



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

**FACSISTEL
INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**Implementación y evaluación de telemetría en un sistema de
IoT agrícola para monitoreo in situ de macronutrientes N, P
y K.**

Hellen Dahana Sánchez Castro

Dirigido por:
Ing. Andrade Caicho Carlos Efraín, M.Sc.

LA LIBERTAD – 2026



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ing. Ronald Rovira Jurado, Ph. D.
DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Carlos Andrade Caicho, M.Sc.
TUTOR

Ing. Edison Coral Salinas, Mgtr.
DOCENTE ESPECIALISTA

Ing. Luis Amaya Fariño, Mgtr.
DOCENTE GUÍA UIC

Ing. Corina Gonzabay De La A, Mgtr.
SECRETARIA



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por **Sánchez Castro Hellen Dahana**, como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero en telecomunicaciones.

La Libertad, a los 03 días del mes de agosto del año 2026

TUTOR

Ing. Carlos Andrade Caicho, M.Sc.



UPSE
UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA

FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
AUTORIZACIÓN

Yo, Sánchez Castro Hellen Dahana

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de artículo profesional de alto nivel con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este artículo académico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

Santa Elena, a los 03 días del mes de agosto del año 2026

EL AUTOR

Sánchez Castro Hellen Dahana



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Sánchez Castro Hellen Dahana**

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, **Implementación y evaluación de telemetría en un sistema de IoT agrícola para monitoreo in situ de macronutrientes N, P y K** de un previo a la obtención del título en Ingeniero en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los 03 días del mes de agosto del año 2026

EL AUTOR

Sánchez Castro Hellen Dahana



UPSE
UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado **Implementación y evaluación de telemetría en un sistema de IoT agrícola para monitoreo in situ de macronutrientes N, P y K**, presentado por el estudiante, **Sánchez Castro Hellen Dahana** fue enviado al Sistema Antiplagio, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 05%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



Certificado de análisis
Compilado Magister* | UPSE-ECU

INTEGRACION CURRICULAR HELLEN SANCHEZ CASTRO

ID : 22752e7483067080d9e01d1205473e7748d338a5

Nombre del fichero : INTEGRACION CURRICULAR HELLEN SANCHEZ CASTRO.pdf
Tamaño del archivo original : 1.36 MB
Número de palabras : 37.106

Depositante : ROSA RUIZ LUIS MIGUEL
Fecha de depósito : 21 de agosto de 2023
Tipo de carga : anterior
Fecha de fin de análisis : 21 de agosto de 2023



5%

Textos sospechosos

TUTOR

Ing. Carlos Andrade Caicho, M.Sc.

AGRADECIMIENTO

Con infinita gratitud, agradezco a Dios por haber sido mi guía en cada uno de mis pasos y por concederme la fortaleza y sabiduría necesarias para alcanzar uno de los sueños más importantes de mi vida.

A mi madre, Priscila Castro, le agradezco por su amor incondicional, por cada sacrificio realizado y por convertirse en la inspiración en mi vida. Gracias por sostenerme con tus palabras, por creer en mí incluso cuando yo dudaba y por jamás soltar mi mano.

A mi padre, Christian Sánchez, gracias por el cariño y el apoyo. A mi padre de corazón, René Freire, y a toda mi familia, gracias por acompañarme en este recorrido, por alentarme. Cada palabra de apoyo me impulsó a continuar luchando por mis sueños.

A mi hermana, Dumanny, gracias por ser mi fortaleza y por inspirarme cada día a crecer.

A mi novio, Christian González Zambrano, gracias por tu amor, tu paciencia y tu compañía. Gracias por permanecer a mi lado en cada obstáculo, por darme fuerzas cuando el cansancio parecía vencerme y por recordarme, una y otra vez, que todo esfuerzo trae consigo una recompensa.

A los esposos Kleber González y Anita Zambrano, a la familia De la A, gracias por abrirme las puertas de su hogar y de su corazón, por brindarme apoyo y cariño.

A la señora Pascualina, Anita y Helen, gracias por su cariño, cada gesto de afecto y cada palabra de aliento ocuparán siempre un lugar especial en mi corazón.

A mis docentes, gracias por compartir sus conocimientos, experiencia y vocación de enseñanza. Su paciencia y dedicación

contribuyeron significativamente a mi formación académica y profesional.

A mis amigos de la universidad, gracias por las experiencias compartidas, por las risas, el apoyo mutuo y los recuerdos que permanecerán por siempre en mi memoria.

A la Universidad Estatal Península de Santa Elena, mi sincero agradecimiento por abrirme las puertas y permitirme crecer tanto en el ámbito profesional como en el personal.

Y, a mi querido Thiaguito, gracias por acompañarme durante tantas noches de desvelo y por llenar mis días de amor y alegría. Hoy cierro un capítulo importante, pero también abro las puertas a nuevos sueños y desafíos, llevando conmigo gratitud y cariño de quienes caminaron a mi lado. Este logro es el reflejo del amor, el esfuerzo, la constancia y la confianza que cada uno depositó en mí.

Hellen Dahana Sánchez Castro

DEDICATORIA

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, por escuchar cada una de mis oraciones, por sostenerme en los momentos de debilidad y recordarme que, incluso en medio de la incertidumbre, siempre existe un propósito.

A mi madre, Priscila Castro, por ser la mujer que me enseñó el verdadero significado de la fortaleza, la perseverancia y el amor incondicional. Gracias por ser mi refugio, mi apoyo y mi mayor ejemplo de vida. Gracias por sostenerme cuando el miedo intentaba vencerme. Este logro es tan tuyo como mío, mamá.

A mi papi René Freire, quien siempre ha confiado en mis capacidades.

A mi mamita Cecy, por cuidarme con sus oraciones, por sus palabras de motivación y por brindarme su amor en cada etapa de este recorrido.

A mi hermana, Dumanny, para que este sea un ejemplo de que no existen límites cuando se lucha con el corazón. Deseo que algún día alcances tus sueños y superes cada una de las metas que la vida ponga en tu camino. Espero que siempre te sientas orgullosa de mí, así como yo me siento profundamente orgullosa de ti.

A mi novio, Christian González Zambrano, gracias por tu amor y tu apoyo incondicional. Gracias por permanecer a mi lado en los momentos más difíciles, por sostener mi mano cuando sentía que las fuerzas se agotaban y por ayudarme a seguir adelante cuando más lo necesitaba. Gracias por celebrar conmigo cada pequeño avance en este largo camino.

A los esposos Kleber y Ana, por el apoyo, consideración y respaldo que brindaron a lo largo de este proceso.

A toda mi familia, gracias por su amor, su confianza y por acompañarme durante esta etapa tan importante de mi vida. Cada uno de ustedes ocupa un lugar especial en mi corazón.

Y, de una manera muy especial a la memoria de mi tío, Jair Castro. Aunque tu presencia física ya no esté entre nosotros, tu recuerdo permanece vivo en nuestros corazones. Estoy segura de que te sentirías orgulloso de este logro. Te extraño profundamente y siempre vivirás en mí.

Finalmente, me dedico este triunfo, porque aprendí a ser fuerte incluso cuando pensaba que ya no podía más. Hoy entiendo que cada sacrificio valió la pena y que cada obstáculo me ayudó a convertirme en la persona que soy hoy.

Hellen Dahana Sánchez Castro

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo implementar y evaluar un sistema de telemetría basado en internet de las cosas (IoT) para el monitoreo *in situ* de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en un entorno agrícola de la provincia de Santa Elena. El sistema integró un sensor NPK industrial, una placa TTGO T-SIM7000G con ESP32, comunicación celular mediante LTE-M/NB-IoT según disponibilidad de red, georreferenciación mediante GNSS y transmisión de datos mediante MQTT hacia la plataforma Blynk IoT.

La validación experimental se desarrolló en la sucursal UPSE Manglaralto mediante mediciones georreferenciadas, el análisis de parámetros de calidad de servicio (QoS) y la evaluación de la autonomía energética del nodo sensor mediante un sistema fotovoltaico.

Los resultados evidenciaron la viabilidad funcional del sistema para el monitoreo remoto y periódico de N, P y K. La comparación con el análisis de laboratorio mostró menores diferencias para el nitrógeno y el fósforo, mientras que el potasio presentó una diferencia mayor. Asimismo, el enlace inalámbrico mantuvo condiciones funcionales para transmitir la telemetría agrícola.

Palabras clave: Internet de las cosas (IoT), telemetría, sensor NPK, ESP32, LTE-M, NB-IoT, MQTT, calidad de servicio (QoS).

ABSTRACT

This study aimed to implement and evaluate an Internet of Things (IoT)-based telemetry system for the *in-situ* monitoring of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) in an agricultural environment in the province of Santa Elena. The system integrated an industrial NPK sensor, a TTGO T-SIM7000G board with an ESP32 microcontroller, LTE-M/NB-IoT cellular communication, GNSS-based georeferencing, and MQTT data transmission to the Blynk IoT platform.

Experimental validation was conducted at the UPSE Manglaralto campus through georeferenced measurements, quality of service (QoS) parameter analysis, and an evaluation of the sensor node's energy autonomy using a photovoltaic system.

The results demonstrated the system's functional feasibility for the remote and periodic monitoring of N, P, and K. Comparison with the laboratory analysis showed smaller differences for nitrogen and phosphorus, whereas potassium exhibited a larger difference. Furthermore, the wireless link maintained functional conditions for agricultural telemetry transmission.

Keywords: Internet of Things (IoT), telemetry, NPK sensor, ESP32, LTE-M, NB-IoT, MQTT, quality of service (QoS).

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

ADC: Analog-to-Digital Converter – Convertidor analógico-digital.

DC: Direct Current – Corriente continua.

DC-DC: Direct Current to Direct Current Converter – Convertidor de corriente continua a corriente continua.

ESP32: Microcontrolador de 32 bits de la familia ESP32.

GNSS: Global Navigation Satellite System – Sistema Global de Navegación por Satélite.

GPS: Global Positioning System – Sistema de Posicionamiento Global.

IDW: Inverse Distance Weighting – Ponderación por distancia inversa.

IoT: Internet of Things – Internet de las Cosas.

LTE-M: Long Term Evolution for Machines – LTE para comunicaciones de máquinas.

LPWAN: Low-Power Wide-Area Network – Red de área amplia y bajo consumo.

MQTT: Message Queuing Telemetry Transport – Protocolo ligero de mensajería para telemetría.

NB-IoT: Narrowband Internet of Things – Internet de las Cosas de banda estrecha.

NPK: Nitrógeno, fósforo y potasio.

PDR: Packet Delivery Ratio – Tasa de entrega de paquetes.

QoS: Quality of Service – Calidad de servicio.

RS485: Recommended Standard 485 – Estándar de comunicación serial diferencial.

RSSI: Received Signal Strength Indicator – Indicador de intensidad de señal recibida.

RTU: Remote Terminal Unit – Unidad terminal remota.

SIM: Subscriber Identity Module – Módulo de identidad del suscriptor.

UART: Universal Asynchronous Receiver-Transmitter – Transmisor-receptor asíncrono universal.

ÍNDICE GENERAL

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	2
DECLARACIÓN DE DOCENTE TUTOR.....	3
DECLARACIÓN AUTORÍA DEL ESTUDIANTE	4
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	5
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO.....	6
AGRADECIMIENTO	7
DEDICATORIA	9
RESUMEN	11
ABSTRACT.....	12
GLOSARIO DE ABREVIATURAS	13
ÍNDICE GENERAL	15
ÍNDICE DE FIGURAS.....	20
ÍNDICE DE TABLAS	22
ÍNDICE DE ANEXOS	24
INTRODUCCIÓN	25
CAPÍTULO I: MARCO CONTEXTUAL DE LA INVESTIGACIÓN	28
1.1. Antecedentes	28
1.2. Descripción del Proyecto	29
1.3. Objetivos	30
1.3.1. Objetivo general.....	30
1.3.2. Objetivos específicos	30
1.4. Justificación	31
1.5. Alcance del Proyecto	32
1.6. Metodología de la investigación	33

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y TECNOLÓGICO.....	35
2.1. Marco conceptual.....	35
2.1.1. Arquitectura jerárquica del internet de las cosas (IoT).....	35
2.1.1.1. Capa de percepción	35
2.1.1.2. Capa de borde (Edge Computing).....	36
2.1.1.3. Capa de red	38
2.1.1.4. Capa de aplicación	40
2.2. Calidad de Servicio (QoS) en redes IoT	41
2.2.1. Definición de QoS en sistemas IoT	41
2.2.2. Parámetros de evaluación de QoS.....	41
2.2.3. Factores que afectan la QoS en entornos Rurales.....	44
2.2.4. Modelo de evaluación propuesto	45
CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA PROPUESTA TÉCNICA	47
3.1. Arquitectura propuesta del sistema de telemetría IoT	47
3.1.1. Escenario de implementación	48
3.1.2. Análisis de cobertura celular del área de estudio.....	49
3.1.3. Flujo de adquisición, procesamiento y transmisión de datos.....	51
3.2. Especificaciones técnicas del hardware	52
3.2.1. Unidad de procesamiento y comunicación TTGO T-SIM7000G.....	52
3.2.2. Arquitectura del microcontrolador ESP32.....	53
3.2.3. Módulo de comunicación celular SIM7000G.....	54
3.2.4. Sistema de georreferenciación GNSS.....	55
3.2.5. Asignación de GPIO e interfaces de comunicación.....	56
3.3. Sensor NPK industrial.....	57
3.3.1. Especificaciones técnicas del sensor NPK.....	58

3.3.2.	Comunicación mediante la interfaz RS485 y el protocolo Modbus RTU	59
3.3.3.	Robustez mecánica y grado de certificación IP68	60
3.3.4.	Parámetros de medición y resolución técnica	60
3.4.	Interfaz de adaptación de señales: transceptor MAX485	61
3.4.1.	Conversión de niveles lógicos	61
3.4.2.	Gestión de comunicación semidúplex	63
3.4.3.	Inmunidad al ruido en entornos agrícolas	63
3.5.	Sistema de alimentación y gestión energética	63
3.5.1.	Sistema fotovoltaico.....	64
3.5.2.	Controlador solar PWM.....	65
3.5.3.	Sistema de almacenamiento energético	66
3.5.4.	Convertidor DC-DC LM2596.....	67
3.5.5.	Sistema de protección eléctrica.....	68
3.5.6.	Autonomía energética del nodo IoT	69
3.6.	Arquitectura del firmware.....	70
3.6.1.	Pseudocódigo del nodo sensor.....	70
3.6.2.	Etapas de funcionamiento del firmware	71
3.6.3.	Verificación funcional del firmware.....	72
3.6.4.	Gestión de adquisición y transmisión de datos	73
3.7.	Integración e implementación del sistema de telemetría IoT	74
3.7.1.	Diseño y simulación de la PCB	75
3.7.2.	Fabricación y ensamblaje del nodo IoT	76
3.7.3.	Algoritmo de funcionamiento	77
3.7.4.	Etapas del proceso de implementación	78
3.7.5.	Arquitectura jerárquica y flujo de protocolos	79

