón de ser se describen mediante la **Tabla 22**. La comunicación LoRa y el manejo de eventos de recepción se realizan mediante las librerías de Heltec, mientras que la pantalla OLED se controla a través de I2C para mostrar estados del sistema y valores resumidos. La conectividad Wi-Fi habilita el acceso a la red local y, sobre esta, el cliente MQTT publica la telemetría en el tópico correspondiente. Finalmente, la serialización en formato JSON estructura las variables recibidas para que puedan ser consumidas de forma compatible por el backend.

Tabla 23

Tabla de Librerías para la programación del nodo Coordinador

Librería	Tipo	Funcion
LoRaWan_APP.h	Heltec / LoRa	Inicialización del radio LoRa, configuración RX y gestión de eventos (RxDone).
Arduino.h	Core Arduino	Funciones base del microcontrolador (setup/loop, tipos, utilidades).
Wire.h	I2C	Comunicación I2C con periféricos (OLED).
HT_SSD1306Wire.h	Heltec / Display	Control de la pantalla OLED SSD1306 (mensajes y datos).
WiFi.h	ESP32	Conexión a red Wi-Fi, obtención de IP, verificación de estado.
PubSubClient.h	MQTT client	Conexión al broker, mantenimiento de sesión y publicación en tópicos.
ArduinoJson.h	JSON	Construcción y serialización del payload JSON antes de publicar.

Comunicación LoRa

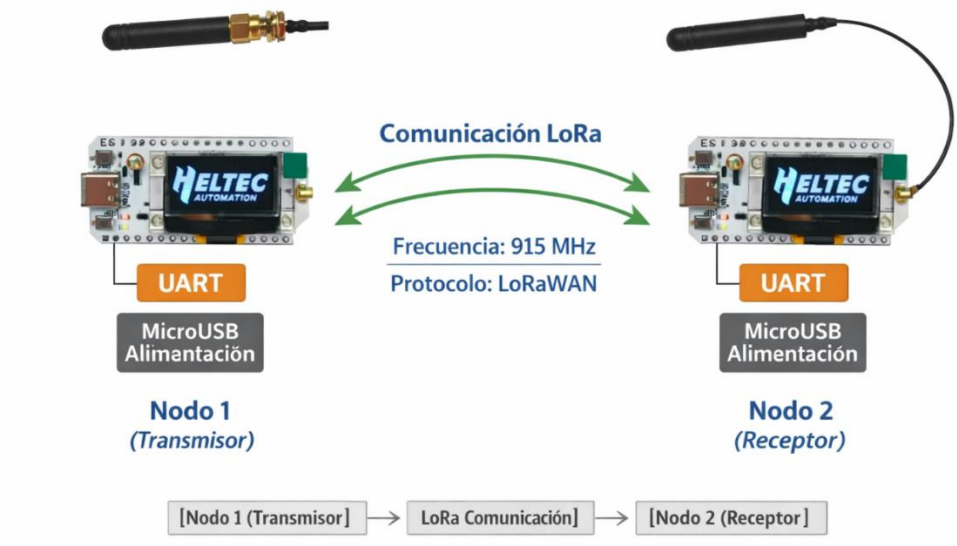
La comunicación entre el nodo sensor y el Coordinador del sistema de monitoreo de cultivos de maiz se realiza mediante la tecnología LoRa (Long Range), la cual es ampliamente utilizada en aplicaciones IoT debido a su largo alcance, bajo consumo energético y alta robustez

frente a interferencias. En el presente proyecto, esta tecnología permite transmitir los datos adquiridos por el dron desde la parcela de estudio hacia el Coordinador, garantizando una comunicación confiable en entornos rurales y agrícolas.

Las placas que se emplean para el presente proyecto son ESP32 LoRa Heltec representadas en la **Figura 18**, las cuales integran un transceptor LoRa basado en el chip Semtech SX1262. Este chip opera en bandas ISM sin licencia, para nuestra región (America del Sur) en 915 MHz, y es responsable de la modulación, demodulación y gestión del enlace inalámbrico. Para la transmisión y recepción de la señal LoRa se utilizan antenas externas sintonizadas para la banda de operación de (915 MHz). Estas antenas suelen presentar ganancias entre 2 dBi y 5 dBi, lo que permite mejorar el alcance efectivo del enlace.

Figura 18

Esquema de comunicación entre las placas embebidas ESP32 LoRa Heltec.



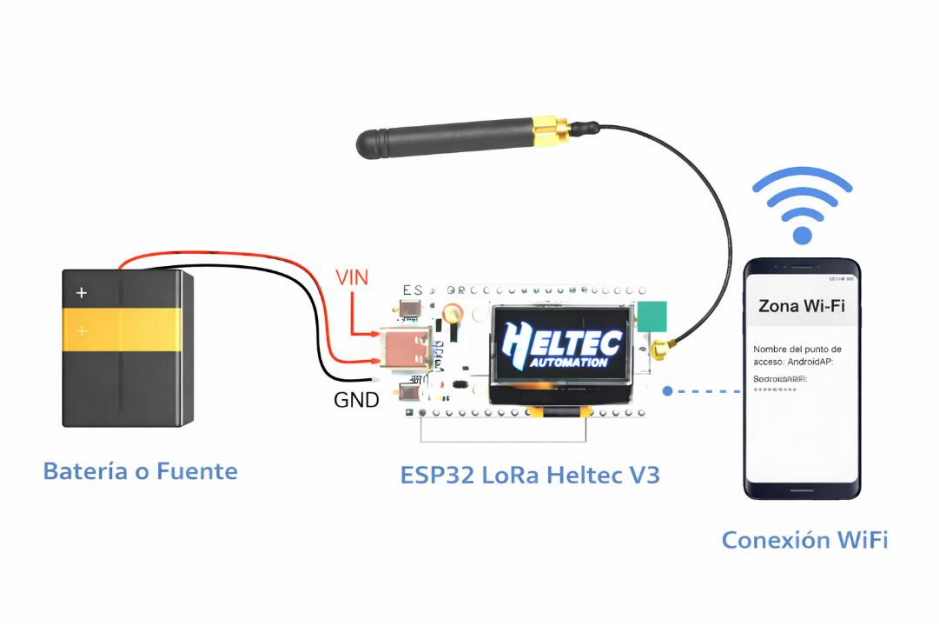
Autoría propia

Diagrama de conexión del nodo Coordinador

El nodo Coordinador cumple la función de intermediario entre el sistema de adquisición de datos en campo y la infraestructura de servicios del sistema IoT, siendo responsable de recibir la información transmitida por el nodo sensor mediante LoRa y reenviarla hacia el servidor a través de una conexión a Internet. En el presente proyecto, el Coordinador está basado en una placa ESP32 LoRa Heltec, lo que permite integrar tanto la comunicación LoRa como la conectividad Wi-Fi en un solo dispositivo, cabe mencionar que esta placa esta alimentada por una batería de 5v de forma independiente.

Figura 19

Diagrama de conexión del circuito del nodo Coordinador que incluye la placa embebida, la batería y la conexión WiFi.



Autoría propia

Conectividad Wi-Fi y acceso a Internet

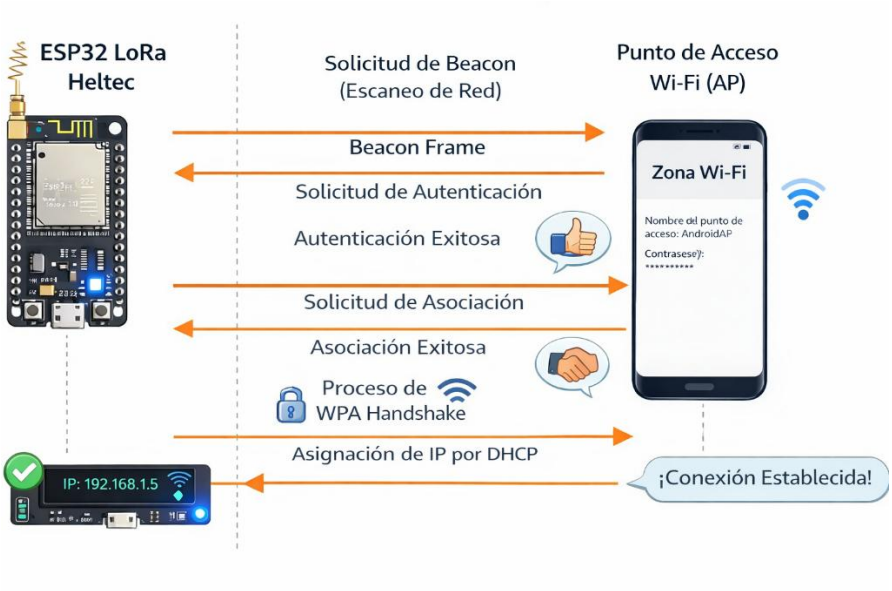
El nodo Coordinador utiliza el módulo Wi-Fi integrado en la ESP32 para conectarse a una red inalámbrica con acceso a Internet. En este caso se utiliza un dispositivo móvil en el cual establecemos una zona WiFi activa a la cual se pueda conectar la placa, además este dispositivo tendrá activados los datos móviles de manera que permita tener acceso a internet y los recursos necesarios para el sistema. Esta conexión permite al Coordinador actuar como punto de enlace entre el sistema de campo y los servicios alojados en el servidor, tales como el broker MQTT, la base de datos y las plataformas de visualización.

El proceso de conexión Wi-Fi se lleva a cabo mediante la configuración de las credenciales de la red (SSID y contraseña) en el firmware de la ESP32. Una vez establecida la conexión, el Coordinador mantiene un enlace activo con el servidor, garantizando el envío oportuno de los datos recibidos. La tecnología usada por la placa es Wi-Fi 802.11 la cual es compatible con los estándares: b/g/n (2.4 GHz), con velocidades de hasta 150 Mbps.

Para establecer una conexión entre la placa ESP32 LoRa Heltec y zona WiFi móvil que propociona conexión hacia la red WAN se establece un proceso de negociación entre estos dos dispositivos, este proceso se describe mediante el grafico de la **Figura 20.**

Figura 20

Esquema de interconexión a la red inalámbrica WiFi e internet por medio del Coordinador.



Autoría propia

3.6.2.3.Diseño del Bloque de Procesamiento de datos

El procesamiento de los datos constituye una etapa fundamental dentro del sistema de monitoreo propuesto, ya que permite transformar los datos crudos adquiridos en campo en información útil para la toma de decisiones. Esta fase se desarrolla una vez que la información ha sido transmitida correctamente desde el nodo sensor hacia el servidor a través del sistema de comunicación.

Comunicación entre el Coordinador y Broker MQTT

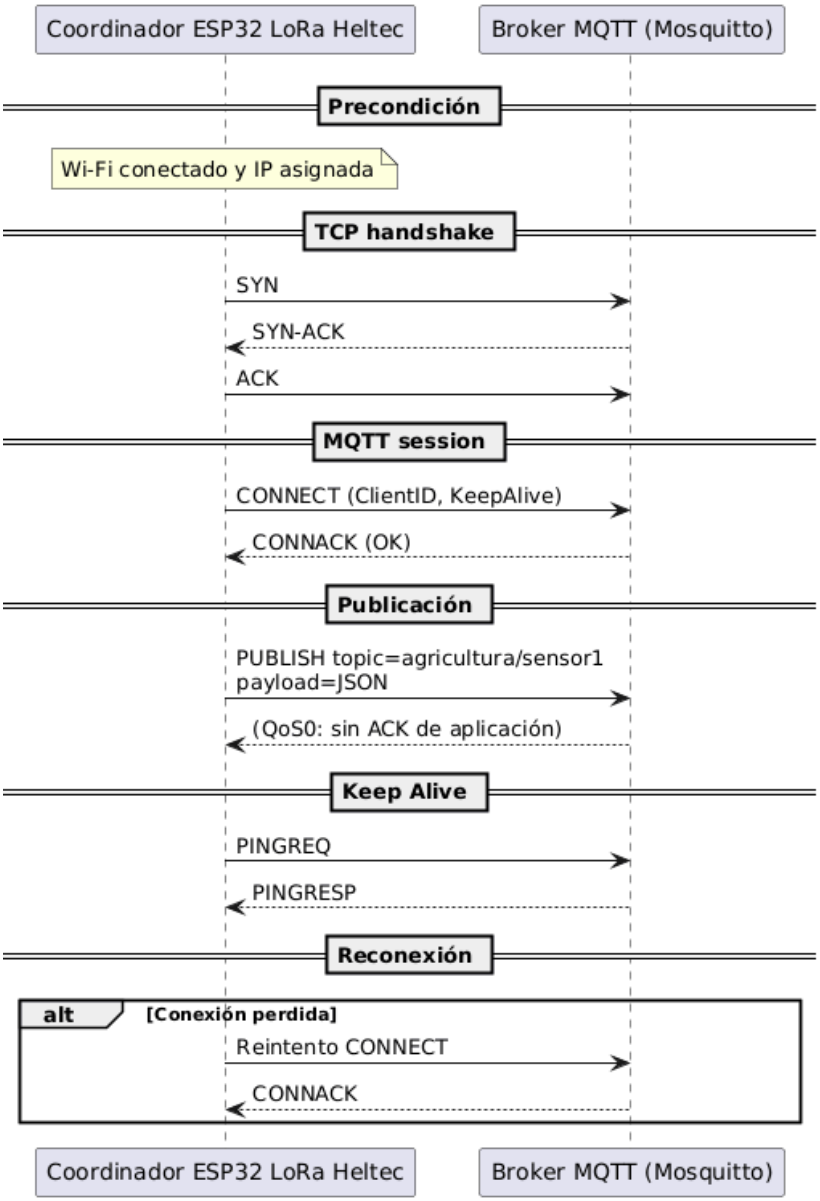
La recepción de los datos provenientes del nodo Coordinador se realiza mediante un broker MQTT Mosquitto, el cual se ejecuta como un contenedor dentro de la máquina virtual. Mosquitto implementa el protocolo MQTT, un mecanismo de mensajería ligero basado en el

modelo de publicación/suscripción, ampliamente utilizado en sistemas IoT debido a su bajo consumo de ancho de banda y su eficiencia en entornos con conectividad limitada.

El nodo Coordinador publica los datos adquiridos por el dron en tópicos MQTT previamente definidos, los cuales incluyen información de las variables medidas, la marca de tiempo y las coordenadas geográficas asociadas a cada lectura. Mosquitto se encarga de recibir estos mensajes y ponerlos a disposición de los servicios suscriptores, garantizando la entrega ordenada y confiable de la información hacia las siguientes etapas del sistema.

Figura 21

Diagrama de Secuencia MQTT entre Coordinador ESP32 y Broker MQTT Mosquitto



Almacenamiento de datos en InfluxDB

Una vez recibidos los mensajes MQTT, los datos son procesados y almacenados en InfluxDB, una base de datos orientada a series temporales, especialmente diseñada para manejar información proveniente de sensores IoT, este proceso lo describe de manera más detallada en el primer bloque de la **Figura 22**. InfluxDB se ejecuta también como un

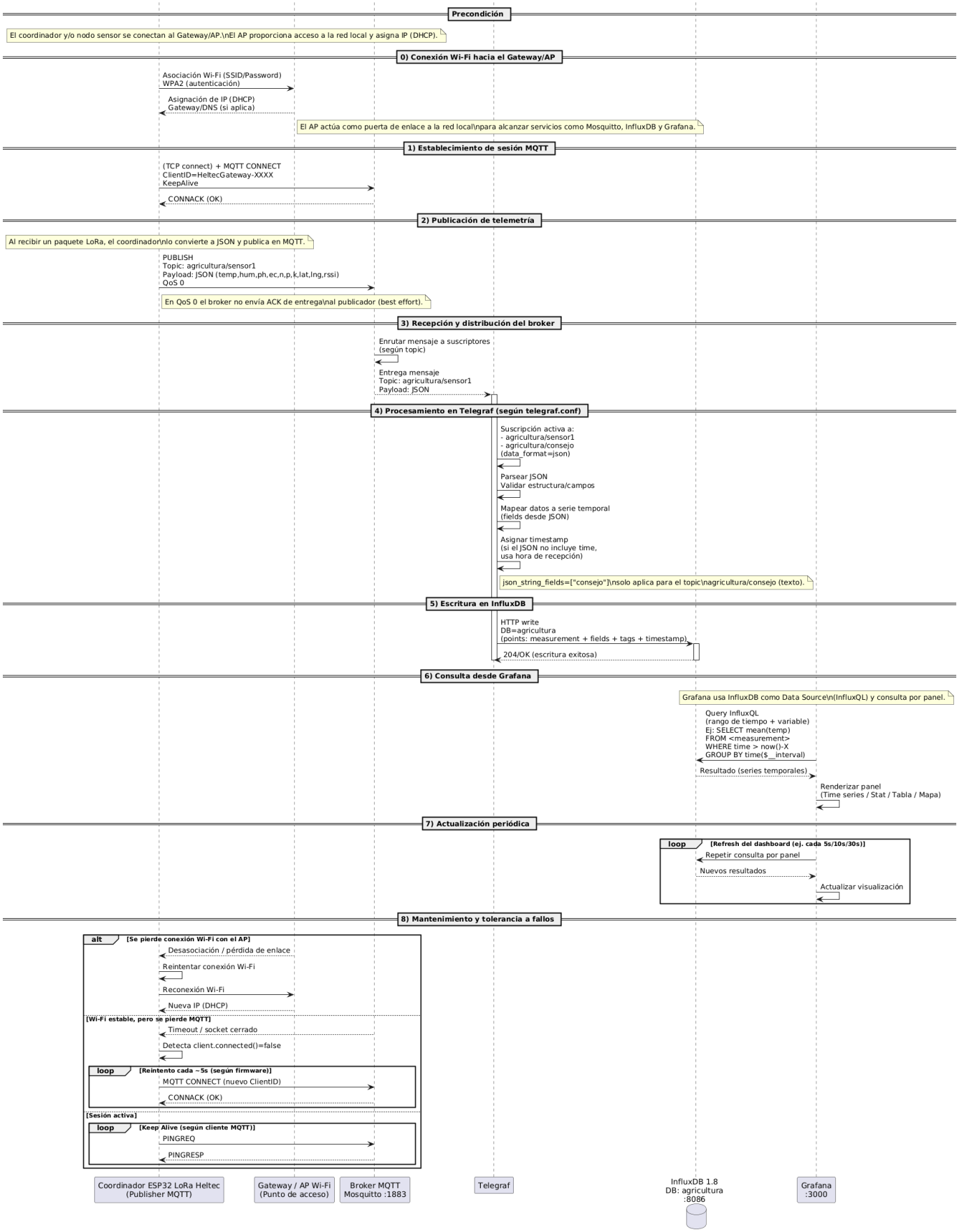
contenedor Docker dentro de la máquina virtual, lo que facilita su integración con el resto de los servicios del sistema.

En esta base de datos, cada registro se almacena junto con su correspondiente marca de tiempo, permitiendo realizar consultas eficientes y análisis históricos de las variables agrícolas monitoreadas. El uso de InfluxDB posibilita identificar patrones, tendencias y variaciones espaciales del suelo a lo largo del tiempo, lo cual resulta fundamental para el análisis del estado del cultivo de maíz.

Finalmente, el diagrama de secuencia de la **Figura 22** describe el bloque de procesamiento donde se puede observar la transmisión de los datos y el camino que sigue de forma secuencial desde que el Nodo Coordinador envia los datos hacia el Broker MQTT hasta que Grafana consulta los datos a InfluxDB. Al extraer las variables del formato Json que recibe Telegraf brinda la posibilidad de consultar los datos de manera limpia y correcta ya que estos datos ya vienen verificados y respectivamente validados en procesos anteriores desde el nodo sensor aplicando los Procesos ETL como se indica en la **Figura 9.**

Figura 22

Diagrama de Secuencia del Bloque de Procesamiento

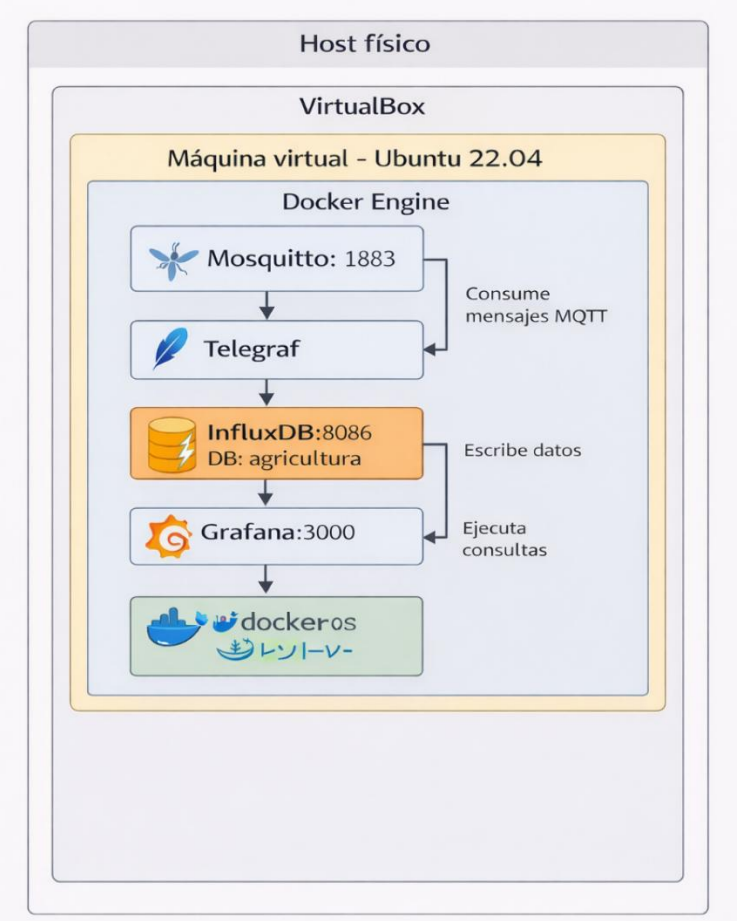


La utilización de una máquina virtual con Ubuntu 22.04 proporciona un entorno estable, seguro y ampliamente soportado para el despliegue de los servicios del sistema. Por su parte, el uso de Docker permite gestionar de manera eficiente los distintos componentes del backend, facilitando su despliegue, actualización y mantenimiento.

Esta arquitectura basada en contenedores mejora la escalabilidad, portabilidad y confiabilidad del sistema de monitoreo agrícola, asegurando que los servicios de comunicación, almacenamiento y visualización operen de forma coordinada y continua.

Figura 23

Diagrama de arquitectura del Docker usando Virtual Box y Ubuntu 22.04



3.6.2.4.Diseño del Bloque de Visualización

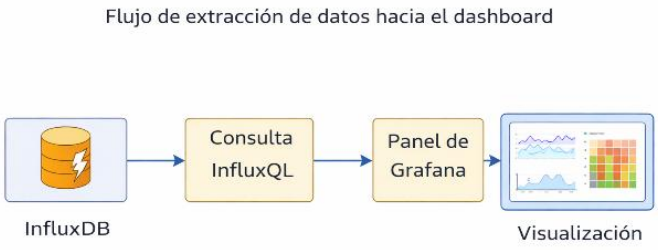
La visualización de los valores obtenidos por medio de los sensores se realiza con Grafana, que actúa como cliente de consulta sobre la base de datos InfluxDB. Los datos que llegan desde el Coordinador a través de MQTT son consumidos por Telegraf, transformados a series temporales y almacenados en InfluxDB dentro de la base agricultura. A partir de este almacenamiento, Grafana se conecta como data source y ejecuta consultas para extraer únicamente las variables requeridas en cada panel del dashboard.

Extracción de Datos

La extracción de datos hacia el dashboard no implica copiar información a otra base, sino consultar dinámicamente los registros almacenados en InfluxDB según filtros definidos en cada panel, por ejemplo: variable (temperatura, humedad, pH, EC, NPK), rango de tiempo, y en algunos casos coordenadas geográficas. De esta manera, cada gráfica se construye con la información específica que necesita representar, manteniendo coherencia con el historial de mediciones.

Figura 24

Descripción de la extracción de datos hacia el dashboard



Diseño del Dashboard

Para el diseño del dashboard se seleccionan distintos tipos de visualización en función de la variable monitoreada y del tipo de análisis requerido. Las variables como temperatura, humedad, pH y EC se representan principalmente con gráficas de serie temporal, ya que permiten visualizar su evolución durante la misión. Por su parte, los nutrientes (N, P y K) pueden mostrarse en una gráfica comparativa o en paneles separados, mientras que los valores de resumen se presentan mediante paneles tipo stat o gauge para facilitar una lectura rápida.

Área de distribución de Variables

En Grafana, la configuración de cada panel se realiza desde el editor de gráficos, donde se define la consulta a InfluxDB, el tipo de visualización y las opciones de presentación. Entre las configuraciones más importantes se encuentran el rango de tiempo, unidades de medida, leyenda, escala de ejes, colores, agrupación temporal y funciones de agregación, así como filtros por variable. De esta manera, cada gráfica se ajusta al comportamiento del dato y a la forma en que se desea interpretar dentro del dashboard.

Figura 25

Maqueta de distribución de graficas por variable en la ventana del dashboard



Área de Mapas de Calor

El diseño del mapa de calor parte de la selección de una variable de interés (por ejemplo, humedad, pH o EC) y de la extracción de los datos georreferenciados almacenados en InfluxDB. Para ello, el panel de visualización consulta los campos correspondientes a la variable seleccionada junto con las coordenadas latitud y longitud, y la marca de tiempo de cada medición. Con esta información, cada registro se interpreta como un punto de muestreo ubicado espacialmente dentro de la parcela.

A partir de estos datos, en Grafana se configura un panel de tipo geoespacial (mapa) en el que se asignan las coordenadas lat y lng como referencia de ubicación, mientras que el valor de la variable se utiliza para definir la intensidad o color de visualización. De esta manera, el sistema representa visualmente la distribución espacial de las mediciones, permitiendo identificar zonas con mayor o menor valor de la variable analizada. Para mejorar la interpretación del mapa, se ajustan parámetros como el rango de colores, la escala de valores, el nivel de zoom, el tamaño de los puntos o la densidad de la capa de calor, así como filtros por intervalo de tiempo o misión.

Finalmente, el mapa de calor se valida verificando que la ubicación de los puntos corresponda a la trayectoria o zona de muestreo registrada por el GPS, y que la variación de colores represente coherentemente los valores medidos. Esta visualización complementa las gráficas temporales del dashboard, ya que permite analizar no solo cómo varía una variable en el tiempo, sino también cómo se distribuye espacialmente dentro del área monitoreada.

Figura 26

Maqueta del mapa de calor en base a los datos de posicionamiento ofrecidas por el gps



Análisis Generado con IA Generativa

El módulo de análisis generado con IA generativa se diseña como una capa de interpretación que se integra al flujo de datos del sistema. Para su implementación, primero se define una ventana de análisis y las variables que se utilizarán como entrada (humedad, temperatura, pH, EC y NPK), las cuales se extraen desde InfluxDB y se organizan en un resumen compacto (últimos valores, promedios y alertas por rangos) para evitar enviar lecturas innecesarias. Con esta información se estructura un prompt que incorpora el contexto del cultivo de maíz y especifica el formato de salida esperado, de manera que la respuesta sea breve, consistente y basada únicamente en los datos proporcionados. La salida generada por la API se normaliza como texto y se integra al sistema publicándola en un tópico dedicado (agricultura/consejo), lo que permite que Telegraf la almacene en InfluxDB como campo de texto y que posteriormente sea visualizada en Grafana mediante un panel específico de recomendaciones.

El prompt utilizado para el análisis es el siguiente:

```
prompt = f"""

Actúa como un ingeniero agrónomo experto en cultivo de MAÍZ (Zea mays).

Analiza estos datos de suelo en tiempo real:

- Humedad: {data.get('hum', 0)}%

- Temperatura: {data.get('temp', 0)}°C

- pH: {data.get('ph', 0)}

- Conductividad (EC): {data.get('ec', 0)} us/cm

- Nitrógeno (N): {data.get('n', 0)} mg/kg
```

- Fósforo (P): {data.get('p', 0)} mg/kg

- Potasio (K): {data.get('k', 0)} mg/kg

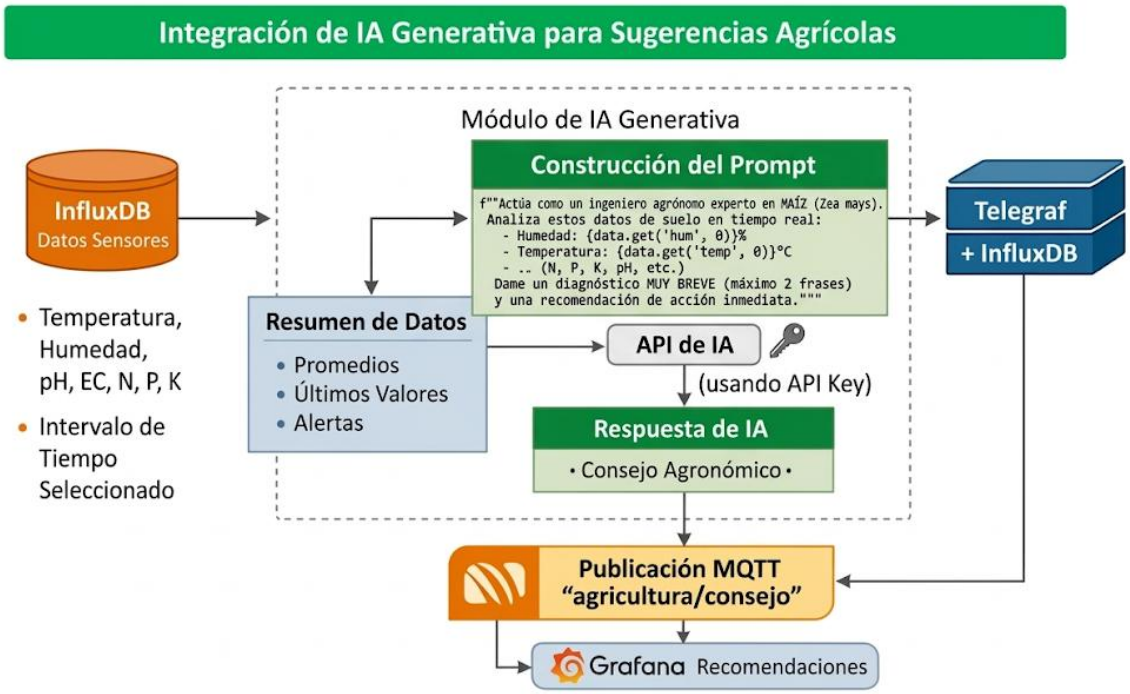
Dame un diagnóstico MUY BREVE (máximo 2 frases) y una recomendación de acción inmediata (riego o fertilización) para optimizar el crecimiento del maíz.

No saludes, ve directo al grano.

"""

Figura 27

Diseño del módulo de análisis generado con IA generativa.



3.7.Implementación del Hardware

Para la presente sección se consideran de manera integral todos los elementos de hardware utilizados en el desarrollo del sistema de monitoreo de cultivos de maíz propuesto. En este apartado se describe de forma detallada el proceso de implementación, abarcando desde el armado del circuito y el montaje de los componentes físicos hasta la configuración y puesta en funcionamiento de las herramientas involucradas en el proyecto.

3.7.1.1.Implementación del Nodo Sensor

En la sección de implementación del nodo sensor se describe la integración física y funcional de todos los elementos que conforman el sistema embarcado, incluyendo las placas de control, módulos de comunicación, sensores y el dron como plataforma de operación. En esta etapa se detalla cómo cada componente se acopla dentro del conjunto final para garantizar la adquisición correcta de las variables de monitoreo, su vinculación con la georreferenciación y la transmisión de la información hacia el resto de la arquitectura. De esta manera, el nodo sensor se presenta como una solución integral, en la que el montaje, las conexiones, la alimentación eléctrica y la disposición de los módulos se articulan para obtener un sistema operativo y coherente con el diseño desarrollado a lo largo del proyecto.

En la **Figura 28** se observa el drone DJI Inspire 1 siendo el drone que se seleccionó por sus características como plataforma de monitoreo en el sistema. Entre sus prestaciones destacan un tiempo de vuelo aproximado de 18 minutos, resistencia al viento de hasta 10 m/s, y una buena precisión de vuelo en modo GPS (hovering), lo que lo hace adecuado para misiones de monitoreo en exteriores. Además, ofrece una plataforma robusta y estable para transportar el conjunto embarcado (sensores + electrónica de adquisición/comunicación), manteniendo un vuelo controlado y repetible durante el recorrido sobre el cultivo.

Figura 28

Dron DJI Inspire 1



Los soportes impresos en 3D que se muestran en la **Figura 29** se implementaron con el objetivo de integrar de manera segura y ordenada los componentes del nodo sensor sobre la plataforma del dron, garantizando estabilidad mecánica durante el vuelo y facilitando el montaje del sistema. Estas piezas incluyen elementos de sujeción y fijación para placas electrónicas, sensores y módulos auxiliares, además de una estructura tipo carcasa/compartimento que permite proteger y organizar los componentes internos. En el diseño se incorporaron superficies de apoyo, ranuras y puntos de anclaje (orificios para tornillos o amarres), lo que permite una instalación más limpia y reduce el movimiento relativo de los dispositivos durante vibraciones, maniobras o cambios de orientación.

3.7.1.2.Implementación de la placa embebida y módulos en el soporte impreso

La **Figura 29** muestra parte del montaje físico del nodo sensor dentro del soporte impreso en 3D, diseñado para alojar y fijar los componentes electrónicos de forma compacta y estable. En el compartimento inferior se ubica la batería LiPo 11.1 V – 1100 mAh, la cual suministra la energía al sistema. Esta alimentación se conecta al módulo reductor de voltaje

(DC–DC), encargado de entregar un voltaje regulado para la electrónica, evitando variaciones que puedan afectar el funcionamiento durante la operación. En la parte superior del soporte se instala la placa Heltec ESP32 LoRa 32 V3, que actúa como unidad principal de control y comunicación, recibiendo los datos del sensor y transmitiéndolos mediante LoRa. Junto a la placa se integra el módulo GPS Neo-6M, conectado por interfaz UART, utilizado para registrar latitud y longitud y asociarlas a cada medición obtenida. Finalmente, el módulo RS485 se incorpora como interfaz de comunicación Modbus hacia el sensor de suelo, permitiendo la lectura de variables como humedad, temperatura, pH, conductividad y NPK. La disposición interna del soporte facilita el orden del cableado, la sujeción de los módulos y la protección del conjunto, garantizando una instalación más segura para su posterior acoplamiento al dron.

Figura 29

Piezas de soporte para la colocación de placas y sensores en el dron

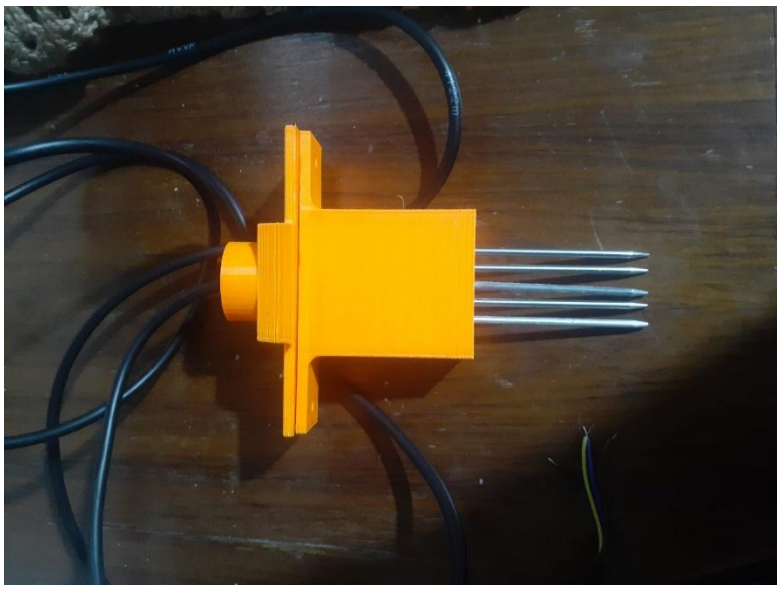


3.7.1.3.Implementación del Sensor NPK en el Drone

En la **Figura 30** se observa el proceso de integración del sensor de suelo NPK mediante un soporte impreso en 3D, diseñado para asegurar el posicionamiento y la fijación mecánica de la sonda durante la operación. En primer lugar, el sensor se inserta en el alojamiento del soporte, dejando expuestas las varillas metálicas de medición para garantizar el contacto directo con el suelo, mientras que el cuerpo del sensor y el punto de salida del cableado quedan protegidos por la estructura. Posteriormente, el conjunto (sensor + soporte) se acopla a la estructura del dron mediante los puntos de anclaje del soporte, logrando una instalación estable y alineada con el área de muestreo. Esta configuración permite transportar la sonda de forma segura, reducir movimientos por vibración y mantener una orientación consistente en cada toma de datos, facilitando la adquisición de mediciones de N, P y K durante las misiones de monitoreo.

Figura 30

Piezas de soporte para la colocación del sensor NPK en el dron



Al final al integrar todas las piezas adecuadamente en el drone obtendremos el nodo sensor completo, integrando todas sus funcionalidades, desde los sensores para la toma de datos hasta la placa de procesamiento con todas sus características de comunicación y procesamiento, además de la georreferenciación por parte del GPS y la correcta gestión energética de la batería mediante los módulos.

Figura 31

Embarque de los soportes y piezas en el dron



3.7.1.4.Implementación del Nodo Coordinador

En la sección de implementación del nodo Coordinador se presenta el ensamblaje físico del conjunto encargado de recibir y reenviar los datos recopilados desde el nodo sensor del sistema hacia la infraestructura de comunicación y almacenamiento. Este nodo se basa en la placa Heltec ESP32 LoRa 32 V3, que actúa como intermediario entre el enlace LoRa proveniente del nodo sensor y la red Wi-Fi disponible en la estación base. En esta etapa se

describe la integración de los módulos y elementos empleados, las conexiones realizadas y la forma en que se garantiza su operación continua en campo. El Coordinador permanece en modo de escucha para recibir los paquetes enviados por LoRa, valida su estructura y posteriormente los convierte a formato JSON para publicarlos mediante MQTT hacia el broker (Mosquitto), permitiendo su consumo por Telegraf y su almacenamiento en InfluxDB. La **Figura 32** muestra el nodo Coordinador armado con sus equipos físicos y su disposición final, montado sobre un soporte diseñado en base a una maqueta que fue impresa en 3D, junto a la placa también se visualiza una batería que será la que alimente al nodo durante su tiempo de uso y además un módulo regulador de voltaje para mantener el uso adecuado de la energía de la batería, evidenciando la integración práctica del componente dentro de la arquitectura IoT del proyecto.

Figura 32

Implementación del nodo Coordinador



3.8. Implementación de Software

En la sección de Implementación de Software se describe la integración lógica de los componentes que permiten el funcionamiento completo del sistema, abarcando desde la programación de los nodos, la configuración de los servicios del backend y el diseño del bloque de visualización. En esta etapa se documentan las partes más relevantes del código del nodo sensor y del nodo Coordinador, el flujo de comunicación y procesamiento de datos, así como la puesta en marcha de la infraestructura basada en Docker (Mosquitto, Telegraf, InfluxDB y Grafana). Finalmente, se detalla la configuración del dashboard y los mecanismos de consulta, almacenamiento y presentación de la información, garantizando trazabilidad entre los datos adquiridos en campo y su representación en la interfaz de usuario.

3.8.1.1.Adquisición de datos del nodo sensor

La adquisición de datos provenientes del sensor se realiza mediante el protocolo maestro-esclavo Modbus RTU sobre RS485. En este sentido la estructura del proceso de adquisición de datos se basa en 3 fases:

1. **Control de Flujo**

Debido a que el bus RS485 es Half-Duplex (no puede hablar y escuchar al mismo tiempo), el código define dos funciones de interrupción (preTransmission y postTransmission). Antes de que el ESP32 envíe la petición al sensor, el pin de control (DE/RE) se pone en estado ALTO (HIGH) para habilitar la transmisión. Tal y como se muestra en el código de la **Figura 33** posteriormente inmediatamente después de enviar el comando, el pin cambia a estado BAJO (LOW) para "escuchar" la respuesta del sensor.

Figura 33

Código encargado del control de flujo de datos del módulo de comunicación RS485

```
// Control de Flujo RS485
void preTransmission() { digitalWrite(MAX485_DE_RE, HIGH); }
void postTransmission() { digitalWrite(MAX485_DE_RE, LOW); }
```

2. Petición de Registros

En la **Figura 34** se describe el código en el cual, para obtener los datos, el ESP32 no lee un flujo continuo, sino que solicita bloques de memoria específicos dentro del sensor. Con ello se solicita la información de todas las variables sensadas que en este caso son 7 correspondiendo a cada una de las variables tomadas por el sensor.

Figura 34

Petición de datos al sensor NPK

```
// Solicitar 7 registros desde la dirección 0x0000
uint8_t result = node.readHoldingRegisters(0x0000, 7);
```

3. Validación y Escalado de Datos

Una vez que el sensor responde, el código verifica que la lectura haya sido exitosa. Si la respuesta es correcta, los datos se almacenan temporalmente en un Buffer

Dado que el protocolo Modbus transmite únicamente números enteros para evitar errores computacionales, los valores que contienen decimales (Humedad, Temperatura y pH) son enviados por el sensor multiplicados por 10. Por lo tanto, el código aplica un factor de corrección (* 0.1) al momento de guardarlos en la estructura final para restaurar su valor real.