3.8.	Validación preliminar del nodo sensor	80
3.8.1.	Selección del punto MAS06 como referencia experimental.....	81
3.8.2.	Recolección de muestras de suelo.....	83
3.8.3.	Evaluación comparativa del sensor NPK mediante análisis de laboratorio.....	84
3.9.	Entorno de desarrollo e implementación del firmware.....	86
3.9.1.	Entorno de desarrollo	86
3.9.2.	Librerías empleadas en el firmware	87
3.9.3.	Relación entre el firmware y la arquitectura del sistema	92
3.10.	Sistema GNSS y protocolo de información	93
3.10.1.	Protocolo de información GNSS	93
3.11.	Modelo tridimensional del prototipo	95
3.11.1.	Interpretación del prototipo.....	96
CAPÍTULO IV: VALIDACIÓN EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA DE TELEMETRÍA IoT		97
4.1.	Escenario de validación del sistema IoT.....	97
4.2.	Validación del subsistema de adquisición de datos	101
4.2.1.	Evaluación comparativa del sensor NPK mediante análisis de laboratorio.....	102
4.2.1.1.	Homologación de las unidades de nitrógeno y fósforo.....	103
4.2.1.2.	Comparación entre el sensor NPK y el análisis de laboratorio.....	108
4.2.2.	Validación de comunicación RS485/Modbus RTU.....	111
4.2.3.	Lecturas preliminares del sensor NPK.....	112
4.2.4.	Consideraciones de equivalencia entre análisis químico y medición electrónica.....	115
4.3.	Consolidación y estructuración de los datos de telemetría del nodo IoT	116
4.3.1.	Modelo de datos de telemetría	117
4.3.2.	Distribución espacial de puntos de medición.....	120

4.4. Análisis espacial de macronutrientes mediante interpolación	122
4.4.1. Distribución espacial del nitrógeno	123
4.4.2. Distribución espacial del fósforo	127
4.4.3. Distribución espacial del potasio	130
4.5. Evaluación del desempeño del enlace inalámbrico	133
4.5.1. Análisis del indicador RSSI	135
4.5.2. Evaluación de confiabilidad mediante PDR	140
4.5.3. Análisis de latencia MQTT	143
4.5.4. Análisis comparativo de parámetros QoS	145
4.6. Relación espacial entre los parámetros de red y la ubicación geográfica	148
4.7. Evaluación energética del nodo sensor	153
4.7.1. Consideraciones del consumo energético del sistema	153
4.7.2. Modelo energético del ciclo de operación	154
4.7.3. Cálculo de la corriente promedio del nodo	155
4.7.4. Evaluación de autonomía energética	156
4.7.5. Aporte del sistema fotovoltaico	157
4.8. Integración funcional de la arquitectura IoT	158
CONCLUSIONES	163
RECOMENDACIONES	165
ANEXOS	166
BIBLIOGRAFÍA	174

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema metodológico.	34
Figura 2. Factores que afectan la QoS en entornos rurales.....	45
Figura 3. Proceso de evaluación	46
Figura 4. Arquitectura general de la propuesta técnica	47
Figura 5. Extensión de la subcuenca Manglaralto	48
Figura 6. Contexto espacial del área de estudio y ubicación del punto MaS en Manglaralto	49
Figura 7. Mapa de cobertura celular del operador Claro en la zona de Manglaralto.....	50
Figura 8. Mapa de cobertura celular del operador CNT en la zona de Manglaralto	50
Figura 9. Flujo general de adquisición, procesamiento y transmisión de datos del sistema IoT	51
Figura 10. Distribución de interfaces de la placa TTGO T-SIM7000G empleadas en la propuesta	54
Figura 11. Flujo de información del sistema GNSS integrado en la placa TTGO T-SIM7000G	55
Figura 12. Sensor NPK industrial	58
Figura 13. Rango de medición y tiempo de respuesta del sensor NPK	61
Figura 14. Fusible de vidrio de 2 A, 250 V y 20 mm empleado como elemento de protección del sistema de alimentación	68
Figura 15. PCB del nodo IoT	75
Figura 16. Proceso de fabricación de la placa PCB de FR-4.....	76
Figura 17. Diagrama de flujo de la lógica de control y ciclo de operación del firmware.	77
Figura 18. Arquitectura jerárquica de 4 capas y flujo de protocolos de telemetría.	79
Figura 19. Ubicación del punto experimental MAS06 en la sede UPSE Manglaralto.....	82
Figura 20. Proceso de recolección de la muestra de suelo en el punto MAS06.	84
Figura 21. Informe de resultados del análisis de laboratorio de la muestra de suelo.	85
Figura 22. Entorno de desarrollo Arduino IDE empleado para la implementación del firmware del nodo IoT.....	87
Figura 23. Integración del sistema GNSS con la telemetría del nodo sensor	94
Figura 24. Modelo 3D del prototipo en el software Tinkercad	95
Figura 25. Interpretación del prototipo	96
Figura 26. Distribución inicial de 9 puntos de muestreo en el área de estudio	97
Figura 27. Ampliación de la malla de muestreo a 15 puntos.....	98

Figura 28. Distribución consolidada de 30 puntos de muestreo	98
Figura 29. Interconexión física del subsistema de adquisición de datos	102
Figura 30. Visualización preliminar de lecturas NPK en el monitor serial	114
Figura 31. Mapa de distribución espacial del nitrógeno utilizando 9 puntos de muestreo.....	124
Figura 32. Mapa de distribución espacial del nitrógeno utilizando 15 puntos de muestreo.....	125
Figura 33. Mapa de distribución espacial del nitrógeno utilizando 30 puntos de muestreo.....	125
Figura 34. Mapa de distribución espacial del fósforo utilizando 9 puntos de muestreo.....	128
Figura 35. Mapa de distribución espacial del fósforo utilizando 15 puntos de muestreo.....	128
Figura 36. Distribución espacial del fósforo con 30 puntos de muestreo.....	129
Figura 37. Distribución espacial del potasio con 9 puntos de muestreo.....	131
Figura 38. Distribución espacial del potasio con 15 puntos de muestreo.....	131
Figura 39. Distribución espacial del potasio con 30 puntos de muestreo.....	132
Figura 40. Distribución espacial del RSSI con 9 puntos de muestreo	137
Figura 41. Distribución espacial del RSSI con 15 puntos de muestreo	137
Figura 42. Distribución espacial del RSSI con 30 puntos de muestreo	138
Figura 43. Distribución del PDR registrado en los puntos de medición de la malla consolidada.	142
Figura 44. Distribución espacial comparativa entre RSSI, PDR y latencia en la malla consolidada de 30 puntos	149

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Asignación funcional de las GPIO del TTGO SIM7000G ESP32	57
Tabla 2. Parámetros técnicos del sensor NPK	59
Tabla 3. Comparación entre los estándares RS485 y UART TTL utilizados en la propuesta.....	62
Tabla 4. Especificaciones técnicas del panel solar utilizado	65
Tabla 5. Especificaciones técnicas del controlador solar PWM utilizado	66
Tabla 6. Especificaciones técnicas de la batería utilizada	67
Tabla 7. Resumen del hardware seleccionado para la propuesta técnica.....	69
Tabla 8. Ejemplo de coordenadas y satélites captados durante la prueba preliminar	73
Tabla 9. Prueba funcional preliminar del nodo IoT realizada en Manglaralto.	81
Tabla 10. Librerías utilizadas en el desarrollo del firmware del nodo sensor	88
Tabla 11. Parámetros del mensaje MQTT generado por el nodo sensor	91
Tabla 12. Condiciones generales del escenario de validación del sistema IoT	99
Tabla 13. Etapas del muestreo espacial empleado en la validación del sistema IoT	100
Tabla 14. Homologación de los resultados de laboratorio para la muestra MAS06.....	107
Tabla 15. Comparación entre las mediciones del sensor NPK y los resultados del laboratorio.	108
Tabla 16. Error relativo porcentual entre las mediciones del sensor NPK y el análisis de laboratorio	110
Tabla 17. Configuración de comunicación empleada para el sensor NPK.....	112
Tabla 18. Lecturas preliminares de macronutrientes NPK en 9 puntos de muestreo	113
Tabla 19. Correspondencia entre parámetros evaluados mediante laboratorio y sensor NPK ..	116
Tabla 20. Modelo de datos de telemetría utilizado para el nodo IoT.....	117
Tabla 21. <i>Registro consolidado de puntos de medición georreferenciados del nodo IoT</i>	119
Tabla 22. Criterio de organización de registros para el análisis espacial	120
Tabla 23. Criterios empleados para la interpolación espacial de macronutrientes	123
Tabla 24. Resumen estadístico de concentración de nitrógeno	127
Tabla 25. Resumen estadístico de concentración de fósforo en la malla consolidada de 30 puntos	130
Tabla 26. Resumen estadístico de la concentración de potasio en la malla consolidada de 30 puntos.....	133
Tabla 27. Parámetros del desempeño del enlace inalámbrico	135

Tabla 28. Resultados obtenidos del RSSI	136
Tabla 29. Evolución del RSSI según densidad de muestreo	139
Tabla 30. PDR promedio por escenario de muestreo.....	141
Tabla 31. Evaluación del Packet Delivery Ratio por escenario de muestreo	142
Tabla 32. Resultados de latencia MQTT para los escenarios evaluados	144
Tabla 33. Comparación general de parámetros QoS por escenario de muestreo.....	146
Tabla 34. Relación espacial entre ubicación y desempeño del enlace inalámbrico	150
Tabla 35. Distribución estimada del consumo energético por etapa de operación	155
Tabla 36. Integración funcional de los subsistemas de la arquitectura IoT	160

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Registro fotográfico del terreno antes de las pruebas.	166
Anexo 2. Recolección de muestras de suelo en el punto MAS06.	166
Anexo 3. Prototipo funcional inicial del nodo IoT.	167
Anexo 4. Verificación del funcionamiento de la antena LTE-M/NB-IoT del nodo IoT.	167
Anexo 5. Pruebas preliminares del módulo GNSS integrado en la placa TTGO T-SIM7000G.	168
Anexo 6. Preparación de las muestras de suelo para la evaluación comparativa del sensor NPK.	168
Anexo 7. Recolección de muestras de suelo en el punto MAS06	169
Anexo 8: Validación de infraestructura metálica del sistema IoT.	169
Anexo 9. Verificación del funcionamiento del módulo GNSS.	170
Anexo 10. Verificación del registro del módem SIM7000G en la red celular.	170
Anexo 11. Prueba de adquisición de datos del sensor NPK mediante Modbus RTU.	171
Anexo 12. Verificación del estado operativo del módem SIM7000G mediante comandos AT.	171
Anexo 13. Verificación de la plataforma Blynk con los datos obtenidos.	172
Anexo 14. Registro consolidado de puntos de medición georreferenciados del nodo IoT.	173

INTRODUCCIÓN

La agricultura, considerada una de las actividades humanas más antiguas y fundamentales, ha evolucionado desde sus formas tradicionales hacia sistemas cada vez más complejos y tecnológicamente integrados. En el contexto actual, caracterizado por el crecimiento poblacional, el cambio climático y la escasez de recursos, el desafío de garantizar la seguridad alimentaria requiere enfoques innovadores que permitan incrementar la producción, optimizar el uso de los insumos y reducir el impacto ambiental. En este escenario, la convergencia entre la agricultura y las telecomunicaciones mediante internet de las cosas (IoT) constituye una alternativa estratégica [1].

La ingeniería de telecomunicaciones cumple una función articuladora mediante el diseño de sistemas de comunicación capaces de afrontar las limitaciones de conectividad existentes en las zonas rurales. Para ello, se emplean tecnologías de red de área amplia y bajo consumo (LPWAN), las cuales permiten transmitir los datos obtenidos en el campo hacia las plataformas destinadas a su procesamiento y análisis [2].

La incorporación de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), particularmente de las comunicaciones inalámbricas, ha permitido desarrollar soluciones capaces de captar, transmitir y analizar parámetros relevantes de los sistemas agrícolas. Este avance ha impulsado la agricultura digital y de precisión, en la que sensores, microcontroladores, redes de comunicación y plataformas IoT interactúan para generar información sobre las condiciones del suelo, el clima, la fertilidad y el desarrollo de los cultivos [3].

La ingeniería de telecomunicaciones conecta los sensores instalados en el campo con las plataformas digitales encargadas de procesar y presentar la información para apoyar la toma de decisiones agrícolas [4].

En particular, la medición de macronutrientes esenciales, como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), representa un desafío para la agricultura ecuatoriana, especialmente para los pequeños y medianos productores que no disponen de acceso frecuente a laboratorios especializados. La concentración y el equilibrio de estos nutrientes influyen en el desarrollo de los cultivos, su rendimiento y la calidad de los productos. Sin embargo, la aplicación empírica de fertilizantes, sin información suficiente sobre las condiciones del suelo, puede ocasionar desperdicio de insumos, contaminación ambiental y deterioro progresivo del terreno [5], [6].

Ante esta problemática, la presente investigación propone implementar y evaluar una arquitectura de telemetría IoT para el monitoreo in situ de N, P y K en un terreno agrícola de la sucursal UPSE Manglaralto [7]. La propuesta integra un nodo sensor capaz de adquirir, procesar y transmitir la información hacia una plataforma de monitoreo remoto, lo que permite visualizar periódicamente los datos y efectuar el seguimiento de las condiciones del suelo. Asimismo, el sistema incorpora georreferenciación mediante GNSS y un subsistema de alimentación autónoma para favorecer su funcionamiento en condiciones de campo [8].

Además de desarrollar la arquitectura de telemetría, la investigación evalúa el desempeño del sistema mediante parámetros de calidad de servicio (QoS), como la intensidad de la señal recibida (RSSI), la tasa de entrega de paquetes (PDR) y la latencia de transmisión. De igual manera, se evalúa el desempeño del sensor NPK mediante la comparación de sus mediciones con los resultados de un análisis de laboratorio, con el propósito de determinar la viabilidad técnica de la solución propuesta para aplicaciones de agricultura de precisión. Este enfoque permite verificar el funcionamiento del prototipo y analizar la confiabilidad de la comunicación inalámbrica en un entorno agrícola.

La investigación aporta una solución tecnológica orientada a fortalecer la digitalización del sector agrícola mediante la integración de un sensor NPK industrial, sistemas de telecomunicaciones y una plataforma IoT. Los resultados obtenidos respaldan la viabilidad funcional de un sistema de monitoreo remoto y periódico destinado a generar información sobre las concentraciones de N, P y K en el suelo. Esta información puede contribuir a la toma de decisiones relacionadas con la gestión de la fertilidad y con el desarrollo de prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles.

Finalmente, el trabajo constituye una referencia para futuras investigaciones relacionadas con la aplicación de tecnologías IoT en el ámbito agropecuario y con el fortalecimiento de la ingeniería de telecomunicaciones como disciplina impulsora de soluciones tecnológicas para el desarrollo rural.

CAPÍTULO I: MARCO CONTEXTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes

La agricultura moderna enfrenta desafíos relacionados con la productividad, la sostenibilidad y el uso eficiente de los recursos. Entre ellos se encuentra la gestión de macronutrientes esenciales del suelo, como el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K), cuya deficiencia o exceso puede afectar las condiciones del suelo y la producción de los cultivos [1]. Estos nutrientes se evalúan comúnmente mediante análisis de laboratorio, procedimiento que puede implicar costos elevados, tiempos prolongados y condiciones técnicas de difícil acceso para los pequeños y medianos agricultores de las zonas rurales del Ecuador [5].

En la provincia de Santa Elena, las condiciones climáticas adversas, las prácticas agrícolas inadecuadas y los procesos de desertificación han ocasionado una pérdida de entre el 25 % y el 50 % de la productividad de los cultivos. Esta situación incrementa las dificultades económicas y ambientales de las comunidades agrícolas y se relaciona con el limitado impulso a la digitalización del sector y las necesidades de capacitación tecnológica de los productores [9].

En la zona de Manglaralto también se presentan limitaciones en la infraestructura convencional de telecomunicaciones. La topografía y la vegetación pueden actuar como barreras físicas y producir atenuación y propagación por trayectorias múltiples en señales inalámbricas de corto alcance, como las de Wi-Fi. Por ello, los antecedentes analizados sugieren el uso de tecnologías de red de área amplia y bajo consumo (LPWAN), como LTE-M o NB-IoT, las cuales aprovechan la infraestructura celular existente y pueden proporcionar un mayor alcance para la transmisión de telemetría en entornos rurales [4].

Ante este panorama, el internet de las cosas (IoT) constituye una alternativa para la agricultura de precisión, debido a que permite integrar sensores y unidades de procesamiento destinados a recopilar y transmitir datos del suelo. Estos sistemas pueden monitorear variables como la humedad, la temperatura y la concentración de nutrientes, efectuar mediciones *in situ* y generar información para mejorar la gestión de los cultivos y el uso de fertilizantes [1].

Desde la perspectiva de la ingeniería de telecomunicaciones, la propuesta integra un microcontrolador ESP32, un sensor especializado y la plataforma Blynk IoT para adquirir, transmitir y visualizar remotamente las concentraciones de N, P y K en el suelo. De esta manera, se plantea una solución de telemetría orientada a complementar las prácticas agrícolas tradicionales y adaptarse a las condiciones del área de estudio, de acuerdo con los principios de la agricultura de precisión.

1.2. Descripción del Proyecto

El presente proyecto tuvo como finalidad implementar una arquitectura de telemetría basada en internet de las cosas (IoT) para adquirir y transmitir inalámbricamente datos de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en un terreno agrícola de la sucursal UPSE Manglaralto. La propuesta buscó facilitar la adquisición, transmisión y visualización remota de las concentraciones de estos macronutrientes, con el propósito de apoyar la toma de decisiones en las actividades agrícolas [8].

El sistema integró un sensor NPK industrial, una unidad de procesamiento local, tecnologías de comunicación celular y una plataforma IoT para el monitoreo remoto. Además, incorporó un mecanismo de georreferenciación que permitió asociar cada registro de telemetría con su ubicación geográfica y facilitar el análisis espacial de las variables monitoreadas [8], [10]. De esta manera, la solución se orientó a complementar los métodos convencionales de análisis de

laboratorio mediante la generación periódica de información sobre la distribución de N, P y K en el suelo.

El desempeño del sistema se evaluó mediante parámetros de calidad de servicio (QoS): intensidad de la señal recibida (RSSI), tasa de entrega de paquetes (PDR) y latencia de transmisión. Asimismo, las mediciones del sensor NPK se compararon con los resultados del análisis de laboratorio para evaluar el desempeño del dispositivo y determinar la viabilidad funcional de la solución [11].

El proyecto constituyó una aplicación de la ingeniería de telecomunicaciones en el sector agrícola, debido a que integró tecnologías IoT, sistemas de comunicación inalámbrica y una plataforma digital para el monitoreo remoto de las condiciones del suelo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Implementar y evaluar un sistema de telemetría inalámbrica basado en IoT para el monitoreo in situ de macronutrientes N, P y K, analizando la fiabilidad de la transmisión de datos en entornos agrícolas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Seleccionar sensores NPK industriales y configurar los parámetros de red de la placa TTGO T-SIM7000G para permitir su integración con redes celulares LPWAN disponibles.

- Establecer el flujo de datos desde el nodo sensor hacia la nube, definiendo protocolos de capa de aplicación como MQTT para una transmisión de telemetría eficiente y de bajo consumo.
- Diseñar y configurar una interfaz de visualización remota en la plataforma Blynk para el monitoreo georreferenciado de los indicadores del suelo mediante el sistema GNSS integrado.
- Validar el sistema mediante pruebas de campo en la sucursal UPSE Manglaralto, midiendo parámetros de Calidad de Servicio (QoS) como la intensidad de la señal (RSSI) y la tasa de éxito en la entrega de datos.

1.4. Justificación

La transformación digital del sector agrícola ha impulsado la incorporación de tecnologías destinadas a mejorar la adquisición, transmisión y análisis de información sobre las condiciones del suelo y los cultivos. Sin embargo, en diversas zonas agrícolas del Ecuador, el monitoreo de macronutrientes esenciales, como el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K), continúa dependiendo principalmente de análisis de laboratorio. Estos procedimientos implican actividades de muestreo, transporte y procesamiento que pueden limitar la disponibilidad oportuna de información para gestionar la fertilización. Por ello, resulta necesario desarrollar soluciones complementarias que permitan obtener y transmitir periódicamente datos del suelo para apoyar la agricultura de precisión [9].

Desde la perspectiva de la ingeniería de telecomunicaciones, la investigación se justificó por el desarrollo y la implementación de una arquitectura de telemetría basada en internet de las cosas (IoT). La propuesta integró un sensor NPK industrial, una unidad de procesamiento local,

comunicación inalámbrica, georreferenciación y una plataforma IoT para adquirir, transmitir, almacenar y visualizar remotamente la información obtenida en el campo.

El aporte científico y disciplinar consistió en generar evidencia sobre el desempeño de una infraestructura de telemetría IoT en un entorno agrícola. El comportamiento del enlace inalámbrico se analizó mediante parámetros de calidad de servicio (QoS), como la intensidad de la señal recibida (RSSI), la tasa de entrega de paquetes (PDR) y la latencia de transmisión. Asimismo, las mediciones del sensor NPK se compararon con los resultados del análisis de laboratorio para evaluar el desempeño del dispositivo. Los resultados pueden servir como referencia para futuras investigaciones sobre telemetría, IoT y redes de comunicación aplicadas al sector agropecuario [11].

En los ámbitos práctico, económico, social y ambiental, el sistema permitió adquirir registros georreferenciados de N, P y K para analizar su distribución espacial y generar información de apoyo para la planificación agrícola. Su implementación puede complementar los procedimientos convencionales de análisis, favorecer el seguimiento de las condiciones del suelo y orientar la gestión de los fertilizantes. Además, la arquitectura puede adaptarse a otros escenarios de monitoreo remoto que requieran integrar sensores, sistemas de comunicación y plataformas de visualización. De esta manera, el proyecto evidencia la contribución de la ingeniería de telecomunicaciones al desarrollo de soluciones orientadas a las necesidades del sector agrícola y a su transformación digital.

1.5. Alcance del Proyecto

La investigación comprendió el diseño, la implementación y la evaluación de una arquitectura de telemetría basada en internet de las cosas (IoT) para el monitoreo *in situ* de

nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en un entorno agrícola. La solución integró un sensor NPK industrial, una unidad de procesamiento local, un módulo de comunicación celular, un sistema de georreferenciación y una plataforma de monitoreo remoto. Asimismo, incluyó la integración del hardware y el software, la configuración de la infraestructura de comunicación y la validación del sistema mediante pruebas de campo.

El alcance contempló la evaluación del enlace inalámbrico mediante parámetros de calidad de servicio (QoS), como la intensidad de la señal recibida (RSSI), la tasa de entrega de paquetes (PDR) y la latencia de transmisión. También comprendió la asociación de los registros con coordenadas geográficas, el análisis espacial de N, P y K, la generación de mapas de calor y la evaluación de la autonomía energética del nodo sensor.

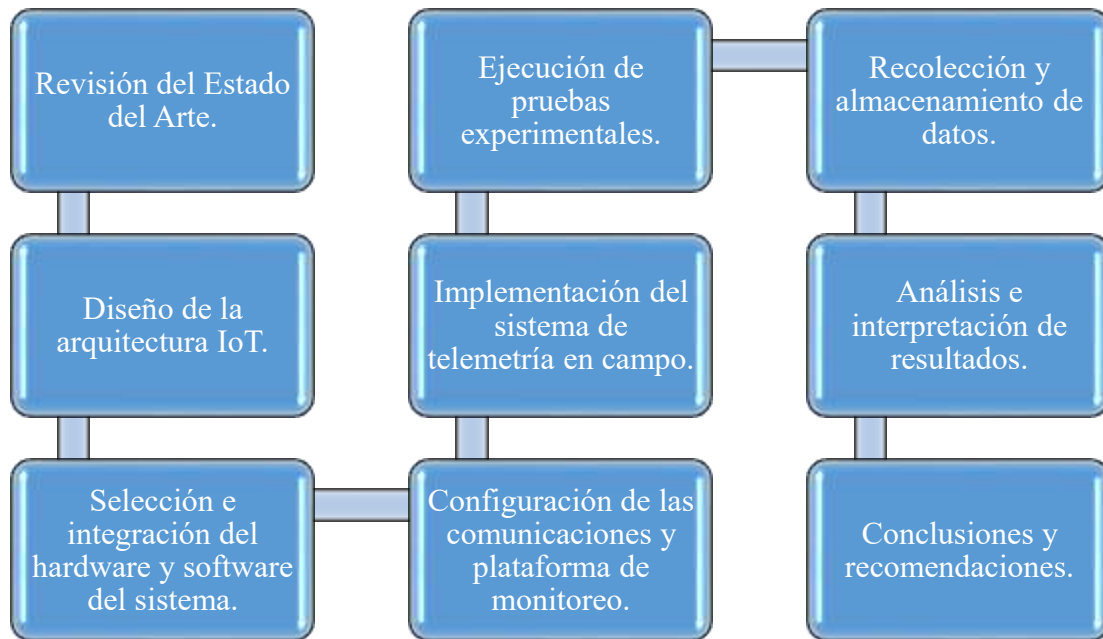
Las pruebas se efectuaron en un escenario experimental específico de la sucursal UPSE Manglaralto. Por tanto, los resultados correspondieron a la configuración de los equipos, la cobertura celular, las condiciones de operación y las características del entorno presentes durante su ejecución. En consecuencia, estos no deben generalizarse a otros escenarios o infraestructuras sin considerar las particularidades técnicas y ambientales de cada implementación. Aunque la arquitectura puede adaptarse a otros sistemas de monitoreo remoto, su aplicación en entornos diferentes requerirá una nueva configuración y validación.

1.6. Metodología de la investigación

La investigación fue de tipo aplicado y experimental, orientada al diseño, la implementación y la evaluación de una arquitectura de telemetría basada en internet de las cosas (IoT) para el monitoreo *in situ* de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). El proceso metodológico comprendió el diseño de la arquitectura propuesta, la integración de los componentes de hardware

y software, la implementación del sistema de telemetría, la ejecución de pruebas experimentales y el análisis de los resultados.

Figura 1. Esquema metodológico.



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 1** presenta las etapas desarrolladas durante la investigación. Este esquema permitió organizar secuencialmente el diseño, la implementación y la evaluación del sistema de telemetría IoT, manteniendo la correspondencia entre los objetivos planteados, las pruebas ejecutadas y el análisis de los resultados.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y TECNOLÓGICO

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Arquitectura jerárquica del internet de las cosas (IoT)

La arquitectura del internet de las cosas (IoT) puede organizarse mediante un modelo de referencia compuesto por cuatro capas funcionales: percepción, borde, red y aplicación. Estas intervienen en la adquisición, el procesamiento, la transmisión, el almacenamiento y la visualización de los datos. En el sistema propuesto, permiten integrar el sensor NPK industrial, la unidad de procesamiento local, la comunicación celular y la plataforma de monitoreo remoto.

2.1.1.1. Capa de percepción

La capa de percepción constituye el nivel físico de la arquitectura IoT y establece la conexión entre las variables del suelo y el sistema de procesamiento digital. Su función consiste en adquirir los valores registrados por el sensor y convertirlos en datos interpretables por la unidad de procesamiento. En esta investigación, comprende el sensor NPK industrial, la interfaz RS485 y el transceptor MAX485.

A) Medición y requerimientos de los cultivos

Los requerimientos nutricionales varían según la especie vegetal, la etapa de desarrollo del cultivo y las condiciones del suelo. Por ello, la selección del sensor debe considerar el rango de medición, la resolución, la unidad de lectura y las condiciones ambientales de operación. En el sistema propuesto, se emplea un sensor NPK industrial para obtener los valores de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en los puntos de medición.

Salida digital: el sensor proporciona los valores de N, P y K mediante registros digitales, lo que facilita su transmisión e interpretación por la unidad de procesamiento.

Protección ambiental: de acuerdo con las especificaciones técnicas del fabricante, el sensor dispone de un grado de protección IP68. Esta clasificación indica protección contra el ingreso de polvo y la inmersión en agua bajo las condiciones establecidas para el dispositivo; sin embargo, no implica necesariamente resistencia frente a sustancias químicas o fertilizantes.

B) Interfaz de comunicación industrial RS485

La interfaz física RS485 emplea señalización diferencial y permite establecer comunicaciones seriales a mayores distancias, con resistencia frente a las interferencias electromagnéticas. Estas características favorecen su aplicación en entornos industriales y agrícolas donde existe separación entre el sensor y la unidad de procesamiento [12].

C) Integración con la unidad de procesamiento

La comunicación entre el sensor NPK y el microcontrolador ESP32 se establece mediante un transceptor MAX485, encargado de adaptar las señales eléctricas diferenciales de la interfaz RS485 a los niveles lógicos utilizados por la unidad de procesamiento, y viceversa.

El MAX485 funciona como interfaz física entre ambos subsistemas, mientras que el firmware ejecutado por el ESP32 genera e interpreta las tramas del protocolo Modbus RTU. Por tanto, el transceptor interviene en la adaptación eléctrica de las señales, pero no en la interpretación de los registros ni en la exactitud de las mediciones del suelo.

2.1.1.2. Capa de borde (Edge Computing)

La capa de borde corresponde a la unidad de procesamiento local ubicada en el nodo sensor. Su función consiste en adquirir, procesar y organizar los datos en el lugar de medición antes de transmitirlos hacia la infraestructura de red. Este procesamiento reduce las operaciones realizadas en la plataforma remota y optimiza el intercambio de información.

En el sistema propuesto, el núcleo de esta capa está constituido por el microcontrolador ESP32 integrado en la placa TTGO T-SIM7000G. Sus principales funciones son las siguientes:

- **Procesamiento local:** el ESP32 es un microcontrolador de 32 bits con arquitectura de doble núcleo, encargado de gestionar la adquisición de datos, la comunicación serial, el posicionamiento geográfico y la conexión celular. El uso simultáneo de ambos núcleos depende de la configuración del firmware.
- **Decodificación de registros:** el microcontrolador consulta e interpreta los registros recibidos mediante Modbus RTU. Posteriormente, organiza los valores de N, P y K, expresados en mg/kg, para incorporarlos al paquete de telemetría. Los factores de escala, calibración o conversión aplicados, cuando corresponda, deben especificarse en el código y en la metodología.
- **Georreferenciación mediante GNSS:** el receptor GNSS proporciona tramas de posicionamiento que son interpretadas por el microcontrolador. Las coordenadas obtenidas se asocian con cada medición de N, P y K para generar registros georreferenciados y facilitar su posterior representación espacial. La exactitud del posicionamiento depende de las condiciones de recepción satelital y de las especificaciones técnicas del receptor.
- **Gestión del consumo energético:** el firmware implementa ciclos de actividad y suspensión profunda (*deep sleep*) para reducir el consumo energético entre las mediciones. Durante la suspensión, se desactivan determinadas funciones del nodo y se reactivan al comenzar un nuevo ciclo de adquisición y transmisión. Esta

estrategia complementa el subsistema energético conformado por la batería y el panel solar de 10 W.

- **Organización de la telemetría mediante MQTT:** el microcontrolador estructura los datos de N, P y K, las coordenadas geográficas y los parámetros de conectividad antes de transmitirlos mediante MQTT. Este protocolo presenta una baja sobrecarga de comunicación y resulta adecuado para dispositivos IoT que transmiten paquetes pequeños. La continuidad y la confiabilidad de la entrega dependen del nivel de QoS configurado, de las condiciones de la red y de los mecanismos de reconexión implementados.

2.1.1.3. Capa de red

La capa de red establece la comunicación entre el nodo sensor y la plataforma IoT. En entornos agrícolas, el comportamiento del enlace inalámbrico puede verse afectado por la distancia, la vegetación, los obstáculos físicos, la topografía y la disponibilidad de infraestructura celular.