Figura 35

Validación y transformación de variables sensadas.

```
if (result == node.ku8MBSuccess) {
    myData.hum  = node.getResponseBuffer(0) * 0.1;
    myData.temp = node.getResponseBuffer(1) * 0.1;
    myData.ec   = node.getResponseBuffer(2);
    myData.ph   = node.getResponseBuffer(3) * 0.1;
    myData.n    = node.getResponseBuffer(4);
    myData.p    = node.getResponseBuffer(5);
    myData.k    = node.getResponseBuffer(6);
} else {
    Serial.println("⚠️ Error lectura Modbus (Revisar Cables)");
}
```

3.8.1.2.Implementación del Bloque de Comunicación

En el bloque de comunicación veremos la implementación del enlace de transmisión de datos entre el nodo sensor y la infraestructura de almacenamiento del sistema. En esta arquitectura, el nodo sensor adquiere las variables del suelo (humedad, temperatura, pH, EC y NPK) y las coordenadas GPS, para posteriormente transmitirlas de forma inalámbrica mediante LoRa hacia un nodo Coordinador. El Coordinador recibe los paquetes, valida su integridad básica y los reenvía hacia la red mediante Wi-Fi, publicando la información en un tópico MQTT en formato JSON. Este enfoque permite separar la adquisición de datos en campo de la capa de red y servicios, mejorando la portabilidad del nodo sensor y facilitando la integración con el backend.

Establecimiento de conexión entre el Nodo sensor y el Coordinador

La comunicación entre las dos placas ESP32 LoRa Heltec se da mediante el código mostrado en la **Figura 36** en este código se muestra las líneas en donde se define los parámetros

de enlace para ambas placas. Para que exista comunicación LoRa P2P es necesario que ambos dispositivos compartan la misma configuración de radio (frecuencia, ancho de banda, factor de expansión, tasa de codificación y preámbulo). En esta implementación se utilizó 915 MHz con SF7, lo cual proporciona un equilibrio entre alcance y tiempo de transmisión, permitiendo el envío periódico de telemetría desde el nodo sensor hacia el Coordinador.

Figura 36

Parámetros de comunicación LoRa

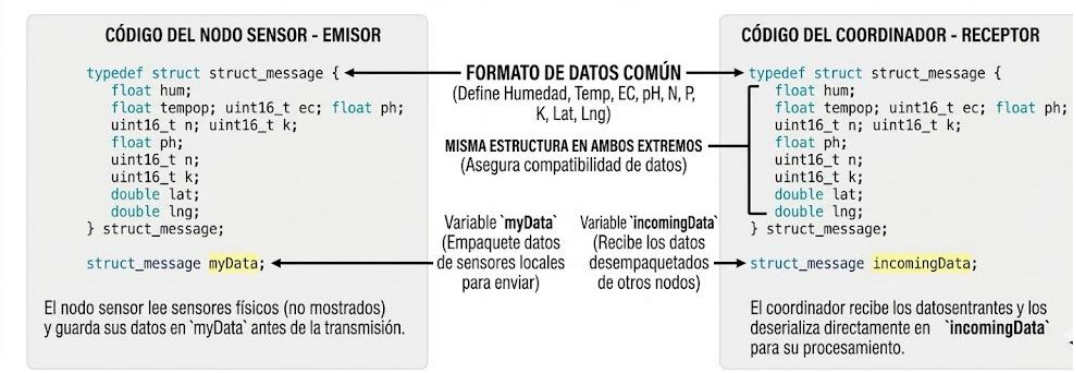
```
#define RF_FREQUENCY 915000000
#define TX_OUTPUT_POWER 14
#define LORA_BANDWIDTH 0
#define LORA_SPREADING_FACTOR 7
#define LORA_CODINGRATE 1
#define LORA_PREAMBLE_LENGTH 8
#define LORA_SYMBOL_TIMEOUT 0
#define LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON false
#define LORA_IQ_INVERSION_ON false
#define RX_TIMEOUT_VALUE 1000
#define BUFFER_SIZE 64
```

Empaquetado y estructura de datos

Seguido a esto otro parámetro importante es la estructura del paquete, es otra característica en la que ambas placas deben compartir la misma configuración. La transmisión LoRa se realiza en formato binario, enviando directamente la estructura de datos. Esta estructura contiene las variables medidas y las coordenadas GPS, permitiendo un paquete compacto y eficiente para LoRa. Para garantizar la correcta reconstrucción en el Coordinador, la estructura definida en el receptor debe ser idéntica a la del transmisor es decir debe tener el mismo orden y tipo de datos, tal como se muestra en la **Figura 37**.

Figura 37

Estructura de datos sensado s



Las lecturas de los valores sensado s se realizan mediante intervalos de tiempo. El nodo sensor ejecuta un ciclo periódico de adquisición definido por TIEMPO_ENTRE_LECTURAS. En cada iteración realiza la lectura Modbus del sensor NPK, incorpora la ubicación GPS (si está disponible) y empaqueta los valores en la estructura. Seguido, los datos se transmiten hacia el Coordinador y el evento OnTxDone indica el envío exitoso y habilita el siguiente ciclo, evitando transmisiones concurrentes.

Serialización y envió de datos

Una vez que la variable myData se llena con las lecturas de los sensores, se invoca a la función de transmisión de la biblioteca nativa del microcontrolador (Radio.Send). Para que el transceptor LoRa pueda enviar esta estructura compleja.

Figura 38

Señalización y envío de datos por LoRa hacia el nodo Coordinador.

```
// ENVIAR POR LORA
Radio.Send( (uint8_t *)&myData, sizeof(myData) );
lora_idle = false;
```

Recepción de datos en el nodo Coordinador

El transceptor de radio del Gateway se configura en modo de escucha continua. Al interceptar un paquete válido, el hardware dispara la interrupción, entregando un arreglo de bytes crudos que vendría siendo el payload.

En la **Figura 39** se muestra el código para reconstruir la información, el código primero realiza una validación de seguridad en donde se comprueba que el tamaño del paquete recibido coincida exactamente con el tamaño esperado de la estructura de datos. Si la validación es exitosa, se utiliza una función para transferir el bloque de bytes directamente a la estructura en la memoria RAM, decodificando instantáneamente todas las variables.

Figura 39

Recepción y reconstrucción de datos

```
void OnRxDone( uint8_t *payload, uint16_t size, int16_t rssi, int8_t snr )
{
    if (size == sizeof(incomingData)) {
        memcpy(&incomingData, payload, size);
```

Comunicación del Coordinador hacia el AP y Broker MQTT

Una vez que la comunicación punto a punto mediante LoRa entrega los datos al nodo Coordinador, el sistema continúa con la transmisión hacia la infraestructura de red. En esta etapa, el Coordinador actúa como intermediario entre el enlace LoRa y la red Wi-Fi disponible en la estación base, permitiendo publicar los datos en un broker MQTT.

En la **Figura 40** se observa el código mediante el cual se realiza el establecimiento de conexión entre el Coordinador y la red WiFi para lo cual se utiliza la librería “WiFi.h” y

también se establecen los datos de conexión como el SSID, la contraseña, la dirección ip del servidor, el puerto de comunicación y el topic mqtt donde se van a publicar los datos.

Figura 40

Parámetros para la conexión WiFi de la placa hacia el AP

```
11  #include <WiFi.h>
12  #include <PubSubClient.h>
13  #include <ArduinoJson.h>
14
15  const char* ssid        = "Galaxy S23 Ultra 6276";
16  const char* password    = "admin123";
17  const char* mqtt_server = "10.234.199.108";
18  const int   mqtt_port   = 1883;
19  const char* mqtt_topic  = "agricultura/sensor1";
```

Una vez establecida la conexión WiFi con el AP se tendrá salida hacia internet de modo que se podrá enviar los datos hacia el bróker MQTT. Este proceso se detalla en la **Figura 41** en donde se muestran las líneas de código donde en primera instancia se indica que si hay una sesión establecida con el broker se procede a transformar los datos en binario obtenidos del nodo sensor a formato JSON y posteriormente son publicados en el broker.

Figura 41

Transformación de datos de binario a Json en el Coordinador

```
182
183     if (client.connected()) {
184
185         StaticJsonDocument<300> doc;
186         doc["lat"] = incomingData.lat;
187         doc["lng"] = incomingData.lng;
188         doc["hum"] = incomingData.hum;
189         doc["temp"] = incomingData.temp;
190         doc["ph"] = incomingData.ph;
191         doc["ec"] = incomingData.ec;
192         doc["n"] = incomingData.n;
193         doc["p"] = incomingData.p;
194         doc["k"] = incomingData.k;
195         doc["rssi"] = rssi;
196
197         char jsonBuffer[300];
198         serializeJson(doc, jsonBuffer);
199
```

3.8.1.3.Procesamiento y almacenamiento de datos

Una vez que se establece la comunicación y se envían los datos hacia el bróker se da paso al siguiente proceso que se encarga de desempaquetar estos datos y prepararlos para almacenarlos y agregar sus respectivas etiquetas.

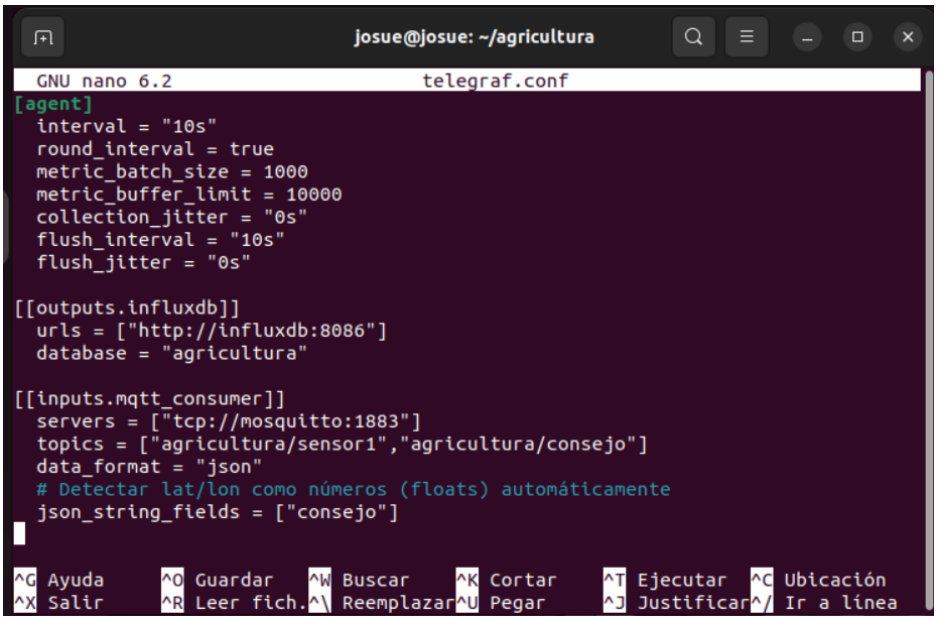
Toma de datos en Telegraf

Telegraf, funciona como un servicio intermediario que toma los mensajes publicados en MQTT y los convierte en registros listos para almacenarse como series temporales en InfluxDB. Todo el proceso se ve descrito mediante el archivo llamado telegraf.conf representado en la **Figura 42**. Como primer paso, el agente de Telegraf define el comportamiento operativo del servicio: establece un ciclo de trabajo de 10 segundos para agrupar métricas y enviarlas en lotes, lo que reduce la sobrecarga de red y evita escrituras punto a punto innecesarias; además fija límites de buffer para prevenir pérdidas si por momentos InfluxDB no está disponible. Luego, Telegraf se conecta como cliente suscriptor al broker Mosquitto (vía TCP en el puerto 1883) y escucha de forma continua dos tópicos: uno destinado

a telemetría del sistema (agricultura/sensor1) y otro destinado a mensajes de texto o recomendaciones (agricultura/consejo). Cada mensaje recibido se interpreta como JSON, por lo que Telegraf extrae automáticamente los campos del payload y los transforma en un punto de medición con marca de tiempo; cuando el mensaje contiene el campo consejo, este se fuerza a almacenarse como cadena de texto para evitar conversiones numéricas. Finalmente, el servicio envía los datos procesados hacia InfluxDB mediante HTTP al puerto 8086 y los guarda en la base agricultura, dejando las mediciones disponibles para consultas posteriores desde Grafana y para análisis histórico del sistema.

Figura 42

Archivo de configuración de telegraf



Una vez que Telegraf consume los mensajes publicados en el broker MQTT y los transforma a un formato compatible con series temporales, el siguiente paso del flujo consiste en el almacenamiento y disponibilidad de los datos para consulta. Para ello, Telegraf envía los

registros procesados hacia InfluxDB, donde se guardan de forma estructurada con marca de tiempo.

Almacenamiento de datos en InfluxDB

En esta etapa, InfluxDB actúa como el repositorio central de almacenamiento para el sistema, ya que está optimizado para manejar mediciones con marca de tiempo. Los datos que Telegraf procesa son enviados a InfluxDB mediante el servicio HTTP disponible en el puerto 8086 y se almacenan en la base de datos denominada agricultura. Cada medición queda registrada como un punto temporal, lo que permite realizar consultas históricas, filtrar por rangos de tiempo y analizar tendencias. Este almacenamiento es fundamental para garantizar que las mediciones no solo se visualicen en tiempo real, sino que también queden disponibles para análisis posterior y generación de reportes tal como se muestra en la **Figura 43.**

Figura 43

Almacenamiento de variables y etiquetas en la base de datos InfluxDB

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	time	topic	lat	lng	lon	hum	temp	ph	ec	n	p	k	rssi	consejo	host	name
630	2025-12-24 01:04:02	agricultura/sensor1	-1,8294		-78,183701	87,9	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
631	2025-12-24 01:04:04	agricultura/sensor1	-1,8299		-78,179001	87,9	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
632	2025-12-24 01:04:06	agricultura/sensor1	-1,836		-78,185699	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
633	2025-12-24 01:04:08	agricultura/sensor1	-1,8298		-78,183601	87,9	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
634	2025-12-24 01:04:10	agricultura/sensor1	-1,8312		-78,186905	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
635	2025-12-24 01:04:12	agricultura/sensor1	-1,8338		-78,186806	88,1	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
636	2025-12-24 01:04:14	agricultura/sensor1	-1,8358		-78,180901	87,9	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
637	2025-12-24 01:04:16	agricultura/sensor1	-1,8297		-78,179901	87,9	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
638	2025-12-24 01:04:18	agricultura/sensor1	-1,8318		-78,183701	87,9	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
639	2025-12-24 01:04:20	agricultura/sensor1	-1,8343		-78,181	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
640	2025-12-24 01:04:23	agricultura/sensor1	-1,8323		-78,184303	88,1	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
641	2025-12-24 01:04:25	agricultura/sensor1	-1,8335		-78,184204	87,9	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
642	2025-12-24 01:04:27	agricultura/sensor1	-1,8302		-78,178802	88,1	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
643	2025-12-24 01:04:29	agricultura/sensor1	-1,8275		-78,186203	88,1	21	6,5	2464	475	1145	1146			e79a4880757c	mqtt_consumer
644	2025-12-24 01:04:31	agricultura/sensor1	-1,8282		-78,188103	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
645	2025-12-24 01:04:33	agricultura/sensor1	-1,8296		-78,179001	88,1	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
646	2025-12-24 01:04:35	agricultura/sensor1	-1,8346		-78,180099	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
647	2025-12-24 01:04:37	agricultura/sensor1	-1,8347		-78,184204	88,1	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
648	2025-12-24 01:04:39	agricultura/sensor1	-1,8313		-78,187607	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
649	2025-12-24 01:04:41	agricultura/sensor1	-1,8311		-78,184006	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
650	2025-12-24 01:04:43	agricultura/sensor1	-1,8359		-78,179001	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
651	2025-12-24 01:04:45	agricultura/sensor1	-1,8359		-78,185501	88,1	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
652	2025-12-24 01:04:48	agricultura/sensor1	-1,8323		-78,180702	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
653	2025-12-24 01:04:50	agricultura/sensor1	-1,828		-78,1875	88,2	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
654	2025-12-24 01:04:52	agricultura/sensor1	-1,829		-78,181206	88,1	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
655	2025-12-24 01:04:54	agricultura/sensor1	-1,8354		-78,181602	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
656	2025-12-24 01:04:56	agricultura/sensor1	-1,8296		-78,1875	88,1	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
657	2025-12-24 01:04:58	agricultura/sensor1	-1,836		-78,182304	88,1	21	6,5	2464	475	1145	1146			e79a4880757c	mqtt_consumer
658	2025-12-24 01:05:00	agricultura/sensor1	-1,8343		-78,186104	88,1	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
659	2025-12-24 01:05:02	agricultura/sensor1	-1,8349		-78,183205	87,9	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
660	2025-12-24 01:05:04	agricultura/sensor1	-1,8359		-78,180702	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
661	2025-12-24 01:05:06	agricultura/sensor1	-1,831		-78,182503	88,1	21	6,5	2464	475	1145	1146			e79a4880757c	mqtt_consumer
662	2025-12-24 01:05:08	agricultura/sensor1	-1,8275		-78,186302	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
663	2025-12-24 01:05:10	agricultura/sensor1	-1,8278		-78,178505	88,1	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
664	2025-12-24 01:05:13	agricultura/sensor1	-1,8269		-78,1819	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
665	2025-12-24 01:05:15	agricultura/sensor1	-1,8349		-78,183502	88,1	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
666	2025-12-24 01:05:17	agricultura/sensor1	-1,8297		-78,182701	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
667	2025-12-24 01:05:19	agricultura/sensor1	-1,8309		-78,183601	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
668	2025-12-24 01:05:21	agricultura/sensor1	-1,8309		-78,185402	88,1	21	6,5	2496	482	1161	1162			e79a4880757c	mqtt_consumer
669	2025-12-24 01:05:23	agricultura/sensor1	-1,8357		-78,182602	88,4	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer
670	2025-12-24 01:05:25	agricultura/sensor1	-1,8277		-78,185402	88,1	21	6,5	2480	479	1153	1154			e79a4880757c	mqtt_consumer

3.8.1.4.Proceso de Visualización de datos

Dentro del panel de visualización de datos se observan varias áreas donde se encuentran tanto variables medidas, mapas de calor y el análisis generado por medio de la ia generativa. Cada uno de estos aspectos tiene su propia estructura y manera de extraer los datos.

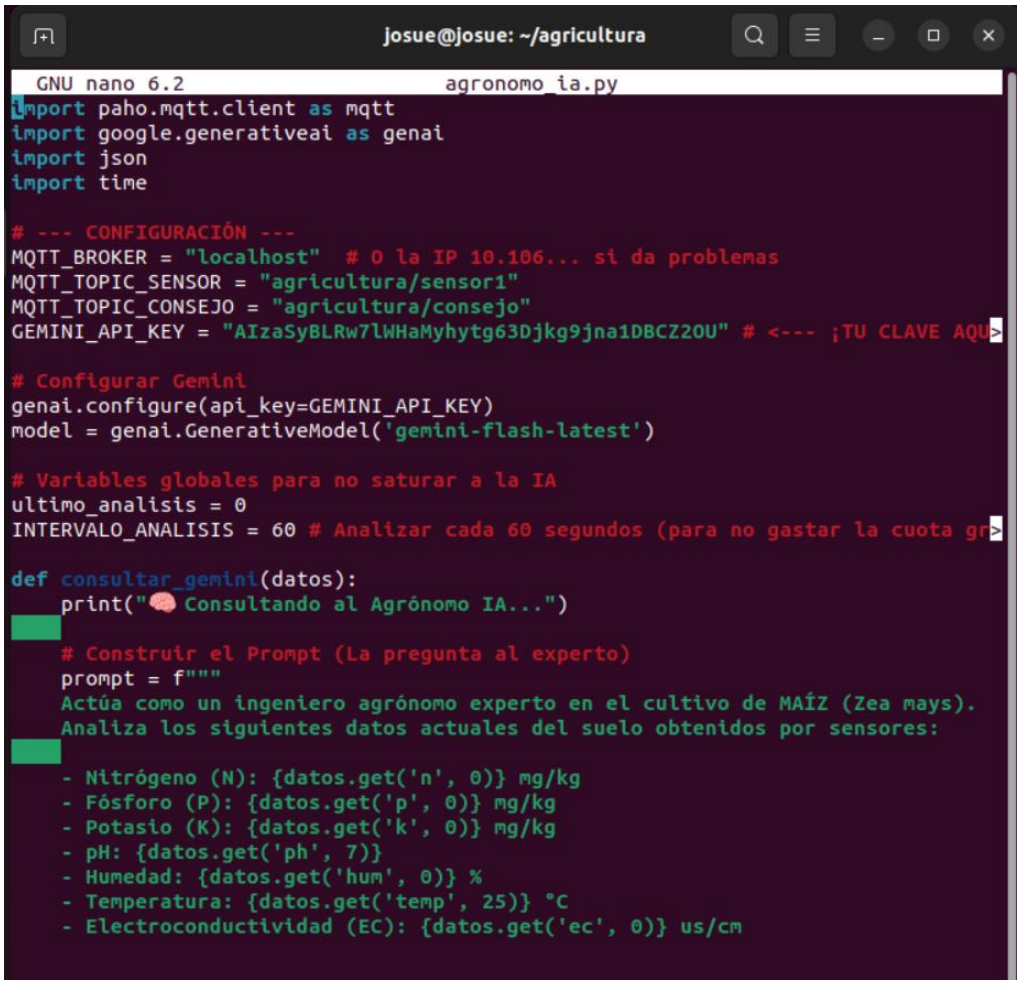
Análisis de datos con IA generativa

Para agregar una característica adicional al sistema con la capacidad de realizar un análisis y generar recomendaciones automatizadas, se desarrolló un script en Python que funciona como un middleware (software de enlace) entre la infraestructura de mensajería local y los servidores del Modelo de Lenguaje de Gran Tamaño (LLM). Este agente virtual asume el rol de un sistema experto agronómico especializado en el cultivo de maiz.

Tal y como se puede observar en la **Figura 44** este script opera bajo una arquitectura dirigida por eventos (event-driven) y utiliza la biblioteca paho-mqtt para establecer una conexión persistente con el broker local Mosquitto. Al inicializarse, el agente se suscribe al tópico de telemetría proveniente del Nodo Coordinador LoRa, ingiere los datos de suelo (NPK, pH, EC, clima), deserializa el JSON e inyecta dinámicamente estos valores en una plantilla de instrucción estructurada (El prompt que establecimos previamente). Esta instrucción se envía de forma segura a la API de Gemini, asignándole el rol de ingeniero agrónomo con restricciones de formato para generar un diagnóstico conciso y una acción inmediata. Al recibir la respuesta de la IA, el agente empaqueta el texto en un nuevo JSON y lo publica de vuelta en el broker MQTT, permitiendo que Telegraf lo almacene en InfluxDB y se visualice en el panel de Grafana.

Figura 44

Script de Python para el análisis por medio de IA generativa.

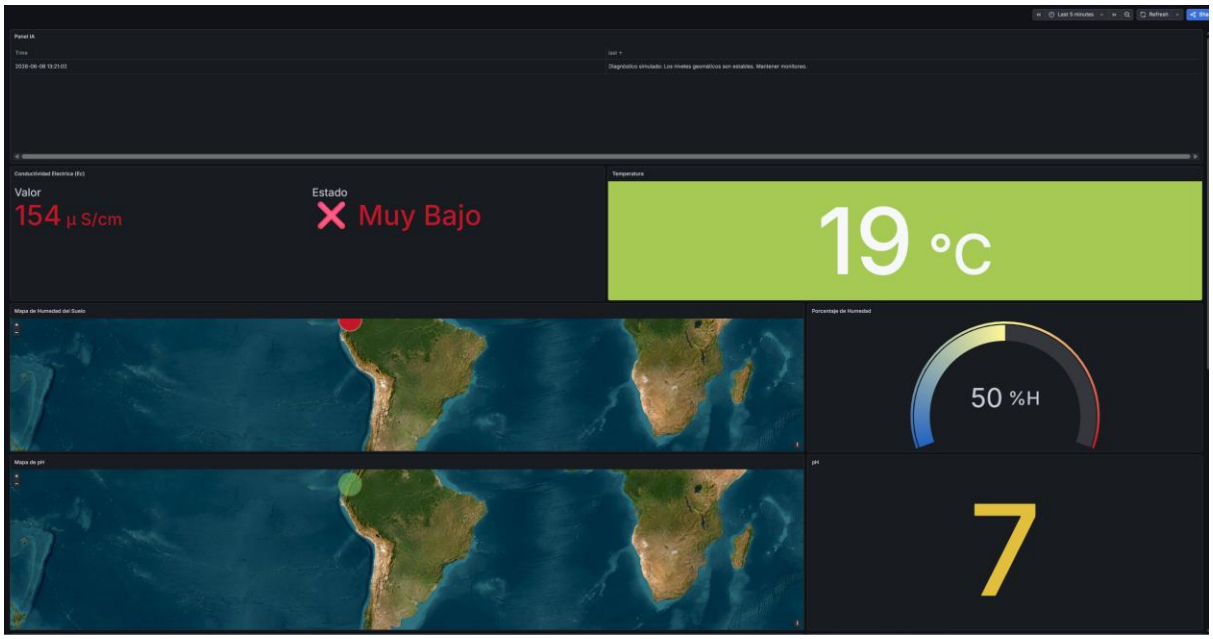


Establecimiento del panel de visualización

Grafana se utiliza como capa de visualización, conectándose a InfluxDB como fuente de datos para consultar las mediciones almacenadas. La extracción de información se realiza por medio de consultas definidas en cada panel, donde se seleccionan variables específicas y rangos de tiempo determinados (por ejemplo, últimas horas o última misión). Con los resultados obtenidos, Grafana genera las visualizaciones del dashboard, incluyendo series temporales, indicadores de resumen y mapas georreferenciados cuando se dispone de latitud y longitud. De esta forma, el usuario puede observar el comportamiento de las variables en tiempo real y revisar el historial de mediciones para apoyar la toma de decisiones.

Figura 45

Dashboard de visualización de datos en Grafana



CAPITULO IV PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan la ejecución del plan de pruebas diseñado para validar el funcionamiento, la estabilidad y la precisión del sistema desarrollado para el monitoreo y diagnóstico inteligente en cultivos de maíz. Apoyándose en la metodología de investigación acción, el proceso de validación se estructuró para evaluar el sistema progresivamente, aislando cada capa tecnológica antes de la integración total. Para ello, se definieron dos entornos de evaluación principales: un escenario de laboratorio enfocado en la calibración instrumental y verificación de las capas de hardware/software, y un escenario de campo destinado a la comprobación integral del sistema bajo estrés ambiental.

Plan de Pruebas y de Evaluación de Resultados

De manera secuencial, el cronograma de pruebas iniciará a nivel físico con el Nodo Sensor, verificando la correcta adquisición de datos y la precisión de la georreferenciación, ajustando la periodicidad del muestreo. Posteriormente, la evaluación pasa a la capa de enlace, donde se someterá a prueba la comunicación LoRa entre el nodo móvil y el nodo Coordinador; en esta etapa, los resultados esperados se centran en validar la integridad de los datos y analizar el alcance efectivo midiendo parámetros de calidad de señal como RSSI y SNR.

Una vez garantizada la validación de la red local, las pruebas escalarán a la infraestructura Backend e Inteligencia Artificial donde se evaluará la conectividad Wi-Fi del Coordinador y su capacidad para serializar y publicar paquetes JSON hacia el Broker MQTT sin pérdida de tramas. De forma paralela, se verificará que Telegraf consuma adecuadamente esta telemetría para su posterior almacenamiento en InfluxDB, y se comprobará que el script de python denominado (agronomo_ia.py) pueda acceder a los datos de las variables y realice

correctamente los diagnósticos agronómicos en base a los datos recolectados. Como resultado de esta fase, se espera visualizar el flujo completo y sincronizado de datos a través de las gráficas temporales y paneles de texto en el Dashboard de Grafana, validando su legibilidad y organización.

Finalmente, la fase culminante del plan consistirá en las Pruebas de Campo (Validación Integral). Esta etapa se ejecutará en un lote representativo de cultivo de maíz, sometiendo la electrónica a las condiciones climáticas del entorno y a los obstáculos de propagación propios de la vegetación densa. A través de esta prueba transversal se espera demostrar la viabilidad operativa de la propuesta tecnológica desde la captura del dato en el suelo hasta la entrega del consejo de riego/fertilización en la pantalla del agricultor, identificando en el proceso cualquier limitación técnica que deba ser documentada para futuras iteraciones del sistema.

Tabla 22

Tabla de Plan de Pruebas

Id_Prueba	Nombre de Prueba	Componentes Involucrados	Objetivo Principal	Resultado Esperado
Prueba01_AD	Adquisición de Datos	Nodo Sensor (ESP32, NPK, GPS)	Validar lectura correcta de sensores y tiempos de muestreo.	Datos exactos estructurados temporalmente en la memoria del nodo.
Prueba02_CO	Comunicación LoRa	Transceptores LoRa (RF)	Medir el alcance (RSSI/SNR) y el envío íntegro del payload.	Transmisión exitosa entre nodos sin pérdida de paquetes.
Prueba03_CONN	Conectividad y MQTT	Gateway y Broker Mosquitto	Probar enlace Wi-Fi y la publicación de mensajes JSON.	Recepción estable de la telemetría en los tópicos correspondientes.
Prueba04_AL	Almacenamiento	Telegraf e InfluxDB	Verificar la ingesta de datos y creación de bases de datos.	Series temporales guardadas y estructuradas correctamente.

Id_Prueba	Nombre de Prueba	Componentes Involucrados	Objetivo Principal	Resultado Esperado
Prueba05_VI	Visualización e IA	Grafana y agronomo_ia.py	Evaluar las gráficas temporales y la generación de diagnósticos IA.	Dashboard funcional y legible con consejos agronómicos coherentes.
Prueba06_PC	Pruebas de Campo	Sistema Integral (End-to-End)	Comprobar el sistema completo dentro del cultivo de maíz.	Operación continua, autónoma y síncrona bajo condiciones reales.

4.1.Prueba01_AD: Pruebas de Adquisición de datos

En las pruebas de adquisición de datos del nodo sensor se verificó el funcionamiento del sistema embarcado en cuanto a la lectura de variables del suelo y la obtención de coordenadas para su posterior transmisión. Para ello, el nodo se energizó e inicializó con los dispositivos configurados, comprobando que el ciclo de muestreo se ejecute de forma periódica según el intervalo establecido en el código. A partir de cada iteración se revisó que las mediciones de humedad, temperatura, pH, conductividad eléctrica y nutrientes (N, P y K) se actualicen correctamente y presenten

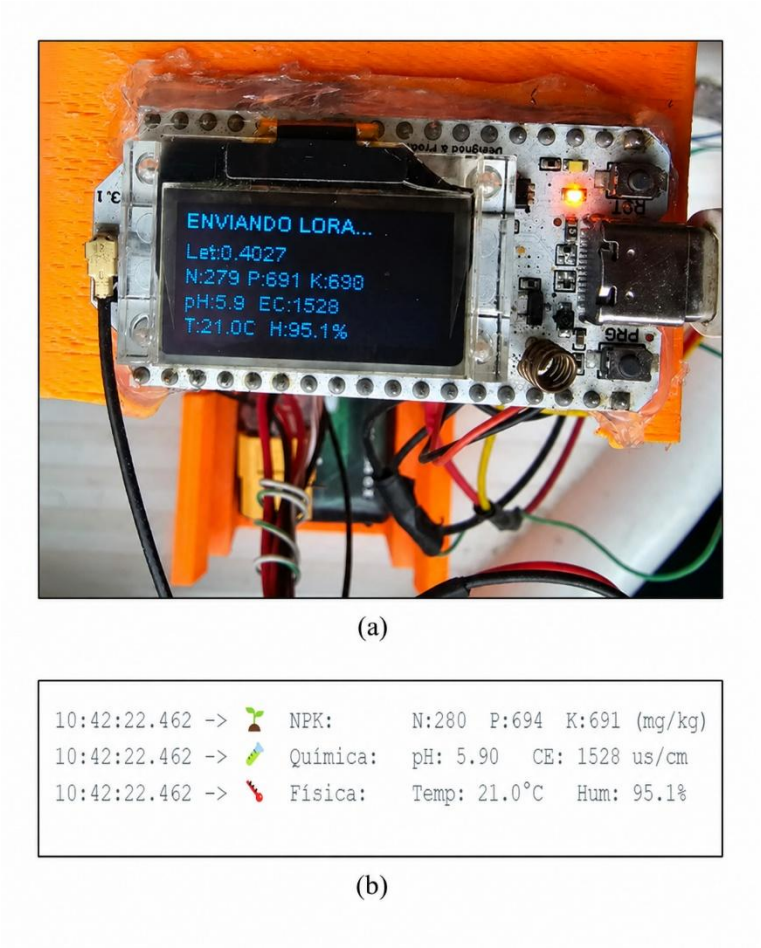
coherencia entre lecturas consecutivas, tanto en el monitor serial como en la pantalla OLED. De igual manera, se evaluó el comportamiento del GPS, validando la disponibilidad de señal y la entrega de latitud y longitud; cuando la ubicación no se encontraba disponible, el sistema mantuvo valores nulos como control para evitar asociar mediciones a posiciones incorrectas. Con estas verificaciones se confirmó que el nodo sensor adquiere y estructura los datos de manera estable, quedando listo para el envío hacia el Coordinador en las etapas posteriores del sistema.

4.1.1. Verificación de lectura del sensor de suelo (NPK, pH, EC, humedad, temperatura)

En la **Figura 46** nos centramos en la verificación de lectura del sensor de suelo se comprobó que el nodo sensor no solo obtiene las variables mediante el módulo de comunicación RS485/Modbus, sino que además aplica un proceso de validación (ETL embebido) antes de considerar la lectura como válida para el sistema. Durante la prueba se registraron varias iteraciones del ciclo de muestreo y se comparó la información presentada en el monitor serial como se muestra en la **Figura 46(b)** y en la pantalla OLED tal y como se evidencia en la **Figura 46(a)**, asegurando que los valores se actualicen correctamente en cada lectura. Este proceso de validación permite identificar de forma inmediata lecturas coherentes y diferenciar casos como valores fuera de rango, ausencia de coordenadas válidas o fallos de comunicación. De esta manera, la prueba confirma que el sistema cuenta con un mecanismo de control de calidad en la etapa de adquisición, lo cual mejora la confiabilidad de los datos antes de su transmisión hacia el nodo Coordinador.

Figura 46

Resultados de adquisición y validación de datos del sensor NPK en el monitor serial del IDE de Arduino y en la pantalla led del nodo sensor.



4.1.2. Verificación de georreferenciación

Durante las pruebas del submódulo de georreferenciación se comprobó que el nodo sensor puede adquirir y procesar correctamente los datos enviados por el GPS Neo-6M. Para que el sistema no se “cuelgue” mientras el GPS inicia sobre todo en arranque en frío se mantuvo la lectura de forma continua y no bloqueante, lo que permitió que el microcontrolador decodifique la información satelital en segundo plano sin afectar el ciclo principal de muestreo. En la

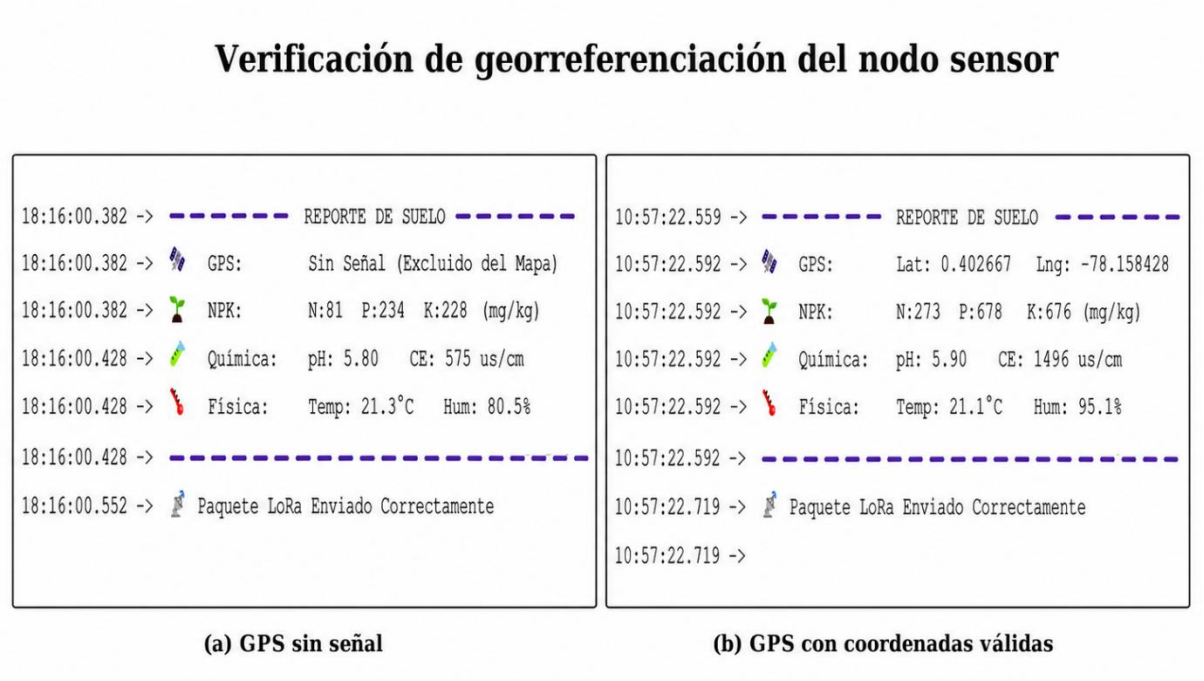
práctica, esto se reflejó en una fijación de coordenadas más estable cuando el equipo se encontraba en exteriores.

Luego, para evaluar el comportamiento ante fallos, se realizaron pruebas simulando pérdida de señal en zonas donde normalmente el GPS se debilita (por ejemplo, áreas con cobertura o interferencia). Como se aprecia en la **Figura 47,** el proceso de validación (ETL embebido) diferencia con claridad ambos escenarios. Cuando el GPS entrega datos confiables (**Figura 47b**), el sistema incorpora latitud y longitud al payload junto con las variables del suelo. En cambio, si no existe señal (**Figura 47a**), el nodo marca la lectura como no válida y aplica una regla de caducidad: si la pérdida es momentánea conserva por poco tiempo la última coordenada válida, pero si se repite durante tres ciclos consecutivos, fuerza la posición a 0.0 y muestra el aviso “Sin Señal (Excluido del Mapa)”.

Este manejo intencional de coordenadas nulas funciona como un control de calidad a nivel del nodo, evitando que se registren posiciones residuales o “datos fantasmas” cuando el equipo cambia de ubicación o el GPS se recupera con retraso. Con ello, el backend puede filtrar fácilmente estas lecturas mediante una condición simple (por ejemplo, excluir latitudes iguales a 0.0), asegurando que el mapa de calor se construya únicamente con puntos georreferenciados reales y consistentes.

Figura 47

Resultados de adquisición de datos de georreferenciación y comparativa de datos válidos y datos inválido.



4.1.3. Prueba de periodicidad de muestreo (tiempo entre lecturas)

En la prueba de periodicidad de muestreo se verificó que el nodo sensor ejecute el ciclo de adquisición de datos de forma periódica conforme al intervalo definido en el código. Para ello, se registraron cinco lecturas consecutivas en el monitor serial y se tomó como referencia la marca de tiempo asociada al inicio de cada bloque de “Reporte de suelo”. A partir de estas marcas se calculó el tiempo transcurrido entre lecturas sucesivas, obteniéndose valores respectivos de 9.983 s, 10.022 s, 9.993 s y 10.017 s, con un promedio de 10.004 s. Estos resultados evidencian que el sistema mantiene una periodicidad de muestreo estable y muy cercana al valor programado de 10 segundos, presentando únicamente pequeñas variaciones en el orden de milisegundos, las cuales son normales y pueden asociarse al tiempo de procesamiento interno y a la impresión de datos en el monitor serial. Con ello, se confirma que

el nodo sensor cumple adecuadamente con la temporización requerida para la adquisición continua y ordenada de las variables del suelo.

Figura 48

Registro en el monitor serial de lecturas consecutivas del nodo sensor utilizadas para verificar la periodicidad del muestreo.