Las tecnologías de corto alcance, como Wi-Fi, basada en la familia de estándares IEEE 802.11, presentan una cobertura condicionada por la potencia de transmisión, la frecuencia, las características de las antenas y el entorno de propagación. Frente a estas limitaciones, las tecnologías celulares permiten ampliar el área de cobertura y aprovechar la infraestructura desplegada por los operadores de telecomunicaciones.

El módem SIM7000G, integrado en la placa TTGO T-SIM7000G, es compatible con LTE-M y NB-IoT. El uso de estas tecnologías depende de su disponibilidad, de las bandas habilitadas y de la configuración de la red del operador. Por tanto, debe distinguirse entre las tecnologías

compatibles con el dispositivo y la tecnología de acceso efectivamente utilizada durante las pruebas.

A) Tecnologías celulares LPWAN

- **LTE-M:** tecnología celular orientada a aplicaciones IoT que requieren movilidad, cobertura amplia y una mayor capacidad de transmisión respecto de otras tecnologías LPWAN. Su disponibilidad depende del despliegue realizado por el operador de telecomunicaciones.
- **NB-IoT:** tecnología celular de banda estrecha diseñada para dispositivos que transmiten volúmenes reducidos de información y requieren cobertura extendida y bajo consumo energético.

El alcance efectivo de LTE-M y NB-IoT depende de la ubicación de las estaciones base, las bandas habilitadas, la potencia de transmisión, las características de las antenas y las condiciones de propagación. En consecuencia, la cobertura debe determinarse mediante mediciones en el entorno de implementación y no mediante valores generales aplicables a todos los escenarios.

B) Transmisión de la telemetría

El nodo sensor transmite los paquetes de telemetría hacia la plataforma IoT mediante la red celular. Para ello, emplea MQTT como protocolo de capa de aplicación, basado en un modelo de publicación/suscripción y caracterizado por una baja sobrecarga de comunicación. La confiabilidad de la entrega depende del nivel de QoS configurado, de las condiciones de la red y de los mecanismos de reconexión o retransmisión implementados.

C) Evaluación del enlace inalámbrico

El comportamiento del enlace se evalúa mediante la intensidad de la señal recibida (RSSI), la tasa de entrega de paquetes (PDR) y la latencia. Estos parámetros se asocian con las coordenadas obtenidas mediante GNSS para analizar espacialmente las condiciones de conectividad. La existencia de una correlación estadística entre las variables deberá sustentarse mediante el cálculo y la interpretación del coeficiente correspondiente.

2.1.1.4. Capa de aplicación

La capa de aplicación constituye el nivel superior de la arquitectura IoT y proporciona las funciones de recepción, almacenamiento y visualización de la telemetría transmitida por el nodo sensor.

En el sistema propuesto, la plataforma Blynk IoT recibe mediante MQTT los valores de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), las coordenadas geográficas y los parámetros de conectividad. Esta información se almacena y organiza para facilitar su visualización remota y posterior análisis.

La plataforma permite consultar los registros sin que el usuario permanezca en el área agrícola. Sin embargo, los datos presentados constituyen información de apoyo y no una recomendación agronómica automática, debido a que su interpretación requiere criterios técnicos y, cuando corresponda, la comparación con resultados de laboratorio.

2.2. Calidad de Servicio (QoS) en redes IoT

2.2.1. Definición de QoS en sistemas IoT

La calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) en los sistemas de internet de las cosas (IoT) comprende el conjunto de parámetros utilizados para caracterizar el desempeño de una red durante la transmisión de datos desde los dispositivos IoT hacia los sistemas de procesamiento, almacenamiento y visualización.

En aplicaciones de telemetría agrícola, como el monitoreo de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en el suelo, la evaluación de la QoS permite analizar la confiabilidad y la disponibilidad de la información transmitida. Debido a que los sistemas IoT pueden operar con restricciones de consumo energético, ancho de banda y cobertura, su desempeño debe evaluarse de acuerdo con las condiciones del entorno de operación.

2.2.2. Parámetros de evaluación de QoS

Para caracterizar el desempeño del sistema de telemetría IoT propuesto, se seleccionaron parámetros relacionados con las condiciones de recepción, la confiabilidad de la entrega y el tiempo de transmisión. En esta investigación, se analizaron la intensidad de la señal recibida (RSSI), la tasa de entrega de paquetes (PDR) y la latencia.

2.2.2.1. Intensidad de señal recibida (RSSI)

El indicador de intensidad de la señal recibida (*Received Signal Strength Indicator*, RSSI) representa la potencia de la señal recibida por el dispositivo de comunicación. Se expresa en decibelios referidos a un milivatio (dBm) y permite caracterizar las condiciones de recepción del enlace inalámbrico.

Cuando la potencia recibida es inferior a 1 mW, su valor expresado en dBm es negativo. Los valores más cercanos a cero indican una mayor potencia recibida, mientras que los valores más negativos representan una menor intensidad de señal.

Como criterio de referencia para esta investigación, los valores de RSSI se clasifican de la siguiente manera:

- -50 dBm a -70 dBm: Señal excelente
- -70 dBm a -90 dBm: Señal aceptable
- -90 dBm a -110 dBm: Señal débil
- < -110 dBm: Señal crítica o pérdida de enlace

El RSSI permite identificar variaciones en la potencia recibida según la ubicación del nodo. Estas variaciones pueden relacionarse con la distancia respecto de la estación base, la vegetación, la topografía, los obstáculos físicos y las características de la infraestructura celular.

2.2.2.2. Tasa de entrega de paquetes (PDR)

La tasa de entrega de paquetes (Packet Delivery Ratio, PDR) representa el porcentaje de paquetes transmitidos por el nodo sensor que son recibidos correctamente en el destino. Este parámetro permite evaluar el desempeño efectivo del proceso de comunicación.

El PDR se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$PDR(\%) = \frac{N_{Recibidos}}{N_{Enviados}} \times 100$$

Donde:

- $N_{Recibidos}$ es el número de paquetes correctamente recibidos

- $N_{Enviados}$ es el número total de paquetes transmitidos

Un valor de PDR cercano al 100 % representa una elevada tasa de entrega de paquetes. Por el contrario, un valor menor indica la existencia de pérdidas durante el proceso de comunicación. No obstante, el PDR debe interpretarse junto con otros parámetros, como RSSI y latencia, debido a que no representa por sí solo la confiabilidad integral del sistema.

2.2.2.3. Latencia (Delay)

La latencia corresponde al tiempo transcurrido entre el envío de un paquete desde el nodo sensor y su recepción en la plataforma de destino, según los puntos de medición temporal definidos en la metodología.

La latencia se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Delay = t_{recepción} - t_{envío}$$

Este parámetro permite determinar la demora experimentada durante la transmisión de la telemetría. En las redes celulares orientadas a IoT, la latencia puede verse afectada por las condiciones radioeléctricas, la disponibilidad de cobertura, la congestión de la red, los procedimientos de conexión, las retransmisiones y los mecanismos de ahorro energético del dispositivo.

Debido a que el sistema propuesto realiza un monitoreo periódico y no controla procesos que requieren una respuesta inmediata, la latencia debe evaluarse de acuerdo con los requisitos temporales definidos para esta aplicación.

2.2.2.4. Tasa de transferencia (Throughput)

La tasa de transferencia (Throughput) representa la cantidad de datos transmitidos correctamente durante un intervalo determinado y se expresa en bits por segundo (bit/s).

Puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{B_{\text{recibidos}}}{\Delta t}$$

Donde:

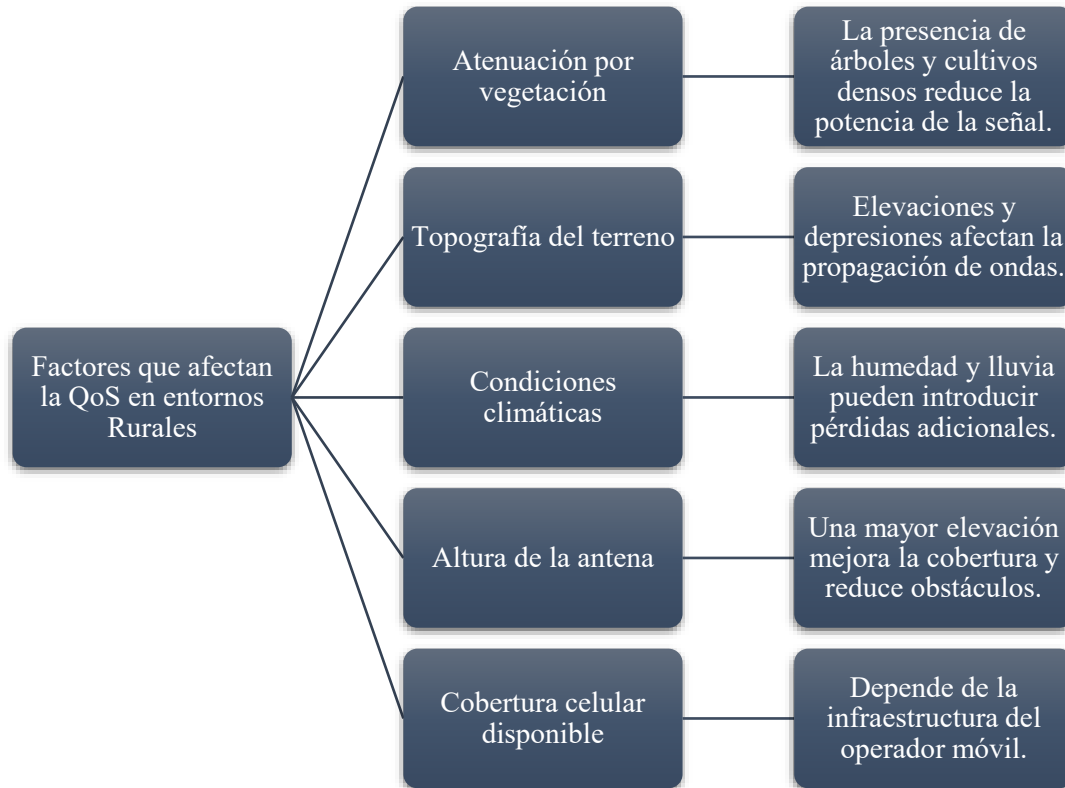
- T : representa la tasa de transferencia;
- $B_{\text{recibidos}}$: corresponde al número de bits recibidos correctamente; y
- Δt : representa el intervalo de observación.

Aunque los paquetes de telemetría del sistema presentan un volumen reducido, este parámetro puede utilizarse para evaluar el aprovechamiento del canal de comunicación, especialmente en escenarios con varios nodos o con una mayor frecuencia de transmisión.

2.2.3. Factores que afectan la QoS en entornos Rurales

La calidad del servicio en redes IoT desplegadas en entornos agrícolas está influenciada por múltiples factores físicos y tecnológicos:

Figura 2. Factores que afectan la QoS en entornos rurales



Nota: Elaboración propia.

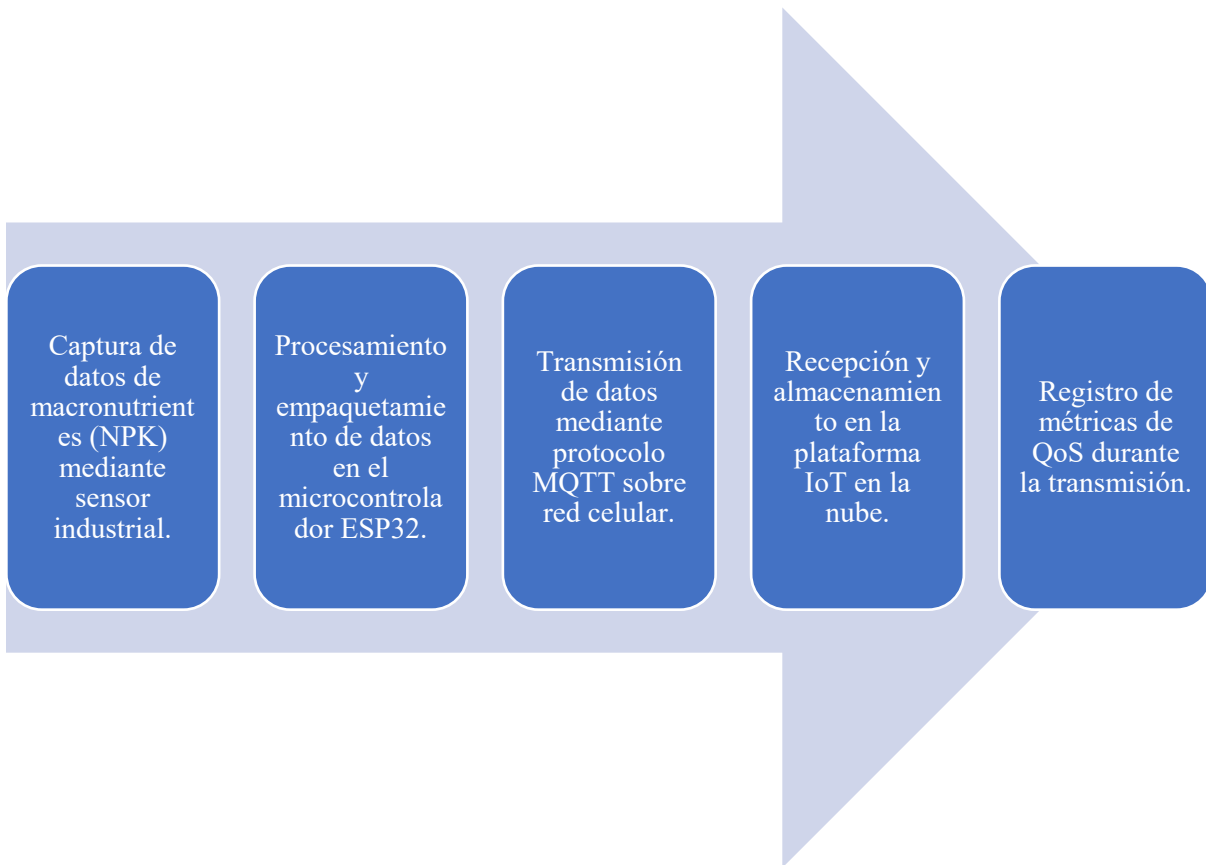
Como se muestra en la **Figura 2**, estos factores pueden modificar las condiciones de propagación y, en consecuencia, influir en la intensidad de la señal recibida, la tasa de entrega de paquetes y la latencia. Su efecto depende de las características del entorno, la infraestructura disponible y la configuración del sistema de comunicación.

2.2.4. Modelo de evaluación propuesto

El modelo de evaluación de QoS propuesto en esta investigación se basa en la medición experimental de los parámetros RSSI, PDR y latencia en el entorno rural de Manglaralto. Para ello, se utiliza un nodo sensor IoT con conectividad celular mediante LTE-M o NB-IoT, según la tecnología de acceso disponible.

El proceso de evaluación comprende las etapas presentadas en la **Figura 3**.

Figura 3. Proceso de evaluación



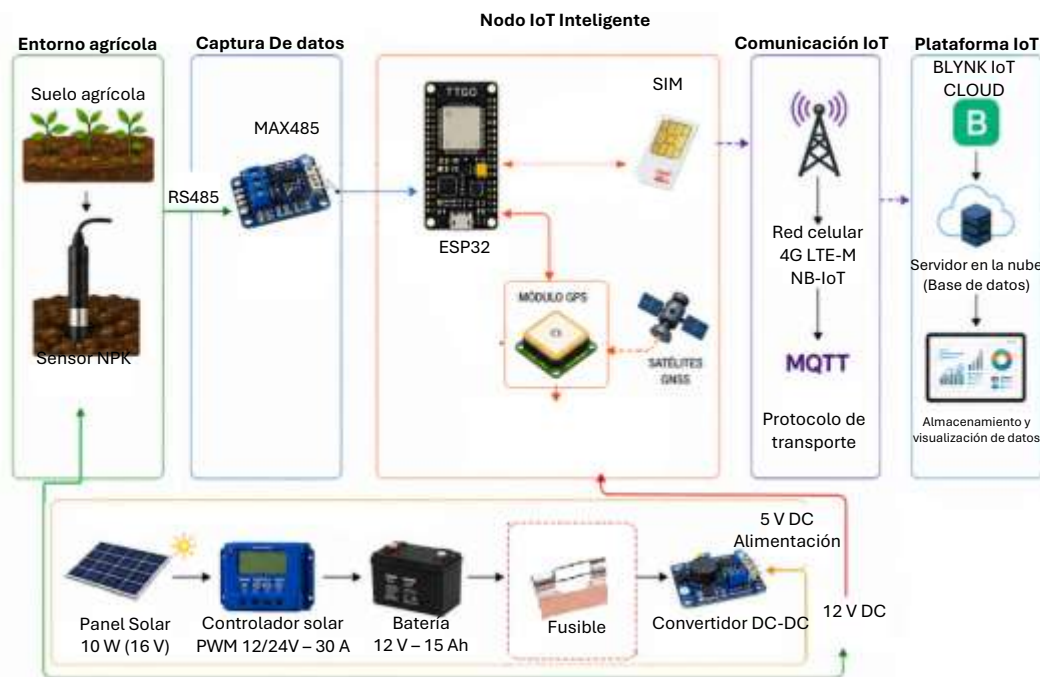
Nota: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA PROPUESTA TÉCNICA

3.1. Arquitectura propuesta del sistema de telemetría IoT

La propuesta técnica se fundamentó en una arquitectura IoT orientada a la adquisición, el procesamiento y la transmisión de datos de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en un entorno agrícola rural. La arquitectura integró una etapa de medición, una unidad de procesamiento local, comunicación celular, una plataforma de monitoreo remoto y un subsistema de alimentación autónoma.

Figura 4. Arquitectura general de la propuesta técnica



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 4** presenta la organización funcional del sistema. El nodo sensor *in situ* estuvo integrado por un sensor NPK industrial, un transceptor MAX485 y una placa TTGO T-SIM7000G, encargada del procesamiento local, la comunicación celular y la georreferenciación de las mediciones.

La telemetría se transmitió mediante MQTT sobre la red celular disponible hacia la plataforma Blynk IoT. El subsistema energético estuvo compuesto por un panel solar monocristalino de 10 W, un controlador de carga PWM, una batería sellada de 12 V y 15 Ah, un fusible y un convertidor DC-DC para suministrar las tensiones requeridas por los componentes del nodo [13], [14], [15].

3.1.1. Escenario de implementación

El sistema se implementó en los terrenos agrícolas de la sucursal UPSE Manglaralto, entorno rural en el que la vegetación, la topografía y la disponibilidad de cobertura celular pueden influir en el desempeño de la telemetría inalámbrica [9].

Figura 5. Extensión de la subcuenca Manglaralto



Nota: Tomado de [9].

Las condiciones del área de estudio motivaron el uso de comunicación celular frente a tecnologías de corto alcance, como Wi-Fi. Asimismo, la instalación *in situ* requirió protección para los componentes electrónicos y un subsistema fotovoltaico destinado a respaldar los ciclos periódicos de medición, procesamiento y transmisión sin depender permanentemente de la red eléctrica convencional.

Figura 6. Contexto espacial del área de estudio y ubicación del punto MaS en Manglaralto



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 6** muestra la ubicación de los puntos MAS dentro de la sucursal UPSE Manglaralto, los cuales constituyeron una referencia espacial previa del terreno. Para las pruebas experimentales preliminares, se seleccionó el punto MAS06, donde se instaló temporalmente el nodo sensor, se registraron las coordenadas geográficas y se obtuvieron las mediciones de N, P y K. Estos valores se compararon posteriormente con los resultados del análisis de laboratorio correspondientes al mismo punto de muestreo.

3.1.2. Análisis de cobertura celular del área de estudio

Antes de implementar el nodo IoT, se revisó la cobertura celular estimada en el área de estudio a partir de los mapas publicados por los operadores Claro y CNT. Esta revisión permitió identificar preliminarmente las zonas con disponibilidad de servicio y planificar las pruebas de telemetría en campo.

Las **Figura 7** y **Figura 8**, presentan los mapas de cobertura estimada de Claro y CNT, respectivamente, en la zona de Manglaralto. Las diferencias observadas en su distribución

evidenciaron la necesidad de comprobar las condiciones reales del enlace mediante mediciones efectuadas con el nodo sensor en el área de estudio.

Figura 7. Mapa de cobertura celular del operador Claro en la zona de Manglaralto



Nota: Tomado del mapa oficial de cobertura de Claro, Ecuador.

Figura 8. Mapa de cobertura celular del operador CNT en la zona de Manglaralto



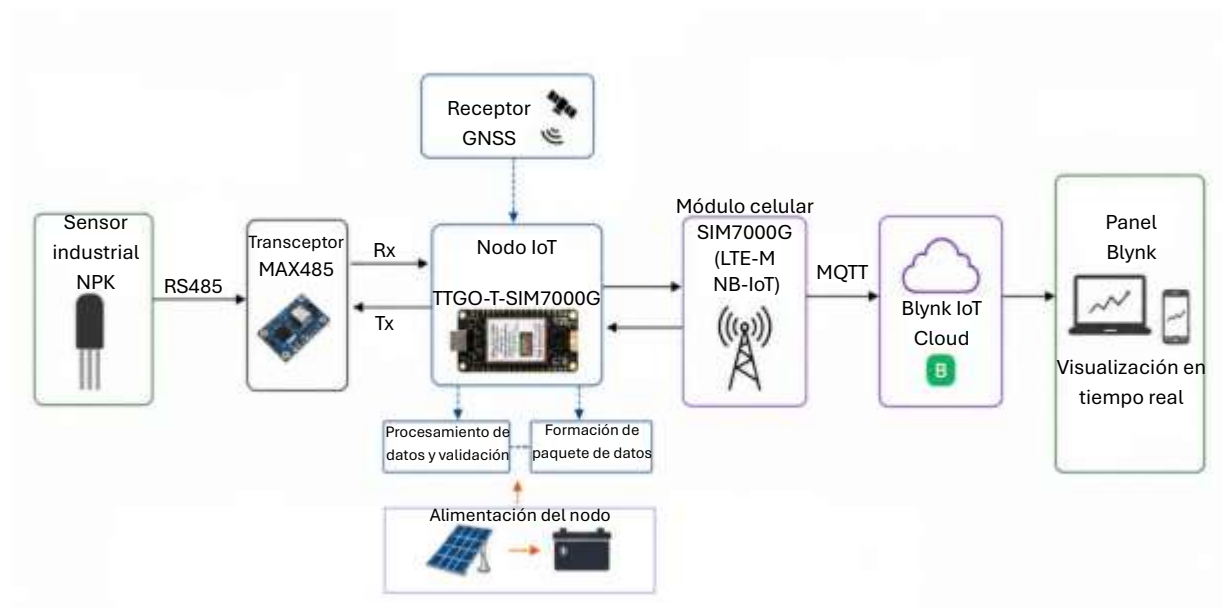
Nota: Tomado del mapa oficial de cobertura de CNT.

3.1.3. Flujo de adquisición, procesamiento y transmisión de datos

El flujo de operación comenzó con la lectura de los registros del sensor NPK industrial mediante el protocolo Modbus RTU sobre la interfaz RS485. El transceptor MAX485 adaptó las señales eléctricas para su recepción e interpretación por el ESP32. Posteriormente, el microcontrolador procesó los valores de N, P y K y los integró con las coordenadas proporcionadas por el receptor GNSS para conformar un registro georreferenciado.

Una vez generado el paquete de telemetría, el módem SIM7000G estableció la conexión con la red celular y el sistema transmitió la información mediante MQTT hacia la plataforma Blynk IoT. En esta plataforma, los datos se almacenaron y organizaron para su visualización remota y posterior análisis.

Figura 9. Flujo general de adquisición, procesamiento y transmisión de datos del sistema IoT



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 9** ilustra el flujo general de adquisición, procesamiento y transmisión de datos implementado en la propuesta técnica. Esta representación sintetiza el funcionamiento global del sistema y sirve como base para desarrollar las especificaciones técnicas.

3.2. Especificaciones técnicas del hardware

La implementación del sistema IoT requirió componentes electrónicos capaces de operar de manera integrada en un entorno agrícola. Estos debían permitir la adquisición de datos, el procesamiento local, la comunicación inalámbrica y la alimentación autónoma del nodo sensor.

Los componentes se seleccionaron según criterios de compatibilidad entre las interfaces de comunicación, consumo energético, capacidad de procesamiento, robustez para la operación en campo y disponibilidad de tecnologías orientadas al internet de las cosas (IoT).

En los apartados siguientes se presentan sus características técnicas y se justifica su integración en la arquitectura propuesta.

3.2.1. Unidad de procesamiento y comunicación TTGO T-SIM7000G

La unidad central del sistema estuvo constituida por la placa TTGO T-SIM7000G, seleccionada porque integra funciones de procesamiento mediante el ESP32, comunicación celular mediante el módem SIM7000G y georreferenciación mediante GNSS. Este dispositivo gestionó la adquisición de los datos proporcionados por el sensor NPK, su procesamiento local y la transmisión de la telemetría hacia la plataforma Blynk IoT.

La selección de la placa respondió a la necesidad de disponer de una solución compacta que integrara las funciones principales del nodo sensor y facilitara su implementación *in situ* en la sucursal UPSE Manglaralto [16].

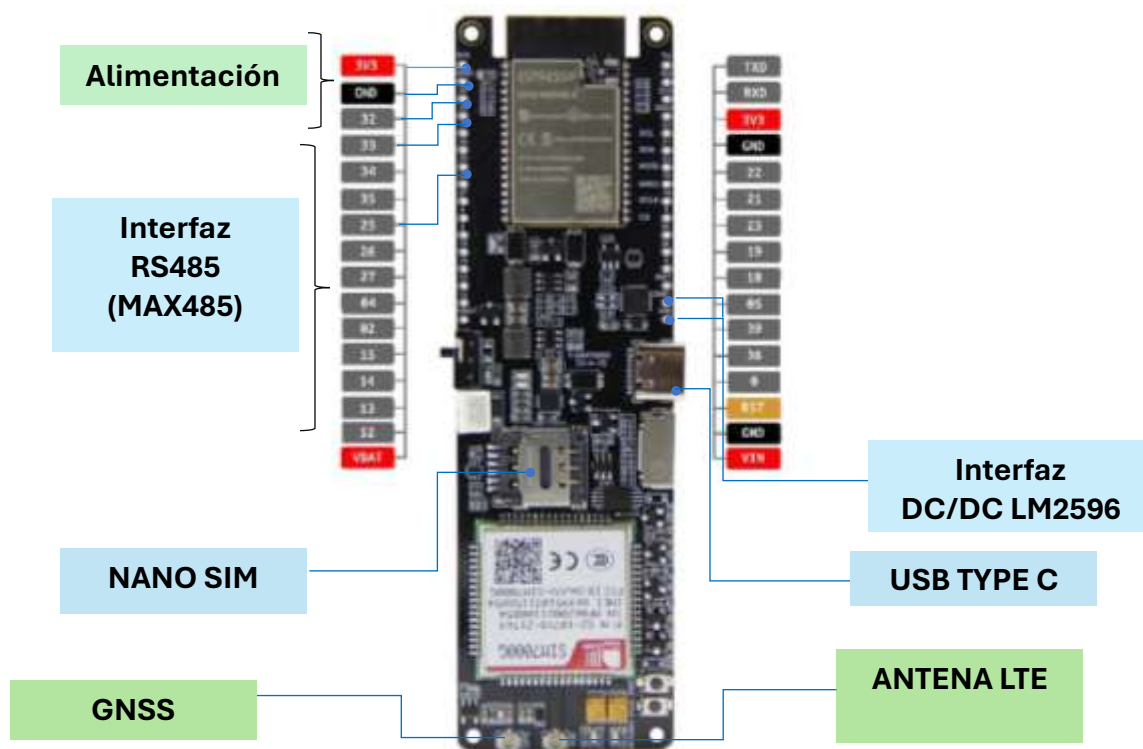
3.2.2. Arquitectura del microcontrolador ESP32

El control lógico del sistema estuvo a cargo del ESP32, un sistema en chip (*SoC*, del inglés *system-on-chip*) de 32 bits con arquitectura de doble núcleo. Este componente se seleccionó por su capacidad para gestionar las tareas de adquisición, procesamiento y comunicación del nodo sensor.

El ESP32 recibió e interpretó los registros del sensor NPK transmitidos mediante Modbus RTU sobre la interfaz RS485 y adaptados eléctricamente por el transceptor MAX485. Posteriormente, procesó los valores obtenidos, incorporó la información de georreferenciación, conformó el paquete de telemetría y coordinó su transmisión mediante el módem celular.

El firmware también implementó el modo de suspensión profunda (*deep sleep*) para reducir la actividad del microcontrolador entre los ciclos de medición. Esta función complementó el subsistema energético compuesto por el panel solar y la batería sellada de 12 V y 15 Ah. No obstante, la reducción del consumo total del nodo dependió también de la desactivación o gestión energética del módem y de los demás componentes.

Figura 10. Distribución de interfaces de la placa TTGO T-SIM7000G empleadas en la propuesta



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 10** muestra las interfaces y conexiones utilizadas para la comunicación RS485, la alimentación, la conectividad celular y la georreferenciación del nodo sensor.

3.2.3. Módulo de comunicación celular SIM7000G

La placa TTGO T-SIM7000G incorporó el módem SIM7000G, diseñado para aplicaciones de internet de las cosas (IoT) y compatible con tecnologías celulares como LTE-M y NB-IoT. La disponibilidad y el uso de estas tecnologías dependen de las bandas admitidas por la versión del módulo, de la configuración realizada y de la infraestructura habilitada por el operador [7].

En el sistema desarrollado, el módem proporcionó la conectividad necesaria para transmitir los paquetes de telemetría hacia Blynk IoT mediante la red celular disponible en el área de estudio.

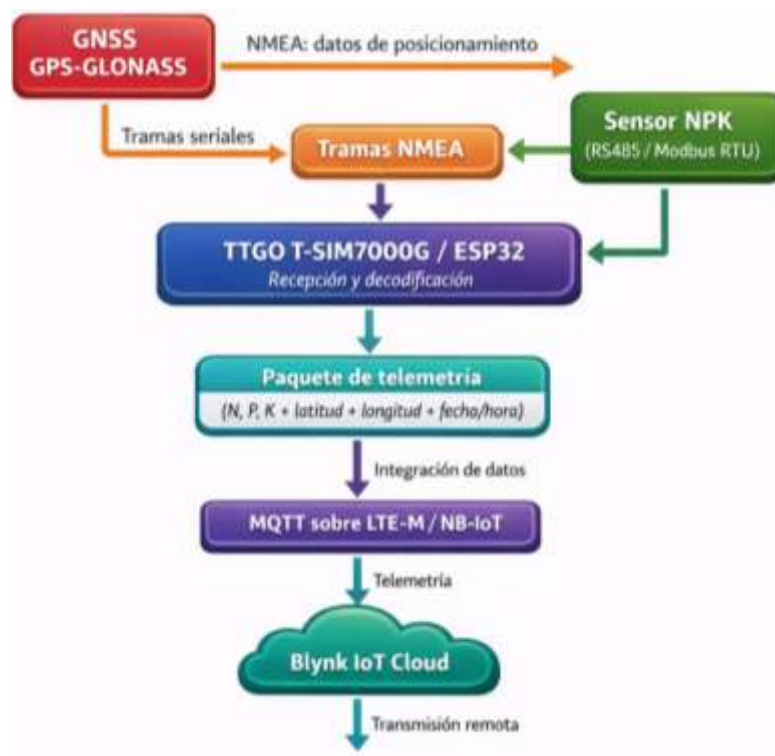
El desempeño del enlace se evaluó mediante la intensidad de la señal recibida (RSSI), la tasa de entrega de paquetes (PDR) y la latencia.