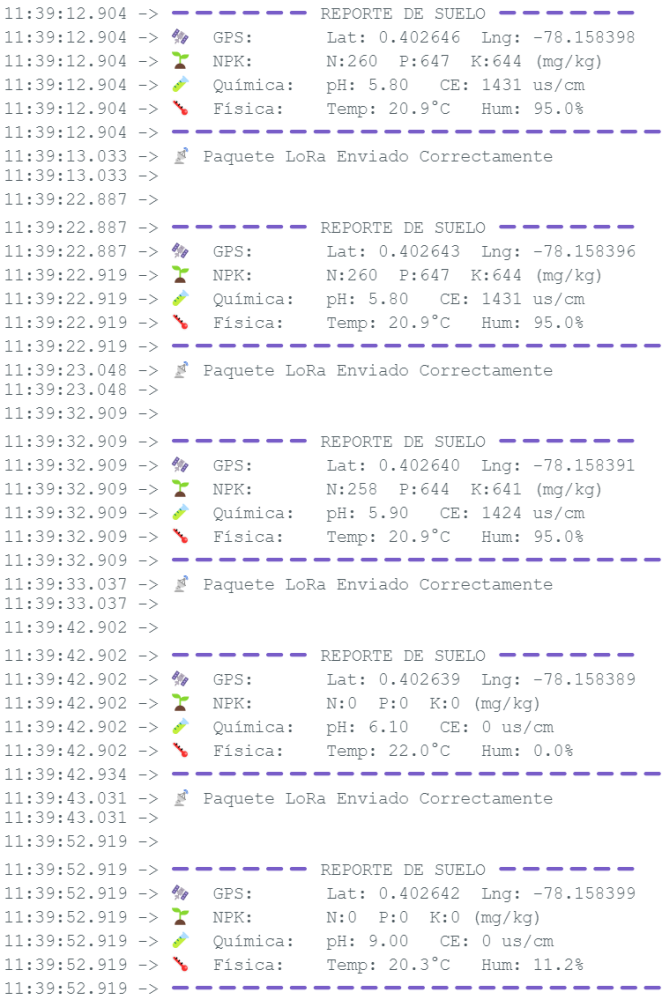


Tabla 23

Tabla de intervalos de tiempo entre lecturas consecutivas del nodo sensor para la verificación de la periodicidad de muestreo

N.° de lectura	Hora de lectura	Intervalo respecto a la lectura anterior (s)
1	11:39:12.904	—
2	11:39:22.887	9.983
3	11:39:32.909	10.022
4	11:39:42.902	9.993
5	11:39:52.919	10.017

Datos tomados del monitor serial (inicio de cada “REPORTE DE SUELO”):

$\boldsymbol{t_1} = 11{:}\,39{:}\,12.904$

$\boldsymbol{t_2} = 11{:}\,39{:}\,22.887$

$\boldsymbol{t_3} = 11{:}\,39{:}\,32.909$

$\boldsymbol{t_4} = 11{:}\,39{:}\,42.902$

$\boldsymbol{t_5} = 11{:}\,39{:}\,52.919$

Cálculo del intervalo entre lecturas consecutivas:

$$\Delta \boldsymbol{t_1} = t_2 - t_1 = 11{:}\,39{:}\,22.887 - 11{:}\,39{:}\,12.904 = 9.983 \text{ s}$$

$$\Delta \boldsymbol{t_2} = t_3 - t_2 = 11{:}\,39{:}\,32.909 - 11{:}\,39{:}\,22.887 = 10.022 \text{ s}$$

$$\Delta \boldsymbol{t_3} = t_4 - t_3 = 11{:}\,39{:}\,42.902 - 11{:}\,39{:}\,32.909 = 9.993 \text{ s}$$

$$\Delta \boldsymbol{t_4} = t_5 - t_4 = 11{:}\,39{:}\,52.919 - 11{:}\,39{:}\,42.902 = 10.017 \text{ s}$$

Promedio del intervalo de muestreo:

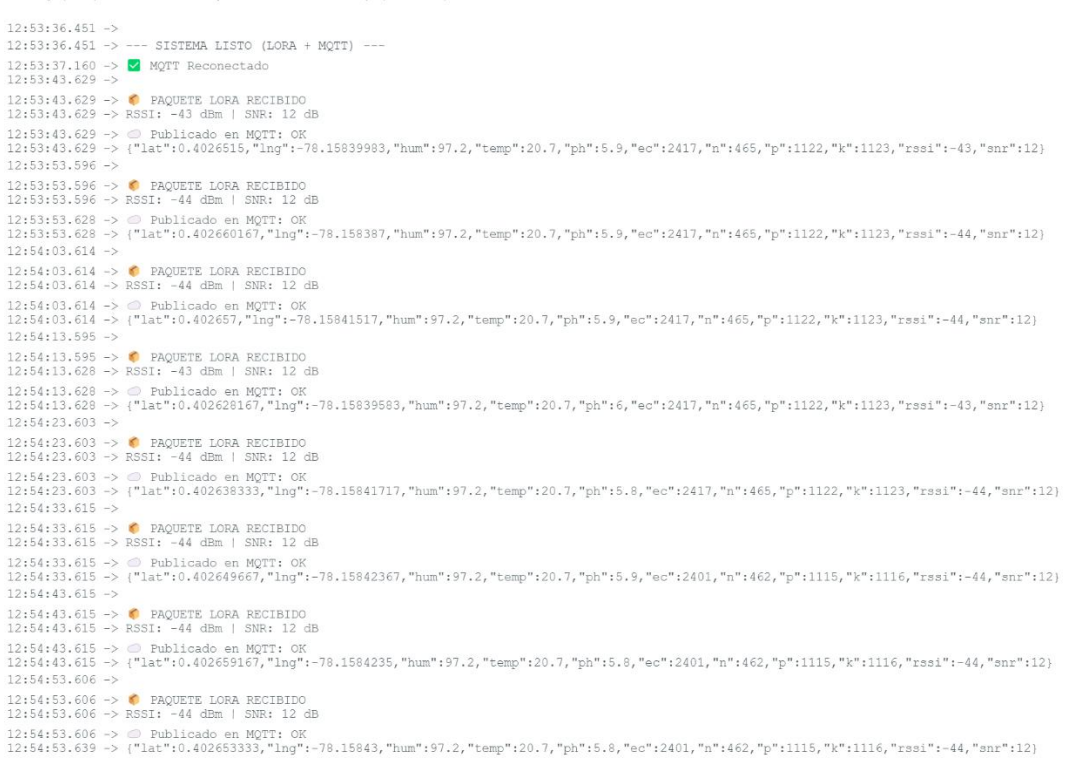
$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4}{4} = \frac{9.983 + 10.022 + 9.993 + 10.017}{4} = \mathbf{10.004\ s}$$

4.2.Prueba02_CO: Pruebas de comunicación LoRa (Nodo Sensor – Coordinador)

Durante las pruebas de comunicación LoRa se comprobó que los datos obtenidos por el nodo sensor se transmiten hacia el nodo Coordinador de forma continua y sin alteraciones, de manera que los datos recopilados lleguen completos. Para esta verificación, el nodo sensor trabajó como transmisor enviando periódicamente las variables del suelo junto con las coordenadas GPS, mientras que el Coordinador se mantuvo en modo recepción esperando los paquetes. En el monitor serial se observó la llegada repetida de mensajes bajo el evento "PAQUETE LORA RECIBIDO", acompañados por los indicadores de enlace RSSI y SNR. En el escenario evaluado, el RSSI se mantuvo entre −43 y −44 dBm y el SNR en 12 dB, lo que evidencia un enlace estable y con buen margen frente al ruido durante la prueba. Finalmente, el Coordinador reconstruyó correctamente los datos recibidos y los publicó en MQTT en formato JSON, mostrando el mensaje "Publicado en MQTT: OK", confirmando que el enlace LoRa cumple su función como puente entre la adquisición en campo y el procesamiento posterior en el backend.

Figura 49

Registro en el monitor serial de lecturas consecutivas del nodo sensor utilizadas para verificar la periodicidad del muestreo.

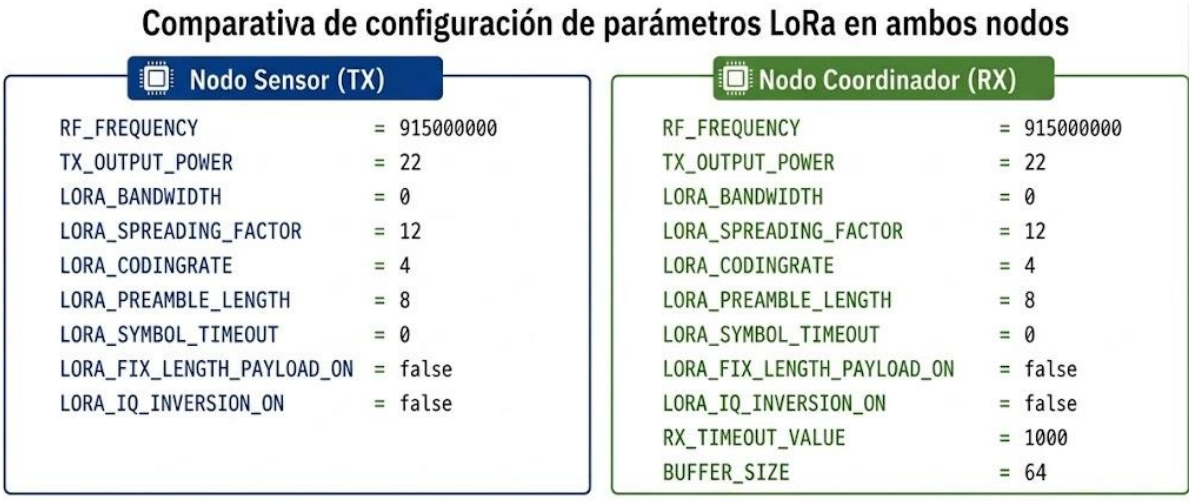


4.2.1. Configuración del enlace LoRa (parámetros y consistencia entre nodos)

Para asegurar la comunicación entre el nodo sensor y el Coordinador se verificó que ambos dispositivos operen con parámetros LoRa compatibles. En este proyecto se empleó la frecuencia de 915 MHz y una configuración equivalente en transmisión y recepción, evitando desajustes que puedan impedir la decodificación de paquetes. Esta validación es necesaria porque el enlace LoRa depende directamente de que ambos nodos compartan los mismos parámetros de modulación, lo que garantiza sincronización del receptor y estabilidad de comunicación durante la misión.

Figura 50

Parámetros de comunicación LoRa en el nodo sensor y nodo coordinador.



Parámetro	Nodo Sensor	Nodo Coordinador	Observación
Frecuencia	915000000	915000000	Igual en ambos nodos
Potencia TX	22	22	Igual en ambos nodos
BW / SF / CR	BW=0, SF=12, CR=4	BW=0, SF=12, CR=4	Consistentes para asegurar compatibilidad del enlace
Preambulo	8	8	Igual en ambos nodos
Payload fijo	false	false	Deshabilitado en ambos nodos
Inversión IQ	false	false	Deshabilitada en ambos nodos
RX_TIMEOUT_VALUE	—	1000	Solo definido en el nodo coordinador
BUFFER_SIZE	—	64	Solo definido en el nodo coordinador

Tabla 24

Tabla de Configuración del enlace LoRa en el nodo sensor y nodo coordinador

Parámetro	**Nodo sensor (TX)**	**Nodo coordinador (RX)**	**Función**	**Observación**
Frecuencia (RF_FREQUENCY)	915000000 Hz	915000000 Hz	Banda de operación del enlace LoRa	Debe coincidir en ambos nodos para comunicación correcta.

Parámetro	Nodo sensor (TX)	Nodo coordinador (RX)	Función	Observación
Potencia TX (TX_OUTPUT_POWER)	22 dBm	22 dBm	Potencia de transmisión del emisor	En RX no es crítico, pero se mantiene la misma referencia en el código.
Ancho de banda (LORA_BANDWIDTH)	0	0	Define BW y afecta alcance/tiempo de aire	Se mantiene igual para compatibilidad; valor “0” corresponde al perfil BW predefinido por la librería.
Factor de Propagación (LORA_SPREADING_FACTOR)	12	12	Sensibilidad vs velocidad de transmisión	Reduce tiempo de aire y mantiene buena estabilidad en distancias cortas/medias.
Coding rate (LORA_CODINGRATE)	4	5	Redundancia/corrección de errores	Aumenta tolerancia a ruido manteniendo eficiencia del enlace.

Parámetro	Nodo sensor (TX)	Nodo coordinador (RX)	Función	Observación
Preambulo (LORA_PREAMBLE_LENGTH)	8	8	Sincronización del receptor antes del payload	Valor estándar para mejorar detección del paquete.
Timeout símbolo (LORA_SYMBOL_TIMEOUT)	0	0	Control de espera en recepción	En RX se usa junto con modo de recepción continua (según configuración).
Payload fijo (LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON)	false	false	Indica si el payload tiene longitud fija	Se usa payload variable, por eso está deshabilitado.
Inversión IQ (LORA_IQ_INVERSION_ON)	false	false	Ajuste de modulación LoRa	Se mantiene deshabilitado para operar en modo estándar y compatible.
Timeout RX (RX_TIMEOUT_VALUE)	—	1000 ms	Tiempo máximo de espera en recepción (si aplica)	Solo está definido en el coordinador porque opera en modo receptor.

Parámetro	Nodo sensor (TX)	Nodo coordinador (RX)	Función	Observación
Tamaño de buffer (BUFFER_SIZE)	—	64 bytes	Capacidad del buffer local para recepción	Se usa en el receptor para almacenar el payload entrante.

La comunicación LoRa requiere que los parámetros principales (frecuencia, BW, SF, CR, preámbulo e IQ) sean equivalentes entre emisor y receptor; por ello, el nodo sensor y el nodo coordinador mantienen la misma configuración base, garantizando que el paquete transmitido pueda ser sincronizado y decodificado correctamente.

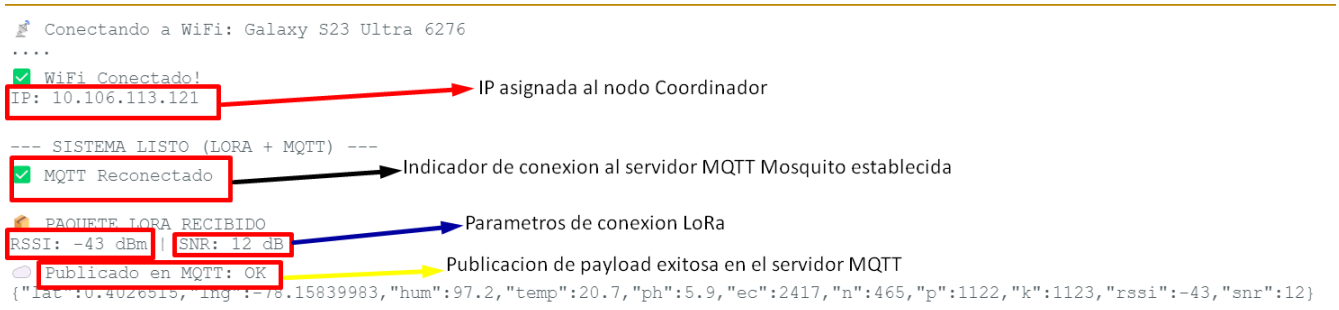
4.2.2. Recepción y validación de paquetes en el Coordinador (estructura/tamaño del payload)

En esta etapa se comprobó que el nodo Coordinador reciba sin problemas los paquetes LoRa enviados por el nodo sensor y que los datos recuperados correspondan al formato definido para el sistema. Para ello, el Coordinador se mantuvo en escucha continua y, cada vez que detectó un mensaje entrante, registró la recepción y reportó los indicadores del enlace. La validación principal se realizó comparando el tamaño del payload recibido con el tamaño esperado de la estructura de datos; con esta verificación se evita procesar tramas incompletas o con información corrupta. Cuando el paquete cumple con el tamaño correcto, el Coordinador reconstruye las variables en memoria y genera el mensaje en formato JSON, incluyendo tanto

las mediciones del suelo y las coordenadas GPS como los valores de RSSI y SNR asociados a la recepción. Finalmente, el JSON se publica en el tópico MQTT configurado y se confirma la operación con el mensaje “Publicado en MQTT: OK”. Con ello se evidencia que el Coordinador no solo actúa como receptor LoRa, sino que también aplica un control de integridad antes de integrar la información al flujo IoT del proyecto.

Figura 51

Recepción, validación y publicación del payload recibido por el nodo Coordinador, mostrando el evento de recepción LoRa, los indicadores RSSI y SNR, y la reconstrucción del mensaje en formato JSON previo a su envío mediante MQTT.



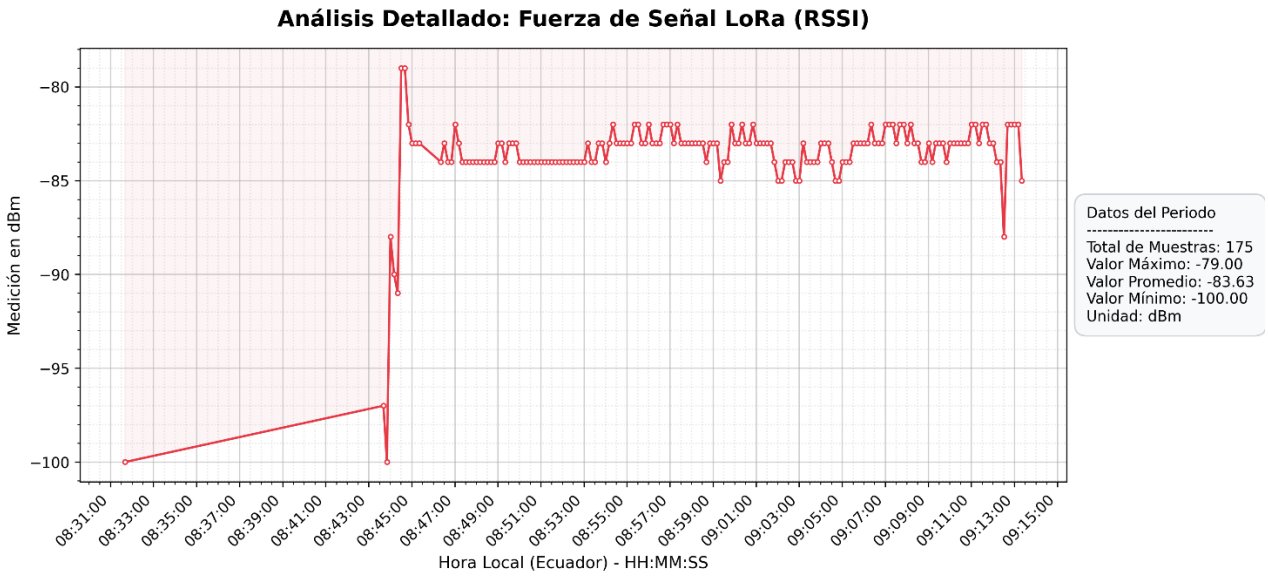
4.2.3. Calidad del enlace (RSSI/SNR, alcance y estabilidad)

En la evaluación de la calidad del enlace LoRa se analizaron los indicadores RSSI y SNR reportados por el nodo Coordinador en cada recepción, ya que ambos permiten describir el estado real de la comunicación en el entorno de prueba. En este contexto, el RSSI representa la potencia con la que llega la señal al receptor (mientras más cercano a 0, mayor intensidad), y el SNR indica la relación entre la señal útil y el ruido del canal; por lo tanto, un SNR más alto suele reflejar una recepción más limpia y con menor probabilidad de errores. Para esta verificación se registraron múltiples

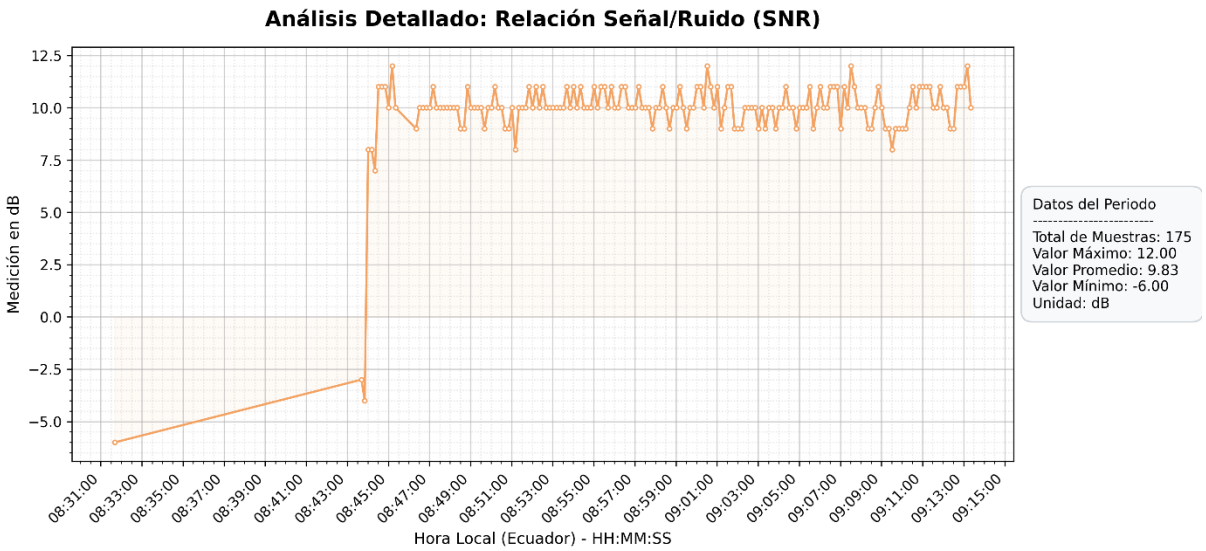
recepciones consecutivas en una condición controlada y de corta distancia, observando que el enlace se mantuvo estable durante el intervalo de prueba. Los resultados muestran un RSSI entre −43 y −44 dBm, con un SNR constante de 12 dB, lo que evidencia una variación mínima entre lecturas y, en consecuencia, una comunicación robusta sin fluctuaciones significativas. Dado que esta prueba se realizó bajo un escenario controlado, estos valores se consideran una referencia base del desempeño del enlace; la evaluación del alcance y el efecto de obstáculos se aborda posteriormente en las pruebas de campo, donde las condiciones del cultivo pueden introducir atenuación adicional y mayor variabilidad en las métricas.

Figura 52

Calidad del enlace LoRa entre nodo sensor y nodo coordinador: (a) variación del RSSI (dBm); (b) variación del SNR (dB) durante recepciones consecutivas.



a)



b)

En las **Figura 52** correspondientes a RSSI y SNR se presenta la variación temporal de los parámetros de calidad del enlace LoRa registrados por el nodo coordinador durante la recepción consecutiva de paquetes. En este contexto, el RSSI (dBm) mostrado a través de la **Figura 52 a)** representa la potencia de la señal recibida: valores menos negativos indican una señal más fuerte, mientras que valores más negativos reflejan atenuación o mayor pérdida en el canal. Por su parte, el SNR (dB) representado mediante la **Figura 52 b)** expresa la relación señal–ruido, es decir, qué tan "limpia" llega la señal respecto al ruido ambiental; valores mayores implican mejores condiciones de decodificación del paquete. Los resultados muestran que el RSSI se mantiene dentro de un rango reducido y con variaciones moderadas entre lecturas, lo cual evidencia estabilidad del enlace en el escenario de prueba, mientras que el SNR se conserva prácticamente constante, indicando que la comunicación se realizó con buen margen frente al ruido. En conjunto, ambas gráficas permiten verificar que el

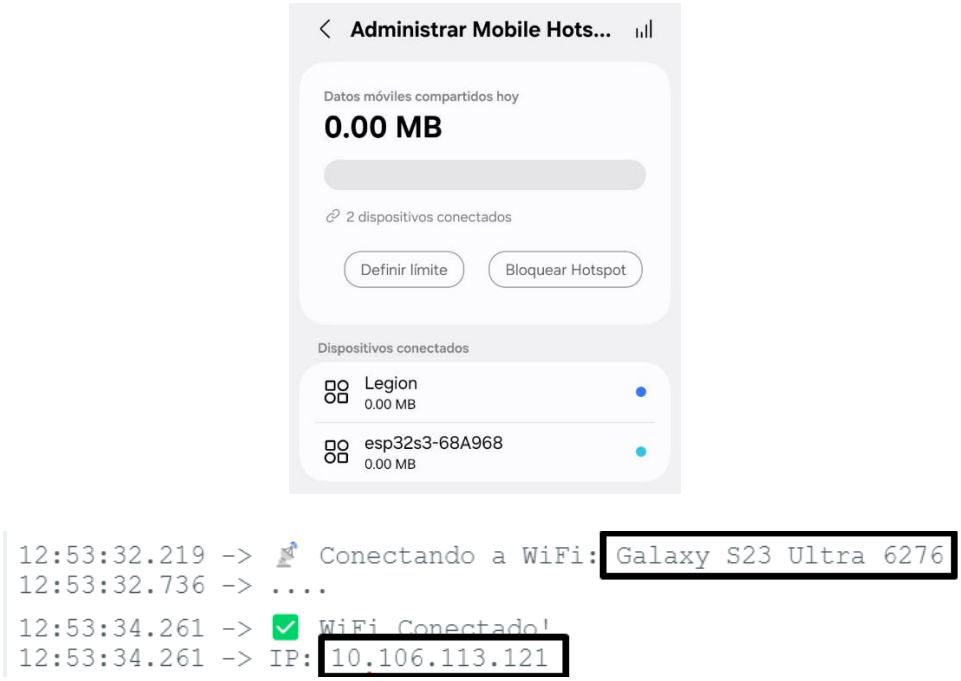
enlace LoRa operó de forma consistente durante el intervalo evaluado, sin fluctuaciones bruscas que sugieran pérdidas recurrentes o degradación crítica de la señal.

4.3.Prueba03_CONN: **Pruebas de conectividad Wi-Fi y publicación MQTT (Coordinador – Broker)**

En esta fase se verificó que el nodo Coordinador pueda conectarse correctamente a una red Wi-Fi y establecer una sesión MQTT con el broker Mosquitto para publicar la telemetría recibida por LoRa. La prueba se ejecutó inicializando el dispositivo, comprobando la asignación de dirección IP y validando la estabilidad de la conexión mediante eventos de reconexión. Una vez establecida la conectividad, se evaluó la publicación de mensajes en el tópico configurado (agricultura/sensor1) utilizando un payload en formato JSON con las variables del suelo y coordenadas GPS. Como resultado, se confirmó que el Coordinador logra publicar de forma continua y que los mensajes pueden ser verificados desde un cliente suscriptor, lo cual deja listo el flujo para la etapa de procesamiento y almacenamiento en el backend.

Figura 53

Conexión del nodo coordinador hacia el servidor MQTT

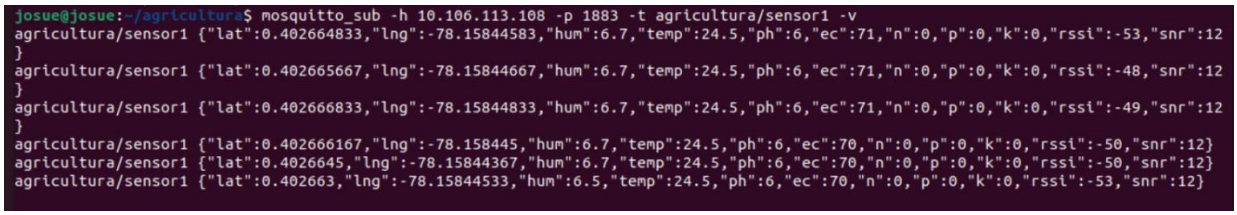


4.3.1. Publicación MQTT (tópico agricultura/sensor1, formato JSON)

En la prueba de conectividad Wi-Fi y publicación MQTT se comprobó que el nodo Coordinador, una vez conectado a la red local, logra publicar de manera continua la telemetría recibida por LoRa hacia el broker Mosquitto. Para validar este proceso desde el lado del servidor se utilizó un cliente suscriptor conectado al puerto 1883 y suscrito al tópico agricultura/sensor1. Como resultado, se evidenció la llegada repetida de mensajes en formato JSON, incluyendo coordenadas GPS y variables del suelo, lo cual confirma que la sesión MQTT se mantiene operativa y que el broker enruta correctamente los datos publicados por el Coordinador hacia los consumidores autorizados. Esta verificación deja lista la capa de mensajería para el consumo posterior por Telegraf y el almacenamiento en InfluxDB.

Figura 54

Verificación de recepción de telemetría en el broker Mosquitto mediante un cliente suscriptor en el tópico agricultura/sensor1, mostrando el payload JSON.



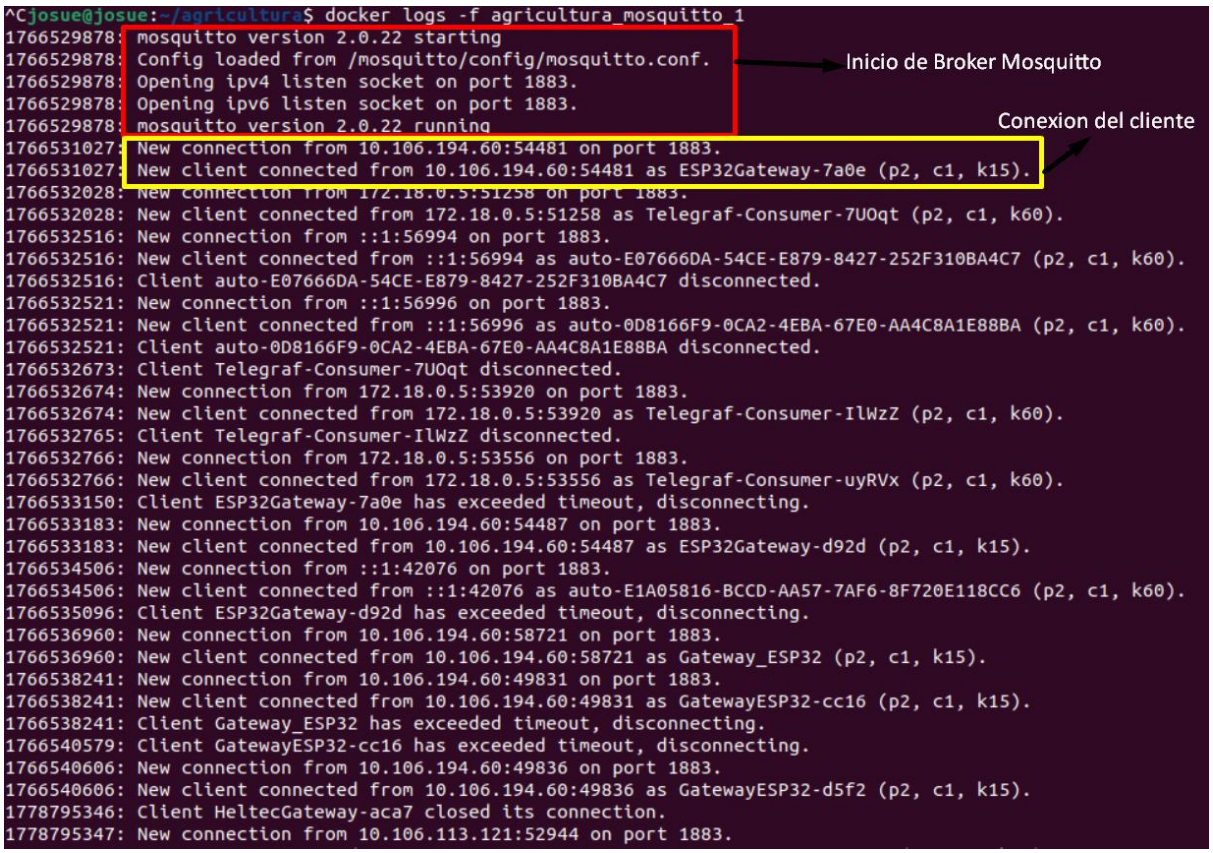
4.3.2. Verificación de recepción MQTT desde cliente suscriptor (herramienta de monitoreo)

En la verificación de conectividad Wi-Fi y sesión MQTT se comprobó que el nodo Coordinador logra establecer comunicación con el broker Mosquitto y mantener una sesión activa para la transmisión de datos. Para validar este proceso desde el lado del servidor se monitorearon los registros del contenedor del broker mediante docker logs, donde se observó el arranque correcto del servicio y la apertura del puerto 1883 para conexiones IPv4. Posteriormente, el broker registró conexiones entrantes identificando al Coordinador mediante su ClientID y, de forma paralela, la conexión del consumidor de datos Telegraf, confirmando que ambos componentes se comunican con el broker. Adicionalmente, los logs muestran eventos de desconexión por timeout y reconexión automática del Coordinador, lo cual evidencia que el sistema es capaz de recuperarse ante interrupciones temporales y restablecer la sesión sin detener el flujo general de operación. Con esta prueba se valida el comportamiento de la capa de mensajería en términos de conexión, autenticación básica por ClientID y persistencia

de sesión, dejando lista la infraestructura para la recepción y procesamiento continuo de telemetría.

Figura 55

Registro del broker Mosquitto (contenedor Docker) durante la prueba de conectividad MQTT, evidenciando el arranque del servicio, la apertura del puerto 1883 y la conexión/reconexión de los clientes.




```
^Cjosue@josue:~/agricultura$ docker logs -f agricultura_mosquitto_1
1766529878: mosquitto version 2.0.22 starting
1766529878: Config loaded from /mosquitto/config/mosquitto.conf.
1766529878: Opening ipv4 listen socket on port 1883.
1766529878: Opening ipv6 listen socket on port 1883.
1766529878: mosquitto version 2.0.22 running
1766531027: New connection from 10.106.194.60:54481 on port 1883.
1766531027: New client connected from 10.106.194.60:54481 as ESP32Gateway-7a0e (p2, c1, k15).
1766532028: New connection from 172.18.0.5:51258 on port 1883.
1766532028: New client connected from 172.18.0.5:51258 as Telegraf-Consumer-7UOqt (p2, c1, k60).
1766532516: New connection from ::1:56994 on port 1883.
1766532516: New client connected from ::1:56994 as auto-E07666DA-54CE-E879-8427-252F310BA4C7 (p2, c1, k60).
1766532516: Client auto-E07666DA-54CE-E879-8427-252F310BA4C7 disconnected.
1766532521: New connection from ::1:56996 on port 1883.
1766532521: New client connected from ::1:56996 as auto-0D8166F9-0CA2-4EBA-67E0-AA4C8A1E88BA (p2, c1, k60).
1766532521: Client auto-0D8166F9-0CA2-4EBA-67E0-AA4C8A1E88BA disconnected.
1766532673: Client Telegraf-Consumer-7UOqt disconnected.
1766532674: New connection from 172.18.0.5:53920 on port 1883.
1766532674: New client connected from 172.18.0.5:53920 as Telegraf-Consumer-IlWzZ (p2, c1, k60).
1766532765: Client Telegraf-Consumer-IlWzZ disconnected.
1766532766: New connection from 172.18.0.5:53556 on port 1883.
1766532766: New client connected from 172.18.0.5:53556 as Telegraf-Consumer-uyRVx (p2, c1, k60).
1766533150: Client ESP32Gateway-7a0e has exceeded timeout, disconnecting.
1766533183: New connection from 10.106.194.60:54487 on port 1883.
1766533183: New client connected from 10.106.194.60:54487 as ESP32Gateway-d92d (p2, c1, k15).
1766534506: New connection from ::1:42076 on port 1883.
1766534506: New client connected from ::1:42076 as auto-E1A05816-BCCD-AA57-7AF6-8F720E118CC6 (p2, c1, k60).
1766535096: Client ESP32Gateway-d92d has exceeded timeout, disconnecting.
1766536960: New connection from 10.106.194.60:58721 on port 1883.
1766536960: New client connected from 10.106.194.60:58721 as Gateway_ESP32 (p2, c1, k15).
1766538241: New connection from 10.106.194.60:49831 on port 1883.
1766538241: New client connected from 10.106.194.60:49831 as GatewayESP32-cc16 (p2, c1, k15).
1766538241: Client Gateway_ESP32 has exceeded timeout, disconnecting.
1766540579: Client GatewayESP32-cc16 has exceeded timeout, disconnecting.
1766540606: New connection from 10.106.194.60:49836 on port 1883.
1766540606: New client connected from 10.106.194.60:49836 as GatewayESP32-d5f2 (p2, c1, k15).
1778795346: Client HeltecGateway-aca7 closed its connection.
1778795347: New connection from 10.106.113.121:52944 on port 1883.
```

4.3.3. Análisis de tráfico con Wireshark (MQTT sobre TCP)

En esta verificación se utilizó Wireshark como herramienta de apoyo para observar el comportamiento real del tráfico de red asociado a la comunicación MQTT del sistema. La captura se realizó en el servidor donde se ejecuta el broker Mosquitto

(puerto 1883), filtrando únicamente el tráfico MQTT para identificar el establecimiento de la sesión y la publicación de telemetría. Como resultado, se evidenció la secuencia de conexión TCP y el intercambio MQTT CONNECT/CONNACK, seguido por mensajes PUBLISH hacia el tópico agricultura/sensor1, lo cual confirma que el Coordinador no solo reporta "publicación exitosa" en su monitor serial, sino que efectivamente envía paquetes MQTT que son recibidos por el broker en la red. Esta evidencia complementa las pruebas de conectividad y recepción desde cliente suscriptor, aportando trazabilidad directa del proceso a nivel de paquetes.

Figura 56

Captura de tráfico MQTT (puerto 1883) donde se evidencia el establecimiento de sesión entre el nodo Coordinador y el broker Mosquitto mediante el intercambio CONNECT/CONNACK.

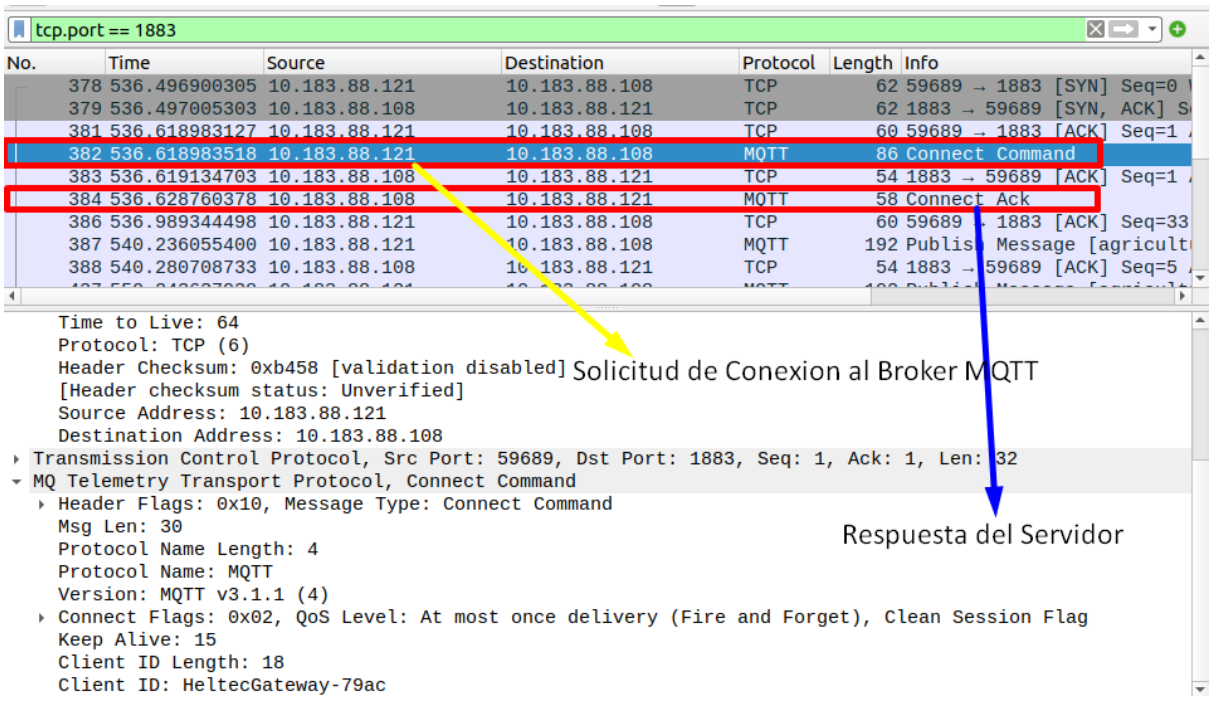
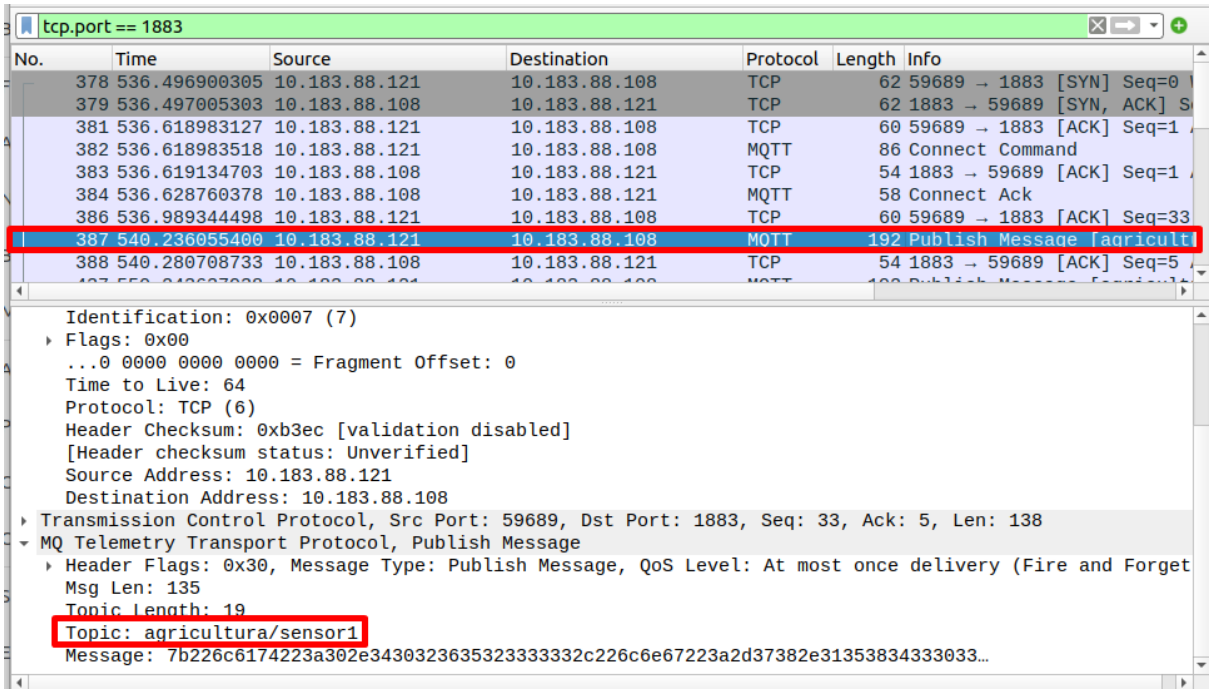


Figura 57

Publicación MQTT de la telemetría en el tópico agricultura/sensor1, capturada con Wireshark, evidenciando el envío del mensaje desde el Coordinador hacia Mosquitto.