3.2.4. Sistema de georreferenciación GNSS

La placa TTGO T-SIM7000G incorporó un receptor GNSS que permitió obtener las coordenadas geográficas del nodo sensor y asociarlas con cada medición de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). De esta manera, se generaron registros georreferenciados para analizar la distribución espacial de las variables monitoreadas.

Las coordenadas también se asociaron con la intensidad de la señal recibida (RSSI), la tasa de entrega de paquetes (PDR) y la latencia, lo que permitió analizar espacialmente el desempeño del enlace celular.

Figura 11. Flujo de información del sistema GNSS integrado en la placa TTGO T-SIM7000G



Nota: Elaboración propia.

Como se observa en la **Figura 11**, las coordenadas geográficas proporcionadas por el subsistema GNSS son procesadas por la placa TTGO T-SIM7000G e incorporadas al paquete de telemetría. Esta integración permite complementar las lecturas del sensor NPK con información espacial, lo que favorece el análisis agronómico y la evaluación del desempeño del enlace inalámbrico en campo.

3.2.5. Asignación de GPIO e interfaces de comunicación

La implementación del nodo sensor requirió asignar interfaces de comunicación y pines de entrada y salida de propósito general (GPIO) de la placa TTGO T-SIM7000G. Esta configuración permitió intercambiar información entre el microcontrolador ESP32, el sensor NPK industrial y los subsistemas integrados de comunicación y georreferenciación.

La comunicación con el sensor NPK se estableció mediante el protocolo Modbus RTU sobre la interfaz física RS485. Para adaptar las señales diferenciales de esta interfaz a los niveles lógicos utilizados por el ESP32, se incorporó un transceptor MAX485.

La transmisión y la recepción de datos se gestionaron mediante una interfaz UART configurada en los pines GPIO32 y GPIO33 para las líneas de recepción (RX) y transmisión (TX), respectivamente. El pin GPIO25 se configuró como salida digital para controlar conjuntamente las líneas de habilitación del transmisor (DE) y del receptor (/RE) del MAX485. Esta configuración permitió alternar entre la transmisión y la recepción requeridas por la comunicación semidúplex.

La placa TTGO T-SIM7000G recibió una tensión regulada de 5 V desde un convertidor DC-DC conectado a la batería de 12 V. Esta alimentación se aplicó a la entrada correspondiente de la placa, que proporcionó internamente los niveles de tensión requeridos por el ESP32, el módem SIM7000G y los demás circuitos integrados.

Tabla 1. Asignación funcional de las GPIO del TTGO SIM7000G ESP32

Pin TTGO T-SIM7000G	Dispositivo	Descripción de la conexión
GPIO32	MAX485 (RO)	Recepción de datos RS485 del sensor NPK.
GPIO33	MAX485 (DI)	Transmisión de comandos Modbus RTU al sensor NPK.
GPIO25	MAX485 (DE/RE)	Control del modo de transmisión y recepción del transceptor RS485.
VIN (5 V)	LM2596	Alimentación regulada proveniente del convertidor DC-DC.
GND	LM2596 / MAX485	Referencia eléctrica común del sistema.
UART interno	SIM7000G	Comunicación celular para el envío de telemetría mediante MQTT.
UART Interno	GNSS	Recepción de coordenadas geográficas para la georreferenciación de las mediciones.

Nota: Elaboración propia.

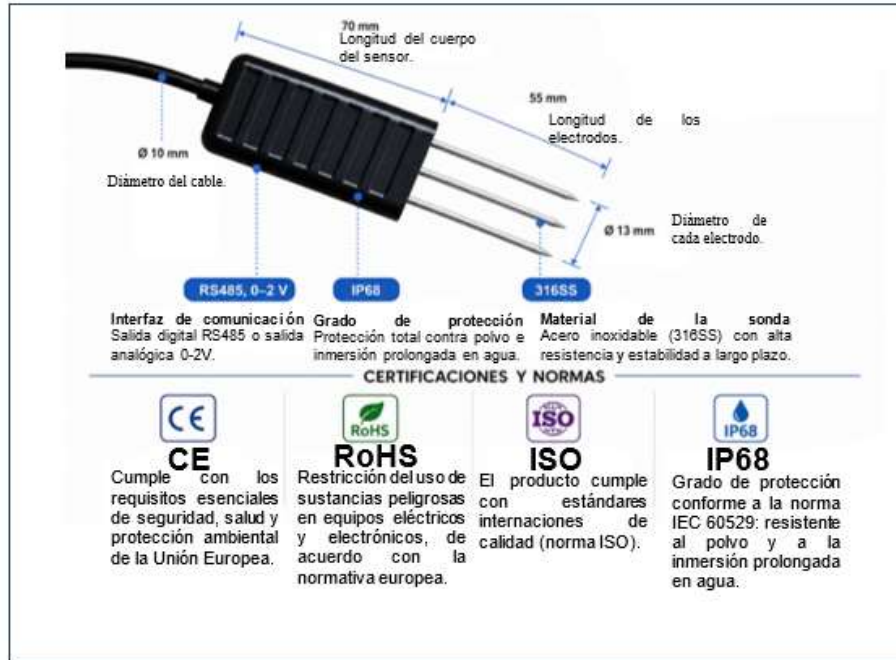
La **Tabla 1** presenta la asignación funcional de los GPIO y las interfaces de comunicación utilizados por la placa TTGO T-SIM7000G. Esta información facilita la comprensión de las conexiones físicas entre los diferentes componentes que conforman la arquitectura del sistema IoT.

3.3. Sensor NPK industrial

La adquisición de las variables del suelo se realizó mediante un sensor NPK industrial diseñado para medir simultáneamente nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Este dispositivo constituye la fuente primaria de datos del sistema, debido a que genera lecturas digitales asociadas con las concentraciones de estos macronutrientes. Posteriormente, los datos son procesados y transmitidos por el nodo IoT.

La selección del sensor respondió a la necesidad de disponer de un dispositivo adecuado para su utilización en un entorno agrícola, con resistencia mecánica, estabilidad de lectura y compatibilidad con interfaces y protocolos industriales.

Figura 12. Sensor NPK industrial



Nota: Elaboración propia.

El sensor NPK constituye uno de los componentes principales del sistema de monitoreo desarrollado, debido a que permite obtener lecturas de las concentraciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) presentes en el suelo.

Como se observa en la **Figura 12**, el dispositivo presenta un diseño compacto y robusto que favorece su instalación en el suelo. Sus electrodos están fabricados en acero inoxidable AISI (316SS), material que presenta una elevada resistencia a la corrosión y a las condiciones de humedad propias del entorno agrícola.

3.3.1. Especificaciones técnicas del sensor NPK

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas del sensor NPK empleado en el sistema de monitoreo desarrollado.

Tabla 2. Parámetros técnicos del sensor NPK

Característica	Especificación
Variable medida	Nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K).
Tecnología de comunicación	RS485 (Modbus RTU).
Salida alternativa	Analógica de 0–2 V (según el modelo).
Material de los electrodos	Acero inoxidable AISI 316 (316SS).
Longitud del cuerpo del sensor	70 mm
Longitud de los electrodos	55 mm
Diámetro del cable	10 mm
Grado de protección	IP68
Certificaciones	CE y RoHS
Aplicación	Monitoreo periódico de nutrientes del suelo.

Nota: Elaboración propia.

De acuerdo con las especificaciones presentadas en la **Tabla 2**, el sensor NPK posee características compatibles con los requerimientos del sistema de monitoreo desarrollado. Su interfaz digital permitió efectuar lecturas periódicas gestionadas por el firmware, lo que favorece la adquisición de datos que posteriormente son procesados y transmitidos para realizar el monitoreo remoto de las concentraciones de N, P y K en el suelo.

El sensor presenta un grado de protección IP68, conforme a la clasificación establecida en la norma IEC 60529. Esta clasificación indica protección total contra el ingreso de polvo y protección frente a la inmersión en agua bajo las condiciones especificadas por el fabricante. Estas características favorecen su utilización en el suelo durante las actividades de monitoreo.

3.3.2. Comunicación mediante la interfaz RS485 y el protocolo Modbus RTU

A diferencia de los sensores con salida analógica simple, el sensor NPK seleccionado utiliza la interfaz física RS485 y el protocolo Modbus RTU. La señalización diferencial de RS485 presenta una mayor resistencia frente al ruido electromagnético, lo que favorece la transmisión de los datos desde el sensor hacia la unidad de procesamiento en aplicaciones de campo.

El protocolo Modbus RTU proporciona una estructura definida para el intercambio de datos, debido a que permite consultar registros específicos del sensor mediante un esquema ordenado de solicitud y respuesta. Esta configuración facilita la adquisición organizada de los valores de N, P y K y su posterior incorporación al flujo de telemetría del sistema.

3.3.3. Robustez mecánica y grado de certificación IP68

El despliegue realizado en la sucursal UPSE Manglaralto requirió que el sensor NPK pueda utilizarse en condiciones de humedad, contacto con el suelo y exposición a condiciones ambientales variables. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, el dispositivo seleccionado presenta un grado de protección IP68, que indica protección total contra el ingreso de polvo y protección frente a la inmersión en agua bajo las condiciones establecidas para el equipo. Estas características favorecen su utilización en aplicaciones agrícolas *in situ*.

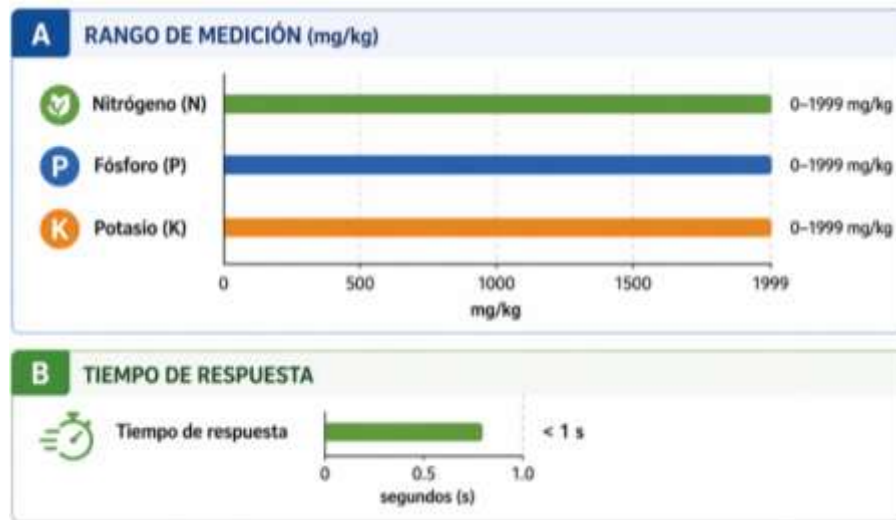
La construcción mecánica del sensor también se consideró durante el proceso de selección. En este sentido, su elección no se fundamentó únicamente en su capacidad para obtener valores de N, P y K, sino también en sus características físicas y en su compatibilidad con la arquitectura de telemetría propuesta para el entorno rural.

3.3.4. Parámetros de medición y resolución técnica

De acuerdo con sus especificaciones técnicas, el sensor NPK seleccionado dispone de rangos de medición para obtener las concentraciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en el suelo. Estos rangos se consideraron durante la selección del dispositivo para su incorporación al sistema propuesto.

La **Figura 13** presenta de manera resumida el rango de medición de N, P y K, así como el tiempo de respuesta especificado para el sensor NPK.

Figura 13. Rango de medición y tiempo de respuesta del sensor NPK



Nota: Elaboración propia.

3.4. Interfaz de adaptación de señales: transceptor MAX485

Para establecer la comunicación entre el ESP32 de la placa TTGO T-SIM7000G y el sensor NPK industrial con interfaz RS485, se incorporó un transceptor MAX485. Este componente adapta las señales eléctricas diferenciales de RS485 a los niveles lógicos requeridos para la comunicación con el microcontrolador, lo que permite el intercambio de datos entre ambos subsistemas.

3.4.1. Conversión de niveles lógicos

La comunicación entre el sensor NPK industrial y el ESP32 requirió adaptar sus señales eléctricas. El sensor empleó la interfaz RS485, basada en señalización diferencial, mientras que la UART del ESP32 operó con niveles lógicos de 3,3 V. Debido a esta diferencia, ambos dispositivos no podían conectarse directamente sin un circuito de adaptación.

Para establecer la comunicación, se incorporó el transceptor MAX485, encargado de convertir las señales lógicas de la UART en señales diferenciales RS485 y efectuar el proceso inverso durante la recepción. El ESP32 generó las solicitudes Modbus RTU mediante la UART;

el MAX485 las transmitió hacia el sensor a través de RS485 y adaptó las respuestas recibidas para que pudieran ser procesadas por el microcontrolador.

La compatibilidad entre la salida RO del MAX485 y los GPIO del ESP32 dependió de la tensión de alimentación y de las características eléctricas de los componentes. Por ello, fue necesario comprobar que la tensión aplicada a las entradas del ESP32 no superara el valor máximo admitido por el fabricante.

Tabla 3. Comparación entre los estándares RS485 y UART TTL utilizados en la propuesta

Característica	RS485	UART TTL (ESP32)
Tipo de señal	Diferencial (A/B)	Niveles lógicos TTL (0–3,3 V)
Medio de transmisión	Par trenzado	Conexión directa entre dispositivos
Distancia de comunicación	Hasta 1200 m	Generalmente menor a 3 m
Inmunidad al ruido electromagnético	Alta	Baja
Velocidad de transmisión	Hasta 10 Mbps (según la distancia)	Dependiente del microcontrolador y la UART
Aplicación en la propuesta	Comunicación entre el sensor NPK y el MAX485	Comunicación entre el MAX485 y el ESP32
Conversión requerida	Sí, mediante transceptor MAX485	No aplica

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 3** presenta las diferencias entre la interfaz RS485 utilizada por el sensor NPK y la interfaz UART con niveles lógicos de 3,3 V empleada por el ESP32. Debido a estas diferencias eléctricas y de señalización, fue necesario incorporar el transceptor MAX485 como elemento de adaptación para establecer la comunicación entre ambos dispositivos.

En consecuencia, la adaptación de las señales mediante el transceptor MAX485 constituye un elemento necesario dentro de la arquitectura del nodo sensor, debido a que permite intercambiar

las solicitudes y respuestas correspondientes al protocolo Modbus RTU entre el sensor NPK y el ESP32.

3.4.2. Gestión de comunicación semidúplex

La comunicación mediante RS485 se implementó en este proyecto bajo un esquema semidúplex, por lo que los procesos de transmisión y recepción se gestionan secuencialmente. El transceptor MAX485 permite efectuar esta conmutación mediante sus pines de control DE y RE, mientras que el firmware alterna entre los estados de transmisión y recepción de acuerdo con el ciclo de consulta definido para el sensor NPK.

Esta configuración permite coordinar el intercambio de solicitudes y respuestas mediante Modbus RTU y reducir el riesgo de colisiones durante la comunicación.

3.4.3. Inmunidad al ruido en entornos agrícolas

Una de las ventajas de utilizar la interfaz RS485 y el transceptor MAX485 es la señalización diferencial, que presenta una mayor resistencia frente al ruido electromagnético que las señales no diferenciales. Esta característica resulta relevante en entornos de campo donde el cableado puede encontrarse expuesto a fuentes de interferencia.