4.4.Prueba04_AL: Pruebas de procesamiento y almacenamiento de datos (Backend)

En la presente sección se presentan las pruebas orientadas a validar el funcionamiento del backend del sistema, es decir, el proceso que permite transformar y almacenar de forma correcta la información recopilada en este apartado. En esta fase se verifica que los mensajes publicados en el broker MQTT sean consumidos por Telegraf, que el contenido en formato JSON sea interpretado y convertido a series temporales, y que dichos registros se escriban correctamente en InfluxDB dentro de la base de datos configurada. Posteriormente, se comprueba la disponibilidad de la información mediante consultas básicas en InfluxDB, con el fin de confirmar que los datos quedan almacenados con marca de tiempo y estructura coherente para su análisis. Con estas pruebas se busca garantizar que la capa de procesamiento y persistencia opere de

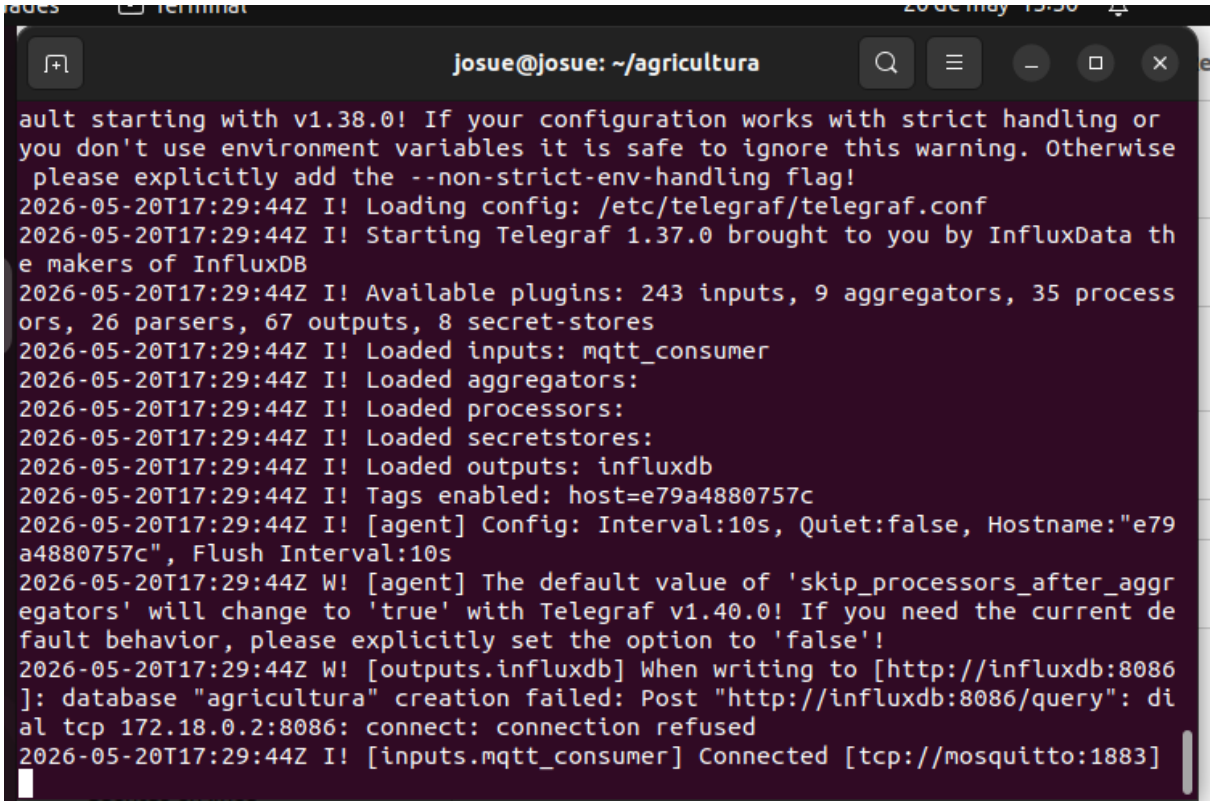
manera estable y que la información quede lista para ser utilizada en la etapa de visualización y análisis del sistema.

4.4.1. Consumo y transformación de datos con Telegraf

En la primera prueba realizada de esta sección se verificó que Telegraf reciba correctamente la telemetría publicada en el broker Mosquitto y la procese según la configuración definida para convertirla en datos almacenables. Para ello se comprobó que Telegraf mantenga la suscripción activa a los tópicos del sistema y que el formato JSON sea interpretado correctamente, identificando cada clave como un campo de medición. Posteriormente, tal como se muestra en la **Figura 58** se validó que el agente ejecute su ciclo de recolección y envío en el intervalo configurado, agrupando las lecturas y preparando los puntos con su respectivo timestamp antes de escribirlos en InfluxDB. Con esto se confirma que Telegraf cumple el rol de puente entre MQTT e InfluxDB, asegurando que los mensajes de telemetría se transformen de forma consistente a series temporales.

Figura 58

Registro del contenedor Telegraf durante la suscripción MQTT y la escritura de métricas hacia InfluxDB.



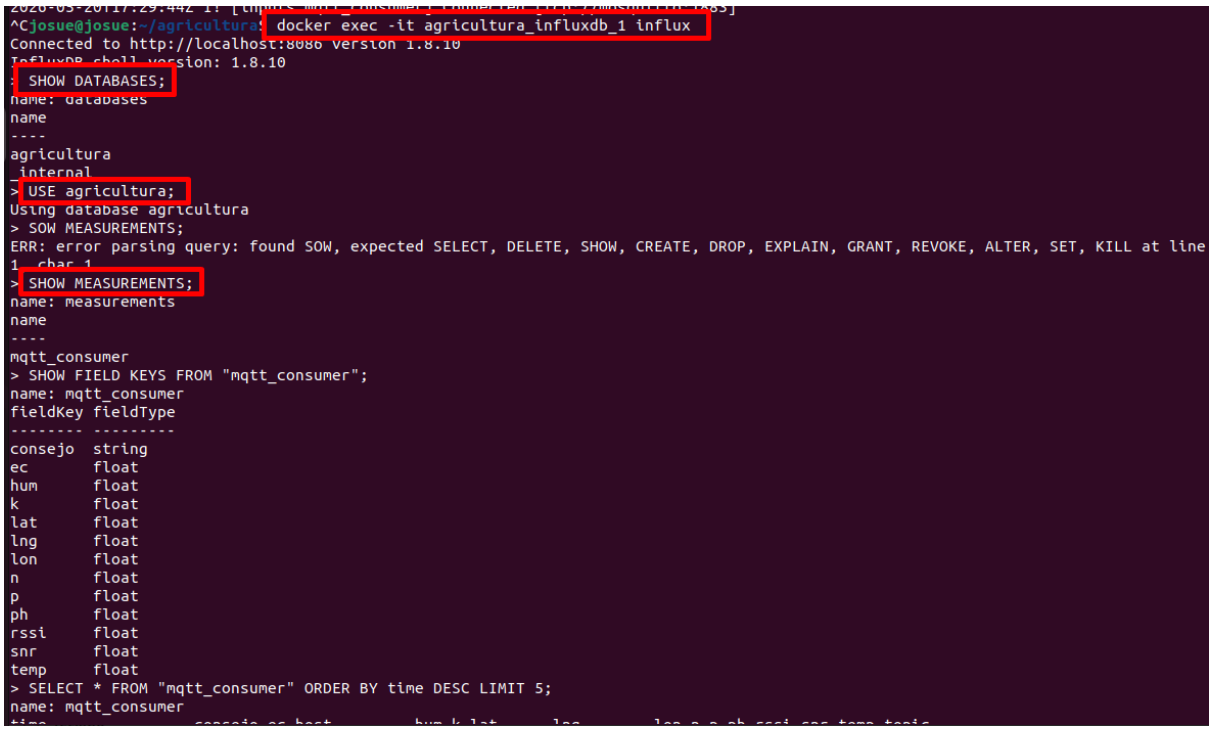
4.4.2. Almacenamiento y consultas básicas en InfluxDB

En esta etapa se verificó que los datos procesados por Telegraf se almacenen correctamente en InfluxDB dentro de la base configurada (agricultura). Para ello se accedió al motor de InfluxDB desde el docker y se realizaron consultas básicas para confirmar la existencia de la base de datos, la creación de mediciones y la persistencia de registros recientes. Como resultado, en la **Figura 59** mediante las consultas realizadas a la base de datos, se comprobó que las lecturas quedan registradas como series temporales con marca de tiempo, lo cual permite recuperar información histórica y filtrar datos por rango temporal o por variable. Mediante esta prueba los resultados

que podemos obtener validan que el componente de almacenamiento opera de forma correcta y que los datos quedan disponibles para el análisis y la visualización.

Figura 59

Proceso de consultas realizadas a la base de datos InfluxDB las cuales muestran el almacenamiento y organización correcto de los datos.



4.5.Prueba05_VI: Verificación de datos y visualización (Dashboard)

En este apartado se validó el correcto funcionamiento del dashboard desarrollado en Grafana como interfaz de visualización del sistema. La prueba consistió en comprobar que los registros almacenados en InfluxDB puedan consultarse y representarse de forma clara en paneles, manteniendo coherencia con las variables adquiridas por el nodo sensor y con los datos procesados en el backend. Para ello se revisó la actualización de los valores en tiempo real, la consistencia de unidades y escalas, y la organización de los paneles para facilitar la interpretación del estado del

suelo. Adicionalmente, se verificó la integración de la tabla de recomendaciones generadas con IA y la visualización espacial mediante el módulo de mapa de calor, de manera que el dashboard no solo muestre lecturas puntuales, sino que permita analizar el comportamiento del cultivo en función del tiempo y la ubicación.

4.5.1. Visualización por variable (gráficas de series temporales)

En la visualización por variable se comprobó que cada medición relevante del sistema pueda mostrarse de manera individual y comprensible en el dashboard, permitiendo interpretar el estado del suelo a partir de lecturas puntuales y su historial. Para esta prueba se verificó la representación de temperatura, humedad, pH, conductividad eléctrica (EC) y nutrientes NPK, observando que los paneles reflejan los valores más recientes consultados desde InfluxDB y mantienen las unidades correspondientes (°C, %, pH, µS/cm y mg/kg). Asimismo, se validó que los indicadores de “estado” (por ejemplo, niveles “Muy bajo”) se actualicen en función de los rangos definidos, lo que permite una interpretación rápida sin necesidad de revisar cada registro en crudo. Con esta verificación se confirmó que el dashboard presenta las variables principales del sistema de forma estructurada y útil para el monitoreo.

Figura 60

Paneles de visualización por variable en Grafana: temperatura, humedad, pH, EC y nutrientes (NPK) consultados desde InfluxDB para el monitoreo del estado del suelo.



4.5.2. Validación del dashboard (organización de paneles, legibilidad y filtros)

En la validación del dashboard se evaluó la organización general de la interfaz y la facilidad de lectura de la información presentada. Para ello se revisó que los paneles estén distribuidos de forma lógica, priorizando en la parte superior los elementos de interpretación rápida, como la tabla de recomendaciones generadas con IA y el módulo de mapa de calor, y ubicando en la sección media e inferior los paneles de variables del suelo (temperatura, humedad, pH, EC y NPK). También se comprobó que los títulos y unidades sean visibles, que los valores destacados tengan un tamaño adecuado y que los indicadores de estado permitan

identificar condiciones críticas sin ambigüedad. Adicionalmente, se verificó el uso del selector de tiempo del dashboard (por ejemplo “Last 5 minutes”), confirmando que al cambiar el rango temporal los paneles se actualizan en conjunto y permiten contrastar lecturas recientes frente a registros históricos. Con ello se confirma que la interfaz no solo muestra datos, sino que facilita su interpretación y consulta bajo distintos rangos de análisis.

Figura 61

Validación del dashboard en Grafana: organización de paneles, legibilidad de resultados y uso del filtro temporal (“Last 5 minutes”) para consulta de registros recientes.



4.6.Prueba06_PC: Pruebas de campo (validación integral del sistema)

En esta fase se realiza la validación integral del sistema en el entorno real de operación, correspondiente a la zona definida para la recolección de datos en el cultivo de maíz. Para iniciar la prueba, el sistema de sensado integrado en el dron se ubicó en uno de los puntos del perímetro del terreno, desde donde se preparó la misión de monitoreo. Posteriormente, se

energizó el nodo sensor, encargado de adquirir las variables del suelo y transmitir la información mediante LoRa. De forma complementaria, se activó el nodo Coordinador, responsable de recibir los paquetes provenientes del nodo sensor y reenviarlos hacia la infraestructura de procesamiento mediante conexión Wi-Fi y protocolo MQTT.

Una vez encendidos los dispositivos de campo, se puso en funcionamiento el servidor local, en el cual se encuentran desplegados los servicios del sistema mediante Docker. Dentro de esta infraestructura se ejecutan el broker MQTT Mosquitto, el agente Telegraf para la suscripción y transformación de datos, la base de datos InfluxDB para el almacenamiento de las mediciones y Grafana como plataforma de visualización. Luego de verificar la correcta comunicación entre el nodo sensor, el nodo Coordinador y los servicios del backend, se comprobó la recepción de datos en el dashboard. Con todos los componentes operativos, se procedió a ejecutar la misión de recolección de datos, evaluando el flujo completo del sistema desde la adquisición en campo hasta la visualización de la información.

Figura 62

Sistema IoT de monitoreo de cultivos



4.6.1. Escenario de prueba en cultivo de maíz (condiciones y procedimiento)

El escenario de prueba se estableció en la comunidad San Andrés El Puente, perteneciente al cantón San Miguel de Urcuquí, provincia de Imbabura. Para la validación del sistema se delimitó un área aproximada de 1.15ha dentro del cultivo de maíz, en la cual se definieron 4 puntos de muestreo para la adquisición de datos. En la **Figura 63** se muestra el área delimitada y la ubicación de los puntos seleccionados. Esta planificación se realizó mediante la aplicación UgCS, la cual permite establecer rutas de vuelo, delimitar zonas de trabajo y configurar puntos de referencia o waypoints para guiar la misión de monitoreo.

Figura 63

Área de monitoreo, plan de vuelo y sensado



Al momento de realizar las pruebas, el terreno se encontraba húmedo debido a un riego previo, lo que permitió obtener mediciones más representativas de las condiciones del suelo. Además, el cultivo de maíz se encontraba en una etapa temprana de desarrollo, facilitando el descenso del dron y la inserción del sensor en los puntos de muestreo sin generar afectaciones importantes en las plantas. Estas condiciones permitieron evaluar el sistema en un entorno real de operación, considerando tanto el comportamiento del prototipo como la confiabilidad de los datos recolectados.

Los parámetros definidos en el software UgCS para la misión fueron se resumen de forma detallada en la **Tabla 24** como la altura, el perímetro de la zona de muestreo, el tiempo, etc.

4.6.2. Planificación de vuelo

Se define como el plan de vuelo al procedimiento que se toma para realizar la planificación del vuelo y toma adquisición de datos, en el plan de vuelo de definen los puntos del terreno en los cuales se tomaran los datos, el área en concreto donde se realizara la toma o captura de datos, las condiciones o parámetros de vuelo como puede ser la altura, velocidad, tiempo de espera, puntos de sensado , obstáculos, distancia entre puntos, delimitación de perímetro, entre otros aspectos técnicos que se toman en cuenta en base a las características del drone.

Figura 64

Delimitación del área de monitoreo del cultivo



La **Figura 6** representa el perímetro designado para realizar la toma de datos y las líneas de cómo se realizará el vuelo del drone, en la **Figura 63** se muestra el área total del terreno el cual tiene una extensión de 1.15ha mientras que en esta imagen ya se define el área de sensado que será únicamente de 5000m2.

Figura 65

Diseño plan de ruta de monitoreo del terreno.



En la **Figura 65** se muestra la planificación de los waypoints agregados en el área de cultivo, esto implica que los datos se tomaran en cada uno de los puntos seleccionados. Se definen los puntos a una distancia de 12m cada uno a razón de que el sensor GPS no logra detectar los cambios a una distancia o área menor, dado que es un gps comercial el cual tiene una precisión limitada. Sin embargo, utilizando esa referencia de distancia se determinó una cantidad de 53 puntos de muestra lo cual es suficiente para tener un informe detallado del estado del cultivo.

El vuelo se planifico en base a las siguientes características:

Tabla 24

Parámetros de planificación de vuelo

Planificación de vuelo	**Configuración / descripción**
Software de planificación	UgCS Open
Tipo de misión	Vuelo de muestreo espacial automatizado mediante *waypoints*
Plataforma	DJI Inspire 1
Carga útil (*Payload*)	Nodo sensor IoT (Módulo LoRa ESP32 + Sensores agronómicos)
Área de monitoreo	5000 m²
Delimitación del terreno	Cuadrícula de muestreo con separación exacta de 12 metros entre puntos de lectura (53 *waypoints* efectivos)
Altura de vuelo	5m sobre el terreno
Velocidad de vuelo	2 m/s

Planificación de vuelo	Configuración / descripción
Patrón de vuelo	*Stop & Dip* (Avance, descenso vertical, retardo, ascenso vertical)
Objetivo de la misión	Mapeo espacial paramétrico de la cobertura de red LoRa (RSSI/SNR) y recolección de datos agronómicos georreferenciados

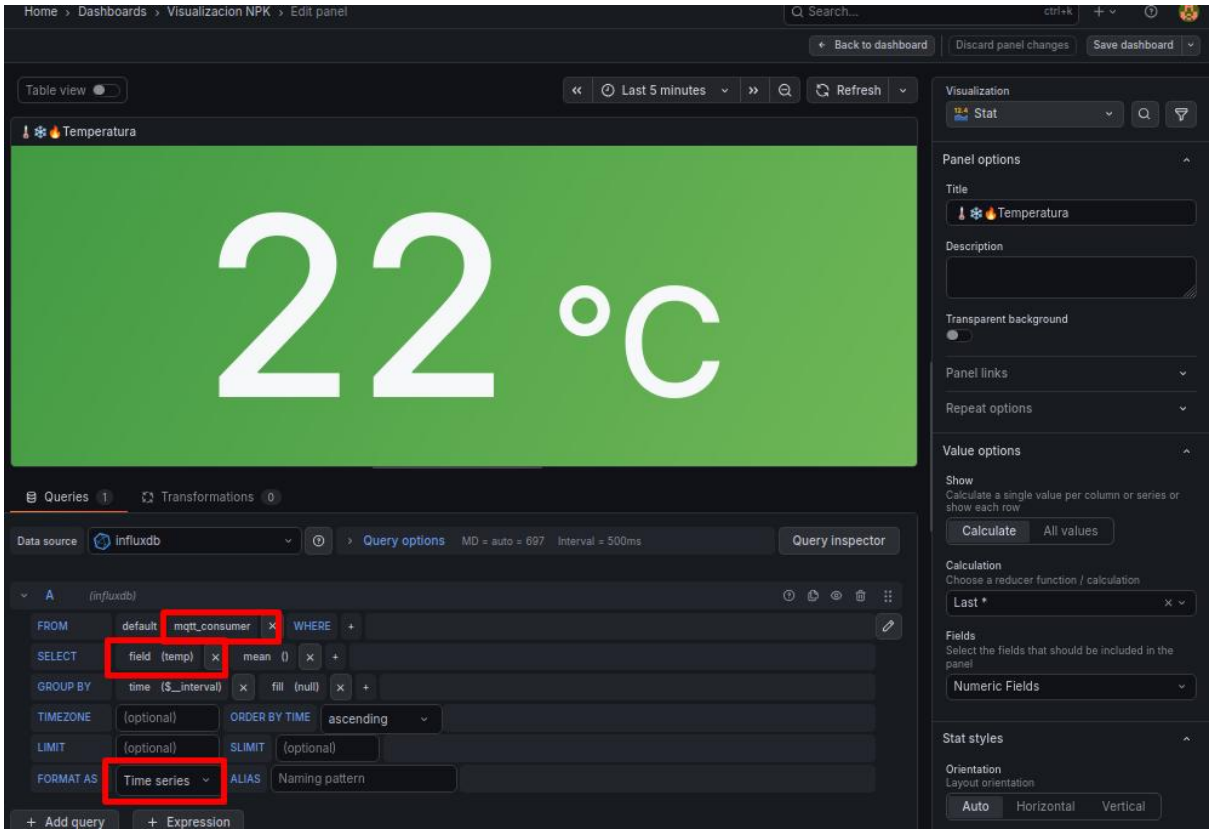
Nota: Se determinaron aproximadamente 53 puntos en el terreno en los que el dron altera su altura para la toma de datos. En cada coordenada definida, la aeronave desciende y permanece estática (*hovering*) durante 60 segundos y luego asciende nuevamente y se dirige al siguiente punto.

4.6.3. Integración de consulta desde Grafana (data source y validación de consultas)

Finalmente, se validó la integración de Grafana con InfluxDB como fuente de datos, con el fin de confirmar que las series temporales almacenadas pueden ser consultadas desde el dashboard. Para ello se configuró InfluxDB como fuente de datos (data source), verificando la conectividad y ejecutando consultas de prueba asociadas a paneles del dashboard. Como resultado, se confirmó que Grafana recupera registros en función del rango de tiempo seleccionado y permite visualizar tendencias por variable, lo cual evidencia que el flujo de datos desde MQTT hasta la capa de visualización se encuentra operativo en el backend. Esta verificación garantiza que la base de datos no solo almacena, sino que también responde correctamente a consultas utilizadas para gráficos y análisis.

Figura 66

Panel en modo edición de grafana donde se realiza la consulta InfluxQL y preview del resultado obtenido.

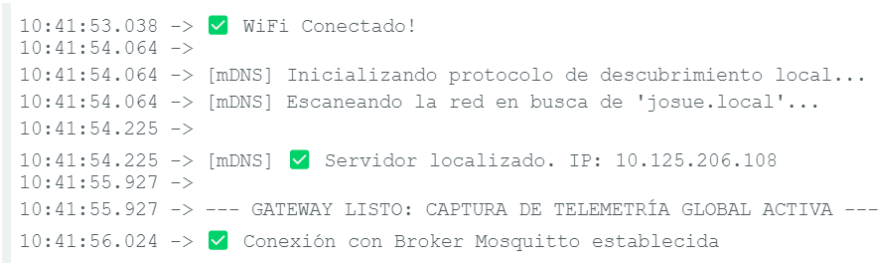


4.6.4. Prueba end-to-end (sensor → LoRa → Coordinador → MQTT → InfluxDB → Grafana)

La prueba end-to-end se realizó con el objetivo de validar el funcionamiento integral del sistema en campo, desde la adquisición de datos en el nodo sensor hasta la visualización final en el dashboard de Grafana. Para ello, se inició el nodo sensor instalado en el dron, verificando la lectura del sensor NPK, la disponibilidad del GPS y la transmisión de datos mediante LoRa. De forma paralela, se encendió el nodo Coordinador, encargado de recibir los paquetes enviados por el nodo sensor, validar su estructura y reenviarlos hacia el servidor mediante Wi-Fi y protocolo MQTT.

Figura 67

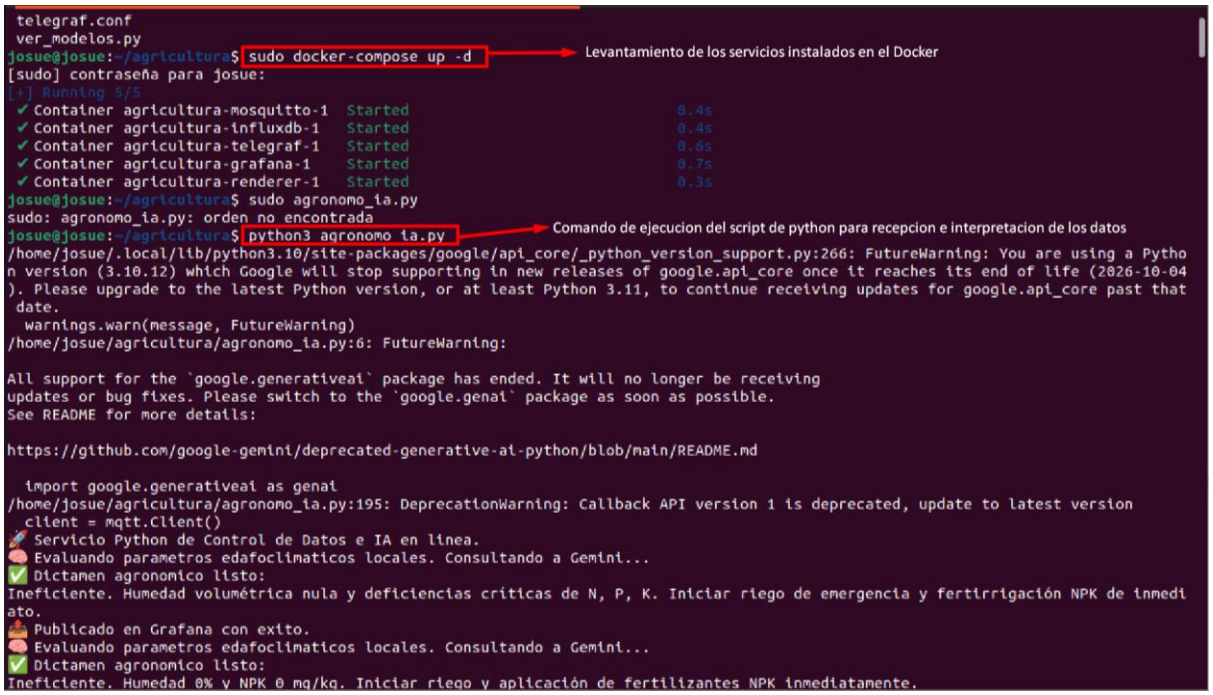
Fase de establecimiento de comunicación del nodo Coordinador



Posteriormente, se puso en funcionamiento la infraestructura de procesamiento desplegada en Ubuntu 22.04 mediante Docker, incluyendo los servicios Mosquitto, Telegraf, InfluxDB y Grafana. Una vez activos los servicios, se verificó que el Coordinador publicara correctamente los datos en el tópico MQTT definido, que Telegraf consumiera dichos mensajes y que InfluxDB almacenara las mediciones como series temporales. Finalmente, se accedió al dashboard de Grafana para comprobar la actualización de los paneles correspondientes a temperatura, humedad, pH, conductividad eléctrica, nutrientes NPK y datos georreferenciados.

Figura 68

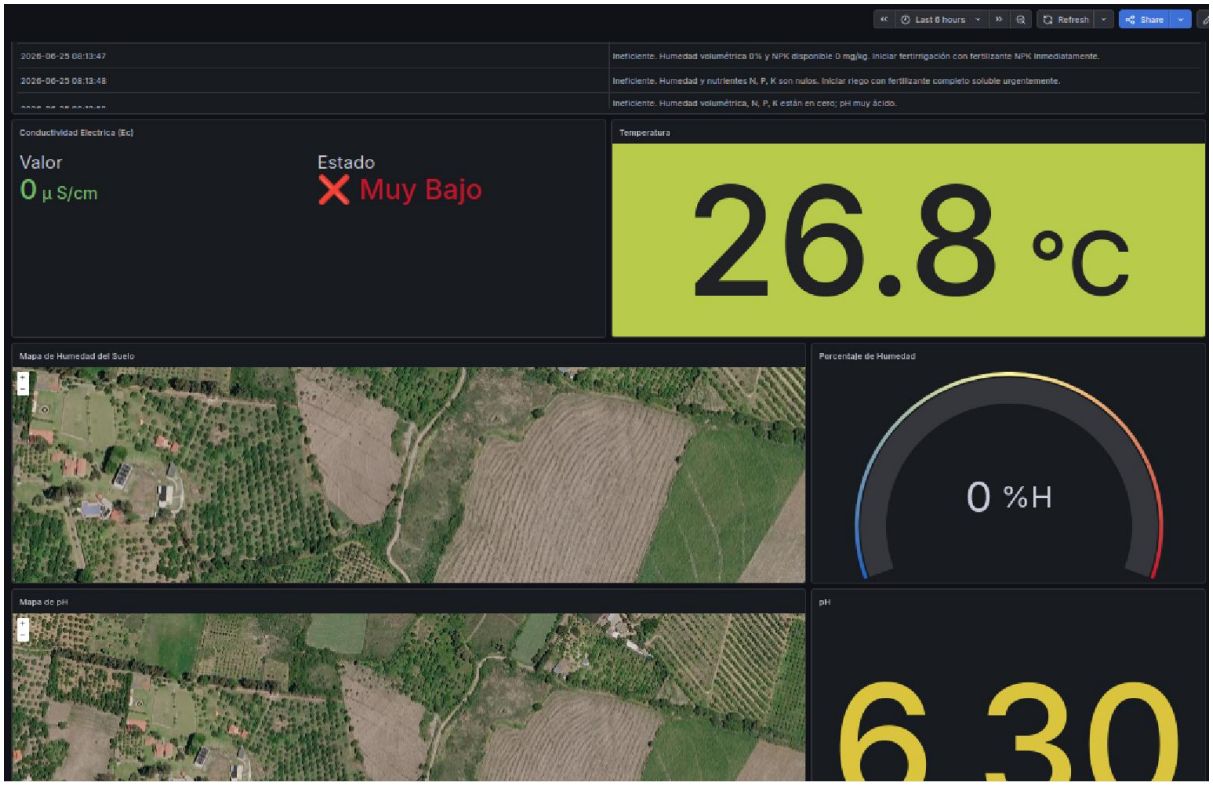
Inicialización del script de python para recepción de datos y análisis de IA



Con esta prueba se comprobó la continuidad del flujo de información entre todos los bloques del sistema: sensor, comunicación LoRa, nodo Coordinador, broker MQTT, almacenamiento en InfluxDB y visualización en Grafana. Los resultados permitieron validar que la arquitectura implementada opera de manera integrada y que los datos recolectados en campo pueden ser transmitidos, almacenados y visualizados correctamente para apoyar el monitoreo agrícola del cultivo de maíz.

Figura 69

Visualización paneles del dashboard en la zona de análisis en tiempo real



4.6.5. Resultados generales y observaciones (fallos, limitaciones y mejoras)

En esta etapa de las pruebas se analizan los datos recopilados y la calidad de la conexión entre nodos, después de verificar que los datos lleguen correctamente hacia la plataforma de visualización verificamos también las métricas de conexión y de la placa con el fin de obtener una conclusión clara de la efectividad del sistema y las limitaciones que puede tener el mismo. De modo que se clasifica las pruebas en varias secciones en donde se verifican y comparan las variables que se obtienen tanto de las pruebas de campo como también de las pruebas realizadas.

Tabla 25

Métricas de Evaluación del sistema

Grupo	Métrica	Qué evalúa	Método de Obtención
Calidad LoRa	RSSI	Potencia de señal recibida	Monitor serial del Coordinador
Calidad LoRa	SNR	Relación señal/ruido	Monitor serial del Coordinador
Pérdida de paquetes	Paquetes enviados/recibidos	Continuidad de transmisión	Contador en nodo sensor y Coordinador
Rendimiento ESP32	Memoria libre	Uso de memoria RAM durante operación	ESP.getFreeHeap()
Sensor	Variables NPK/pH/EC/Hum/Temp	Estabilidad de mediciones	JSON, InfluxDB, Grafana
GPS	Coordenadas válidas	Disponibilidad de georreferenciación	lat/lng ≠ 0.0

Nota: Las métricas analizadas se enfocan en evaluar la comunicación y transmisión de datos a través de las tecnologías empleadas en el sistema. **Fuente:** Autoría propia.

4.6.5.1.Pruebas de potencia de la señal recibida RSSI

En esta prueba de funcionamiento se tomaron los datos de ubicación y distancia entre el nodo coordinador y el nodo sensor, con el objetivo de detectar y analizar la variación de valores en la intensidad de la señal recibida en el nodo coordinador a medida que el nodo sensor aumenta la distancia.

El RSSI es una medida de la potencia presente en una señal de radio recibida. Este valor se calcula mediante la ecuación de balance de enlace derivada de la ecuación de transmisión de Friis.

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{FSPL} - L_M$$

Donde:

$\boldsymbol{P_{RX}}$**:** Potencia de la señal recibida o RSSI (medida en dBm).

$\boldsymbol{P_{TX}}$**:** Potencia de transmisión del nodo sensor (dBm).

$\boldsymbol{G_{TX}}$ $\boldsymbol{G_{RX}}$: Ganancia de las antenas transmisora y receptora (dBi).

$\boldsymbol{L_{FSPL}}$: Pérdida de trayectoria en el espacio libre (Free Space Path Loss) (dB).

$\boldsymbol{L_M}$: Pérdidas misceláneas por obstáculos (follaje del cultivo), absorción atmosférica o cableado (dB).

Figura 70

Estabilidad y Atenuación de la señal (RSSI) por Rangos de distancia con potencia de 14dBm

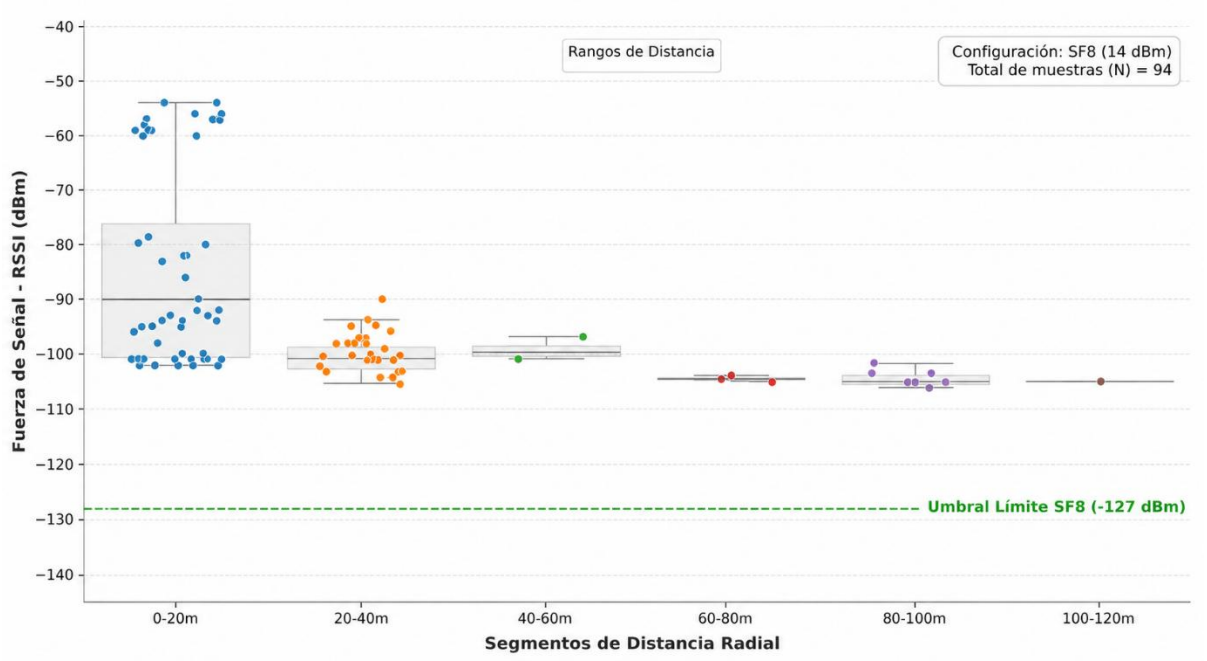
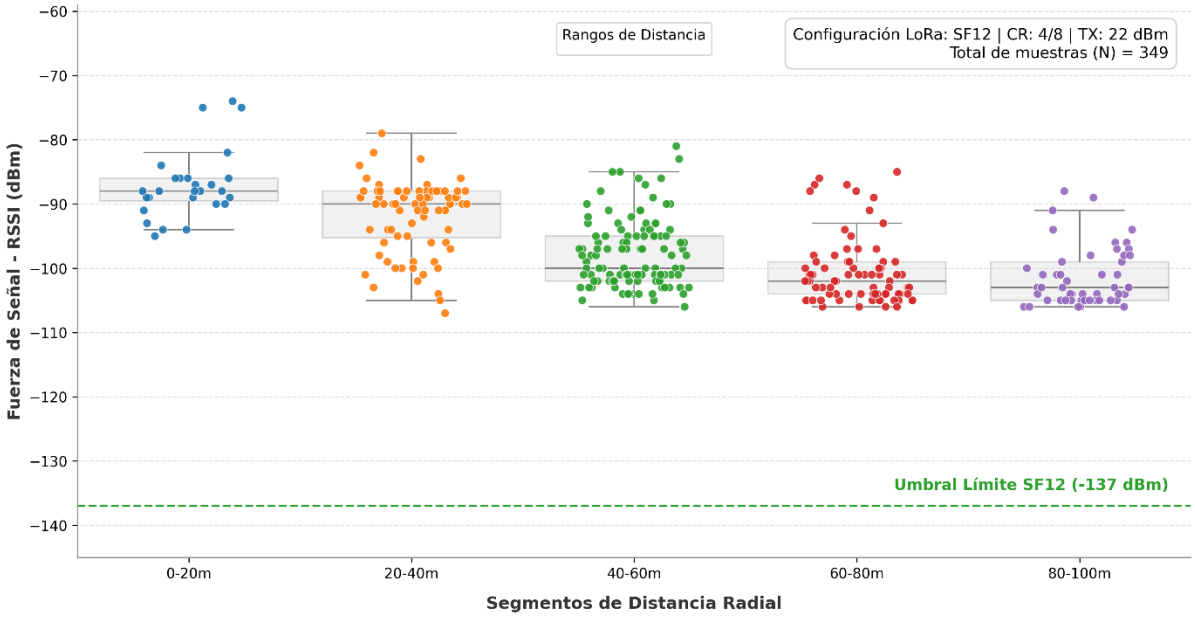


Figura 71

Estabilidad y Atenuación de la señal (RSSI) por Rangos de distancia con potencia de 22dBm



En esta prueba se utilizaron dos casos en los que la principal variable fueron los parámetros de comunicación utilizados para obtener mejores resultados en la **Figura 70** se muestra una prueba utilizando una potencia de transmisión de 14dBm y una factor de expansión de 8 mientras que en la **Figura 71** se muestra una gráfica en donde se varios estos parámetros con la finalidad de mejorar la calidad del enlace y evitar pérdidas durante la transmisión de los datos, en este ejemplo se utiliza una potencia de transmisión de 22dBm y una factor de expansión de 12 lo cual mejora sustancialmente la estabilidad del enlace, algunos aspectos importantes que se pueden observar son los siguientes:

Al observar los datos de la prueba realizada el 28 de junio en el segmento de 40-60m, la gráfica revela un dato muy importante. Aunque la distancia aumenta linealmente, los puntos verdes muestran una dispersión vertical enorme (desde -80 dBm hasta casi -108 dBm).

Esto implica que, a esa distancia, la onda electromagnética está sufriendo interferencia constructiva y destructiva. La señal original choca contra la maleza, el suelo o la humedad del terreno, creando múltiples rebotes que llegan desfasados al nodo coordinador, causando caídas abruptas de potencia.

Algo importante y que justifica la razón de haber modificado los parámetros de comunicación LoRa es que a pesar de la fuerte atenuación que provoca la barrera física de la vegetación al tener el nodo sensor muy cerca del suelo, la prueba de la **Figura 71** demuestra que incluso en la peor distancia evaluada (80-100m), donde la señal cae a medianas de -105 dBm, la red mantiene un margen de seguridad de más de 30 dBm por encima del umbral de muerte del chip SX1262 (-137 dBm). Esto garantiza que el enlace físico de radiofrecuencia sobrevive a los 100 metros.

4.6.5.2.Pruebas de calidad de la señal SNR

La Relación Señal/Ruido (SNR) constituye una métrica de gran relevancia para verificar la estabilidad de un enlace de radiofrecuencia sometido a condiciones hostiles. El presente apartado detalla el comportamiento del canal de comunicación LoRa frente a severos desvanecimientos por trayectos múltiples, causados por una topología donde la antena transmisora se encuentra ubicada a nivel del suelo. El análisis posterior muestra la capacidad del enlace para operar con márgenes de SNR negativos, demostrando cómo la reconfiguración del Factor de Dispersión (SF) permite demodular exitosamente tramas de datos inmersas por debajo del piso de ruido térmico.

El SNR compara el nivel de la señal de información deseada con el nivel del ruido de fondo presente en el ambiente.

$$SNR_{dB} = 10 \log 10 \left(\frac{P_{señal}}{P_{ruido}}\right)$$

Figura 72

Comportamiento del SNR vs Distancia con potencia de 14dBm

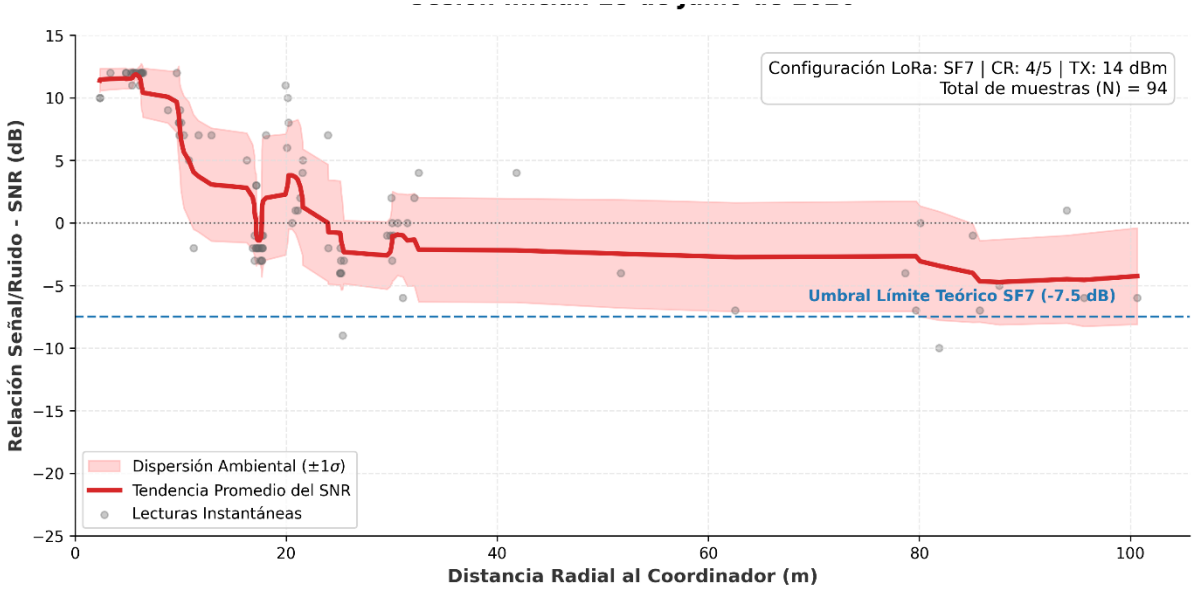
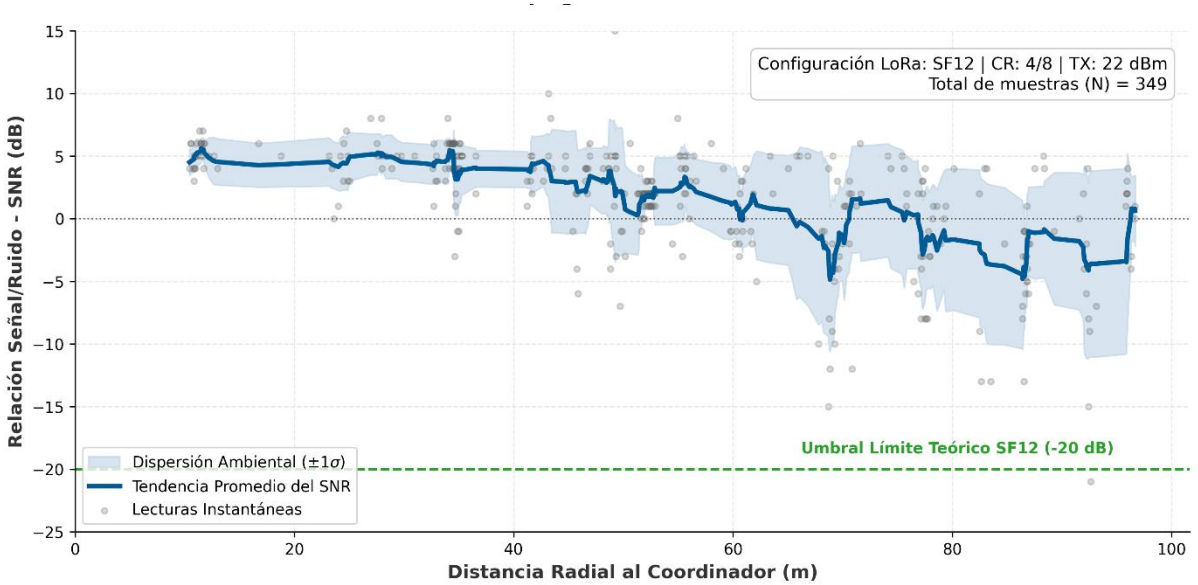


Figura 73

Comportamiento del SNR vs Distancia con potencia de 22dBm



Para el análisis se presentan dos escenarios claves en los que como se mostró previamente en el caso de RSSI, se varían las métricas de comunicación del enlace LoRa, en la primera **Figura 72** se muestra la prueba realizada con una potencia de transmisión de 14dB en la cual se logra notar una degradación violenta de la señal. Aunque el enlace comienza con un SNR excelente (casi +12 dB) gracias a la cercanía, la curva roja se desploma rápidamente y cruza el piso de ruido (0 dB) a los escasos 18-20 metros. Esto ilustra a la perfección el impacto de la absorción de radiofrecuencia por la biomasa; la maleza actúa como un muro denso que ahoga la señal casi de inmediato. Mientras que en la **Figura 73** la curva azul muestra un comportamiento muy distinto. Aunque el SNR inicial es menor (comienza alrededor de +5 dB, lo cual es normal ya que el SF12 ensancha la señal reduciendo el pico de potencia espectral), la tendencia forma una "meseta" de alta estabilidad. El enlace logra mantenerse por encima del piso de ruido hasta aproximadamente los 65 metros. La potencia de transmisión de 22 dBm empuja la onda electromagnética a través de los obstáculos cercanos con éxito.

Dentro del análisis también observamos que en la **Figura 72** el promedio del SNR a los 100 metros ronda los -5 dB. Estando el límite del hardware en -7.5 dB, el sistema opera con un margen de seguridad paupérrimo de apenas 2.5 dB. Cualquier ráfaga de viento que mueva las hojas o un cambio en la humedad del suelo causaría una desconexión. Mientras que en la **Figura 73** a los mismos 100 metros, el promedio del SNR es similar (rondando los -5 a -8 dB). Sin embargo, al haber bajado el límite tecnológico a -20 dB mediante el SF12, el sistema ahora goza de un margen de seguridad masivo de 12 a 15 dB.

4.6.5.3.Pruebas de Perdida de Paquetes

La evaluación de la Tasa de Pérdida de Paquetes es un aspecto fundamental para garantizar la fiabilidad de un enlace inalámbrico LoRa. A diferencia de las métricas de

propagación física en el aire (como el RSSI y el SNR), la pérdida de paquetes refleja directamente el porcentaje de telemetría que fue destruida por el medio y no logró llegar al nodo coordinador. En un entorno de cultivos denso, donde la antena opera a escasos centímetros del nivel del suelo sin línea de vista (NLOS), esta métrica determina si el sistema es viable para la monitorización continua. La **Figura 74** presenta el comportamiento de la red agrupado por segmentos espaciales de 20 metros, contrastando el rendimiento de dos perfiles de transmisión bajo las mismas condiciones de interferencia vegetal.

El PLR es una métrica de calidad de servicio que cuantifica el porcentaje de tramas de datos que, habiendo sido transmitidas por el nodo sensor, nunca llegaron a la base de datos debido a colisiones, atenuación por el cultivo o interferencias y viene dada por la siguiente formula:

$$PLR = \left(\frac{N_{TX} - N_{RX}}{N_{TX}}\right) * 100$$

Donde:

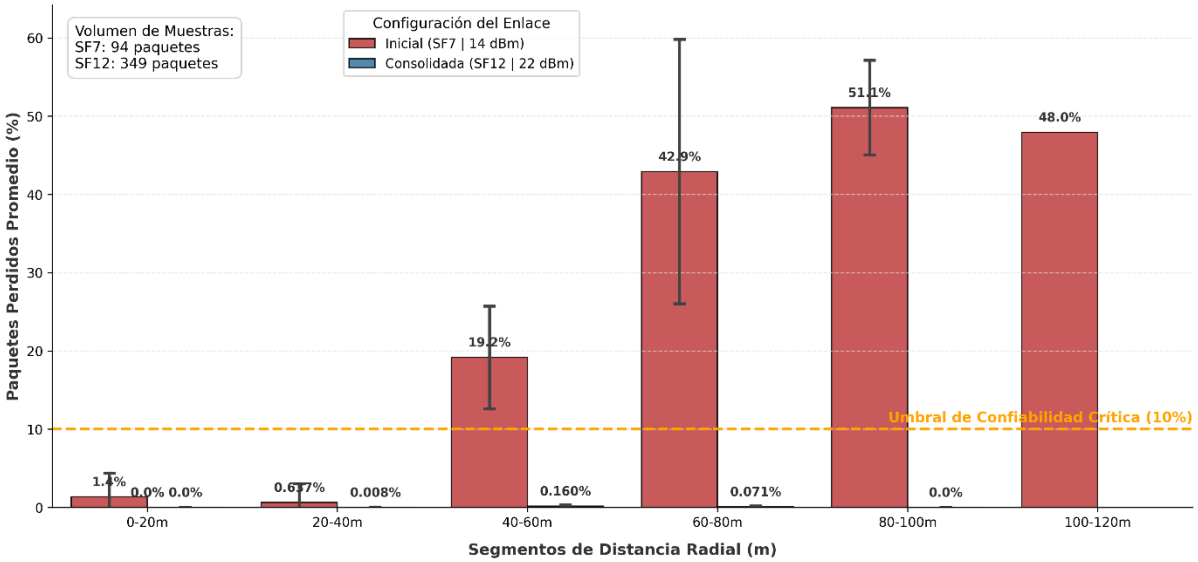
PLR: Tasa de pérdida de paquetes (%).

N_{TX}: Número total de paquetes transmitidos por el nodo final.

N_{RX}: Número total de paquetes exitosamente recibidos y procesados por el coordinador

Figura 74

Tasa de Perdida de paquetes en proporción a la distancia



En el análisis de la gráfica de perdida de paquetes utilizando los parámetros de comunicación equivalente a 14dBm de potencia de transmisión, un factor de propagación de 8 y una configuración de la tasa de corrección de errores de 4/8 se representan con las barras de color rojo se evidencia un colapso inminente del enlace a medida que aumenta la distancia radial. En los primeros 40 metros, la pérdida se mantiene marginal (0.637%), lo cual indica que la potencia estándar es suficiente para distancias cortas a pesar de la maleza. Sin embargo, a partir del segmento de 40 a 60 metros, la atenuación física rompe abruptamente el umbral de confiabilidad crítica del 10% alcanzando una pérdida promedio del 19.2%.

Esta degradación tiene un aumento proporcional a la distancia, registrando una pérdida de paquetes superior al 51% en el rango de 80 a 100 metros. El porcentaje de error en rangos

de distancia mayores confirman una alta inestabilidad del canal, donde la entrega de datos del nodo sensor se vuelve ineficaz y dependiente de fluctuaciones aleatorias del medio físico.

En contraste con la primera muestra realizada, la muestra más relevante se da al implementar los cambios en los parámetros de comunicación LoRa. Siendo la potencia de transmisión de 22dBm y un factor de propagación de 12 manteniendo la misma tasa de bit de corrección es decir 4 ya que esta permite enviar 4 bits de corrección por cada 4 bits enviados, logrando así una configuración de gran robustez. Esta configuración permitió mejorar significativamente la tasa de perdida de paquetes, demuestra un mejor rendimiento a un entorno de condiciones variables. Con la aplicación de estas variables la tasa de paquetes perdidos se desploma drásticamente, manteniéndose por debajo del 0.2% en toda el área de cobertura estudiada.

Es fundamental destacar la captura de valores residuales, tales como el 0.160% a los 60 metros o el 0.071% a los 80 metros. Estos datos confirman el comportamiento del canal de radiofrecuencia configurado para funcionar en óptimas condiciones en un entorno con muchas variables que influyen en la degradación de la señal y por ende la ineficiencia en la comunicación es conclusión el enlace sigue sufriendo las interferencias de la maleza, pero gracias a la redundancia de la codificación matemática el chip coordinador SX1262 logra reconstruir exitosamente la información fragmentada por debajo del piso de ruido, recuperando la tasa de pérdida a un rotundo 0.0% en los límites de la red (100-120m).

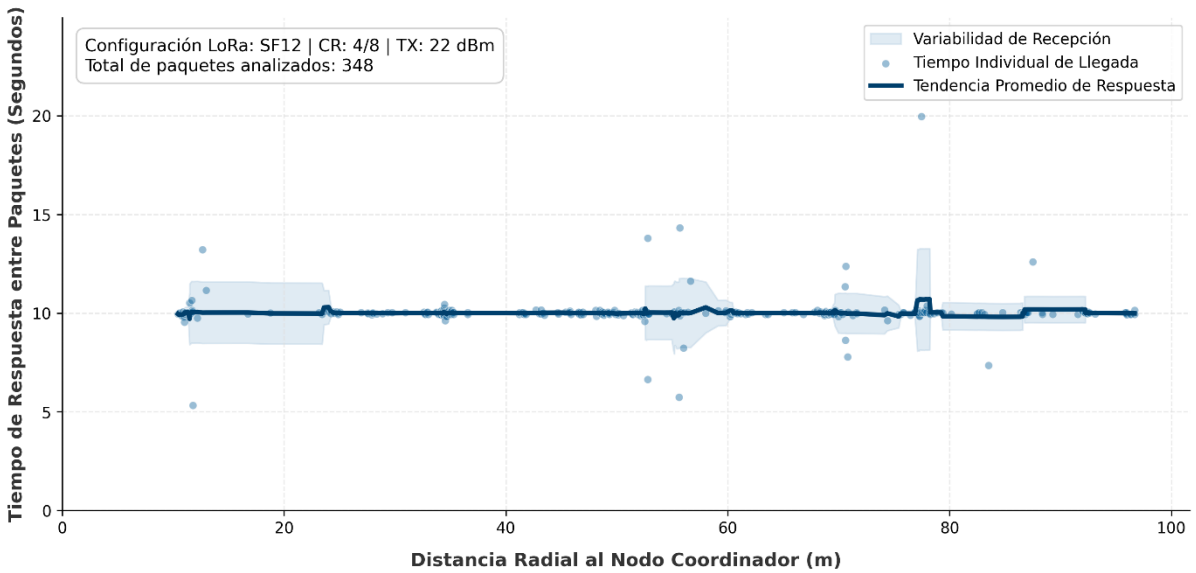
4.6.5.4.Prueba de tiempo de respuesta y retrasos

Cuando en un enlace de comunicaciones inalámbricas utilizando LoRa se configura un factor de propagación de 7 este viaja extremadamente rápido es decir que el factor de propagación es directamente proporcional al tiempo de transmisión o entrega de los paquetes, en cambio un paquete con un factor de propagación de 12 se ensancha tanto en el tiempo que

puede tardar más de 1 o 2 segundos completos solo en transmitirse, lo que genera un "cuello de botella" y retrasos en la recepción. Sin embargo, al sacrificar el tiempo de entrega se obtiene un mayor alcance del enlace o una mayor resistencia a fallos.

Figura 75

Tiempo de respuesta en función de la distancia



La **Figura 75** presenta el tiempo de respuesta en función de la distancia, utilizando la configuración de red con los parámetros más adecuados para entornos agrícolas con mayor cantidad de obstáculos e interferencia por el medio en el que se estableció los parámetros para que la comunicación sea más robusta y resistente a la atenuación por el ambiente y a la distancia. A diferencia del análisis de la configuración estándar en la cual se usaba una potencia de transmisión de 14 dBm y un factor de propagación de 8, en la cual los tiempos de espera se multiplicaban debido a la pérdida de información, esta gráfica revela un comportamiento de canal altamente determinista y predecible.

En la interpretación de la gráfica el hallazgo más significativo de esta prueba es la línea de tendencia central, la cual se mantiene rígida y constante sobre el umbral de los 10 segundos a lo largo de todo el trayecto. Esto indica que el nodo coordinador recibe con éxito cada

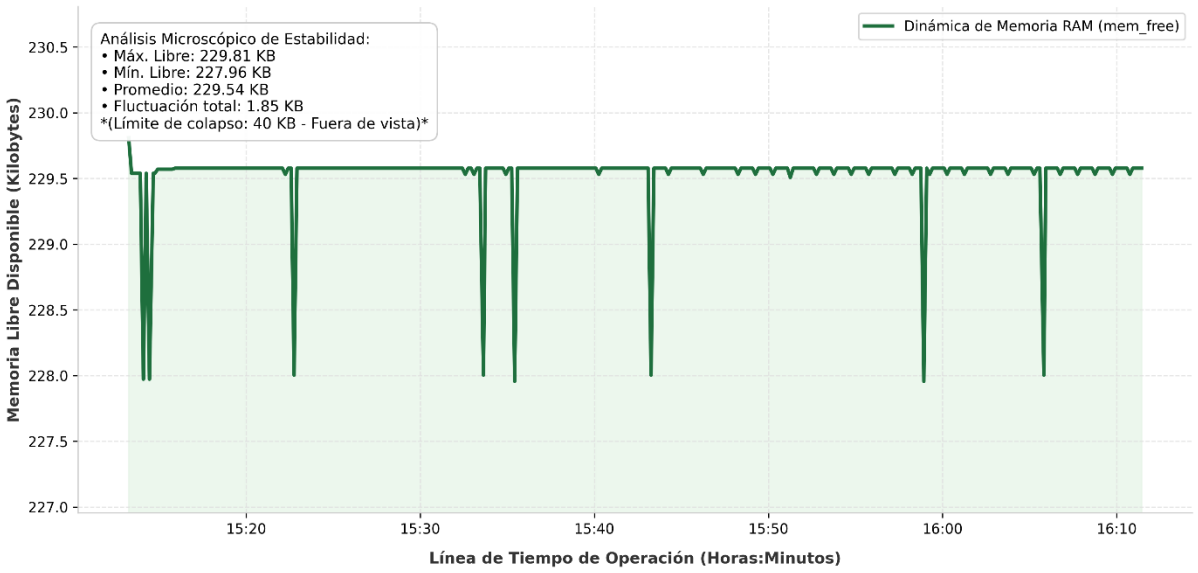
transmisión exactamente en el intervalo programado por el firmware del nodo sensor. La atenuación causada por la biomasa de la maleza y la falta de línea de vista directa no logran perturbar la periodicidad de la telemetría. Sin embargo, en algunos puntos se ve algunos paquetes que llegan con retardos leves y de forma muy poco frecuente existe alguno que otro paquete que excede el umbral de tiempo por muchos segundos, pero a pesar de ello se entregan todos los paquetes. Al no existir paquetes corruptos, el coordinador no sufre tiempos muertos de espera, garantizando un flujo de datos ininterrumpido.

4.6.5.5.Prueba de Consumo de memoria del microcontrolador Esp32 LoRa Heltec V3 ubicado en el nodo Coordinador

El consumo de memoria Ram de la placa durante la transmisión constituye un aspecto critico durante el diseño del sistema, ya que influye directamente en el rendimiento del sistema para transmitir y procesar los datos. En este caso en la **Figura 76** permite observar un patrón picos invertidos o caídas abruptas recurrentes. Lejos de ser anomalías, estos descensos representan el instante exacto en el que el coordinador recibe una trama de datos LoRa proveniente de los sensores de suelo.

Figura 76

Comportamiento del consumo de memoria de la placa del nodo coordinador durante la transmisión de datos



Al ingresar un paquete, el microcontrolador asigna memoria dinámicamente para alojar el payload, decodificar la estructura, construir el objeto JSON y preparar el socket de red para la transmisión vía MQTT hacia el servidor. Este esfuerzo computacional genera una ocupación instantánea de memoria, empujando el valor libre hacia el mínimo registrado de 227.96 KB. Teniendo en cuenta que la memoria total es de 512KB el porcentaje usado tanto por el sistema como también para la transmisión de datos es equivalente a al 55% logrando que el rendimiento sea el óptimo y de alta eficiencia. En sistemas embebidos, un rendimiento excelente no se mide por tener el consumo más bajo posible, sino por la estabilidad y predictibilidad del consumo.

4.6.5.6.Análisis agronómico de las variables del suelo

La presente sección se enfoca en el análisis de los datos capturados por el sistema de monitoreo de cultivos desplegada en el terreno durante diferentes jornadas en el año 2026. Se toma en cuenta que se realizo la captura de los datos por secciones, logrando así un monitoreo completo de todo el cultivo de maíz en aproximadamente 3 días, sin embargo, se realizaron más pruebas y comparativas previas y posteriores en las cuales los factores climáticos variaban drásticamente con la finalidad de observar el comportamiento y analizar los datos obtenidos en esas condiciones variables.

Jornada 1: 25 de junio de 2026

En esta primera jornada de recolección de datos se procesaron un total de 32 lecturas georreferenciadas en donde uno de los factores determinantes fue la humedad del suelo ya que esta prueba se realizó mientras en cultivo se encontraba muy seco por lo que desde la perspectiva de la instrumentación electrónica y la edafología, la captura de un valor "0" no implica necesariamente la esterilidad química absoluta del suelo, sino que responde a limitaciones físicas en el principio de medición del sensor bajo condiciones ambientales adversas.

Condiciones Ambientales

Las primeras variables recopiladas son la temperatura y la humedad para este caso dando una temperatura promedio de 18.4°C mientras que la humedad promedio estuvo en un valor de 31.32%.

Figura 77

Estado de las variables Temperatura y humedad durante la primera jornada de monitoreo en campo el día 25 de junio



Reacción del Suelo (pH) y Conductividad (EC)

El pH promedio registrado fue de 8.3. El pH promedio es alcalino para los requerimientos óptimos del maíz (ideal entre 5.8 y 7.0). Esto podría estar limitando la asimilación de nutrientes, especialmente fósforo. Por otro lado, la conductividad eléctrica (EC) registró un promedio de 0.00 dS/m, indicando que existió algún error durante la lectura o las condiciones del suelo son extremamente secas lo cual impide al sensor medir correctamente la conductividad eléctrica.

Figura 78

Mapa de calor representativa de la variable pH en la zona de cultivo



Macronutrientes (NPK) y Distribución Espacial

En este apartado mostro valores de NPK igual a cero en todos los valores debido a que el Sensor utilizado mide la concentración de los macronutrientes en base a la conductividad eléctrica, al tener valores de cero en esta variable no tiene manera de como calcular los valores de NPK.

Figura 79

Mapas de calor correspondiente a macronutrientes tales como Nitrógeno, Fosforo, Potasio



Análisis de datos con IA

En este análisis preliminar podemos notar que la IA interpreta los datos recopilados por medio de los sensores, en este caso nos muestra una clara deficiencia en los nutrientes NPK a lo largo de toda la monitorización debido a la falta de calibración y resequedad del suelo. La recomendación que nos da es que se realice una pronta fertilización para estabilizar los parámetros de suelo y mejorar el estado del cultivo.

Figura 80

Resumen de los resultados y consejos proporcionados por la IA generativa



Panel IA

Time	consejo
2026-06-25 08:08:40	Ineficiente. Humedad y nutrientes (N, P, K) nulos. Iniciar fertirrigación con un fertilizante balanceado de NPK inmediatamente.
2026-06-25 08:08:48	Ineficiente. Humedad volumétrica y nutrientes (N, P, K) en cero. Iniciar riego inmediato y fertirrigación completa.
2026-06-25 08:08:48	Ineficiente. Humedad volumétrica nula y deficiencias críticas de N, P, K. Iniciar riego de emergencia y fertirrigación NPK de inmediato.
2026-06-25 08:08:48	Ineficiente. Humedad 0% y NPK 0 mg/kg. Iniciar riego y aplicación de fertilizantes NPK inmediatamente.
2026-06-25 08:13:47	Ineficiente. Humedad volumétrica 0% y NPK disponible 0 mg/kg. Iniciar fertirrigación con fertilizante NPK inmediatamente.

En el análisis por distancia se tiene los valores característicos en cada punto, lo cual nos ofrece una visión más clara del estado de las variables durante este monitoreo.

Tabla 26

Tabla de Variables en función de la distancia durante la jornada de monitoreo del 25 de junio

Hora	Distancia (m)	Coordenadas	N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	pH	EC (dS/m)	Temp (°C)	Hum (%)
18:13	0.0 m	0.404006, -78.152520	0.0	0.0	0.0	9.00	0.00	20.7	40.7
18:14	14.3 m	0.403888, -78.152571	0.0	0.0	0.0	9.00	0.00	16.7	5.2
18:21	78.4 m	0.403315, -78.152663	0.0	0.0	0.0	8.50	0.00	20.3	12.3
18:28	64.9 m	0.403552, -78.152889	0.0	0.0	0.0	8.90	0.00	16.0	19.5
18:46	30.6 m	0.404063, -78.152250	0.0	0.0	0.0	6.10	0.00	20.0	78.7

Jornada 2: 27 de junio de 2026

El segundo recorrido realizado fue realizado en horas de la tarde durante la cual se procesaron un total de 150 lecturas georreferenciadas, evaluando la variabilidad espacial de las condiciones edáficas y ambientales.

Condiciones Ambientales

Durante el recorrido, la temperatura promedio del suelo/ambiente en los puntos de medición fue de 24.6 °C, con una humedad relativa del 29.7%. Estas condiciones influyen

directamente en la tasa de mineralización de la materia orgánica y en el estrés hídrico de las plantas.

Figura 81

Estado de las variables Temperatura y humedad durante la primera jornada de monitoreo en campo el día 27 de junio



Reacción del Suelo (pH) y Conductividad (EC)

El pH promedio registrado fue de 6.79. El pH se encuentra dentro del rango óptimo el cual se encuentra en el rango de 5.8 a 7.0 para el correcto desarrollo del maíz, facilitando la absorción de nutrientes. Por otro lado, la conductividad eléctrica (EC) registró un promedio de 203.15 dS/m, indicando un nivel de salinidad que, en este rango, no representa un factor de estrés osmótico limitante para la germinación o desarrollo del maíz.

Figura 82

Mapa de calor representativa de la variable pH en la zona de cultivo

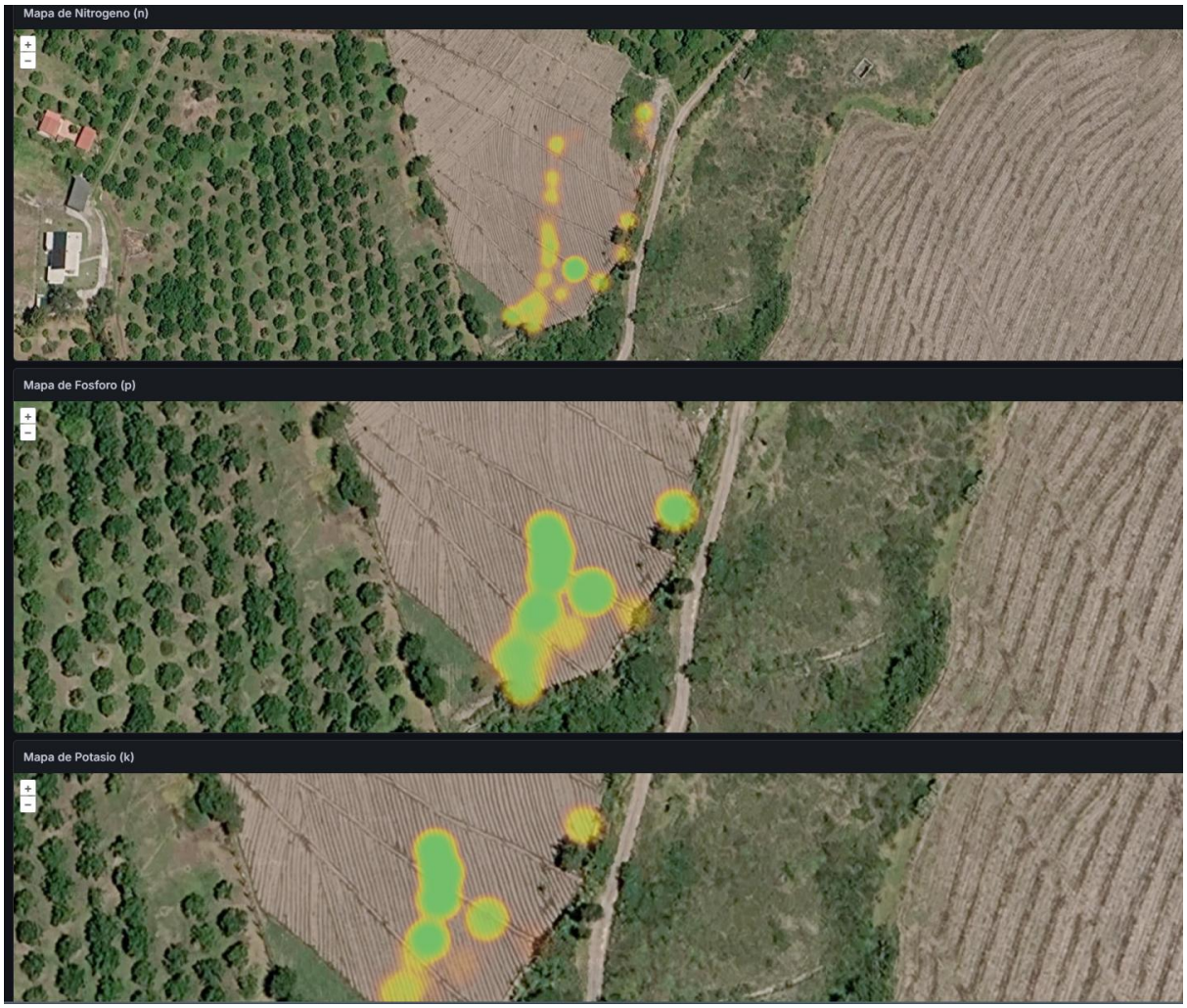


Macronutrientes (NPK) y Distribución Espacial

La disponibilidad de macronutrientes mostró los siguientes promedios: Nitrógeno (12.5 mg/kg), Fósforo (54.7 mg/kg) y Potasio (47.5 mg/kg). Los niveles de Nitrógeno están en un rango bajo. El maíz es un cultivo altamente exigente en nitrógeno; por lo cual en esta sección del terreno se sugiere evaluar un programa de fertilización nitrogenada de cobertera.

Figura 83

Mapas de calor correspondiente a macronutrientes tales como Nitrógeno, Fosforo, Potasio en el monitoreo realizado el 27 de junio



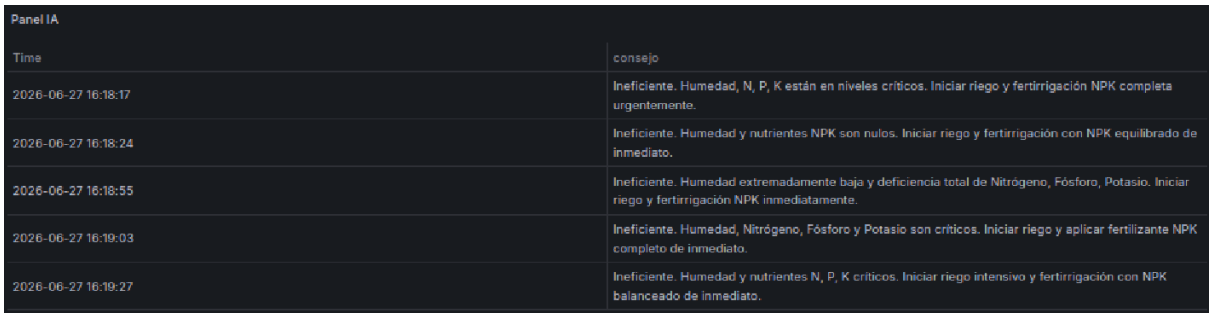
Al analizar la tabla de concentraciones por distancia, se puede observar cómo varían estos niveles a medida que nos alejamos del punto de origen 0 m. Las variaciones bruscas en la concentración de nutrientes (NPK) a determinadas distancias pueden indicar zonas con diferente tipo de suelo.

Análisis de datos con IA

En el presente análisis se puede notar que persiste la deficiencia de valores NPK adecuados debido a la falta de riego y fertilización del terreno, al no contar con la humedad suficiente el sensor es incapaz de medir la concentración de nutrientes en el suelo por lo cual arroja ese tipo de resultados.

Figura 84

Reporte de consejos proporcionados por la IA generativa durante el monitoreo



Panel IA

Time	consejo
2026-06-27 16:18:17	Ineficiente. Humedad, N, P, K están en niveles críticos. Iniciar riego y fertirrigación NPK completa urgentemente.
2026-06-27 16:18:24	Ineficiente. Humedad y nutrientes NPK son nulos. Iniciar riego y fertirrigación con NPK equilibrado de inmediato.
2026-06-27 16:18:55	Ineficiente. Humedad extremadamente baja y deficiencia total de Nitrógeno, Fósforo, Potasio. Iniciar riego y fertirrigación NPK inmediatamente.
2026-06-27 16:19:03	Ineficiente. Humedad, Nitrógeno, Fósforo y Potasio son críticos. Iniciar riego y aplicar fertilizante NPK completo de inmediato.
2026-06-27 16:19:27	Ineficiente. Humedad y nutrientes N, P, K críticos. Iniciar riego intensivo y fertirrigación con NPK balanceado de inmediato.

Tabla 27

Tabla de Variables en función de la distancia durante la jornada de monitoreo del 27 de junio

Hora	Distancia (m)	Coordenadas	N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	pH	EC (dS/m)	Temp (°C)	Hum (%)
16:27	0.0 m	0.403809, -78.152700	0.0	0.0	0.0	9.00	71	23.1	5.5
16:29	13.5 m	0.403690, -78.152726	0.0	0.0	0.0	6.80	0	24.4	3.3
16:31	35.3 m	0.403494, -78.152739	0.0	0.0	0.0	6.90	0	23.5	3.1

Hora	Distancia (m)	Coordenadas	N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	pH	EC (dS/m)	Temp (°C)	Hum (%)
16:33	47.4 m	0.403384, -78.152743	19.0	90.0	82.0	6.40	276	23.2	92.1
16:34	59.2 m	0.403282, -78.152777	33.0	124.0	117.0	6.20	346	19.5	63.2
16:36	69.5 m	0.403195, -78.152820	0.0	18.0	11.0	6.90	128	23.8	19.9
16:41	58.4 m	0.403286, -78.152657	0.0	25.0	17.0	5.60	142	29.2	17.8
16:49	42.9 m	0.403521, -78.152444	0.0	0.0	0.0	8.80	0	19.4	19.0

Jornada 3: 28 de junio de 2026

Durante esta Jornada de monitoreo se afinaron algunos parámetros de medición y captura de datos con el fin de mejorar la transmisión de paquetes y tener mejores resultados. Durante este periodo se recolectaron 349 muestras de las cuales se analizan en las siguientes secciones.

Condiciones Ambientales

Durante el trayecto realizado en la zona de pruebas, la temperatura promedio del suelo/ambiente en los puntos de medición fue de 28.7 °C, con una humedad relativa del 32.7%. Siendo así valores dentro del rango aceptable para el cultivo de maíz.

Figura 85

Estado de las variables Temperatura y humedad durante la primera jornada de monitoreo en campo el día 28 de junio



Reacción del Suelo (pH) y Conductividad (EC)

En cuanto a los valores de pH y conductividad nos encontramos con valores promedios de 6.38 para el pH lo cual indica un suelo ligeramente acido, sin embargo, esto está dentro del rango adecuado para un desarrollo adecuado del maíz. Mientras que la conductividad eléctrica está en un valor promedio de 352.76 dS/m. Esto indica que el nivel de salinidad del suelo es relativamente adecuado para el cultivo de maíz

Figura 86

Mapa de calor representativa de la variable pH en la zona de cultivo

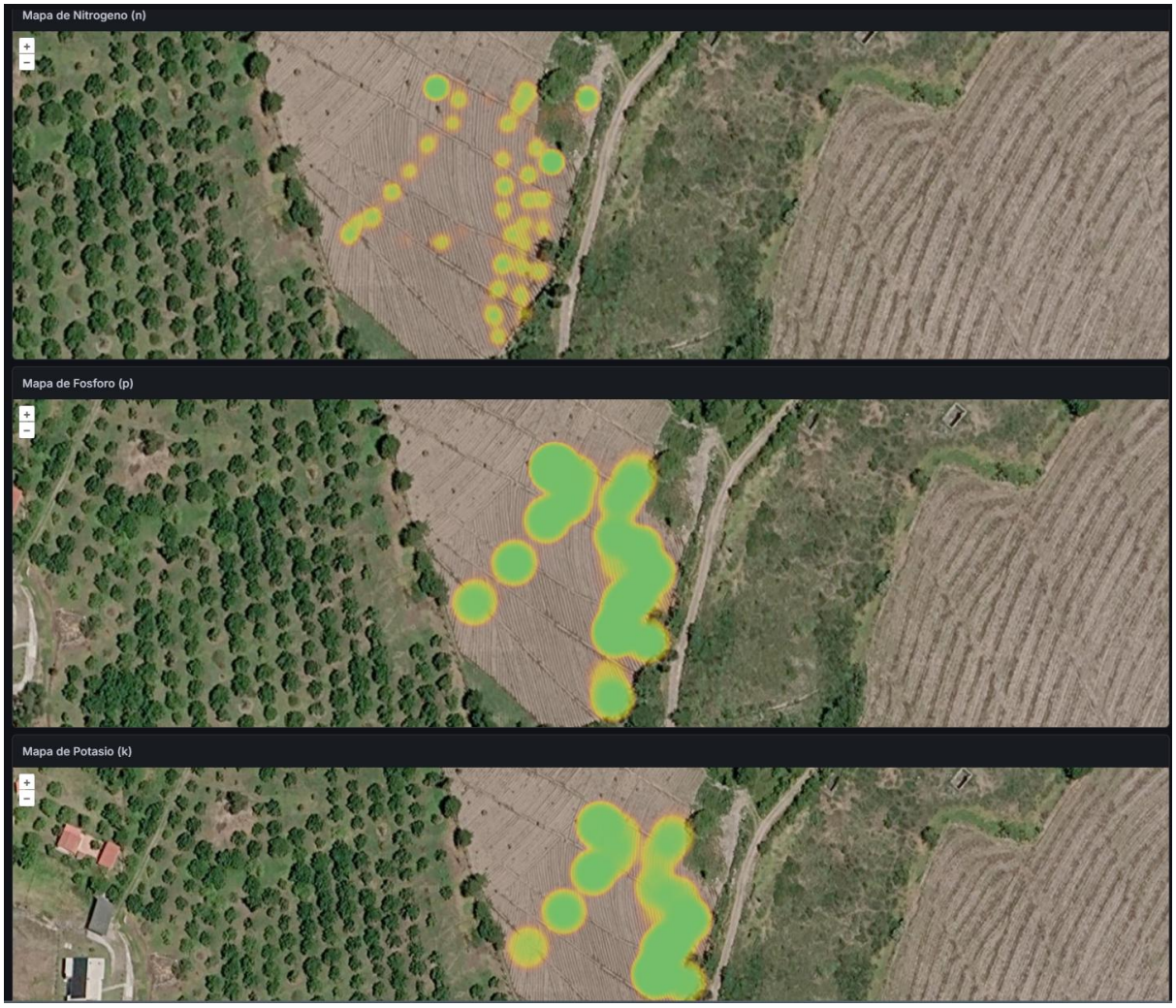


Macronutrientes (NPK) y Distribución Espacial

La disponibilidad de macronutrientes mostró los siguientes promedios: Nitrógeno (37.4 mg/kg), Fósforo (126.9 mg/kg) y Potasio (119.9 mg/kg). Los niveles de Nitrógeno presentan una concentración adecuada/alta, lo cual es favorable para sostener el vigor y el rendimiento esperado del cultivo.

Figura 87

Mapas de calor correspondiente a macronutrientes tales como Nitrógeno, Fosforo, Potasio en el monitoreo realizado el 28 de junio



Al analizar la tabla de concentraciones por distancia, se puede observar cómo varían estos niveles a medida que nos alejamos del punto de origen (0 m).

Análisis de datos con IA

Para este caso se realizó el monitoreo justo después de haberse dado el respectivo riego como se indica en los valores de la tabla el porcentaje de humedad es mayor en comparación con análisis previos, esto también ayuda a que se puedan tomar datos con mayor eficiencia y por ende también se logra detectar de mejor manera la concentración de nutrientes en el suelo tal y como se muestra en los consejos de la **Figura 88.**

Figura 88

Reporte de consejos proporcionados por la IA generativa durante el monitoreo



Tabla 28

Tabla de Variables en función de la distancia durante la jornada de monitoreo del 28 de junio

Hora	Distancia (m)	Coordenadas	N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	pH	EC (dS/m)	Temp (°C)	Hum (%)
15:19	0.0 m	0.403923,	0.0	24.0	16.0	6.90	139.00	33.8	6.7

Hora	Distancia (m)	Coordenadas	N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	pH	EC (dS/m)	Temp (°C)	Hum (%)
		-78.152522							
15:21	13.0 m	0.403827, -78.152588	0.0	0.0	0.0	6.40	0.00	31.2	3.0
15:22	23.4 m	0.403728, -78.152599	0.0	0.0	0.0	6.30	0.00	30.7	3.3
15:25	38.7 m	0.403585, -78.152603	0.0	0.0	0.0	7.90	0.00	33.3	4.1
15:27	50.8 m	0.403473, -78.152596	47.0	156.0	149.0	6.10	413.00	29.9	50.0
15:29	62.2 m	0.403371, -78.152607	0.0	23.0	15.0	6.00	137.00	30.7	42.9
15:31	72.3 m	0.403282, -78.152630	0.0	0.0	0.0	7.20	0.00	31.4	8.1
15:35	56.2 m	0.403418, -78.152538	0.0	0.0	0.0	6.80	0.00	24.0	5.4
15:37	42.0 m	0.403546, -78.152540	65.0	197.0	191.0	6.30	499.00	27.0	41.7
15:40	26.1 m	0.403688, -78.152524	23.0	99.0	92.0	9.00	296.00	22.6	22.3
15:49	39.8 m	0.403567, -78.152487	0.0	0.0	0.0	3.90	7.00	24.5	2.4
15:50	52.1 m	0.403456,	0.0	0.0	0.0	6.80	0.00	22.9	4.2

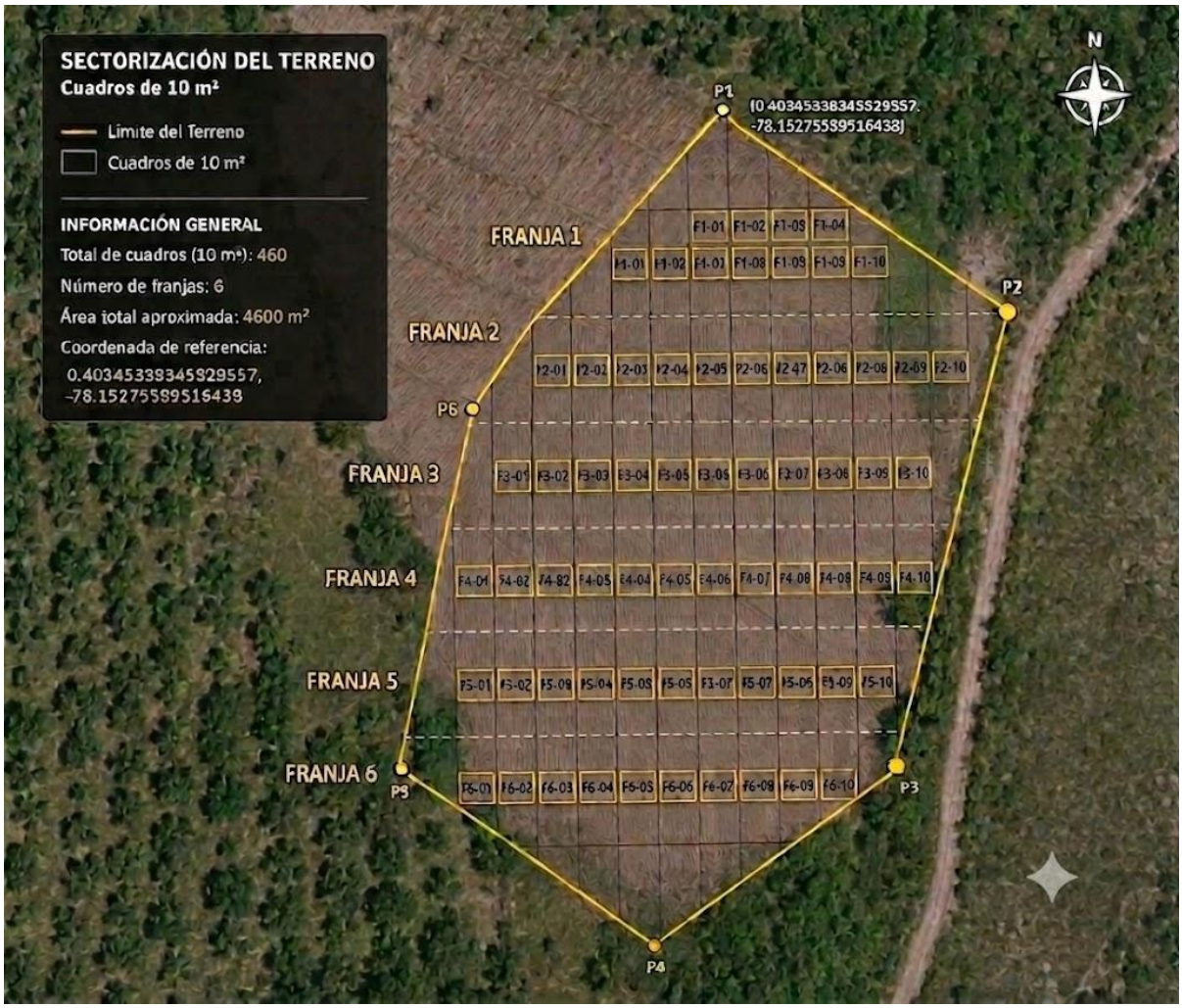
Hora	Distancia (m)	Coordenadas	N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	pH	EC (dS/m)	Temp (°C)	Hum (%)
		-78.152489							
15:53	65.8 m	0.403536, -78.152969	0.0	0.0	0.0	3.30	79.00	20.2	23.2
15:59	54.4 m	0.403636, -78.152917	0.0	0.0	0.0	6.90	0.00	27.2	2.5
16:01	37.2 m	0.403772, -78.152820	0.0	45.0	38.0	6.50	184.00	23.2	55.4
16:01	26.3 m	0.403832, -78.152739	33.0	124.0	117.0	5.90	346.00	21.9	29.6
16:11	13.3 m	0.403905, -78.152640	0.0	21.0	13.0	6.30	133.00	22.9	18.8

4.6.5.7.Análisis de Variabilidad Temporal del Suelo en Puntos Fijos

En la siguiente sección se realiza un análisis por bloques en el cual se secciona partes del terreno en denominadas franjas con el objetivo de determinar el estado de cada bloque del suelo para con ello poder enfocarnos en los puntos o bloques los cuales necesiten mayor atención o cuidado.