La señalización diferencial contribuye a reducir el efecto del ruido eléctrico durante la transmisión de los datos desde el sensor NPK hasta el microcontrolador. No obstante, el desempeño del enlace también depende de la longitud y las características del cable, la conexión a tierra, la terminación del bus y las condiciones de instalación.

3.5. Sistema de alimentación y gestión energética

La operación in situ del nodo requiere un sistema de alimentación autónomo que permita el funcionamiento del hardware sin depender permanentemente de una infraestructura eléctrica

convencional. Para ello, la propuesta incorpora un subsistema fotovoltaico compuesto por un panel solar monocristalino de 10 W y una batería de 12 V y 15 Ah. Esta configuración permite almacenar la energía generada para ejecutar ciclos periódicos de medición, procesamiento y transmisión.

3.5.1. Sistema fotovoltaico

El panel solar constituye la fuente primaria de captación energética del sistema. Su función consiste en generar energía para recargar la batería de almacenamiento. En la propuesta, este componente forma parte de la estrategia de alimentación fotovoltaica orientada a favorecer la autonomía del nodo durante su funcionamiento en el entorno rural.

Para implementar el prototipo, se seleccionó un panel solar monocristalino de 10 W, de acuerdo con los requerimientos energéticos del nodo IoT y las características técnicas del sistema de alimentación. El panel presenta una tensión en el punto de máxima potencia (V_{mp}) de 16 V, una corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp}) de 0,63 A, una tensión de circuito abierto (V_{oc}) de 19,2 V y una corriente de cortocircuito (I_{sc}) de 0,69 A. Estas especificaciones permiten su integración en un sistema de almacenamiento con una batería de 12 V mediante un controlador de carga.

La energía generada por el panel es administrada mediante un controlador de carga PWM, encargado de regular el proceso de carga de la batería. Posteriormente, la energía almacenada es acondicionada mediante un convertidor DC-DC LM2596, que proporciona una tensión regulada de 5 V para alimentar la placa TTGO T-SIM7000G. Por su parte, el sensor NPK recibe alimentación directamente de la batería de 12 V, de acuerdo con sus requerimientos de operación.

Tabla 4. Especificaciones técnicas del panel solar utilizado

Parámetro	Especificación
Tecnología	Monocrystalino
Potencia máxima (Pmax)	10 W
Voltaje a máxima potencia (Vmp)	16 V
Corriente a máxima potencia (Imp)	0,63 A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	19,2 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	0,69 A
Sistema de trabajo	12 V
Dimensiones	350 × 235 × 15 mm
Longitud del cable	2,9 m
Tipo de conector	DC 5,5 × 2,1 mm
Función en la propuesta	Fuente primaria de energía para el nodo IoT

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 4** resume las principales características técnicas del panel solar. La selección del panel monocrystalino de 10 W respondió a criterios de disponibilidad comercial, compatibilidad eléctrica y requerimientos energéticos del sistema.

El subsistema fotovoltaico se diseñó para suministrar energía al nodo sensor y recargar la batería durante los periodos de radiación solar, con el propósito de respaldar los ciclos periódicos de medición, procesamiento y transmisión.

3.5.2. Controlador solar PWM

El controlador solar de modulación por ancho de pulso (PWM, *Pulse Width Modulation*) gestionó la transferencia de energía entre el panel fotovoltaico monocrystalino de 10 W y la batería sellada de 12 V y 15 Ah. Este dispositivo reguló el proceso de carga de acuerdo con su configuración y con las características eléctricas de la batería.

Durante el funcionamiento del sistema, el controlador recibió la energía generada por el panel y administró la carga de la batería. Posteriormente, la energía almacenada se suministró

directamente al sensor NPK y al convertidor DC-DC encargado de proporcionar la tensión regulada requerida por la placa TTGO T-SIM7000G.

Tabla 5. Especificaciones técnicas del controlador solar PWM utilizado

Parámetro	Especificación
Tipo de controlador	PWM (Pulse Width Modulation)
Voltaje nominal	12 V / 24 V
Corriente máxima	30 A
Tipo de batería compatible	Plomo-ácido, Gel y Litio
Protección contra sobrecarga	Sí
Protección contra descarga profunda	Sí
Protección contra cortocircuito	Sí
Protección por inversión de polaridad	Sí
Función dentro de la propuesta	Regulación de la carga de la batería y gestión energética

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 5** presenta las principales características técnicas del controlador solar PWM implementado en el sistema de alimentación del nodo IoT. Estas funciones permiten gestionar el proceso de carga y aplicar las protecciones eléctricas especificadas para el dispositivo.

3.5.3. Sistema de almacenamiento energético

El sistema de almacenamiento energético estuvo conformado por una batería sellada de plomo-ácido de 12 V y 15 Ah, equivalente a una energía nominal de 180 Wh. Su función consistió en almacenar la energía generada por el panel solar y suministrarla al nodo sensor durante las actividades de monitoreo en campo.

La batería se cargó mediante el controlador solar PWM y suministró energía a los subsistemas del nodo. El sensor NPK recibió una tensión de 12 V, mientras que la placa TTGO T-SIM7000G se alimentó con 5 V mediante un convertidor DC-DC. Esta configuración se diseñó

para respaldar los ciclos periódicos de adquisición, procesamiento y transmisión durante los periodos de baja o nula generación fotovoltaica.

Tabla 6. Especificaciones técnicas de la batería utilizada

Parámetro	Especificación
Tipo de batería	Batería sellada de plomo-ácido
Voltaje nominal	12 V
Capacidad	15 Ah
Energía almacenada	180 Wh
Método de carga	Controlador PWM
Aplicación	Sistema de almacenamiento energético
Función dentro de la propuesta	Alimentación continua del nodo IoT y del sensor NPK

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 6** presenta las características principales de la batería empleada como sistema de almacenamiento energético del nodo IoT. Su capacidad nominal de 15 Ah permite almacenar la energía generada por el panel solar y suministrarla a los componentes durante los periodos de baja o nula generación fotovoltaica, lo que favorece la operación autónoma del sistema.

3.5.4. Convertidor DC-DC LM2596

El convertidor DC-DC LM2596 se utilizó para reducir la tensión de 12 V suministrada por la batería hasta una salida regulada de 5 V, requerida para alimentar la placa TTGO T-SIM7000G. De esta manera, la placa proporcionó internamente los niveles de tensión necesarios para el ESP32, el módem SIM7000G y sus demás circuitos integrados.

El LM2596 emplea una topología reductora basada en conmutación, que permite obtener una tensión continua de salida inferior a la tensión de entrada. Su eficiencia depende de la diferencia entre las tensiones de entrada y salida, la corriente demandada, la frecuencia de conmutación y las características del módulo utilizado. Para esta implementación, la salida del convertidor se ajustó a 5 V antes de conectarla a la placa.

3.5.5. Sistema de protección eléctrica

El sistema de alimentación incorporó un fusible para proteger el cableado y los componentes frente a sobre corrientes y cortocircuitos. Este dispositivo contiene un elemento conductor que se funde cuando la corriente supera su valor nominal durante el tiempo definido por su curva de operación, lo que abre el circuito e interrumpe el suministro eléctrico.

El fusible se instaló entre el terminal positivo de la batería de 12 V y 15 Ah y el circuito de distribución de energía. Esta ubicación permitió desconectar las cargas alimentadas por la batería, entre ellas el sensor NPK, el convertidor DC-DC LM2596 y la placa TTGO T-SIM7000G. Sin embargo, el fusible no proporciona protección específica frente a sobretensiones, inversión de polaridad o descargas profundas de la batería.

Figura 14. Fusible de vidrio de 2 A, 250 V y 20 mm empleado como elemento de protección del sistema de alimentación



Nota: Elaboración propia.

En la **Figura 14** se muestra el fusible empleado como elemento de protección del sistema de alimentación. Este dispositivo se instaló en el conductor positivo conectado a la batería de 12 V, con el propósito de interrumpir el flujo de corriente en caso de sobre corriente o cortocircuito y reducir el riesgo de daños en el cableado y en los componentes del nodo sensor.

3.5.6. Autonomía energética del nodo IoT

La autonomía energética del sistema dependió de la generación fotovoltaica, la capacidad útil de la batería y la estrategia de gestión implementada en el firmware. Durante el modo de suspensión profunda, el ESP32 redujo su actividad entre los ciclos de medición y reactivó las funciones requeridas para la adquisición, el procesamiento y la transmisión de los datos.

La operación periódica del nodo se respaldó mediante la combinación del panel solar, la batería sellada de 12 V y 15 Ah y la gestión del consumo energético. La autonomía efectiva debe determinarse a partir de la energía consumida durante cada ciclo, la capacidad útil de la batería, la energía generada por el panel solar y las pérdidas introducidas por el controlador, el convertidor DC-DC y los demás componentes.

Con el propósito de sintetizar los elementos físicos que conforman la propuesta técnica, la **Tabla 7** presenta un resumen del hardware seleccionado, la función de cada componente y su justificación técnica.

Tabla 7. Resumen del hardware seleccionado para la propuesta técnica

Componente	Función dentro del sistema	Justificación técnica
TTGO T-SIM7000G	Procesamiento, comunicación celular y georreferenciación	Integra ESP32, SIM7000G y GNSS en una sola placa
Sensor NPK RS485/IP68	Medición de nitrógeno, fósforo y potasio	Permite monitoreo in situ con comunicación industrial
MAX485	Adaptación de señales RS485 a TTL	Permite la adaptación entre la interfaz RS485 y la UART del ESP32
Panel solar	Fuente primaria de energía	Contribuye a la autonomía energética del nodo
Batería 12 V y 15 Ah	Almacenamiento energético	Mantiene operatividad en ausencia de radiación solar
Caja estanca IP55	Protección física de la electrónica	Favorece despliegue in situ en entorno agrícola

Nota: Elaboración propia.

3.6. Arquitectura del firmware

El firmware del nodo sensor funciona mediante ciclos que comprenden la adquisición de datos, el procesamiento local, la georreferenciación mediante GNSS, la transmisión de la telemetría hacia la nube y la gestión energética mediante el modo de suspensión profunda (deep sleep).

El diseño de estas etapas se orienta a reducir el consumo energético, organizar los datos adquiridos y favorecer la operación autónoma del nodo sensor bajo las condiciones del entorno agrícola rural.

3.6.1. Pseudocódigo del nodo sensor

Inicio

Inicializar interfaces:

- Microcontrolador ESP32
- Transceptor MAX485
- GNSS integrado del módulo SIM7000G

Establecer conexión celular mediante LTE-M/NB-IoT

Activar antena GNSS y sincronizar hora

Mientras nodo activo:

Leer sensor NPK mediante RS485/Modbus RTU

Procesar y organizar los datos expresados en mg/kg

Obtener coordenadas GNSS (latitud, longitud, altitud)

Empaquetar los datos en formato JSON

Transmitir datos mediante MQTT a la plataforma Blynk IoT

Registrar métricas (RSSI/latencia) y contabilizar paquetes para calcular posteriormente el PDR.

Activar modo suspensión profunda por un intervalo predefinido

Fin Mientras

Fin

3.6.2. Etapas de funcionamiento del firmware

El funcionamiento del firmware se estructura en las siguientes etapas:

- i. **Inicialización de las interfaces:** se configuran las interfaces de comunicación utilizadas por el transceptor MAX485, el sensor NPK y el sistema GNSS integrado. Asimismo, se inicializa el módem celular para establecer la conexión mediante LTE-M o NB-IoT, según la tecnología de acceso disponible.
- ii. **Lectura y procesamiento de los datos:** el microcontrolador ESP32 genera las solicitudes Modbus RTU y consulta los registros correspondientes a N, P y K. Posteriormente, procesa y organiza los valores recibidos para incorporarlos al paquete de telemetría.
- iii. **Georreferenciación:** el sistema GNSS integrado en el módulo SIM7000G proporciona los datos de latitud, longitud y altitud asociados con cada medición, lo que permite georreferenciar los registros de telemetría.

- iv. **Empaquetado y transmisión:** los datos se organizan en una estructura JSON y se transmiten mediante MQTT hacia la plataforma Blynk IoT. Esta estructura permite integrar las variables agronómicas, las coordenadas geográficas y los parámetros de conectividad en un mismo mensaje.
- v. **Registro de los parámetros de QoS:** durante el proceso de comunicación, se registra la intensidad de la señal recibida (RSSI), se mide la latencia y se contabilizan los paquetes enviados y recibidos para calcular la tasa de entrega de paquetes (PDR). Estos parámetros se utilizan para evaluar el desempeño del enlace inalámbrico.
- vi. **Gestión energética:** el nodo alterna entre los periodos de actividad y el modo de suspensión profunda (deep sleep) para reducir el consumo energético entre los ciclos de medición. Esta estrategia, junto con el panel solar de 10 W y la batería de 12 V y 15 Ah, contribuye a la operación autónoma del sistema en campo.

3.6.3. Verificación funcional del firmware

Antes de integrar el sensor NPK y habilitar la transmisión de telemetría, se realizó una prueba preliminar de la placa TTGO T-SIM7000G, el microcontrolador ESP32 y el receptor GNSS. La placa fue reconocida mediante un puerto serial en Arduino IDE, lo que permitió cargar y ejecutar el firmware de prueba.

Inicialmente, se utilizó el programa Blink para comprobar la compilación, la carga del código y el funcionamiento básico de la placa mediante el LED. Posteriormente, se ejecutó un programa de lectura GNSS y se visualizaron en el monitor serial los datos de latitud, longitud, altitud y número de satélites detectados. Esta prueba permitió verificar la ejecución del código, la

comunicación serial y la recepción preliminar de información geográfica antes de incorporar el sensor NPK y la transmisión mediante MQTT hacia Blynk IoT.

Tabla 8. Ejemplo de coordenadas y satélites captados durante la prueba preliminar

N.º	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Satélites
1	-2.123456	-79.123456	48	8
2	-2.123457	-79.123457	48	8
3	-2.123458	-79.123458	48	7
4	-2.123459	-79.123459	48	8
5	-2.123460	-79.123460	48	7

Nota: Elaboración propia.

Los resultados de esta fase preliminar permitieron verificar la ejecución del *firmware*, la comunicación serial y la recepción de información GNSS. Estas comprobaciones sirvieron como base para integrar posteriormente el sensor NPK y evaluar los parámetros de calidad de servicio (QoS) durante las pruebas en campo.

3.6.4. Gestión de adquisición y transmisión de datos

El *firmware* del nodo IoT gestionó secuencialmente la adquisición, el procesamiento y la transmisión de los datos. En cada ciclo, coordinó la lectura del sensor NPK, la incorporación de las coordenadas geográficas y el envío del paquete de telemetría hacia Blynk IoT.

Al comenzar el ciclo, el ESP32 envió una solicitud Modbus RTU al sensor NPK mediante la interfaz RS485. Para ello, el *firmware* controló las líneas DE y /RE del transceptor MAX485 mediante el GPIO25, alternando entre los modos de transmisión y recepción. Una vez recibida la respuesta, los valores de N, P y K se interpretaron y almacenaron temporalmente en las variables del programa.

Posteriormente, el *firmware* conformó el paquete de telemetría con los valores de N, P y K, las coordenadas GNSS y los parámetros definidos en la estructura del mensaje. El módem

SIM7000G estableció la conexión celular y los datos se transmitieron mediante MQTT hacia Blynk IoT. Después de completar el envío, el sistema permaneció en suspensión durante el intervalo programado antes de comenzar un nuevo ciclo, con el propósito de controlar la frecuencia de medición y reducir el consumo energético.