Figura 89

Mapa de sectorización del terreno



En la **Figura 89** demuestra cómo hemos distribuido las zonas del terreno por medio de la sectorización con el fin de analizar cada una de forma independiente, con eso en mente mediante las pruebas vamos a analizar detenidamente cada uno de los puntos por separado.

El predio analizado ha sido dividido en cuadros los cuales tienen un área de 10m2 esto se justifica debido a una razón técnica, para incrementar la eficiencia del análisis se toman datos más cercanos con el fin de tener una mayor certeza en la variabilidad de los datos en el terreno sin realizar mediciones innecesarias o repetitivas al realizar las mediciones a menor distancia. De esta manera se logra establecer 60 cuadros en total en el terreno en un área

aproximada de 4600m2. Todos estos cuadros están agrupados por franjas para tener un mejor entendimiento de las ubicaciones de los puntos, de forma que requiera un menor esfuerzo ubicar algún punto en específico.

4.6.5.8.Análisis de la Franja 1

Tabla 29

Análisis de puntos en los cuadros correspondientes a la franja 1

Cuadro	25 de Junio	27 de Junio	28 de Junio	29 de Junio	07 de Julio
F1-01	Hum: 0.0% Temp: 21.4°C pH: 5.48 N: 0.4 | P: 1.8 | K: 1.5 **mg/kg**	S/D	S/D	Hum: 3.1% Temp: 20.8°C pH: 5.15 N: 0.8 | P: 2.5 | K: 2.2 **mg/kg**	Hum: 12.5% Temp: 23.1°C pH: 6.20 N: 4.1 | P: 10.5 | K: 9.2 **mg/kg**
F1-02	Hum: 0.0% Temp: 21.4°C pH: 5.58 N: 0.5 | P: 1.9 | K: 1.6 **mg/kg**	S/D	S/D	Hum: 2.8% Temp: 21.1°C pH: 5.20 N: 0.7 | P: 2.4 | K: 2.1 **mg/kg**	Hum: 11.8% Temp: 22.8°C pH: 6.15 N: 3.8 | P: 9.8 | K: 8.5 **mg/kg**
F1-03	Hum: 47.4% Temp: 19.5°C pH: 5.69 N: 2.1 | P: 6.5 | K: 5.8 **mg/kg**	S/D	S/D	Hum: 8.2% Temp: 20.5°C pH: 5.10 N: 1.2 | P: 3.8 | K: 3.5 **mg/kg**	Hum: 15.4% Temp: 22.0°C pH: 6.35 N: 5.2 | P: 12.1 | K: 11.0 **mg/kg**
F1-04	S/D	S/D	Hum: 0.0% Temp: 30.4°C	Hum: 1.5% Temp: 21.5°C	Hum: 10.2% Temp: 23.5°C

			pH: 3.73	pH: 4.85	pH: 6.05
			N: 0.5 | P: 2.2 | K: 1.8 **mg/kg**	N: 0.6 | P: 2.0 | K: 1.7 **mg/kg**	N: 3.1 | P: 8.2 | K: 7.5 **mg/kg**
	Hum: 0.0%			Hum: 3.5%	Hum: 13.1%
	Temp: 22.5°C			Temp: 20.9°C	Temp: 22.7°C
F1-05	pH: 6.00	S/D	S/D	pH: 5.30	pH: 6.25
	N: 0.6 | P: 2.1 | K: 1.8 **mg/kg**			N: 0.9 | P: 2.8 | K: 2.4 **mg/kg**	N: 4.5 | P: 11.0 | K: 9.8 **mg/kg**
		Hum: 0.0%	Hum: 0.0%	Hum: 2.1%	Hum: 11.5%
		Temp: 16.6°C	Temp: 29.8°C	Temp: 20.2°C	Temp: 22.4°C
F1-06	S/D	pH: 4.93	pH: 3.85	pH: 4.95	pH: 6.12
		N: 0.1 | P: 1.0 | K: 0.8 **mg/kg**	N: 0.4 | P: 2.0 | K: 1.6 **mg/kg**	N: 0.5 | P: 1.8 | K: 1.5 **mg/kg**	N: 3.5 | P: 9.1 | K: 8.0 **mg/kg**
	Hum: 10.5%			Hum: 5.5%	Hum: 14.2%
	Temp: 20.1°C			Temp: 20.6°C	Temp: 22.2°C
F1-07	pH: 5.60	S/D	S/D	pH: 5.35	pH: 6.28
	N: 1.2 | P: 3.5 | K: 3.1 **mg/kg**			N: 0.9 | P: 2.6 | K: 2.3 **mg/kg**	N: 4.8 | P: 11.5 | K: 10.2 **mg/kg**
	Hum: 0.0%	Hum: 0.0%		Hum: 2.4%	Hum: 12.0%
	Temp: 21.1°C	Temp: 17.0°C		Temp: 20.5°C	Temp: 22.6°C
F1-08	pH: 5.55	pH: 5.01	S/D	pH: 5.12	pH: 6.18
	N: 0.4 | P: 1.8 | K: 1.5 **mg/kg**	N: 0.2 | P: 1.2 | K: 1.0 **mg/kg**		N: 0.6 | P: 2.1 | K: 1.8 **mg/kg**	N: 3.9 | P: 9.5 | K: 8.4 **mg/kg**
			Hum: 0.0%	Hum: 1.8%	Hum: 10.8%
			Temp: 30.1°C	Temp: 21.2°C	Temp: 23.0°C
F1-09	S/D	S/D	pH: 3.80	pH: 5.08	pH: 6.10
			N: 0.6 | P: 2.3 | K: 1.9 **mg/kg**	N: 0.7 | P: 2.2 | K: 1.9 **mg/kg**	N: 3.4 | P: 8.8 | K: 7.8 **mg/kg**
	Hum: 0.0%			Hum: 2.9%	Hum: 12.6%
F1-10	Temp: 21.8°C	S/D	S/D	Temp: 20.8°C	Temp: 22.5°C

pH: 5.65	pH: 5.25	pH: 6.22
N: 0.5 | P: 2.0 | K: 1.7 **mg/kg**	N: 0.8 | P: 2.5 | K: 2.2 **mg/kg**	N: 4.2 | P: 10.2 | K: 9.0 **mg/kg**

El análisis de las 10 cuadrículas que conforman la Franja 1 demuestran el nivel de degradación del predio. De manera general, todos los cuadros de esta franja se caracterizan por una pobreza nutricional crítica: las lecturas de los macronutrientes esenciales apenas promedian valores traza durante los primeros días de la prueba, siendo el Nitrógeno (N) el elemento menos abundante en esa zona.

Las observaciones más relevantes que se pudo notar es que el terreno sufre de una severa compactación. Esta alteración destruye la porosidad, impidiendo la retención del agua y acelerando la evaporación, convirtiendo a casi todos los cuadros en parches secos con alta inestabilidad térmica y una pronunciada tendencia hacia la acidez.

Como conclusión podemos agregar que al realizar el respectivo riego de agua permitió que los valores nutricionales del suelo suban a niveles más adecuados, detectando el Fósforo y el Potasio a niveles cercanos a los 10 mg/kg. Sin embargo, estos valores siguen siendo agronómicamente deficientes frente a los >80 mg/kg registrados en otras zonas del cultivo.

4.6.5.9.Análisis de la Franja 2

En el análisis de la segunda franja de cuadros a diferencia de la esterilidad severa encontrada en la Franja 1, el análisis de los 10 cuadros de la Franja 2 revela los primeros indicios de actividad biológica en el predio, esto también debido a que durante los dias posteriores en donde se tomaron los datos las condiciones climáticas y la humedad del suelo ayudo a una mejor captación de los datos. Esta área actúa como una zona de amortiguamiento,

donde el suelo es menos compacto y logra retener niveles marginales de humedad (entre 6% y 15% en días favorables).

Sin embargo, a pesar de esta ligera mejora, el estado general de los cuadros refleja un déficit nutricional persistente. Durante los momentos de mayor actividad (28 de junio y 7 de julio), los niveles de Fósforo (P) apenas superan los 20 mg/kg y el Potasio (K) oscila los 19 mg/kg. Según las tablas de referencia agronómica para cultivos de maíz en la zona climática de la sierra ecuatoriana, estos valores continúan clasificándose dentro de los umbrales "Bajo" o "Deficiente", indicando que, la zona no es adecuada para obtener los mejores resultados en un cultivo de maíz.

Tabla 30

Análisis de puntos en los cuadros correspondientes a la franja 2

Cuadro	25 de Junio	27 de Junio	28 de Junio	29 de Junio	07 de Julio
F2-01	S/D	Hum: 0.0% Temp: 18.5°C pH: 6.50 N: 0.2 | P: 1.1 | K: 0.8 **mg/kg**	S/D	Hum: 1.8% Temp: 20.5°C pH: 6.10 N: 0.5 | P: 1.8 | K: 1.5 **mg/kg**	Hum: 16.2% Temp: 22.4°C pH: 6.55 N: 14.2 | P: 20.5 | K: 19.0 **mg/kg**
F2-02	Hum: 14.5% Temp: 18.2°C pH: 8.10 N: 0.4 | P: 1.5 | K: 1.2 **mg/kg**	S/D	S/D	Hum: 2.1% Temp: 20.8°C pH: 6.15 N: 0.6 | P: 1.9 | K: 1.6 **mg/kg**	Hum: 15.8% Temp: 22.7°C pH: 6.60 N: 15.1 | P: 21.8 | K: 19.5 **mg/kg**
F2-03	S/D	S/D	Hum: 7.5% Temp: 31.5°C pH: 6.30	Hum: 2.5% Temp: 21.2°C pH: 6.05	Hum: 17.5% Temp: 22.9°C pH: 6.50

			N: 2.8 | P: 11.5 | K: 10.1 **mg/kg**	N: 0.8 | P: 2.1 | K: 1.8 **mg/kg**	N: 16.8 | P: 23.5 | K: 21.2 **mg/kg**
	Hum: 15.2%	Hum: 0.0%	Hum: 6.5%	Hum: 2.0%	Hum: 16.5%
	Temp: 18.5°C	Temp: 19.2°C	Temp: 32.1°C	Temp: 21.0°C	Temp: 22.8°C
F2-04	pH: 8.15	pH: 6.80	pH: 6.45	pH: 6.12	pH: 6.62
	N: 0.5 | P: 1.8 | K: 1.4 **mg/kg**	N: 0.3 | P: 1.2 | K: 1.0 **mg/kg**	N: 2.6 | P: 12.1 | K: 10.5 **mg/kg**	N: 0.7 | P: 1.9 | K: 1.5 **mg/kg**	N: 16.2 | P: 22.5 | K: 21.0 **mg/kg**
	Hum: 13.2%	Hum: 0.0%		Hum: 2.2%	Hum: 15.5%
	Temp: 18.8°C	Temp: 19.0°C		Temp: 20.6°C	Temp: 22.5°C
F2-05	pH: 8.00	pH: 6.70	S/D	pH: 6.18	pH: 6.58
	N: 0.3 | P: 1.4 | K: 1.1 **mg/kg**	N: 0.2 | P: 1.1 | K: 0.9 **mg/kg**		N: 0.5 | P: 1.7 | K: 1.4 **mg/kg**	N: 14.9 | P: 21.0 | K: 18.8 **mg/kg**
			Hum: 7.1%	Hum: 1.9%	Hum: 17.1%
			Temp: 30.5°C	Temp: 20.9°C	Temp: 22.6°C
F2-06	S/D	S/D	pH: 6.40	pH: 6.08	pH: 6.48
			N: 2.4 | P: 10.8 | K: 9.5 **mg/kg**	N: 0.6 | P: 1.8 | K: 1.6 **mg/kg**	N: 15.5 | P: 22.2 | K: 20.5 **mg/kg**
	Hum: 12.1%		Hum: 8.2%	Hum: 3.1%	Hum: 17.0%
	Temp: 19.0°C		Temp: 30.8°C	Temp: 21.5°C	Temp: 22.5°C
F2-07	pH: 7.95	S/D	pH: 6.25	pH: 6.00	pH: 6.55
	N: 0.4 | P: 1.6 | K: 1.3 **mg/kg**		N: 2.5 | P: 10.8 | K: 9.2 **mg/kg**	N: 0.9 | P: 2.2 | K: 1.9 **mg/kg**	N: 14.8 | P: 19.5 | K: 20.2 **mg/kg**
	Hum: 11.8%			Hum: 2.4%	Hum: 16.0%
	Temp: 19.1°C			Temp: 20.4°C	Temp: 22.3°C
F2-08	pH: 7.80	S/D	S/D	pH: 6.15	pH: 6.60
	N: 0.3 | P: 1.3 | K: 1.1 **mg/kg**			N: 0.6 | P: 1.9 | K: 1.5 **mg/kg**	N: 15.0 | P: 21.4 | K: 19.8 **mg/kg**
		Hum: 0.0%	Hum: 6.8%	Hum: 1.7%	Hum: 16.8%
		Temp: 18.7°C	Temp: 31.0°C	Temp: 21.1°C	Temp: 22.7°C
F2-09	S/D				
		pH: 6.50	pH: 6.20	pH: 5.95	pH: 6.52

		N: 0.2 | P: 1.0 | K: 0.8 **mg/kg**	N: 2.9 | P: 11.8 | K: 10.2 **mg/kg**	N: 0.7 | P: 2.0 | K: 1.7 **mg/kg**	N: 15.8 | P: 23.0 | K: 20.8 **mg/kg**
	Hum: 15.0%			Hum: 2.6%	Hum: 16.4%
	Temp: 18.5°C			Temp: 20.7°C	Temp: 22.5°C
F2-10	pH: 8.20	S/D	S/D	pH: 6.20	pH: 6.58
	N: 0.5 | P: 1.9 | K: 1.5 **mg/kg**			N: 0.8 | P: 2.2 | K: 1.8 **mg/kg**	N: 15.5 | P: 22.0 | K: 19.6 **mg/kg**

El monitoreo realizado el 7 de julio post-riego muestra un terreno estabilizado. Con humedades promedio del 16.5% y un pH neutralizado de 6.5, los macronutrientes muestran valores más adecuados a pesar de que continúan siendo bajos, pero son valores constantes diferentes de cero lo cual muestra una mejoría en el cultivo y reduce la necesidad de aplicar fertilizantes en grandes cantidades.

4.6.5.10. Análisis de la Franja 3

El contraste entre esta franja (40-60m) y las dos anteriores es abismal. Los cuadros de la **Tabla 31** denominada Franja 3 exhiben un estado óptimo agrícola, con una alta capacidad nativa para retener agua y un reservorio latente de macronutrientes extremadamente rico.

A diferencia de las franjas analizadas previamente, el suelo aquí no es inerte. El 28 de junio, gran parte de los cuadros superaron con facilidad los 60 mg/kg de Fósforo y Potasio, y algunos experimentaron picos masivos. Según los umbrales de referencia agronómica que estamos usando, cuando hay valores > 40 mg/kg de Fósforo se consideran niveles muy altos), esta zona no requiere planes de fertilización complementaria NPK, ya que cuenta con un excedente químico. El único factor limitante en esta área es la gestión hídrica. Siendo así la mejor zona agrícola del cultivo hasta el momento.

Tabla 31

Análisis de puntos en los cuadros correspondientes a la franja 3

Cuadro	25 de Junio	27 de Junio	28 de Junio	29 de Junio	07 de Julio
F3-01	S/D	S/D	Hum: 24.8% Temp: 27.9°C pH: 5.56 N: 0.3 | P: 43.3 | K: 35.5 **mg/kg**	Hum: 2.1% Temp: 20.8°C pH: 5.80 N: 0.2 | P: 5.1 | K: 4.5 **mg/kg**	Hum: 22.5% Temp: 23.1°C pH: 6.35 N: 25.5 | P: 68.4 | K: 62.1 **mg/kg**
F3-02	Hum: 0.0% Temp: 20.3°C pH: 7.10 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	S/D	Hum: 8.6% Temp: 33.4°C pH: 7.10 N: 1.2 | P: 10.8 | K: 9.4 **mg/kg**	Hum: 1.5% Temp: 21.0°C pH: 6.05 N: 0.5 | P: 2.8 | K: 2.5 **mg/kg**	Hum: 23.8% Temp: 22.8°C pH: 6.42 N: 28.1 | P: 71.5 | K: 66.8 **mg/kg**
F3-03	S/D	Hum: 5.2% Temp: 24.0°C pH: 7.20 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	Hum: 33.9% Temp: 25.6°C pH: 6.68 N: 45.8 | P: 152.7 | K: 145.6 **mg/kg**	Hum: 3.2% Temp: 20.5°C pH: 5.95 N: 1.1 | P: 6.5 | K: 5.8 **mg/kg**	Hum: 24.1% Temp: 22.5°C pH: 6.50 N: 32.5 | P: 82.3 | K: 78.4 **mg/kg**
F3-04	S/D	S/D	Hum: 30.6% Temp: 26.7°C pH: 7.28 N: 88.9 | P: 229.2 | K: 225.2 **mg/kg**	Hum: 2.8% Temp: 21.2°C pH: 6.10 N: 1.5 | P: 8.2 | K: 7.1 **mg/kg**	Hum: 25.5% Temp: 23.0°C pH: 6.55 N: 35.8 | P: 95.6 | K: 88.2 **mg/kg**
F3-05	S/D	S/D	Hum: 14.2% Temp: 24.9°C pH: 7.11 N: 17.1 | P: 68.7 | K: 64.3 **mg/kg**	Hum: 1.9% Temp: 20.9°C pH: 5.85 N: 0.8 | P: 4.5 | K: 4.0 **mg/kg**	Hum: 21.4% Temp: 22.6°C pH: 6.38 N: 24.2 | P: 65.1 | K: 60.5 **mg/kg**
F3-06	S/D	S/D	Hum: 23.8%	Hum: 2.2%	Hum: 22.8%

			Temp: 26.0°C pH: 6.25 N: 9.1 | P: 64.6 | K: 57.1 **mg/kg** Hum: 19.3%	Temp: 21.1°C pH: 5.90 N: 0.7 | P: 5.0 | K: 4.6 **mg/kg** Hum: 2.5%	Temp: 22.9°C pH: 6.45 N: 26.5 | P: 69.8 | K: 64.2 **mg/kg** Hum: 23.5%
F3-07	S/D	S/D	Temp: 25.9°C pH: 6.14 N: 24.3 | P: 77.2 | K: 73.9 **mg/kg**	Temp: 21.3°C pH: 6.00 N: 1.0 | P: 6.8 | K: 5.9 **mg/kg**	Temp: 23.2°C pH: 6.48 N: 29.4 | P: 74.5 | K: 70.1 **mg/kg**
		Hum: 2.2%		Hum: 1.7%	Hum: 21.9%
F3-08	S/D	Temp: 24.8°C pH: 5.80 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	S/D	Temp: 20.7°C pH: 5.75 N: 0.4 | P: 3.5 | K: 3.0 **mg/kg**	Temp: 22.4°C pH: 6.30 N: 22.8 | P: 62.4 | K: 58.7 **mg/kg**
		Hum: 27.0%		Hum: 2.4%	Hum: 24.6%
F3-09	S/D	Temp: 22.6°C pH: 8.02 N: 7.4 | P: 35.4 | K: 32.2 **mg/kg**	S/D	Temp: 21.5°C pH: 6.15 N: 0.9 | P: 5.8 | K: 5.2 **mg/kg**	Temp: 23.5°C pH: 6.60 N: 31.0 | P: 78.9 | K: 74.5 **mg/kg**
	Hum: 0.0%		Hum: 17.4%	Hum: 2.0%	Hum: 23.1%
F3-10	Temp: 19.6°C pH: 6.60 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	S/D	Temp: 32.2°C pH: 6.26 N: 19.5 | P: 76.3 | K: 71.6 **mg/kg**	Temp: 20.8°C pH: 5.95 N: 0.8 | P: 4.9 | K: 4.4 **mg/kg**	Temp: 22.7°C pH: 6.40 N: 27.6 | P: 72.8 | K: 68.3 **mg/kg**

Los registros de los cuadros F3-03 y F3-04 el día 28 de junio son los más altos de todo el predio. El cuadro F3-04, al combinar una humedad excepcional (30.6%) y una temperatura alta (26.7°C), registró valores exorbitantes: Nitrógeno (88.9 mg/kg), Fósforo (229.2 mg/kg) y

Potasio (225.2 mg/kg) lo cual es inclusive considerado como valores muy altos según los umbrales agrícolas usados como referencia para la elaboración de esta investigación.

4.6.5.11. Análisis de la Franja 4

La Franja 4 comprende el anillo radial entre los 60 y 80 metros del nodo coordinador. De acuerdo con el mapeo global, esta área constituye la zona de Máxima Fertilidad del predio agrícola.

En la evaluación de la tabla podemos notar que los días 29 de junio se mantiene un mayor porcentaje de sequía en el cultivo y 7 de julio se produce una estabilización en la humedad y nutrientes.

Tabla 32

Análisis de puntos en los cuadros correspondientes a la franja 4

Cuadro	25 de Junio	27 de Junio	28 de Junio	29 de Junio	07 de Julio
F4-01	S/D	S/D	Hum: 41.1% Temp: 29.2°C pH: 6.32 N: 78.8 | P: 207.2 | K: 204.0 **mg/kg**	Hum: 3.5% Temp: 20.5°C pH: 5.80 N: 2.1 | P: 9.5 | K: 8.2 **mg/kg**	Hum: 26.5% Temp: 22.8°C pH: 6.45 N: 38.5 | P: 95.2 | K: 89.4 **mg/kg**
F4-02	S/D	S/D	Hum: 1.6% Temp: 24.3°C pH: 7.66 N: 0.0 | P: 2.8 | K: 1.2 **mg/kg**	Hum: 1.0% Temp: 21.0°C pH: 6.50 N: 0.0 | P: 1.5 | K: 1.0 **mg/kg**	Hum: 22.1% Temp: 22.5°C pH: 6.80 N: 24.5 | P: 65.4 | K: 61.2 **mg/kg**
F4-03	S/D	Hum: 3.1%	S/D	Hum: 2.0%	Hum: 23.5%

		Temp: 24.3°C pH: 5.72 N: 0.0 | P: 0.6 | K: 0.0 **mg/kg** Hum: 13.6%		Temp: 20.8°C pH: 5.60 N: 0.0 | P: 0.5 | K: 0.0 **mg/kg** Hum: 2.5%	Temp: 22.9°C pH: 6.50 N: 28.1 | P: 71.3 | K: 68.5 **mg/kg** Hum: 25.8%
F4-04	S/D	Temp: 22.7°C pH: 6.94 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg** Hum: 16.9%	Temp: 23.0°C pH: 6.95 N: 18.7 | P: 56.8 | K: 54.2 **mg/kg** Hum: 9.5%	Temp: 20.5°C pH: 5.90 N: 1.2 | P: 4.5 | K: 4.0 **mg/kg** Hum: 1.8%	Temp: 23.2°C pH: 6.60 N: 35.2 | P: 88.5 | K: 82.1 **mg/kg** Hum: 24.2%
F4-05	S/D	Temp: 23.7°C pH: 6.10 N: 0.0 | P: 1.5 | K: 1.0 **mg/kg** Hum: 60.6%	Temp: 26.9°C pH: 6.33 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 12.3 **mg/kg**	Temp: 21.1°C pH: 5.80 N: 0.5 | P: 1.2 | K: 2.5 **mg/kg** Hum: 3.8%	Temp: 22.6°C pH: 6.40 N: 31.4 | P: 75.6 | K: 70.8 **mg/kg** Hum: 28.5%
F4-06	S/D	Temp: 24.2°C pH: 6.64 N: 58.1 | P: 160.5 | K: 157.2 **mg/kg**	S/D	Temp: 21.5°C pH: 6.00 N: 2.5 | P: 12.5 | K: 11.2 **mg/kg**	Temp: 23.5°C pH: 6.55 N: 42.1 | P: 105.8 | K: 98.5 **mg/kg**
F4-07	Hum: 19.4% Temp: 20.0°C pH: 8.50 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	S/D Hum: 24.7%	Hum: 19.2% Temp: 26.1°C pH: 6.93 N: 28.6 | P: 83.5 | K: 81.2 **mg/kg** Hum: 24.1%	Hum: 2.2% Temp: 20.2°C pH: 6.10 N: 1.5 | P: 6.8 | K: 5.5 **mg/kg** Hum: 2.8%	Hum: 25.1% Temp: 22.7°C pH: 6.65 N: 34.8 | P: 85.2 | K: 80.4 **mg/kg** Hum: 24.8%
F4-08	S/D	Temp: 24.4°C pH: 6.02 N: 25.5 | P: 72.7 | K: 71.0 **mg/kg**	Temp: 21.0°C pH: 5.85 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	Temp: 20.1°C pH: 5.70 N: 0.8 | P: 3.5 | K: 2.8 **mg/kg**	Temp: 22.4°C pH: 6.35 N: 33.5 | P: 81.6 | K: 77.2 **mg/kg**

F4-09	Hum: 0.0% Temp: 20.0°C pH: 6.40 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	S/D	Hum: 27.3% Temp: 27.9°C pH: 5.22 N: 45.7 | P: 123.8 | K: 121.7 **mg/kg**	Hum: 2.4% Temp: 21.2°C pH: 5.50 N: 1.8 | P: 8.2 | K: 7.5 **mg/kg**	Hum: 27.2% Temp: 23.1°C pH: 6.25 N: 40.2 | P: 98.5 | K: 92.1 **mg/kg**
F4-10	S/D	S/D	Hum: 18.3% Temp: 23.7°C pH: 6.54 N: 17.4 | P: 58.4 | K: 55.6 **mg/kg**	Hum: 1.9% Temp: 20.8°C pH: 6.00 N: 0.9 | P: 4.1 | K: 3.8 **mg/kg**	Hum: 24.5% Temp: 22.9°C pH: 6.52 N: 32.8 | P: 79.4 | K: 74.5 **mg/kg**

La característica más notable de esta zona de cuadros es su alta capacidad de retención de agua. A diferencia de las primeras franjas analizadas, aquí el suelo es capaz de absorber y retener humedades superiores al 20%, e incluso alcanzar picos de sobresaturación del 60.6% como en el caso del cuadro F4-06.

4.6.5.12. Análisis de la Franja 5

Esta zona tiene una gran deficiencia nutricional e hidrica. Al estar expuesta a los bordes del terreno, sufre de mayor evaporación por acción del viento y la exposición directa. Los promedios nutricionales apenas rozan los 25 mg/kg para el Fósforo y caen por debajo de los 10 mg/kg en Nitrógeno. Según los umbrales agronómicos, el estado global de esta franja es Deficiente, lo que demanda un plan de fertilización enfocado específicamente en compensar esta degradación perimetral.

Tabla 33

Análisis de puntos en los cuadros correspondientes a la franja 5

Cuadro	25 de Junio	27 de Junio	28 de Junio	29 de Junio	07 de Julio
F5-01	Hum: 12.3% Temp: 20.3°C pH: 8.50 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	Hum: 17.9% Temp: 24.2°C pH: 6.43 N: 0.0 | P: 21.7 | K: 13.7 **mg/kg**	Hum: 0.0% Temp: 26.0°C pH: 6.20 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	Hum: 8.2% Temp: 21.0°C pH: 5.80 N: 0.8 | P: 8.5 | K: 6.8 **mg/kg**	Hum: 18.5% Temp: 24.8°C pH: 6.45 N: 8.2 | P: 26.5 | K: 21.0 **mg/kg**
F5-02	S/D	S/D	Hum: 3.8% Temp: 26.3°C pH: 5.85 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	Hum: 8.5% Temp: 21.2°C pH: 5.85 N: 1.1 | P: 9.0 | K: 7.2 **mg/kg**	Hum: 18.0% Temp: 25.1°C pH: 6.50 N: 7.8 | P: 24.8 | K: 19.5 **mg/kg**
F5-03	S/D	Hum: 12.9% Temp: 25.9°C pH: 6.59 N: 0.0 | P: 12.1 | K: 7.6 **mg/kg**	Hum: 2.8% Temp: 27.7°C pH: 6.16 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	Hum: 7.8% Temp: 20.8°C pH: 5.75 N: 0.9 | P: 8.2 | K: 6.5 **mg/kg**	Hum: 17.5% Temp: 24.5°C pH: 6.40 N: 7.5 | P: 23.5 | K: 18.8 **mg/kg**
F5-04	Hum: 0.0% Temp: 19.8°C pH: 6.70 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	S/D	S/D	Hum: 8.1% Temp: 21.1°C pH: 5.82 N: 1.0 | P: 8.8 | K: 6.9 **mg/kg**	Hum: 18.2% Temp: 25.0°C pH: 6.55 N: 8.0 | P: 25.2 | K: 20.5 **mg/kg**
F5-05	S/D	Hum: 41.5% Temp: 21.7°C pH: 7.05 N: 20.5 | P: 78.4 | K: 70.9 **mg/kg**	S/D	Hum: 8.8% Temp: 20.9°C pH: 5.90 N: 1.2 | P: 9.5 | K: 7.5 **mg/kg**	Hum: 19.1% Temp: 24.7°C pH: 6.60 N: 8.5 | P: 27.0 | K: 21.8 **mg/kg**
F5-06	S/D	Hum: 20.4%	Hum: 11.1%	Hum: 8.0%	Hum: 17.8%

		Temp: 28.2°C pH: 6.80 N: 0.0 | P: 25.8 | K: 18.0 **mg/kg**	Temp: 33.5°C pH: 6.34 N: 6.3 | P: 29.1 | K: 26.9 **mg/kg**	Temp: 21.3°C pH: 5.78 N: 0.8 | P: 8.0 | K: 6.6 **mg/kg**	Temp: 25.2°C pH: 6.48 N: 7.6 | P: 24.0 | K: 19.0 **mg/kg**
	Hum: 13.0%		Hum: 23.3%	Hum: 8.4%	Hum: 18.4%
F5-07	Temp: 17.8°C pH: 8.03 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	S/D	Temp: 21.0°C pH: 3.40 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	Temp: 20.7°C pH: 5.85 N: 1.0 | P: 8.9 | K: 7.0 **mg/kg**	Temp: 24.9°C pH: 6.52 N: 8.1 | P: 25.8 | K: 20.2 **mg/kg**
			Hum: 13.3%	Hum: 8.6%	Hum: 18.6%
F5-08	S/D	S/D	Temp: 24.6°C pH: 6.69 N: 4.4 | P: 25.6 | K: 23.1 **mg/kg**	Temp: 21.0°C pH: 5.88 N: 1.1 | P: 9.2 | K: 7.3 **mg/kg**	Temp: 25.0°C pH: 6.58 N: 8.3 | P: 26.2 | K: 20.8 **mg/kg**
	Hum: 18.1%			Hum: 8.3%	Hum: 17.9%
F5-09	Temp: 16.9°C pH: 6.70 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	S/D	S/D	Temp: 20.8°C pH: 5.80 N: 0.9 | P: 8.6 | K: 6.8 **mg/kg**	Temp: 24.6°C pH: 6.45 N: 7.7 | P: 24.5 | K: 19.2 **mg/kg**
		Hum: 65.6%		Hum: 9.0%	Hum: 19.5%
F5-10	S/D	Temp: 27.3°C pH: 7.22 N: 46.5 | P: 134.7 | K: 129.5 **mg/kg**	S/D	Temp: 21.4°C pH: 5.95 N: 1.3 | P: 9.8 | K: 7.8 **mg/kg**	Temp: 25.5°C pH: 6.65 N: 8.8 | P: 28.0 | K: 22.5 **mg/kg**

Los cuadros F5-01 y F5-3 documentan la inestabilidad de la zona. El 27 de junio mostraban niveles residuales de nutrientes. En menos de 24 horas 28 de junio, se desecaron completamente (Humedad: ~0.0% a 2.8%), y las lecturas iónicas colapsaron a cero.

4.6.5.13. Análisis de la Franja 6

Durante el análisis de esta Franja se logra identificar algo importante ya que no existen muchos datos durante las sesiones de monitoreo a estas zonas. El día 28 de junio, el nodo móvil focalizó su muestreo en el núcleo fértil, por lo que esta franja registra el marcador "S/D" (Sin Datos) en esa jornada.

Mientras tanto los datos del 7 de julio reflejan la recuperación del estado del cultivo a valores óptimos bajo el plan de riego actual, sin embargo, queda en evidencia la dificultad de estas tierras para retener los beneficios del agua.

Tabla 34

Análisis de puntos en los cuadros correspondientes a la franja 6

Cuadro	25 de Junio	27 de Junio	28 de Junio	29 de Junio	07 de Julio
F6-01	Hum: 0.0% Temp: 21.0°C pH: 5.77 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	S/D	S/D	Hum: 4.8% Temp: 18.5°C pH: 9.11 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	Hum: 12.5% Temp: 22.0°C pH: 6.80 N: 1.5 | P: 8.2 | K: 7.1 **mg/kg**
F6-02	S/D	Hum: 7.5% Temp: 25.4°C pH: 6.46 N: 0.0 | P: 5.5 | K: 3.7 **mg/kg**	S/D	S/D	Hum: 13.0% Temp: 22.5°C pH: 6.50 N: 2.1 | P: 10.5 | K: 8.5 **mg/kg**
F6-03	S/D	S/D	S/D	Hum: 10.0% Temp: 21.3°C pH: 4.76 N: 0.8 | P: 15.1 | K: 13.0 **mg/kg**	Hum: 14.5% Temp: 23.1°C pH: 6.20 N: 3.5 | P: 18.2 | K: 15.0 **mg/kg**

	Hum: 0.0% Temp: 17.8°C pH: 9.00 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	Hum: 19.8% Temp: 24.1°C pH: 7.10 N: 1.9 | P: 22.2 | K: 17.3 **mg/kg**			Hum: 15.2% Temp: 23.5°C pH: 6.70 N: 4.2 | P: 24.5 | K: 19.8 **mg/kg**
F6-04			S/D	S/D	
F6-05	S/D	S/D	S/D	Hum: 9.5% Temp: 21.2°C pH: 6.60 N: 1.4 | P: 9.6 | K: 8.6 **mg/kg**	Hum: 13.8% Temp: 22.8°C pH: 6.50 N: 2.8 | P: 14.5 | K: 12.5 **mg/kg**
F6-06	Hum: 0.0% Temp: 20.4°C pH: 6.08 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	S/D	S/D	S/D	Hum: 12.0% Temp: 22.1°C pH: 6.20 N: 1.8 | P: 9.2 | K: 7.8 **mg/kg**
F6-07	Hum: 0.0% Temp: 26.4°C pH: 6.30 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	S/D	S/D	S/D	Hum: 11.5% Temp: 22.4°C pH: 6.30 N: 1.6 | P: 8.5 | K: 7.2 **mg/kg**
F6-08	S/D	S/D	S/D	Hum: 6.1% Temp: 19.6°C pH: 6.08 N: 0.8 | P: 5.9 | K: 5.2 **mg/kg**	Hum: 12.8% Temp: 22.6°C pH: 6.40 N: 2.2 | P: 11.0 | K: 9.5 **mg/kg**
F6-09	Hum: 0.0% Temp: 21.3°C pH: 3.00 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	S/D	S/D	S/D	Hum: 11.0% Temp: 21.8°C pH: 5.50 N: 0.5 | P: 4.2 | K: 3.5 **mg/kg**

F6-10	Hum: 0.0% Temp: 21.2°C pH: 5.62 N: 0.0 | P: 0.0 | K: 0.0 **mg/kg**	S/D	S/D	S/D	Hum: 11.2% Temp: 21.9°C pH: 6.10 N: 1.2 | P: 6.8 | K: 5.5 **mg/kg**

Al encontrarse en el perímetro exterior, esta franja actúa como una zona de impacto que recibe el viento directo y la erosión superficial en esta zona. Esto genera una incapacidad para retener agua. Los promedios generales no superan los 12 mg/kg de Fósforo/Potasio ni siquiera en los días estabilizados, por lo que sembrar cultivos de valor en estos cuadros resultaría en pérdidas económicas directas por baja productividad y eso se evidencia en el cultivo ya que en estas zonas las plantas tienden a desarrollarse mucho más lento y es usual que no alcancen a desarrollarse por completo.

4.6.5.14. Análisis General de deficiencias y atención prioritaria

Una vez que hemos concluido con el análisis de cada uno de los puntos o cuadros determinados en el cultivo de maíz podemos tener una visión más clara de lo que le hace falta y donde se encuentra bien el terreno. La telemetría probó que la aparente "ausencia" de fertilizantes (valores de 0.0 mg/kg en NPK) durante los días de sequía no se debía a que el suelo estuviera estéril, sino a un bloqueo iónico.

Los nutrientes estaban latentes en estado sólido, y solo al conjugarse una humedad superior al 20% con temperaturas de suelo entre 22°C y 28°C, las sales se disolvieron y se volvieron biodisponibles para las plantas.

En cuanto a las zonas pudimos determinar que los cuadros con mayor concentración de nutrientes y mejores condiciones son el cuadro F4-01 y F4-06 ambos ubicados en la misma

franja, estos cuadros alcanzaron niveles de sobresaturación (humedades >40% y Fósforo >160 mg/kg) durante el pico térmico.

También los cuadros F3-03 y F3-04 ubicados en la franja 3 contienen altos niveles de nutrientes, principalmente de nitrógeno.

4.6.5.15. Plan de Acción y Recomendaciones

Basado en los resultados obtenidos para cada uno de los puntos evaluados, se sugieren las siguientes acciones correctivas inmediatas para maximizar el rendimiento del cultivo:

- **Acción 1:** Suspensión de Fertilización en las Franjas 3 y 4 específicamente en los cuadros: F3-01 a F3-10 y F4-01 a F4-10. Se recomienda establecer un horario de riego para mantener la humedad de estos cuadros en un rango estricto del 20% al 25%, lo cual es suficiente para garantizar la máxima biodisponibilidad de su banco de nutrientes nativo.
- **Acción 2:** Se recomienda realizar una descompactación del suelo realizando un arado superficial para restaurar la porosidad en la Franja 1 en los cuadros del F1-01 a F1-10. Además, se debe aplicar cal agrícola de urgencia en los cuadros F1-04, F1-06 y F1-09 para neutralizar su acidez y llevar el pH a un valor cercano a 6.0. Una vez neutralizado el pH, se puede iniciar la fertilización NPK, ya que esta zona está auténticamente vacía de nutrientes.
- **Acción 3:** En las zonas correspondientes a las Franjas 2 y 5 muestran una fertilidad mediocre a deficiente. Se recomienda el uso de maquinaria agrícola para inyectar fertilizante líquido únicamente al regar sobre estas franjas específicas, logrando un crecimiento homogéneo del cultivo sin desperdiciar insumos en el centro.
- **Acción 4:** Franja 6 del cuadro F6-01 a F6-10, se recomienda no aplicar ningún tipo de fertilizantes en esta zona, ya que se perderían. Se debe transformar esta franja en una

zona de Amortiguamiento, sembrando barreras vivas como pastos perennes o árboles rústicos que sirvan para frenar el viento, regular la acidez del suelo y evitar que la contaminación externa penetre hacia el centro productivo del cultivo.

4.7.Análisis de Costos

La presente sección de análisis de costos tiene como finalidad determinar la inversión aproximada requerida para la implementación del sistema de monitoreo para cultivos de maíz desarrollado en este proyecto. Esta evaluación permite identificar los recursos económicos asociados a los componentes de hardware, herramientas de software, elementos de montaje, servicios de comunicación y actividades de implementación necesarias para poner en funcionamiento el prototipo. Asimismo, este apartado permite valorar la viabilidad económica de la solución propuesta, considerando que el sistema está orientado a pequeños productores de maíz de la comunidad San Andrés.

Para el análisis se consideran directamente los costos asociados a la adquisición de los componentes electrónicos, plataforma de vuelo, sensores, módulos de comunicación, alimentación, materiales de soporte e infraestructura de software utilizada. Además, se diferencian los costos de implementación del prototipo, en el que se detallan aspectos como: diseño, programación, configuración del backend, pruebas e integración. Esta calculo permite mostrar el valor económico real del sistema construido y, al mismo tiempo, estimar cuánto podría representar su implementación si el desarrollo fuera contratado externamente.

4.7.1. Costos de hardware

Los costos de hardware corresponden a los elementos físicos empleados para la construcción del sistema, incluyendo la plataforma de vuelo, placas embebidas, sensores, módulos de comunicación, alimentación eléctrica y elementos de montaje. Estos componentes permiten la

adquisición de datos en campo, la comunicación entre nodos y la operación autónoma del sistema durante las pruebas. En la **Tabla 35** se presenta el costo referencial de cada componente utilizado en el prototipo.

Tabla 35

Costos de Materiales de Hardware para la implementación del sistema

Hardware	**Precio unitario $**	**Cantidad**	**Total $**
Dron DJI Inspire 1	700.00	1	700.00
ESP32 LoRa Heltec V3	35.00	2	35.00
Sensor de suelo NPK 7 en 1 RS485	140.00	1	140.00
Módulo GPS u-blox NEO-6M	5.00	1	5.00
Módulo RS485 a UART	5.00	1	5.00
Batería LiPo 11.1 V 3S 35C 1100 mAh	25.00	1	25.00
Módulo regulador DC-DC	2.50	1	2.50
Soportes impresos en 3D y elementos de fijación	20.00	1	20.00
Total			967.50

Nota: El costo más alto del proyecto es debido al tipo de drone usado ya que este tiene las características requeridas para realizar este tipo de misiones de monitoreo, lo que hace que la mayor parte del costo del proyecto sea provocada por este elemento representando más del 80% del costo total. **Fuente:** Autoría propia.

4.7.2. Costos de software

Para el desarrollo de la parte lógica del prototipo se opta por utilizar herramientas de software libre o de uso gratuito, lo cual reduce significativamente los costos de operación. Entre

estas herramientas se encuentran Arduino IDE para la programación de los nodos, Mosquitto MQTT como broker de mensajería, InfluxDB para almacenamiento de datos, Grafana para visualización, Telegraf para integración entre MQTT e InfluxDB y Docker para el despliegue de servicios. Esta selección es concuerda con los criterios requeridos en la elección de software, donde se priorizaron compatibilidad, facilidad de integración y bajo costo operativo. En el caso de la API de inteligencia artificial, se seleccionó una alternativa con condiciones favorables para pruebas mediante beneficios gratuitos, tal y como se detalla en el requerimiento **StSR 12**.

Tabla 36

Costos de Software

Software	**Precio unitario $**	**Cantidad**	**Total $**
Arduino IDE	0.00	1	0.00
Mosquitto MQTT	0.00	1	0.00
InfluxDB	0.00	1	0.00
Grafana	0.00	1	0.00
Telegraf	0.00	1	0.00
Docker	0.00	1	0.00
Ubuntu 22.04	0.00	1	0.00
VirtualBox	0.00	1	0.00
API Gemini	0.00	1	0.00
Python	0.00	1	0.00
Total			0.00

Nota: Se opta por utilizar herramientas de software libre u open source con el fin de ahorrar recursos y lograr un sistema con un costo más accesible. **Fuente:** Autoría propia.

4.7.3. Costos de implementación e ingeniería

Además de los componentes físicos y lógicos, el desarrollo del sistema incluye actividades de ingeniería relacionadas con el diseño del prototipo, armado del circuito, programación de los nodos, configuración del backend, diseño del dashboard, integración de la API de IA y ejecución de pruebas. Dado que estas actividades fueron realizadas por mi persona, es conveniente estimar su valor referencial para dimensionar el costo real que tendría el sistema en caso de ser implementado como servicio técnico externo.

Tabla 37

Costos referenciales de Ingeniería

Ingeniería referencial	**Precio unitario $**	**Cantidad**	**Total $**
Diseño del sistema y arquitectura IoT	10.00	2 días	20.00
Armado del nodo sensor	20.00	1 día	20.00
Programación del nodo sensor	10.00	5 días	50.00
Programación del nodo coordinador	10.00	4 días	40.00
Configuración de Ubuntu, Docker y servicios backend	15.00	3 días	45.00
Configuración de InfluxDB, Telegraf y Grafana	10.00	3 días	30.00
Integración de API de IA	5.00	2 días	10.00
Pruebas de laboratorio y campo	20.00	3 días	60.00
Total			275.00

Nota: Estos costos son referenciales y varían mucho dependiendo de cada persona y de su formación profesional. **Fuente:** Autoría propia.

4.7.4. Costo total del sistema

Con base en las tablas anteriores, se obtiene el costo total estimado del sistema. Para una evaluación más clara, se presenta un escenario de costo de prototipo, que incluye únicamente los valores de hardware y servicios realmente requeridos, y un escenario de costo referencial, que incorpora además el valor de ingeniería.

Tabla 38

Costo total del sistema

Tipo de costo	Costo prototipo (USD)
Hardware	967.50
Software y servicios	0.00
Ingeniería / implementación	275.00
Total	1242.50

Nota: Los valores mostrados en esta tabla representa la suma total de hardware, software e ingeniería. Estos valores son referenciales y representan una inversión accesible para la implementación del prototipo. **Fuente:** Autoría propia.

El análisis económico evidencia que el sistema propuesto presenta una estructura de costos razonable para un prototipo tecnológico de monitoreo de cultivos de maíz basado en el uso de drones y la arquitectura IoT. La mayor inversión corresponde al hardware, especialmente el drone y el sensor multiparámetro; sin embargo, el uso de software libre, servicios gratuitos y herramientas de código abierto permite reducir los costos recurrentes de operación. Asimismo, la posibilidad de utilizar el sistema bajo un modelo comunitario mejora su viabilidad para pequeños productores.

Finalmente podemos determinar que el sistema no debe evaluarse únicamente por su costo inicial, sino también por los beneficios potenciales ya que puede ofrecer en la reducción del tiempo de monitoreo, la optimización de recursos como: agua y fertilizantes, la generación de información georreferenciada y el apoyo a la toma de decisiones agrícolas. Por ello, el análisis de costos respalda la factibilidad del prototipo como una solución tecnológica de acuerdo al contexto agrícola de la comunidad San Andrés.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Conclusiones

El desarrollo del sistema de monitoreo de cultivos de maíz mediante el uso de drone permitió integrar de manera funcional una arquitectura IoT orientada a la adquisición, transmisión, procesamiento y visualización de variables del suelo en cultivos de maíz. La solución implementada demostró que es posible combinar una plataforma aérea, sensores multiparámetro, comunicación inalámbrica LoRa, mensajería MQTT, almacenamiento en InfluxDB y visualización en Grafana para obtener información precisa y georreferenciada del estado del cultivo.

Se demostró que mediante una configuración adecuada de parámetros de comunicación LoRa se puede alcanzar grandes distancias en la comunicación sin perder datos o tramas durante el proceso, tomando en cuenta la geografía del terreno y la ubicación adecuada de los nodos para que incluso a pesar de no contar con línea de vista directa se logre establecer una comunicación efectiva como es el caso en el que se llegó a establecer una tasa de perdidas cercana al 0%.

El análisis del terreno mediante la sectorización del mapa permite al usuario poder identificar de manera más intuitiva y clara cada una de las zonas del cultivo permitiendo focalizar el cuidado y tratamiento del cultivo optimizando el uso de recursos. La telemetría reveló una variabilidad drástica dependiente del radio de distancia: se identificó una altamente fertil entre las Franjas 3 y 4 donde las concentraciones de Fósforo (P) y Potasio (K) superaron los 160.5 mg/kg y 157.2 mg/kg respectivamente. Por el contrario, en la zona correspondiente a las franjas 1 y 2, los macronutrientes promediaron niveles traza

deficientes inferiores a los 12.0 mg/kg. Este hallazgo cuantitativo justifica de forma absoluta la transición de la agricultura tradicional hacia la Agricultura basada en una arquitectura IoT.

La interpretación de los datos procesados en la base de datos InfluxDB y visualizados en Grafana se tradujo en acciones directas. Al identificar que la zona de mayor fertilidad del terreno cuenta con una sobresaturación nativa de nutrientes alcanzando máximos de Nitrógeno de 88.9 mg/kg, se dictaminó la suspensión inmediata de la aplicación de abono en esta área. Esto representa un ahorro proyectado del 100 % en costos de fertilización para ese sector del cultivo, ayudando también de forma indirecta a que el cultivo no sufra salinización, así como también degradación por exceso de humedad, y reorientando esos recursos económicos exclusivamente hacia el riego y la restauración de las franjas que tienen una degradación alta de nutrientes.

Finalmente, el sistema propuesto demuestra viabilidad técnica como prototipo de monitoreo agrícola para pequeños productores, ya que combina tecnologías accesibles, software de bajo costo y una arquitectura modular que puede ser ajustada o ampliada en futuras implementaciones. Aunque el sistema aún puede optimizarse en aspectos como autonomía, protección física, automatización del muestreo y validación agronómica, los resultados obtenidos evidencian que la solución es funcional y aplicable al contexto agrícola de la comunidad San Andrés.

Recomendaciones

Se recomienda realizar futuras pruebas de campo en diferentes etapas del cultivo de maíz, ya que las condiciones del suelo, la humedad, la demanda nutricional y la respuesta de la planta pueden variar significativamente durante el ciclo productivo. Esto permitiría obtener una base de datos más amplia y representativa para mejorar el análisis del comportamiento del cultivo.

Se recomienda proteger adecuadamente los componentes electrónicos del nodo sensor mediante una carcasa resistente al polvo, humedad y vibraciones. Aunque el sistema fue diseñado para pruebas controladas y de campo, una implementación más robusta permitiría mejorar la seguridad del hardware durante vuelos, aterrizajes y contacto con el suelo.

Para mejorar la autonomía del sistema, se recomienda evaluar estrategias de ahorro energético en el nodo sensor, como ciclos de suspensión, activación del GPS solo durante la toma de muestras, transmisión LoRa por intervalos y apagado temporal de sensores cuando no se estén utilizando. Esto permitiría extender el tiempo de operación sin aumentar significativamente el peso del sistema embarcado.

Se recomienda complementar las mediciones obtenidas por el sensor NPK con análisis de suelo realizados en laboratorio, al menos en una fase inicial de validación. Esta comparación permitiría determinar el nivel de precisión de las lecturas del sensor y establecer factores de corrección o calibración más adecuados para las condiciones específicas del suelo de la comunidad San Andrés.

Es recomendable mejorar la gestión de seguridad del sistema IoT, incorporando autenticación en el broker MQTT, control de acceso por usuario, cifrado de comunicaciones cuando sea necesario y respaldo periódico de la base de datos. Estas medidas permitirían proteger la información recolectada y evitar accesos no autorizados al sistema.

Para trabajos futuros se recomienda mejorar el módulo de inteligencia artificial generativa, mediante un modelo más robusto y entrenado con el fin de obtener mejores resultados y diagnósticos del cultivo.

Para futuras versiones del sistema, se recomienda automatizar parcialmente la planificación de rutas y puntos de muestreo del dron, integrando herramientas de waypoints o planificación de misiones. Esto permitiría reducir la intervención manual del operador y mejorar la repetibilidad de las pruebas en diferentes jornadas de monitoreo.

Se recomienda evaluar el desempeño del sistema en parcelas de mayor extensión y bajo diferentes condiciones ambientales, con el fin de analizar el comportamiento real del enlace LoRa, la estabilidad del GPS, la duración de la batería y la respuesta del sistema ante obstáculos, vegetación densa o variaciones climáticas.

Para futuras mejoras se recomienda utilizar un sensor gps con una mayor capacidad o precisión con el fin de realizar un mapeo del área a mayor detalla pudiendo aumentar el número de puntos de muestreo.

Se recomienda utilizar métodos de riego más tecnificados con la finalidad de optimizar recursos y reducir costos de producción y mejorar el rendimiento del cultivo y facilitar la obtención de muestras en el terreno.

Bibliografía

Andrade, E. (2022). *Comunicaciones Habilitadas Por Drones: Requisitos, Tecnologías Y Automatización*.

Chicaiza, L. (2022). Simulación y control del sistema de riego, temperatura y humedad dentro de un invernadero. *Tesis*, 1–100.

CIVIL, D. (2020). *Direcciòn General de Aviaciòn Civil*. https://www.aviacioncivil.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/03/estatuto_orgA%CC%81nico_por_procesos_noviembre_2022_-_240223_-vf_-_numerado04394230016772654 91.pdf

COITAOC. (2021). *Estado del Arte y Tendencias del IoT e IoE* (Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Telecomunicación de Andalucía Oriental y Melilla, Ed.). https://coitaoc.org/wp-content/uploads/2021/06/Estado-del-Arte-IoT.pdf

De León, R., & Victorino, L. (2024). Implicaciones en Adoptar la Agricultura Digital. Una Visión Genérica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *8*(2), 6818–6826. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.11095

Katherine, L., & Santos, C. (2018). *The use of technology in agriculture*. *2*, 25–32.

Narvaez, Y. (2020). *Diseño de redes de distribución eléctrica de media y baja tensión para la normalización del barrio El Piñoncito de Campo de la Cruz*.

OACI. (2020). Introducción a UAVs Información Aeronáutica para Drones. *Aeroespacial y Defensa Everis*, 33.

Robles, F. (2023). *Incidencia de la tecnología agrícola ecuatoriana en el sector de la producción agrícola durante el período*.

Sánchez, J., Ligarreto, G., & Leiva, F. (2020). Vsriabilidad del crecimiento y el rendimiento del cultivo de maíz para choclo (Zea mays L.) como respuesta a diferentes cariables. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, *65*(2), 6579–6590.

Santiago Silvestre, & Jordi Salazar. (2017). *El mundo internet of things (IoT)*. https://techpedia.fel.cvut.cz/html/frame.php?oid=159&pid=1000&finf=html&fp=1000

Serna, M. (2021, June 17). *La importancia del Monitoreo de la Calidad del Suelo*. https://ogreen.com.pe/monitoreo-ambiental/monitoreo-calidad-suelo/

Torrecillas, C., Roncero, S., & Martínez, J. (2024). *Drones: Diseño, navegación y aplicaciones*.

Yánez G., C. (2007). *Manual de producción de maíz para pequeños agricultores y agricultoras 2007*. http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/394

Zambrano, J., Vlásquez, D., & Segovia, C. (2021). *Guía para la producción sustentable de maíz en la Sierra ecuatoriana*.

Zayas, I. (2020). El Desarrollo Tecnologico Y La Innovación Como Ente Principal De Competitividad En Las Empresas Del Sector Agropecuario En El Municipio De Angostura, Sinaloa. *Mexicana de Agronegocios*, *42*(2018), 867–877.

Anexo 1. Encuesta para la recolección de información sobre prácticas agrícolas y necesidades tecnológicas en el cultivo de maíz en la comunidad San Andrés, Cantón San Miguel de Urcuquí

Objetivo del cuestionario

El objetivo de este cuestionario es recopilar información precisa y actualizada sobre la situación agrícola del sector San Andrés, específicamente en relación con el manejo del cultivo de maíz, las prácticas de monitoreo actualmente utilizadas y la percepción de los agricultores frente a la incorporación de tecnologías emergentes, como drones equipados con sensores.

La información obtenida permitirá identificar necesidades, limitaciones y oportunidades de mejora, sirviendo como insumo fundamental para la fase de levantamiento de requerimientos dentro de la metodología de Investigación–Acción aplicada en el proyecto.

Población objetivo

Este cuestionario está dirigido a agricultores de la comunidad San Andrés, perteneciente al Cantón San Miguel de Urcuquí, quienes se dedican al cultivo de maíz y poseen conocimiento directo de las labores de manejo del cultivo de maíz en sus parcelas.

Instrucciones para el encuestado

Por favor, responda cada pregunta con sinceridad y de acuerdo con su experiencia personal.

No existen respuestas correctas o incorrectas; toda la información proporcionada será utilizada únicamente con fines académicos y para mejorar el diseño del sistema de monitoreo agrícola propuesto.

- **Bloque 1: Manejo del cultivo de maíz**

1. ¿Qué extensión aproximada de su terreno destina al cultivo de maíz?
    - ☐ Menos de 1 ha
    - ☐ Entre 1 y 3 ha
    - ☐ Más de 3 ha
2. ¿Qué método utiliza principalmente para verificar el estado del cultivo?
    - ☐ Observación visual
    - ☐ Toma manual de muestras de suelo
    - ☐ Asesoría técnica o agrónoma
    - ☐ Otro (especifique): _____
3. ¿Qué aspectos del sembrío observa con mayor frecuencia al inspeccionar su cultivo?
    - ☐ Humedad del suelo
    - ☐ Temperatura
    - ☐ Estado de las hojas o coloración
    - ☐ Presencia de plagas
    - ☐ Otro: _____
4. ¿Cuáles considera que son las principales dificultades que enfrenta al monitorear su cultivo de maíz

5. ¿Cómo decide actualmente cuándo regar su cultivo de maíz?
    - ☐ Por experiencia propia
    - ☐ Observando el aspecto del suelo
    - ☐ Siguiendo un calendario fijo
    - ☐ Otro: _____
6. ¿Cómo decide la cantidad de fertilizante que aplica en cada ciclo?
    - ☐ Experiencia propia
    - ☐ Recomendación de proveedores
    - ☐ Asesoría técnica
    - ☐ Ensayo y error
    - ☐ Otro (especifique): _____

7. ¿Ha tenido pérdidas en su cultivo de maíz?
    - ☐ Sí
    - ☐ No
8. En caso de que haya respondido si en la anterior pregunta señale las causas
    - ☐ Falta de agua
    - ☐ Falta de fertilizantes
    - ☐ Plagas
    - ☐ Otro (especifique): _____

- ◇ Bloque 2: Uso actual de tecnologías en los cultivos

9. ¿Ha utilizado antes alguna herramienta tecnológica o dispositivos de sensado para medir variables agrícolas como (PH, Humedad, Nitrógeno, Fosforo, etc.) para monitorear su cultivo de maíz?
    - ☐ Sí
    - ☐ No
10. Si respondió "sí" a la pregunta anterior, indique qué herramienta utilizo:
    - ☐ Drones de Sensado para variables agrícolas (Humedad, Ph, Materia orgánica, etc.)
    - ☐ Drones de Fumigación
    - ☐ Aplicaciones Móviles con IA
11. ¿Utiliza actualmente dispositivos o instrumentos digitales (teléfono inteligente, computadora, Internet) en su cultivo de maíz?
    - ☐ Sí, con frecuencia
    - ☐ A veces
    - ☐ No

◇ Bloque 3: Expectativas y percepción sobre el uso de nuevas tecnologías

12. ¿Estaría interesado en un sistema que le permita tener información sobre el estado de su cultivo?
    - ☐ Muy interesado
    - ☐ Interesado
    - ☐ Poco interesado
    - ☐ Nada interesado
13. ¿En qué medida cree que ayudaría el uso de la tecnología en su cultivo de maíz?
    - ☐ Mucho
    - ☐ Algo
    - ☐ Poco
    - ☐ Nada
14. ¿Qué tipo de información considera más útil recibir de un sistema de monitoreo agrícola?
    - ☐ Ph del suelo
    - ☐ Humedad del suelo
    - ☐ Nutrientes del suelo
    - ☐ Detección de Plagas
    - ☐ Presencia de Hongos en la raíz
15. ¿Cómo preferiría recibir los datos de su cultivo?
    - ☐ En formato digital (aplicación o teléfono móvil)
    - ☐ En formato físico (hojas impresas o reportes)
    - ☐ En ambos formatos

◇ Bloque 4: Costos y rentabilidad

16. Complete la siguiente tabla indicando, en una escala del 1 al 5, el nivel de impacto que tiene cada uno de los siguientes aspectos en sus costos de producción.

    En donde:

    1 = Muy bajo **2** = Bajo **3** = Medio **4** = Alto **5** = Muy alto

	Riego	**Fertilización**	**Control de plagas**
Valor			

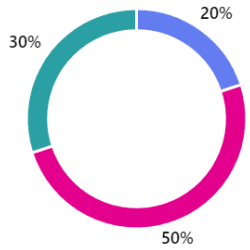
17. ¿Cuánto estaría dispuesto a invertir en una herramienta tecnológica que le ayude a mejorar el rendimiento de su cultivo?
    - ☐ Nada
    - ☐ Hasta $50
    - ☐ Entre $50 y $100
    - ☐ Más de $100
18. En su opinión, ¿cómo podría una herramienta tecnológica mejorar la rentabilidad de su cultivo de maíz?

Anexo 2. Resultados de la aplicación de la Encuesta

1. ¿Que extension aproximada de su terreno destina al cultivo de maiz?

Más detalles

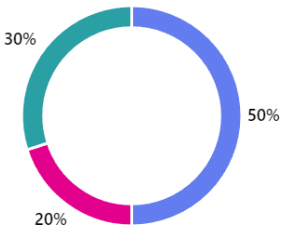
Menos de 1 ha	2
Entre 1 y 3 ha	5
Mas de 3 ha	3



2. ¿Qué método utiliza principalmente para verificar el estado del cultivo?

Más detalles

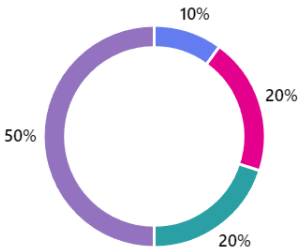
Observación visual	5
Toma manual de muestras de suelo	2
Asesoría técnica o agrónoma	3
Otras	0



3. ¿Que aspectos del sembrio observa con mayor frecuencia al inspeccionar su cultivo?

Más detalles

Humedad del suelo	1
Temperatura	2
Estado de las hojas o coloración	2
Presencia de plagas	5
Otras	0



4. ¿Cuales considera que son las principales dificultades que enfrenta al monitorear su cultivo de maiz? Más detalles

7
Respuestas

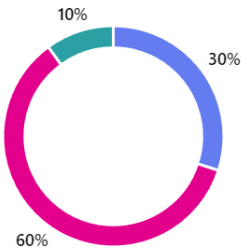
Respuestas más recientes
"Una de las principales es la falta de mano de obra"
...

3 encuestados (43%) respondieron falta para esta pregunta.



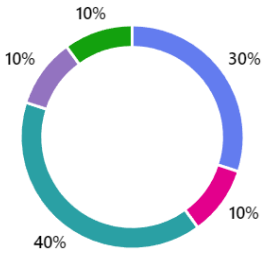
5. ¿Como decide actualmente cuando regar su cultivo de maiz? Más detalles

Por experiencia propia	3
Observando el aspecto del suelo	6
Siguiendo un calendario fijo	1
Otras	0



6. ¿Como decide la cantidad de fertilizante que aplica en cada ciclo? Más detalles

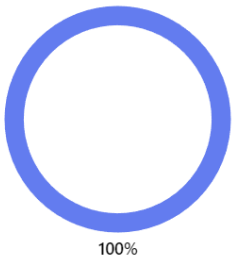
Experiencia propia	3
Recomendación de proveedores	1
Asesoría técnica	4
Ensayo y error	1
Otras	1



7. ¿Ha tenido pérdidas en su cultivo de maíz?

Más detalles

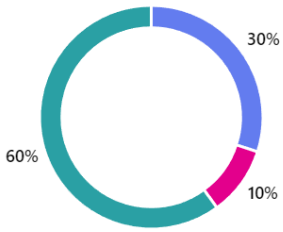
Si	10
No	0



8. En caso de que haya respondido "si" en la anterior pregunta señale las causas

Más detalles

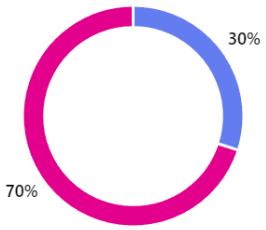
Falta de agua	3
Falta de Fertilizantes	1
Plagas	6
Otras	0



9. ¿Ha utilizado antes alguna herramienta tecnológica o dispositivos de sensado para medir variables agrícolas como (P H, Humedad, Nitrógeno, Fosforo, etc.) para monitorear su cultivo de maíz?

Más detalles

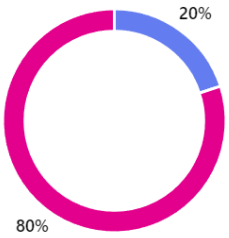
Si	3
No	7



10. Si respondio "si" a la pregunta anterior, indique que herramienta utilizo

Más detalles

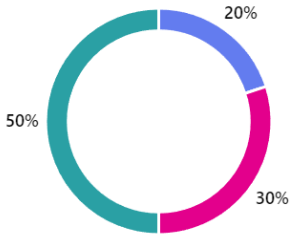
Drones de Sensado para variables agrícolas (Humedad, Ph, Materia orgánica, etc.)	1
Drones de Fumigación	4
Aplicaciones Móviles con IA	0



11. ¿Utiliza actualmente dispositivos o instrumentos digitales (teléfono inteligente, computadora, Internet) en su cultivo de maiz?

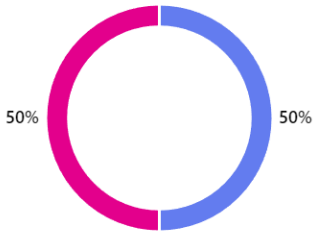
Más detalles

Si, con frecuencia	2
A veces	3
No	5



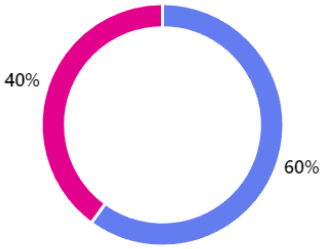
12. ¿Estaría interesado en un sistema que le permita tener información sobre el estado de su cultivo? Más detalles

Muy interesado	5
Interesado	5
Poco Interesado	0
Nada interesado	0



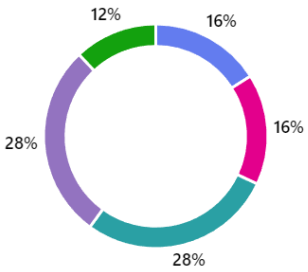
13. ¿En qué medida cree que ayudaría el uso de la tecnología en su cultivo de maíz? Más detalles

Mucho	6
Algo	4
Poco	0
Nada	0



14. ¿Qué tipo de información considera más útil recibir de un sistema de monitoreo agrícola? Más detalles

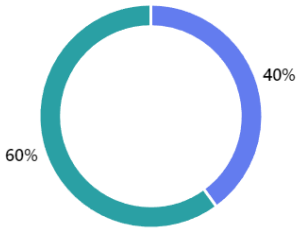
Ph del suelo	4
Humedad del suelo	4
Nutrientes del suelo	7
Detección de Plagas	7
Presencia de Hongos en la raíz	3



15. ¿Cómo preferiría recibir los datos de su cultivo?

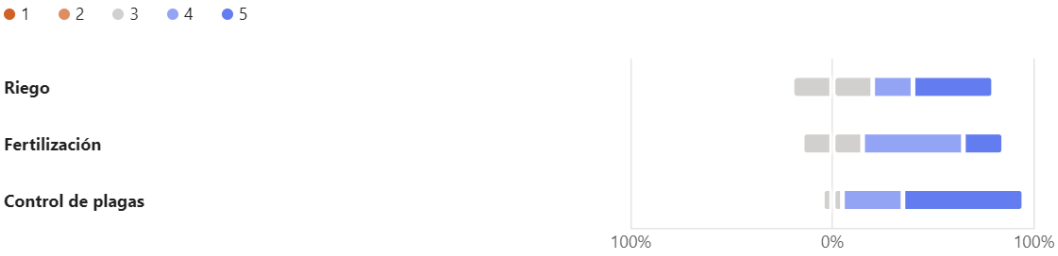
Más detalles

En formato digital (aplicación o teléfono móvil)	4
En formato físico (hojas impresas o reportes)	0
En ambos formatos	6



16. Complete la siguiente tabla indicando, en una escala del 1 al 5, el nivel de impacto que tiene cada uno de los siguient es aspectos en sus costos de producción.

Más detalles



18. En su opinión, ¿cómo podría una herramienta tecnológica mejorar la rentabilidad de su cultivo de maíz?

Más detalles

10
Respuestas

Respuestas más recientes

"Mejoraría en muchos aspectos tanto en la calidad y en la producción"

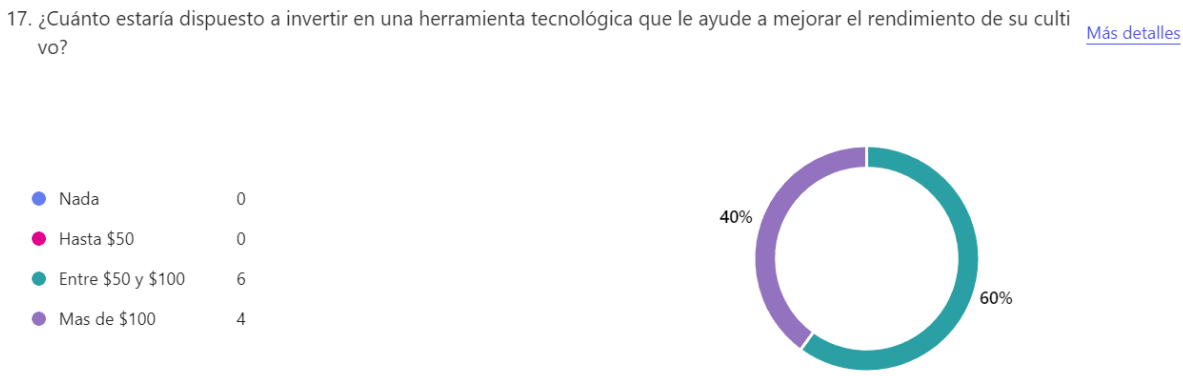
"En evitar perdidas económicas."

"Mejorar la calidad del producto"

...

2 encuestados (20%) respondieron cultivos para esta pregunta.





Anexo 3. Revisión de Trabajos Relacionados

Para la selección de los trabajos relacionados se establecieron como criterios principales la afinidad tecnológica y la aplicabilidad al contexto del presente proyecto. En este sentido, se tomaron como referencia investigaciones y desarrollos que incorporan arquitecturas basadas en el Internet de las Cosas (IoT), debido a que este enfoque constituye el eje fundamental del sistema de monitoreo agrícola propuesto. Asimismo, se priorizaron aquellos trabajos que emplean dispositivos y tecnologías afines, como drones, sensores ambientales, microcontroladores y plataformas de transmisión y almacenamiento de datos, puesto que su análisis permite identificar soluciones técnicas que pueden ser adaptadas o replicadas en el diseño del prototipo. De esta manera, la revisión de estos trabajos no solo enriquece el marco de referencia, sino que también justifica la pertinencia de las decisiones tomadas en cuanto a hardware, software y metodologías de integración, consolidando la base científica y técnica sobre la cual se sustenta el proyecto.

1. **RECONOCIMIENTO DE PATRONES DE DATOS DE WSN ENFOCADO A REGADÍOS POR AMBIENTES CONTROLADOS DE ROSAS A ESCALA DE LABORATORIO**

Uno de los trabajos relevantes relacionados con este proyecto de (Champutiz, 2019) que es el desarrollo del sistema ROSEND, descrito en el trabajo de titulación titulado "Reconocimiento de patrones de datos de WSN enfocado a regadíos por ambientes controlados de rosas a escala de laboratorio". Este sistema, basado en redes de sensores inalámbricos (WSN), se diseñó para monitorear variables ambientales clave que afectan el crecimiento y desarrollo de rosas en un ambiente controlado, tales como humedad, temperatura, CO_2, y luminosidad.

El sistema ROSEND utiliza sensores integrados con hardware y software libre de bajo costo para recopilar datos, que luego son procesados mediante algoritmos de clasificación, como el KNN, con el objetivo de identificar patrones y optimizar recursos, específicamente el riego. A través de esta metodología, se logró automatizar la toma de decisiones en función de las condiciones del terreno y el ambiente, mejorando significativamente los procesos agrícolas relacionados con el cultivo de rosas.

Entre los resultados más destacados, el sistema demostró que el uso de análisis basado en datos reduce las decisiones empíricas y permite implementar sistemas determinísticos que optimizan la aplicación de agua y nutrientes. Aunque el enfoque estuvo limitado a un ambiente controlado y a un cultivo específico, los principios y metodologías aplicados son relevantes para otras áreas agrícolas.

Este antecedente resulta especialmente útil para el desarrollo del presente proyecto, ya que destaca la viabilidad de integrar tecnologías como sensores IoT, redes inalámbricas y análisis de datos para optimizar los procesos agrícolas. No obstante, el proyecto actual busca expandir esta propuesta al ámbito de cultivos agrícolas en general y a terrenos abiertos,

mediante el uso de drones como plataforma de monitoreo, aumentando la cobertura y autonomía del sistema.

2. DISEÑO DE UN SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL MEDIANTE UNA PLATAFORMA USANDO UN DRONE PARA IDENTIFICAR LA PLAGA LANCHA (PHYTOPHTHORA INFESTANS) EN CAMPOS AGRÍCOLAS DE TOMATE RIÑÓN EN ROMERILLO BAJO.

El trabajo de titulación titulado “Diseño de un sistema de visión artificial mediante una plataforma usando un dron para identificar la plaga lancha (Phytophthora infestans) en campos agrícolas de tomate riñón en Romerillo Bajo” comparte elementos clave con el presente proyecto, destacando el uso de drones como herramienta tecnológica para mejorar la gestión agrícola. Mientras que el trabajo de (Noboa, 2021) se centra en la identificación de plagas a través de visión artificial y procesamiento de imágenes, este proyecto propone el uso de sensores IoT integrados en un dron para monitorear variables críticas del terreno, como humedad, temperatura y pH del suelo.

Ambos proyectos buscan optimizar los procesos agrícolas mediante la implementación de tecnologías avanzadas que permitan a los agricultores tomar decisiones informadas. Además, ambos integran plataformas tecnológicas para la recolección y transmisión de datos a sistemas centrales que generan información visual y práctica, como reportes o mapas, útiles para el manejo eficiente de los cultivos. En el caso del proyecto propuesto, el análisis se presenta mediante mapas de calor que identifican zonas con diferentes condiciones del suelo,

mientras que el trabajo de titulación utiliza algoritmos de visión artificial para detectar la presencia de plagas.

Esta relación evidencia cómo el uso de drones y sistemas tecnológicos se está consolidando como una herramienta esencial en la agricultura moderna, contribuyendo a la sostenibilidad y eficiencia del sector. El trabajo mencionado sirve como un antecedente que refuerza la viabilidad y relevancia del presente proyecto, al demostrar cómo la tecnología aplicada a la agricultura puede generar un impacto positivo en la productividad y la toma de decisiones.

3. COMPARATIVA DE PLATAFORMAS RASPBERRY PI 4 Y JETSON NANO PARA APLICACIONES DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN.

El trabajo realizado por (Escobar, 2023) se vincula directamente con el desarrollo del presente proyecto, ya que ambos exploran el uso de tecnologías embebidas en el contexto agrícola. Mientras que el trabajo analizado evalúa las capacidades técnicas de la Raspberry Pi 4 y el Jetson Nano para tareas relacionadas con agricultura de precisión, este proyecto utiliza la Raspberry Pi 4 como núcleo principal de procesamiento para integrar sensores IoT en un dron, permitiendo la recolección de datos clave como humedad, temperatura y pH del suelo.

De forma comparativa ambos proyectos buscan optimizar los procesos agrícolas mediante el uso de plataformas de bajo costo y alta eficiencia. En el trabajo previo, se destacan las ventajas técnicas de la Raspberry Pi 4 en términos de flexibilidad y rendimiento, lo cual refuerza su elección en este proyecto para procesar los datos recolectados y transmitirlos

mediante Wi-Fi utilizando el protocolo MQTT. Asimismo, ambos trabajos coinciden en la implementación de drones como una herramienta versátil para la adquisición de datos en entornos agrícolas.

Aunque los enfoques específicos difieren (visión artificial en el trabajo analizado y monitoreo de variables del suelo en este proyecto), ambos comparten el objetivo de impulsar la agricultura de precisión a través de soluciones tecnológicas innovadoras que optimizan recursos y mejoran la toma de decisiones. Este antecedente proporciona un sustento técnico que valida la selección de la Raspberry Pi 4 en el presente proyecto y destaca la viabilidad de integrar drones y tecnologías embebidas en aplicaciones agrícolas.

4. DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE MALEZAS EN CULTIVOS DE MAÍZ Y/O PAPA UTILIZANDO IMÁGENES ADQUIRIDAS POR DRONES EMPLEANDO LA ARQUITECTURA DE RED NEURONAL CONVOLUCIONAL XCEPTION.

Este trabajo se relaciona directamente con el presente proyecto, ya que ambos comparten el objetivo de optimizar procesos agrícolas mediante el uso de drones y tecnologías avanzadas. Mientras que el trabajo realizado por (Lema, 2024) emplea drones para capturar imágenes y procesarlas mediante redes neuronales para detectar malezas, este proyecto utiliza drones equipados con sensores IoT para monitorear variables críticas del suelo. Ambos proyectos forman parte del enfoque de agricultura de precisión, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola y a la toma de decisiones informadas mediante la implementación de herramientas tecnológicas innovadoras.

5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO NUTRICIONAL INTELIGENTE MEDIANTE SERVICIO IOT DE CULTIVO DE MAÍZ CON PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN LORAWAN

Este trabajo de titulación guarda una relación estrecha con el presente proyecto, ya que ambos proyectos se busca integrar tecnologías IoT para mejorar la gestión agrícola. Mientras que el trabajo de (Ponce, 2023) utiliza sensores para medir macronutrientes y humedad en cultivos de maíz, este proyecto se enfoca en un monitoreo más amplio de variables del suelo, empleando drones como plataforma móvil y Wi-Fi como protocolo de transmisión. Ambos proyectos comparten el objetivo de optimizar recursos agrícolas, promover prácticas sostenibles y proporcionar herramientas innovadoras para la agricultura de precisión.

Anexo 4. Código del Sistema

Código Fuente del Nodo Sensor

```
#include "LoRaWan_APP.h"
#include "Arduino.h"
#include <ModbusMaster.h>
#include <Wire.h>
#include "HT_SSD1306Wire.h"
#include "HT_TinyGPS++.h"

// --- PANTALLA OLED ---
SSD1306Wire pantalla(0x3c, 500000, SDA_OLED, SCL_OLED, GEOMETRY_128_64,
RST_OLED);

// --- OBJETOS ---
```

```
TinyGPSPlus gps;
ModbusMaster node;

// --- PINES ---
#define MAX485_DE_RE 47
#define TX_PIN 48
#define RX_PIN 26
#define GPS_RX_PIN 34
#define GPS_TX_PIN 33

// --- 🔧 CONFIGURACIÓN LORA 🔧 ---
#define RF_FREQUENCY 915000000
#define TX_OUTPUT_POWER 22          // Potencia de Transmision
#define LORA_BANDWIDTH 0            // 125 kHz
#define LORA_SPREADING_FACTOR 12    // Factor de Propagacion
#define LORA_CODINGRATE 4           // Tasa 4/8:Bits de corrección de errores
#define LORA_PREAMBLE_LENGTH 8
#define LORA_SYMBOL_TIMEOUT 0
#define LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON false
#define LORA_IQ_INVERSION_ON false

#define TIEMPO_ENTRE_LECTURAS 10000 // 10 segundos

// --- ESTRUCTURA DE DATOS ---
typedef struct struct_message {
  float hum;
  float temp;
  uint16_t ec;
  float ph;
  uint16_t n;
  uint16_t p;
  uint16_t k;
  double lat;
  double lng;
} struct_message;

struct_message myData = {0.0, 0.0, 0, 0.0, 0, 0, 0, 0.0, 0.0};

// --- VARIABLES DE ESTADO Y TTL---
static RadioEvents_t RadioEvents;
void OnTxDone( void );
void OnTxTimeout( void );
bool lora_idle = true;
unsigned long lastSendTime = 0;
int errores_modbus = 0;
int errores_gps = 0;

// Control de Flujo RS485
```

```
void preTransmission() { digitalWrite(MAX485_DE_RE, HIGH); }
void postTransmission() { digitalWrite(MAX485_DE_RE, LOW); }

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Mcu.begin(HELTEC_BOARD, SLOW_CLK_TPYE);

    // Iniciar Pantalla
    pantalla.init();
    pantalla.setFont(ArialMT_Plain_10);
    pantalla.flipScreenVertically();
    pantalla.clear();
    pantalla.drawString(0, 0, "Iniciando Sistema...");
    pantalla.display();

    // Iniciar RS485
    pinMode(MAX485_DE_RE, OUTPUT);
    digitalWrite(MAX485_DE_RE, LOW);
    Serial1.begin(4800, SERIAL_8N1, RX_PIN, TX_PIN);
    node.begin(1, Serial1);
    node.preTransmission(preTransmission);
    node.postTransmission(postTransmission);

    // Iniciar GPS
    Serial2.begin(9600, SERIAL_8N1, GPS_RX_PIN, GPS_TX_PIN);

    // Iniciar LoRa
    RadioEvents.TxDone = OnTxDone;
    RadioEvents.TxTimeout = OnTxTimeout;
    Radio.Init( &RadioEvents );
    Radio.SetChannel( RF_FREQUENCY );

    // Configuración aplicada de TX
    Radio.SetTxConfig( MODEM_LORA, TX_OUTPUT_POWER, 0, LORA_BANDWIDTH,
                       LORA_SPREADING_FACTOR, LORA_CODINGRATE,
                       LORA_PREAMBLE_LENGTH, LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON,
                       true, 0, 0, LORA_IQ_INVERSION_ON, 3000 );

    Serial.println("\n☑ SENSOR MAESTRO INICIADO (TX 22dBm - SF10 - CR4/8)");
}

void loop()
{
  // 1. EXTRACT CONTINUO GPS
  while (Serial2.available() > 0) {
    gps.encode(Serial2.read());
  }
```

```
  // 2. TEMPORIZADOR DE MUESTREO (10s)
  if(lora_idle && (millis() - lastSendTime > TIEMPO_ENTRE_LECTURAS))
  {
    lastSendTime = millis();

    pantalla.clear();
    pantalla.drawString(0, 0, "Leyendo Sensores...");
    pantalla.display();

    // --- VALIDACIÓN MODBUS ---
    uint8_t result = node.readHoldingRegisters(0x0000, 7);
    if (result == node.ku8MBSuccess) {
        errores_modbus = 0;

        float temp_hum  = node.getResponseBuffer(0) * 0.1;
        float temp_temp = node.getResponseBuffer(1) * 0.1;
        float temp_ph   = node.getResponseBuffer(3) * 0.1;

        if (temp_hum >= 0.0 && temp_hum <= 100.0) myData.hum = temp_hum;
        if (temp_temp >= -20.0 && temp_temp <= 80.0) myData.temp = temp_temp;
        if (temp_ph >= 0.0 && temp_ph <= 14.0) myData.ph = temp_ph;

        myData.ec = node.getResponseBuffer(2);
        myData.n  = node.getResponseBuffer(4);
        myData.p  = node.getResponseBuffer(5);
        myData.k  = node.getResponseBuffer(6);
    } else {
        errores_modbus++;
        Serial.printf("⚠ Error lectura Modbus. Intento fallido %d/3\n",
errores_modbus);

        if (errores_modbus >= 3) {
            Serial.println("❌ Modbus Caducado: Enviando ceros (Filtrado
activo).");
            myData.hum = 0; myData.temp = 0; myData.ec = 0; myData.ph = 0;
            myData.n = 0; myData.p = 0; myData.k = 0;
        }
    }

    // --- VALIDACIÓN GPS ---
    if (gps.location.isValid() && gps.location.lat() != 0.0) {
      errores_gps = 0;
      myData.lat = gps.location.lat();
      myData.lng = gps.location.lng();
    } else {
      errores_gps++;
      if (errores_gps < 3) {
```

```
        Serial.printf("⚠️ Perdiendo señal GPS. Reteniendo última válida
(Intento %d/3)\n", errores_gps);
      } else if (errores_gps == 3) {
        Serial.println("❌ GPS Caducado: Forzando coordenadas a 0.0");
        myData.lat = 0.0;
        myData.lng = 0.0;
      }
    }

    // --- REPORTE SERIAL Y OLED ---
    Serial.println("\n━━━━━━━ REPORTE DE SUELO ━━━━━━━");
    if(myData.lat != 0.0) {
       Serial.printf("🛰️  GPS:       Lat: %.6f  Lng: %.6f\r\n", myData.lat,
myData.lng);
    } else {
       Serial.println("🛰️  GPS:       Sin Señal (Excluido del Mapa)");
    }

    if (myData.hum != 0 || myData.ph != 0) {
        Serial.printf("🌱  NPK:       N:%d  P:%d  K:%d (mg/kg)\r\n",
myData.n, myData.p, myData.k);
        Serial.printf("🧪  Química:   pH: %.2f  CE: %d us/cm\r\n", myData.ph,
myData.ec);
        Serial.printf("🌡️  Física:    Temp: %.1f°C   Hum: %.1f%%\r\n",
myData.temp, myData.hum);
    } else {
        Serial.println("🚫  SUELO:     Datos nulos por desconexión.");
    }
    Serial.println("━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━");

    pantalla.clear();
    pantalla.drawString(0, 0, "ENVIANDO LORA...");

    char strBuf[60];
    if (myData.lat != 0.0) {
      sprintf(strBuf, "Lat:%.4f", myData.lat);
      pantalla.drawString(0, 15, strBuf);
    } else {
      pantalla.drawString(0, 15, "GPS: Sin Fix (0.0)");
    }

    sprintf(strBuf, "N:%d P:%d K:%d", myData.n, myData.p, myData.k);
    pantalla.drawString(0, 27, strBuf);
    sprintf(strBuf, "pH:%.1f  EC:%d", myData.ph, myData.ec);
    pantalla.drawString(0, 39, strBuf);
    sprintf(strBuf, "T:%.1fC  H:%.1f%%", myData.temp, myData.hum);
    pantalla.drawString(0, 51, strBuf);
    pantalla.display();
```

```
    // ENVIAR POR LORA
    Radio.Send( (uint8_t *)&myData, sizeof(myData) );
    lora_idle = false;
  }

  Radio.IrqProcess();
}

void OnTxDone( void ) {
  Serial.println("📡 Paquete LoRa Enviado Correctamente\n");
  lora_idle = true;
}

void OnTxTimeout( void ) {
  Serial.println("❌ Timeout LoRa");
  Radio.Sleep();
  lora_idle = true;
}
```

Código Fuente del Nodo Coordinador

```
#include "LoRaWan_APP.h"
#include "Arduino.h"
#include <Wire.h>
#include "HT_SSD1306Wire.h"
#include <WiFi.h>
#include <ESPmDNS.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <ArduinoJson.h>

// --- 🔧 CONFIGURACIÓN DE RED Y NUBE LOCAL 🔧 ---
const char* ssid             = "Galaxy S23 Ultra 6276";
const char* password         = "admin1234";
const char* mqtt_server_name = "josue";             // Dominio local de
InfluxDB/Grafana
const int   mqtt_port        = 1883;
const char* mqtt_topic       = "agricultura/sensor1";
```

```
IPAddress mqtt_server_ip;

// --- OBJETOS ---
SSD1306Wire pantalla(0x3c, 500000, SDA_OLED, SCL_OLED, GEOMETRY_128_64,
RST_OLED);
WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

// --- 📡 CONFIGURACIÓN FÍSICA LORA 📡 ---
#define RF_FREQUENCY 915000000
#define TX_OUTPUT_POWER 22
#define LORA_BANDWIDTH 0          // 125 kHz
#define LORA_SPREADING_FACTOR 12  // SF12 (Largo alcance)
#define LORA_CODINGRATE 4         // CR 4/8 (Máxima resistencia a
interferencias)
#define LORA_PREAMBLE_LENGTH 8
#define LORA_SYMBOL_TIMEOUT 0
#define LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON false
#define LORA_IQ_INVERSION_ON false
#define RX_TIMEOUT_VALUE 1000
#define BUFFER_SIZE 64

// --- ESTRUCTURA DE DATOS ALINEADA ---
typedef struct struct_message {
  float hum; float temp; uint16_t ec; float ph;
  uint16_t n; uint16_t p; uint16_t k;
  double lat; double lng;
} struct_message;

struct_message incomingData;

static RadioEvents_t RadioEvents;
bool lora_idle = true;

// --- VARIABLES PARA CÁLCULO DE PÉRDIDA DE PAQUETES ---
unsigned long last_rx_time = 0;
uint32_t total_paquetes_esperados = 0;
uint32_t total_paquetes_recibidos = 0;
float packet_loss_actual = 0.0;
const unsigned long INTERVALO_SENSOR_MS = 10000; //Tiempo de transmisión cada
10 segundos
// --- FUNCIÓN DE RESOLUCIÓN MDNS ---
void resolver_ip_servidor() {
  pantalla.clear();
  pantalla.drawString(0, 0, "Iniciando mDNS...");
  pantalla.drawString(0, 15, "Buscando host:");
  pantalla.drawString(0, 30, String(mqtt_server_name) + ".local");
  pantalla.display();
```

```
  Serial.println("\n[mDNS] Buscando servidor en el Hotspot...");
  if (!MDNS.begin("heltec-gateway")) return;

  mqtt_server_ip = MDNS.queryHost(mqtt_server_name);
  int intentos = 0;
  while (mqtt_server_ip.toString() == "0.0.0.0" && intentos < 15) {
    delay(1000);
    Serial.print(".");
    mqtt_server_ip = MDNS.queryHost(mqtt_server_name);
    intentos++;
  }

  if (mqtt_server_ip.toString() != "0.0.0.0") {
    Serial.printf("\n[mDNS] ☑ Servidor localizado. IP: %s\n",
mqtt_server_ip.toString().c_str());
    pantalla.clear();
    pantalla.drawString(0, 0, "Servidor OK!");
    pantalla.drawString(0, 20, mqtt_server_ip.toString());
    pantalla.display();
    delay(1500);
  }
}

// --- FUNCIONES WIFI Y MQTT ---
void setup_wifi() {
  Serial.print("\n📡 Conectando a WiFi: ");
  Serial.println(ssid);
  WiFi.begin(ssid, password);

  int intentos = 0;
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && intentos < 20) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
    intentos++;
  }

  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    Serial.println("\n☑ WiFi Conectado!");
  }
}

bool reconnect_non_blocking() {
  String clientId = "HeltecGateway-" + String(random(0xffff), HEX);
  if (client.connect(clientId.c_str())) {
    Serial.println("☑ Conexión MQTT establecida");
    return true;
  }
```

```
  return false;
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Mcu.begin(HELTEC_BOARD, SLOW_CLK_TPYE);

    pantalla.init();
    pantalla.setFont(ArialMT_Plain_10);
    pantalla.flipScreenVertically();
    pantalla.clear();
    pantalla.drawString(0, 0, "INICIANDO GATEWAY...");
    pantalla.display();

    setup_wifi();
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        resolver_ip_servidor();
        client.setServer(mqtt_server_ip, mqtt_port);
    }

    RadioEvents.RxDone = OnRxDone;
    Radio.Init( &RadioEvents );
    Radio.SetChannel( RF_FREQUENCY );
    Radio.SetRxConfig( MODEM_LORA, LORA_BANDWIDTH, LORA_SPREADING_FACTOR,
                       LORA_CODINGRATE, 0, LORA_PREAMBLE_LENGTH,
                       LORA_SYMBOL_TIMEOUT, LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON,
                       0, true, 0, 0, LORA_IQ_INVERSION_ON, true );

    Serial.println("\n--- GATEWAY LISTO: TELEMETRÍA GLOBAL Y DIAGNÓSTICO
ACTIVO ---");
}

void loop() {
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
      if (!client.connected()) {
        static unsigned long lastReconnectAttempt = 0;
        long now = millis();
        if (now - lastReconnectAttempt > 5000) {
          lastReconnectAttempt = now;
          if (reconnect_non_blocking()) lastReconnectAttempt = 0;
        }
      }
      client.loop();
  }

  if(lora_idle) {
    lora_idle = false;
    Radio.Rx(0);
```

```
  }
  Radio.IrqProcess( );
}

// --- MOTOR DE RECEPCIÓN Y EMPAQUETADO ---
void OnRxDone( uint8_t *payload, uint16_t size, int16_t rssi, int8_t snr ) {
    if (size == sizeof(incomingData)) {
        memcpy(&incomingData, payload, size);

        unsigned long now = millis();
        uint32_t ram_libre = ESP.getFreeHeap();

        // --- CÁLCULO DE PÉRDIDA DE PAQUETES ---
        if (last_rx_time != 0) {
            unsigned long diff = now - last_rx_time;
            // Si pasaron más de 15 segundos (10s del intervalo + 5s de margen
de retardo en el aire)
            if (diff > (INTERVALO_SENSOR_MS + 5000)) {
                int paquetes_perdidos_estimados = (diff - 5000) /
INTERVALO_SENSOR_MS;
                total_paquetes_esperados += paquetes_perdidos_estimados;
            }
        }
        total_paquetes_esperados++;
        total_paquetes_recibidos++;
        last_rx_time = now;

        // Calcular porcentaje histórico
        packet_loss_actual = ((float)(total_paquetes_esperados -
total_paquetes_recibidos) / total_paquetes_esperados) * 100.0;

        // --- REPORTE SERIAL ---
        Serial.println("\n============== REPORTE DE CAMPO LORA
==============");
        Serial.printf("📡 SEÑAL    -> RSSI: %d dBm | SNR: %d dB\n", rssi,
snr);
        Serial.printf("🌐 RED      -> Pérdida: %.2f%% (%u recibidos de
%u)\n", packet_loss_actual, total_paquetes_recibidos,
total_paquetes_esperados);
        Serial.printf("🧠 HARDWARE -> RAM Libre: %u Bytes\n", ram_libre);
        Serial.printf("🌱 SUELO    -> N:%d P:%d K:%d | pH:%.2f | CE:%d\n",
incomingData.n, incomingData.p, incomingData.k, incomingData.ph,
incomingData.ec);
        Serial.println("================================================");

        // --- INYECCIÓN A LA NUBE JSON ---
        if (client.connected()) {
            StaticJsonDocument<400> doc;
```

```
            doc["lat"] = incomingData.lat;
            doc["lng"] = incomingData.lng;
            doc["hum"] = incomingData.hum;
            doc["temp"] = incomingData.temp;
            doc["ph"] = incomingData.ph;
            doc["ec"] = incomingData.ec;
            doc["n"] = incomingData.n;
            doc["p"] = incomingData.p;
            doc["k"] = incomingData.k;

            // Métricas físicas de la infraestructura
            doc["rssi"] = rssi;
            doc["snr"] = snr;
            doc["packet_loss"] = packet_loss_actual;
            doc["mem_free"] = ram_libre;
            doc["status"] = 1;

            char jsonBuffer[400];
            serializeJson(doc, jsonBuffer);
            client.publish(mqtt_topic, jsonBuffer);
        }

        // --- ACTUALIZACIÓN OLED ---
        pantalla.clear();
        pantalla.drawString(0, 0, "MQ:OK | R:" + String(rssi) + " S:" +
String(snr));

        char strBuf[60];
        if (incomingData.lat != 0.0) {
            sprintf(strBuf, "Lat: %.4f", incomingData.lat);
            pantalla.drawString(0, 12, strBuf);
        } else {
            pantalla.drawString(0, 12, "GPS: Buscando...");
        }

        sprintf(strBuf, "N:%d P:%d K:%d", incomingData.n, incomingData.p,
incomingData.k);
        pantalla.drawString(0, 24, strBuf);
        sprintf(strBuf, "pH:%.1f EC:%d", incomingData.ph, incomingData.ec);
        pantalla.drawString(0, 36, strBuf);
        sprintf(strBuf, "Pérdida Red: %.1f%%", packet_loss_actual);
        pantalla.drawString(0, 48, strBuf);
        pantalla.display();

    } else {
        Serial.printf("⚠ Trama corrupta o tamaño incorrecto: %d bytes\n",
size);
```

```
    }

    Radio.Sleep( );
    lora_idle = true;
}
```

Script usado para el análisis en Pyhton

```
import os
import json
from datetime import datetime
from fpdf import FPDF
import paho.mqtt.client as mqtt
import google.generativeai as genai
from playwright.sync_api import sync_playwright

# --- CONFIGURACION DE LA API DE GEMINI ---
# Reemplaza "TU_API_KEY_AQUI" por tu clave real de Google AI Studio
genai.configure(api_key=os.environ.get("GEMINI_API_KEY",
"AIzaSyBLRw7lWHaMyhytg63Djkg9jna1DBCZ2OU"))
model = genai.GenerativeModel('gemini-2.5-flash') # Modelo actualizado y veloz

# --- CONFIGURACION ESTRUCTURADA DE LOS 5 PANELES ---
MAPAS_CONFIG = {
    "1. Mapa de Humedad del Suelo": {
        "url": "http://localhost:3000/d-solo/adzgn5z/monitoreo-de-cultivos-de-
maiz?orgId=1&panelId=1",
        "archivo": "mapa_1_humedad.png"
    },
```

```
    "2. Mapa de Potencial de Hidrogeno (pH)": {
        "url": "http://localhost:3000/d-solo/adzgn5z/monitoreo-de-cultivos-de-
maiz?orgId=1&panelId=2",
        "archivo": "mapa_2_ph.png"
    },
    "3. Mapa de Fertilidad - Nitrogeno (N)": {
        "url": "http://localhost:3000/d-solo/adzgn5z/monitoreo-de-cultivos-de-
maiz?orgId=1&panelId=3",
        "archivo": "mapa_3_nitrogeno.png"
    },
    "4. Mapa de Fertilidad - Fosforo (P)": {
        "url": "http://localhost:3000/d-solo/adzgn5z/monitoreo-de-cultivos-de-
maiz?orgId=1&panelId=4",
        "archivo": "mapa_4_fosforo.png"
    },
    "5. Mapa de Fertilidad - Potasio (K)": {
        "url": "http://localhost:3000/d-solo/adzgn5z/monitoreo-de-cultivos-de-
maiz?orgId=1&panelId=5",
        "archivo": "mapa_5_potasio.png"
    }
}

# --- VARIABLES DE ESTADO ---
ultimos_datos = {}
ultimo_consejo = "Esperando telemetria inicial para emitir diagnostico..."

class PDF(FPDF):
    def header(self):
        self.set_font("Arial", 'B', 16)
        self.cell(0, 10, 'Reporte Tecnico de Telemetria e Inferencia
Agronomica', 0, 1, 'C')
        self.ln(5)

    def footer(self):
        self.set_y(-15)
        self.set_font("Arial", 'I', 8)
        self.cell(0, 10, f'Pagina {self.page_no()}', 0, 0, 'C')

def capturar_mapa_headless(url, nombre_archivo):
    print(f"📸 Capturando panel en Grafana: {nombre_archivo}...")
    try:
        with sync_playwright() as p:
            browser = p.chromium.launch(headless=True, args=['--disable-gpu',
'--no-sandbox'])
            page = browser.new_page(viewport={'width': 1000, 'height': 500})
            page.goto(url)
            page.wait_for_timeout(6000) # Tiempo vital para que carguen los
mapas
```

```
            page.screenshot(path=nombre_archivo)
            browser.close()
        print(f"☑ Archivo guardado: {nombre_archivo}")
        return True
    except Exception as e:
        print(f"❌ Error en Playwright: {e}")
        return False

def construir_pdf_reporte():
    global ultimos_datos, ultimo_consejo

    if not ultimos_datos:
        print("⚠ Operacion cancelada: Sin datos previos en memoria.")
        return

    print("\n============================================================")
    print("🤖 MQTT TRIGGER: Generando reporte formal con 5 mapas...")
    print("============================================================")

    for nombre_panel, info in MAPAS_CONFIG.items():
        capturar_mapa_headless(info["url"], info["archivo"])

    pdf = PDF()
    pdf.add_page()

    pdf.set_font("Arial", '', 11)
    fecha_str = datetime.now().strftime("%d/%m/%Y %H:%M:%S")
    pdf.cell(0, 8, f"Fecha de emision: {fecha_str}", 0, 1)
    pdf.cell(0, 8, f"Coordenadas del lote: Lat: {ultimos_datos.get('lat')},
Lng: {ultimos_datos.get('lng')}", 0, 1)
    pdf.ln(5)

    pdf.set_font("Arial", 'B', 13)
    pdf.cell(0, 10, "1. Metricas actuales del analisis de suelo:", 0, 1)
    pdf.set_font("Arial", '', 11)
    pdf.cell(0, 7, f"- Humedad Relativa:
{ultimos_datos.get('hum')}%  |  Temperatura Media:
{ultimos_datos.get('temp')}C", 0, 1)
    pdf.cell(0, 7, f"- Grado de acidez (pH): {ultimos_datos.get('ph')}", 0, 1)
    pdf.cell(0, 7, f"- Macronutrientes: N: {ultimos_datos.get('n')} mg/kg, P:
{ultimos_datos.get('p')} mg/kg, K: {ultimos_datos.get('k')} mg/kg", 0, 1)
    pdf.ln(5)

    pdf.set_font("Arial", 'B', 13)
    pdf.cell(0, 10, "2. Dictamen Prescriptivo de la IA (Gemini):", 0, 1)
    pdf.set_font("Arial", '', 11)
    pdf.multi_cell(0, 8, ultimo_consejo)
    pdf.ln(10)
```

```
    pdf.set_font("Arial", 'B', 13)
    pdf.cell(0, 10, "3. Anexos Cartograficos del Terreno:", 0, 1)
    pdf.ln(3)

    for nombre_panel, info in MAPAS_CONFIG.items():
        archivo_img = info["archivo"]
        if os.path.exists(archivo_img):
            pdf.set_font("Arial", 'B', 11)
            pdf.cell(0, 8, nombre_panel, 0, 1)
            pdf.ln(2)
            pdf.image(archivo_img, x=15, w=170)
            pdf.ln(12)

    timestamp = datetime.now().strftime("%Y%m%d_%H%M%S")
    nombre_final = f"Reporte_Suelo_Completo_{timestamp}.pdf"
    pdf.output(nombre_final)
    print("============================================================")
    print(f"☑ DOCUMENTO COMPLETADO: {nombre_final}")
    print("============================================================\n")

def procesar_diagnostico_ia(nuevos_datos):
    global ultimo_consejo
    print("🤔 Evaluando parametros edafoclimaticos locales. Consultando a
Gemini...")

    prompt = f"""
    Estás evaluando un cultivo de maíz de altura (aprox. 2200 msnm, clima
andino, suelo de origen volcánico).
    Acabas de recibir esta telemetría del lote (Lat {nuevos_datos['lat']}, Lng
{nuevos_datos['lng']}):

    - Humedad volumétrica: {nuevos_datos['hum']}%
    - Temperatura del suelo: {nuevos_datos['temp']} °C
    - Nivel de pH: {nuevos_datos['ph']}
    - Nitrógeno (N) disponible: {nuevos_datos['n']} mg/kg
    - Fósforo (P) asimilable: {nuevos_datos['p']} mg/kg
    - Potasio (K) de intercambio: {nuevos_datos['k']} mg/kg

    Instrucciones estrictas:
    1. Sé extremadamente directo (máximo 2 líneas de texto).
    2. No des NINGUNA explicación teórica.
    3. Inicia tu respuesta indicando si el estado general es "Adecuado" o
"Ineficiente" para el maíz.
    4. Indica qué parámetro está fallando y dicta la acción correctiva
inmediata.
    Ejemplo de salida esperada: "Ineficiente. Humedad baja y deficiencia de
Nitrógeno. Iniciar fertirrigación con urea inmediatamente."
```

```
    5. No uses asteriscos, ni viñetas, ni texto en negrita.
    """

    try:
        respuesta = model.generate_content(prompt)
        ultimo_consejo = respuesta.text.strip()
        print(f"☑ Dictamen agronomico listo:\n{ultimo_consejo}")

        trama_salida = {"consejo": ultimo_consejo}
        client.publish("agricultura/sensor1/consejo",
json.dumps(trama_salida))
        print("📤 Publicado en Grafana con exito.")

    except Exception as e:
        print(f"⚠ Error de conexion con Gemini: {e}")

def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    if rc == 0:
        print("🚀 Servicio Python de Control de Datos e IA en linea.")
        client.subscribe("agricultura/sensor1")
        client.subscribe("agricultura/generar_reporte")
    else:
        print(f"❌ Error en la conexion al broker. Codigo: {rc}")

def on_message(client, userdata, msg):
    global ultimos_datos

    if msg.topic == "agricultura/sensor1":
        try:
            datos_entrantes = json.loads(msg.payload.decode())

            # FILTRO: Solo procesa si los valores de nutrientes o humedad
cambian
            if (datos_entrantes.get('hum') != ultimos_datos.get('hum') or
                datos_entrantes.get('ph') != ultimos_datos.get('ph') or
                datos_entrantes.get('n') != ultimos_datos.get('n') or
                datos_entrantes.get('p') != ultimos_datos.get('p') or
                datos_entrantes.get('k') != ultimos_datos.get('k')):

                ultimos_datos = datos_entrantes
                procesar_diagnostico_ia(datos_entrantes)
            else:
                pass # Datos idénticos, ahorrando recursos

        except Exception as e:
            print(f"⚠ Error en JSON: {e}")

    elif msg.topic == "agricultura/generar_reporte":
```

```
        construir_pdf_reporte()

client = mqtt.Client()
client.on_connect = on_connect
client.on_message = on_message

client.connect("localhost", 1883, 60)
client.loop_forever()
```

Código Fuente del Docker donde se instalaron todas las dependencias

```
services:
  mosquitto:
    image: eclipse-mosquitto
    ports:
      - "1883:1883"
      - "9001:9001"
    volumes:
      - ./mosquitto/config:/mosquitto/config
      - ./mosquitto/data:/mosquitto/data
      - ./mosquitto/log:/mosquitto/log

  influxdb:
    image: influxdb:1.8
    ports:
      - "8086:8086"
    environment:
      - INFLUXDB_DB=agricultura

  telegraf:
    image: telegraf
    volumes:
      - ./telegraf.conf:/etc/telegraf/telegraf.conf:ro
```

```
    depends_on:
      - influxdb
      - mosquitto

  grafana:
    image: grafana/grafana
    ports:
      - "3000:3000"
    environment:
      - GF_RENDERING_SERVER_URL=http://renderer:8081/render
      - GF_RENDERING_CALLBACK_URL=http://grafana:3000
      - GF_LOG_FILTERS=rendering:debug
      - GF_RENDERING_RENDERER_TOKEN=secret
      - GF_AUTH_ANONYMOUS_ENABLED=true
      - GF_AUTH_ANONYMOUS_ORG_ROLE=Viewer
      - GF_RENDERING_RENDER_TIMEOUT=60s

    depends_on:
      - influxdb
    volumes:
      - grafana-storage:/var/lib/grafana

  renderer:
    image: grafana/grafana-image-renderer:latest
    security_opt:
      - seccomp:unconfined
    ports:
      - "8081"
    environment:
      - ENABLE_METRICS=true
      - RENDERING_TOKEN=secret

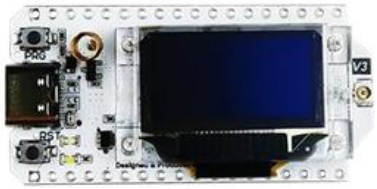
volumes:
  grafana-storage:
```

Anexo 5. Hoja de datos de la placa y sensores



WiFi LoRa 32 V3.2

LoRa Node Development Kit



https://heltec.org



1. Description

1.1 Overview

WiFi LoRa 32 is a classic IoT dev-board designed & produced by Heltec Automation. It features rich pins and a 0.96-inch OLED display.Since its launch in 2017, it has been loved by developers and makers. Thanks to the three communication methods of Wi-Fi, Bluetooth, and LoRa provided by the esp32 + SX1262, the device has been widely used in the fields of Internet of Things development and long-distance communication.

WiFi LoRa 32 are available in two product variants:

Table 1.1: Product model list

No.	Model	Description
1	LF	470~510MHz working LoRa frequency, used for China mainland (CN470) LPW band.
2	HF	For EU868, IN865, US915, AU915, AS923, KR920 and other LPW networks with operating frequencies between 863~928MHz.

1.2 Difference between V3 and V2

	WiFi LoRa 32 (V2)	WiFi LoRa 32 (V3)
MCU	ESP32-D0	ESP32-S3
LoRa Chip	SX1276	SX1262
USB Socket	Micro USB	Type C
Crystal Oscillator	Ordinary crystal oscillator	High precision temperature



		compensated crystal oscillator
Low Power	800uA	<10uA
Other		Better impedance matching of RF circuits.

1.3 Product features

- Microprocessor: ESP32-S3FN8 (Xtensa® 32-bit LX7 dual core processor, five stage pipeline rack Structure, main frequency up to 240 MHz).
- SX1262 LoRa node chip.
- Type-C USB interface with a complete voltage regulator, ESD protection, short circuit protection, RF shielding, and other protection measures.
- Onboard SH1.25-2 battery interface, integrated lithium battery management system (charge and discharge management, overcharge protection, battery power detection, USB / battery power automatic switching).
- Integrated WiFi, LoRa, Bluetooth three network connections, onboard Wi-Fi, Bluetooth dedicated 2.4GHz metal spring antenna, reserved IPEX (U.FL) interface for LoRa use.
- Onboard 0.96-inch 128*64 dot matrix OLED display, which can be used to display debugging information, battery power, and other information.
- Integrated CP2102 USB to serial port chip, convenient for program downloading, debugging information printing.
- Support the Arduino development environment.
- We provide ESP32 + LoRaWAN protocol Arduino® library, this is a standard

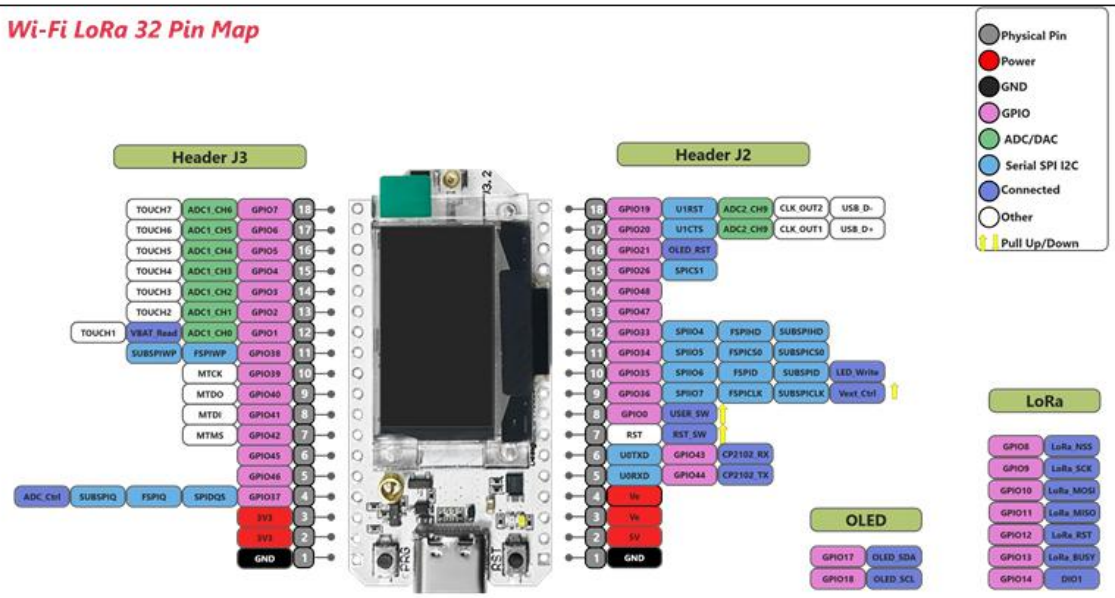


LoRaWAN protocol that can communicate with any LoRa gateway running the LoRaWAN protocol. In order to make this code running, a unique license is needed. It can be found on this page;

- With good RF circuit design and low-power design.

2. Pin Definition

2.1 Pin assignment



2.2 Pin description

- **Header J2**



Table 2.2-1: Pin description

No.	Name	Type	Function
1	GND	P	Ground.
2	5V	P	5V Power Supply.
3	Ve	P	Output 3.3V, power supply for external sensor.
4	Ve	P	Output 3.3V, power supply for external sensor.
5	RX	I/O	GPIO44, U0RXD, connected to CP2102 TXD
6	TX	I/O	GPIO43, U0RXD, connected to CP2102 RXD
7	RST	I	CHIP_PU, connected to RST switch
8	0	I/O	GPIO0, connect to PRG switch
9	36	I/O	GPIO36, SPIIO7, FSPICLK, SUBSPICLK, Vext Ctrl
10	35	I/O	GPIO35, SPIIO6, FSPID, SUBSPID, LED Write Ctrl
11	34	I/O	GPIO34, SPIIO5, FSPICS0, SUBSPICS0.
12	33	I/O	GPIO33, SPIIO4, FSPIHD, SUBSPIHD.
13	47	I/O	GPIO47, SPICLK_P_DIFF, SUBSPICLK_P_DIFF.
14	48	I/O	GPIO48, SPICLK_N_DIFF, SUBSPICLK_N_DIFF.
15	26	I/O	GPIO26, SPICS1.
16	21	I/O	GPIO21, OLED RST
17	20	I/O	GPIO20, U1CTS, ADC2_CH9, CLK_OUT1, USB_D+[2].
18	19	I/O	GPIO19, U1RTS, ADC2_CH8, CLK_OUT2, USB_D-[3].

Header J3

[2] DP pin connectable to USB socket, solder R29

[3] DN pin connectable to USB socket, solder R3



3. Specifications

3.1 General specifications

Table 3.1: General specifications

Parameters	Description
Master Chip	ESP32-S3FN8 (Xtensa®32-bit lx7 dual core processor)
LoRa Chipset	SX1262
USB to Serial Chip	CP2102
Frequency	470~510 MHz, 863~928 MHz
Max. TX Power	21 ± 1 dBm
Max. Receiving sensitivity	-137 dBm
Wi-Fi	802.11 b/g/n, up to 150Mbps
Bluetooth	Bluetooth LE: Bluetooth 5, Bluetooth mesh
Hardware Resource	7*ADC1 + 2*ADC2; 7*Touch; 3*UART; 2*I2C; 2*SPI; etc.
Memory	384KB ROM; 512KB SRAM; 16KB RTC SRAM; 8MB SiP Flash
Interface	Type-C USB; 2*1.25 lithium battery interface; LoRa ANT(IPEX1.0); 2*18*2.54 Header Pin
Battery	3.7V lithium battery power supply and charging
Operating temperature	-20 ~ 70 ℃
Dimensions	50.2 * 25.5* 10.2 mm



3.2 Power supply

Except when USB or 5V Pin is connected separately, lithium battery can be connected to charge it. In other cases, only a single power supply can be connected.

Table 3.2: Power supply

Power supply mode	Minimum	Typical	Maximum	Company
Type-C USB(≥500mA)	4.7	5	6	V
Lithium battery(≥250mA)	3.3	3.7	4.2	V
5V pin(≥500mA)	4.7	5	6	V
3V3 pin(≥150mA)	2.7	3.3	3.5	V

3.3 Power output

Table 3.3: Power output

Output Pin	Minimum	Typical	Maximum	Company
3.3V Pin			500	mA
5V Pin (USB Powered only)			500	mA
Vext Pin			350	mA

3.4 Power characteristics

Table 3.4: Power characteristics

Mode	Condition	Min.	Typical	Max.	Company
WiFi Scan	USB powered		115		mA
WiFi AP	USB powered		150		mA
BT	USB powered		115		mA



TX	14dBm, USB powered, 868		200		mA
	17dBm, USB powered, 868		210		mA
	22dBm, USB powered, 868		230		mA
RX	TX disabled; RX enabled		90		mA
sleep	USB powered		2		mA
	VBAT/battery powered		15		uA
	3.3V header powered		10		uA

3.5 LoRa RF characteristics

3.5.1 Transmit power

Table3.5.1: Transmit power

Operating frequency band	Maximum power value/[dBm]
470~510	21 ± 1
867~870	21 ± 1
902~928	21 ± 1

3.5.2 Receiving sensitivity

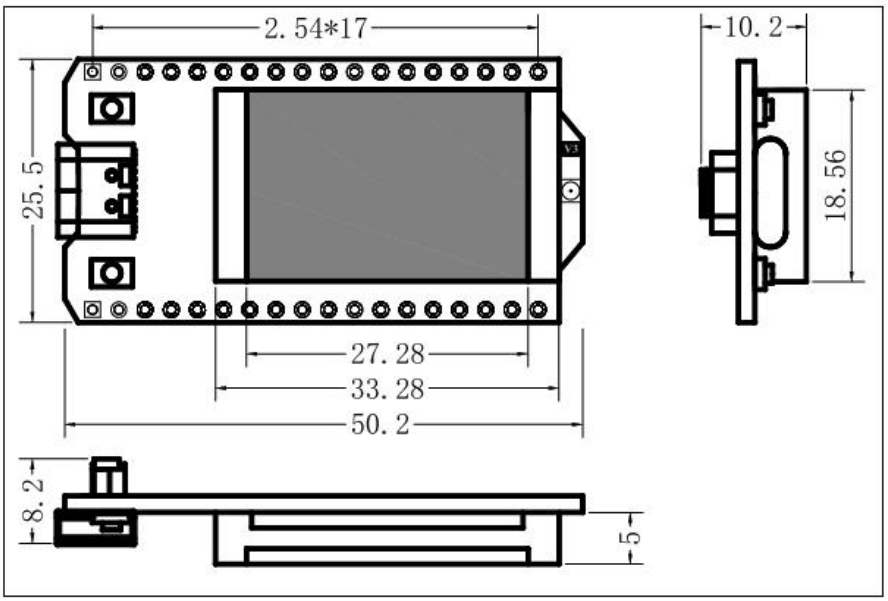
The following table gives typically sensitivity level of the HTIT-WB32LA.

Table3.5.2: Receiving sensitivity

Signal Bandwidth/[KHz]	Spreading Factor	Sensitivity/[dBm]



4. Physical dimensions



5. Resource

5.1 Relevant Resource

- Source Code
  - Heltec ESP (ESP32 & ESP8266) framework
  - Heltec ESP32 library
- Schematic diagram
  - V3
  - V3.2
- Pin map
- Downloadable resource

Hoja de datos del sensor NPK

SLICETEX ELECTRONICS

SOIL-MB-NPKPHCTH-S
Hoja de Datos

SOIL-MB-NPKPHCTH-S

Sensor de suelo con lectura de Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), pH, Conductividad (EC), Temperatura y Humedad con conexión RS-485 por ModBus RTU

Hoja de Datos

Autor: Ing. Boris Estudiez



1. Descripción General

El sensor SOIL-MB-NPKPHCTH-S permite medir niveles de Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), pH, Conductividad (EC), Temperatura y Humedad del suelo utilizando la interfaz de comunicación RS-485 mediante el protocolo ModBus RTU. Ideal para conectar a un PLC, HMI o sistema de monitoreo con soporte para dicha interfaz de comunicación. Como la transmisión de los valores se hace en formato digital sobre un bus de datos RS-485, puede colocar varios sensores en red, incluso a distancias de hasta 800 metros sin degradación de la señal de lectura.

© 2025 Slicetex Electronics

2. Características de Hardware Principales

- Rango de Alimentación: 5 a 30 VDC
- Consumo máximo: 0.5 Watt.
- Interfaz de comunicación: RS-485, half-duplex.
- Protocolo: ModBus RTU, sensor es esclavo.
- Velocidad máxima de comunicación: 9600 bps (por defecto 4800, 8N1).
- Longitud cable fábrica: 2 m
- Distancia máxima posible de cableado: 800 m
- Protección IP68 (resistente totalmente al agua)
- Resistente a la electrolisis, corrosión y puede ser enterrado.
- Encapsulado a vacío.
- Dimensiones: 45x15x130 mm (ver detalles en **Figura 1**)
- Ejemplos disponibles para PLC de marca Slicetex Electronics.
- Compatible con la mayoría de PLC, HMI y sistemas con soporte ModBus RTU por RS-485.
- Origen del producto: China

Tabla 1: Parámetros de medición de suelo

Parámetro	Rango	Exactitud	Estabilidad a Largo Plazo	Tiempo de Repuesta
Temperatura	-40 a 80 [°C]	± 5 °C (a 25 °C)	≤ 0.1 °C / año	≤ 15 s
Humedad	0 a 100 [% RH]	±2% (dentro 0-50%) ±3% (dentro 50-100%)	≤ 1% RH / año	≤ 4 s
Conductividad (EC)	0 a 20000 [µS / cm] µS = micro Siemens	±3% (dentro 0-10000 µS/cm) ±5% (dentro 0-20000 µS/cm)	≤ 1% [µS/cm] / año	≤ 1 s
pH	3 a 9	±0.3 pH	≤ 5% / año	≤ 10 s
Nitrógeno (N) Fósforo (P) Potasio (K)	1 a 1999 [mg/kg] (mg/L)	1 [mg/kg] (mg/L)	-	≤ 1 s

Notas:

1. El tiempo de repuesta es el necesario para una medición estable, pero puede consultar al sensor en tiempos menores por ModBus.
2. La medición NPK adopta un método de detección rápida basado en la conductividad del suelo (EC), por lo tanto, usar con precaución ya que no está exento de ciertos errores. Para reducir los errores, el sensor admite la escritura de factores de corrección NPK, que pueden ser llenados con información de calibración usando instrumentos NPK (como patrón) o reactivos propios para su suelo. Esto mejorará la exactitud de medición y tendencias.
3. La medición NPK no se puede realizar en agua.

2.1 Aplicaciones

- Lectura de parámetros de suelo en tiempo real para agricultura inteligente.
- Determinar fertilidad y nutrientes del suelo para una evaluación de la condición del suelo.
- Lectura del sensor a distancia (800 metros) sin degradación de señal en cableados largos.
- Expansión de sensores en equipos con puertos RS-485.
- Irrigación, ahorro de agua en campos, invernaderos con hortalizas.
- Cultivos de plantas.
- Hidropónia.
- Flores, jardinería.
- Mediciones científicas.

2.2 Modelos Disponibles

Tabla 2: Modelos Disponibles para Ordenar

Modelo Numero de Parte (P/N)	Descripción
SOIL-MB-NPKPHCTH-S	Nitrógeno, Fósforo, Potasio, pH, Conductividad (EC), Temperatura y Humedad. RS485.

2.3 Requerimientos

Para utilizar este sensor requiere un PLC o dispositivo con soporte RS-485 y protocolo ModBus RTU (Maestro).

Para los PLC de Slicetex Electronics, además debe actualizar el PLC al último firmware disponible y actualizar el entorno de programación **StxLadder** a la última versión. De lo contrario los ejemplos provistos pueden no funcionar correctamente.

2.4 ¿Para qué sirve la medición NPK?

Las letras NPK identifican los tres nutrientes esenciales que las plantas requieren para crecer, prosperar y estar saludables: Nitrógeno (N), Potasio (P) y Fósforo (K).

Tabla 3: Nutrientes NPK y su descripción

Nutriente	Descripción
Nitrógeno (N)	El nitrógeno es responsable del crecimiento y el verdor de las hojas de las plantas.
Potasio (P)	El fósforo ayuda a la planta a desarrollar raíces, frutos y flores fuertes.
Fósforo (K)	El potasio mejora la salud general y la resistencia de una planta.

Si el suelo no tiene suficientes nutrientes, las plantas no crecerán en todo su potencial. Por lo tanto, es esencial medir los niveles actuales de N, P y K del suelo para determinar cuánto contenido adicional de nutrientes se debe agregar para aumentar la fertilidad de los cultivos.

2.8 Dimensiones Mecánicas



Figura 1: Dimensiones mecánicas en [mm].



Figura 2: Foto del sensor

3. Conexionado

3.1 Cableado y Terminales

Tabla 4: Descripción del cableado

Color	Tipo	Nombre	Descripción
Marrón	E	Power+	Entrada de tensión CC (corriente continua) para alimentación, terminal positivo. Rango 5 a 30 VCC.
Negro	E	GND	Retorno, tierra o masa de alimentación. Terminal negativo. También utilizado para masa de comunicación.
Amarillo (o verde)	E/S	D+	Terminal D+ (no inversor) para conexión en bus RS-485. Datos.
Azul	E/S	D-	Terminal D- (inversor) para conexión en bus RS-485. Datos.



Figura 3: Terminación típica de los cables individuales del cable del sensor.

Anexo 6. Fotografías de las pruebas realizadas

Zona de pruebas, terreno ubicado en la comunidad San Andres El Puente



Ejecución de pruebas del dron en el terreno



Muestra de toma de datos por parte del Nodo Sensor en campo



Muestra de la recepción de datos en campo por medio del nodo Coordinador



Prueba de vuelo del Drone en el campo de pruebas con el payload del nodo sensor integrado.



Prueba de aterrizaje del Drone en el cultivo para la captura de datos.



Visualización del plan de vuelo del drone mediante la aplicación DJI GO



Visualización de los datos en el dashboard de Grafana tomados en campo por medio del drone y transmitidos hacia el nodo coordinador.