3.7. Integración e implementación del sistema de telemetría IoT

La etapa de integración e implementación comprendió el montaje de los componentes electrónicos, la configuración de los servicios de comunicación y la puesta en funcionamiento del nodo IoT desarrollado para el monitoreo georreferenciado de N, P y K en el suelo. Durante esta fase, se integraron los subsistemas de adquisición de datos, procesamiento local, comunicación inalámbrica y alimentación autónoma. Asimismo, se verificó la comunicación entre los elementos que conformaron la arquitectura propuesta.

El proceso de implementación se inició con el diseño del esquema electrónico y la elaboración de la placa de circuito impreso. Posteriormente, se efectuaron el ensamblaje físico del prototipo y la integración del sistema de alimentación fotovoltaica. También se configuraron el servidor MQTT (*bróker*), la plataforma Blynk IoT y el sistema GNSS para establecer el flujo de adquisición, transmisión y visualización remota de la información.

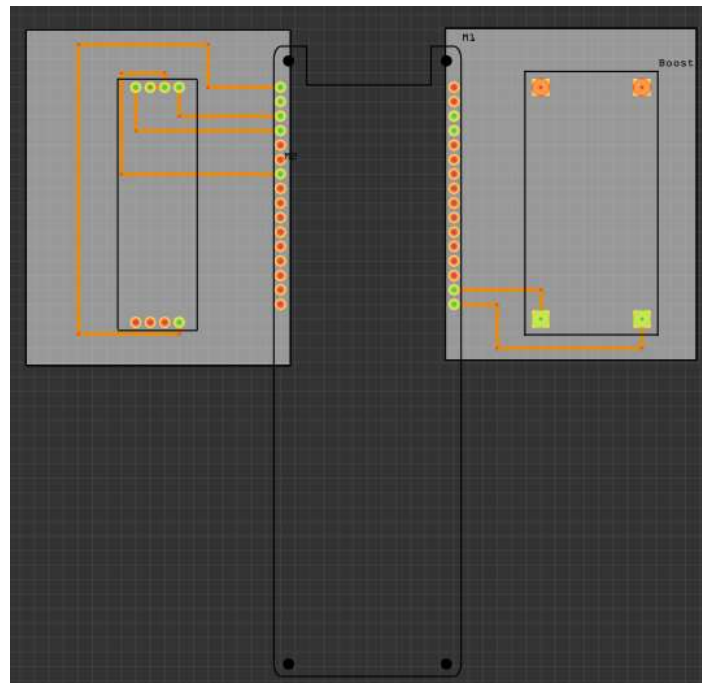
La integración de estos subsistemas permitió disponer de un nodo IoT capaz de adquirir los datos proporcionados por el sensor NPK, asociarlos con las coordenadas geográficas y transmitirlos mediante la red celular hacia la plataforma de monitoreo. El sistema integrado constituyó la base experimental para efectuar las pruebas de validación descritas en los apartados siguientes.

3.7.1. Diseño y simulación de la PCB

La placa de circuito impreso (PCB) se diseñó mediante EasyEDA para integrar las conexiones de los módulos de comunicación y del sistema de alimentación del nodo IoT. Durante el diseño, se definieron las dimensiones de la placa, la ubicación de los componentes y conectores, las pistas de alimentación y las líneas de comunicación UART y RS485.

Antes de fabricar la PCB, se verificaron visualmente la distribución de los componentes, el enrutamiento de las pistas y la compatibilidad mecánica de los conectores, con el propósito de identificar posibles errores de diseño.

Figura 15. PCB del nodo IoT



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 15** muestra la distribución de los componentes, las interfaces disponibles y la ubicación de los conectores en la PCB. Esta representación se utilizó para verificar el espacio disponible y la compatibilidad mecánica de los elementos antes de fabricar la placa.

3.7.2. Fabricación y ensamblaje del nodo IoT

Una vez finalizado el diseño de la placa de circuito impreso, se fabricó y ensambló el nodo IoT con los componentes definidos en la arquitectura. Durante este proceso, se verificó la ubicación de cada elemento según el trazado de la PCB.

Posteriormente, se conectaron el sensor NPK, el transceptor MAX485, el módulo SIM7000G con su antena, el sistema de alimentación y los conectores externos.

Figura 16. Proceso de fabricación de la placa PCB de FR-4



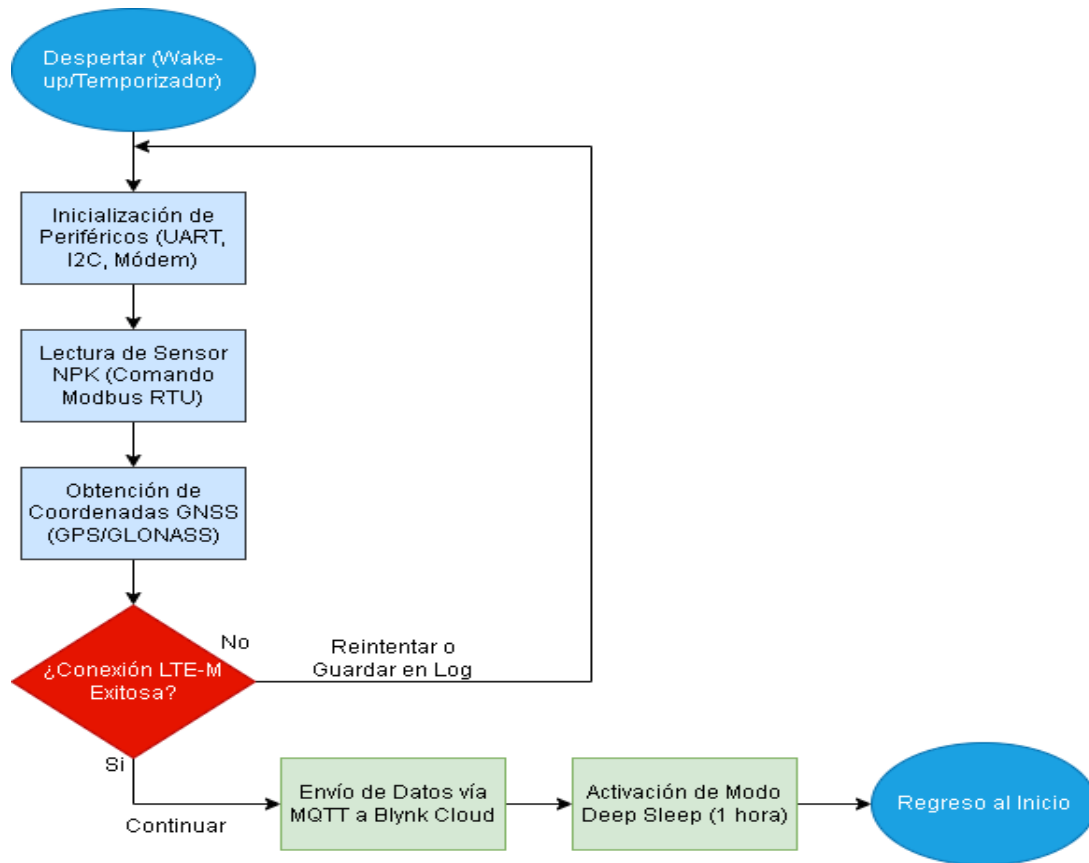
Nota: Elaboración propia.

En la **Figura 16** se presentan las principales etapas del proceso de fabricación y ensamblaje. Estas comprendieron la preparación de la PCB, la soldadura de los componentes, la instalación del cableado y el ensamblaje final del prototipo. Este proceso permitió preparar el nodo IoT para las pruebas funcionales y la posterior validación en campo.

3.7.3. Algoritmo de funcionamiento

Una vez establecidas las especificaciones del hardware seleccionado, se definió la lógica de funcionamiento del firmware del nodo sensor.

Figura 17. Diagrama de flujo de la lógica de control y ciclo de operación del firmware.



Nota: Elaboración propia.

Como se muestra en la **Figura 17**, el sistema funciona mediante un ciclo de operación orientado a reducir el consumo energético. El proceso comienza con la activación del nodo mediante un temporizador interno. Posteriormente, se inician las interfaces de comunicación y el módem SIM7000G.

A continuación, el ESP32 consulta los registros del sensor NPK mediante Modbus RTU y obtiene las coordenadas proporcionadas por el sistema GNSS para georreferenciar la telemetría. Una vez establecida la conexión celular, los datos se organizan y se transmiten mediante MQTT hacia el servidor de Blynk Cloud.

Finalmente, el sistema entra en modo de suspensión profunda (deep sleep) durante una hora antes de iniciar un nuevo ciclo de monitoreo. Esta estrategia contribuye a reducir el consumo de energía almacenada en la batería de 12 V y 15 Ah.

3.7.4. Etapas del proceso de implementación

Para garantizar la integridad de la información recolectada en la sucursal UPSE Manglaralto, el firmware del nodo ejecuta las siguientes fases operativas:

- *Inicialización.*

En esta etapa, se activan las interfaces necesarias para la operación del sistema, incluyendo los canales seriales que se emplean para la comunicación con el módem SIM7000G y con el sensor NPK mediante el transceptor MAX485. De igual manera, se inicia el procedimiento de registro en la red y preparación de periféricos del nodo para el ciclo de adquisición.

- *Adquisición y georreferenciación.*

Una vez que se establece la fase de operación, el sistema se conecta con el sensor NPK industrial mediante Modbus RTU para obtener los valores de nitrógeno, fósforo y potasio. Paralelamente, el receptor GNSS aporta las coordenadas geográficas asociadas a cada medida, de forma que la telemetría generada queda asociada espacialmente al punto de medición.

- *Transmisión y reposo.*

Una vez que se comprueba que el enlace inalámbrico está disponible, el nodo empaqueta la información y la publica mediante MQTT sobre la red móvil. Posteriormente y para preservar la autonomía energética del sistema, el microcontrolador desactiva los módulos no esenciales y pasa a estado de Deep Sleep hasta el próximo ciclo de medición.

3.7.5. Arquitectura jerárquica y flujo de protocolos

Con el propósito de representar la organización funcional del sistema, desde la adquisición de los datos hasta su visualización remota, se presenta la arquitectura jerárquica de cuatro capas y los protocolos empleados en el flujo de telemetría del nodo sensor.

Figura 18. Arquitectura jerárquica de 4 capas y flujo de protocolos de telemetría.



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 18** presenta la infraestructura de comunicación del sistema. La capa de percepción adquiere los valores de N, P y K mediante el sensor NPK, cuyos datos se transmiten hacia el ESP32 a través de la interfaz RS485. La capa de borde realiza el procesamiento local y organiza el paquete de telemetría mediante el SoC ESP32.

La capa de red establece la conexión celular mediante LTE-M o NB-IoT, según la disponibilidad de la red. La plataforma Blynk IoT recibe y organiza la información para su visualización remota mediante el dispositivo móvil del usuario.

3.7.5.1. Estrategias de eficiencia energética

La estrategia de control implementada se orienta a reducir el consumo energético del nodo sensor. El ESP32 permanece activo durante las etapas de inicialización, adquisición, georreferenciación y transmisión. Una vez finalizadas estas etapas, el microcontrolador entra en modo de suspensión profunda (deep sleep) hasta el inicio del siguiente ciclo.

Esta estrategia reduce el consumo del ESP32 entre los ciclos de operación. En conjunto con el panel solar de 10 W y la batería de 12 V y 15 Ah, contribuye a la autonomía energética del sistema durante el despliegue in situ. Por tanto, la lógica del firmware constituye un elemento relevante para la operación del nodo en el entorno rural.

3.8. Validación preliminar del nodo sensor

Antes de integrar completamente el sensor NPK y la transmisión de telemetría, se realizó una prueba funcional de la placa TTGO T-SIM7000G, basada en el microcontrolador ESP32 y equipada con el módulo SIM7000G y el sistema GNSS. Esta etapa tuvo como objetivo verificar el reconocimiento de la placa, la carga y ejecución del firmware, la comunicación serial y la recepción de la información geográfica.

Durante la prueba, el sistema operativo Windows asignó al dispositivo el puerto COM5, el cual fue detectado mediante Arduino IDE. Posteriormente, se cargó el programa de verificación Blink para comprobar la compilación, la transferencia del código al microcontrolador y su ejecución en la placa.

Una vez comprobada la ejecución del programa, se realizó una prueba de lectura GNSS. Los datos de latitud, longitud, altitud y número de satélites detectados se visualizaron mediante el monitor serial. Esta prueba permitió verificar la comunicación UART, el procesamiento de la información de posicionamiento y la obtención de datos geográficos antes de incorporar el sensor NPK y la transmisión mediante MQTT hacia la plataforma Blynk IoT.

Tabla 9. *Prueba funcional preliminar del nodo IoT realizada en Manglaralto.*

N.º	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Satélites
1	-2.123456	-79.123456	48	8
2	-2.123457	-79.123457	48	8
3	-2.123458	-79.123458	48	7
4	-2.123459	-79.123459	48	8
5	-2.123460	-79.123460	48	7

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 9** presenta los resultados de las pruebas preliminares de programación y recepción de datos GNSS. Los registros obtenidos permitieron verificar la ejecución del código en el microcontrolador, la comunicación mediante la interfaz serial y la recepción de información geográfica.

Esta etapa permitió comprobar, de manera preliminar, el funcionamiento de la unidad de procesamiento y del sistema de georreferenciación. Asimismo, estableció una base técnica para la posterior integración del sensor NPK, la transmisión de telemetría y la evaluación de parámetros de calidad de servicio del enlace inalámbrico.

3.8.1. Selección del punto MAS06 como referencia experimental

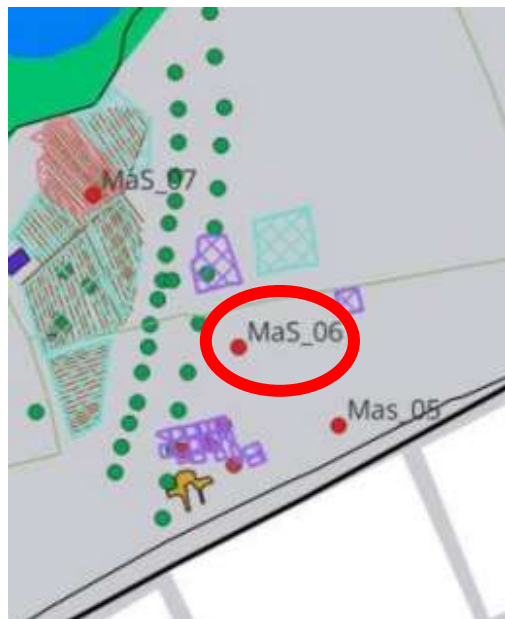
El punto de muestreo MAS06 se seleccionó como referencia para validar el funcionamiento del nodo IoT en condiciones reales de campo. Este punto se encuentra ubicado en las instalaciones de la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), sede Manglaralto. Su selección

respondió a la disponibilidad de información previa sobre la fertilidad del suelo, lo que permitió comparar las mediciones obtenidas mediante el sensor NPK con los resultados del análisis de laboratorio.

La selección de un único punto experimental permitió mantener condiciones de muestreo similares, como la compactación y el contenido de agua del suelo, durante el proceso de validación, así como reducir la influencia de la variabilidad espacial. Además, el lugar permitió instalar temporalmente el nodo sensor, realizar las mediciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), y registrar las coordenadas geográficas mediante el sistema GNSS integrado en la placa TTGO T-SIM7000G.

El punto MAS06 se georreferenció mediante el receptor GNSS integrado en el nodo IoT, con el propósito de garantizar la trazabilidad espacial de las mediciones.

Figura 19. Ubicación del punto experimental MAS06 en la sede UPSE Manglaralto.



Nota: Adaptado de [9]

En la **Figura 19**, el círculo rojo indica la ubicación del punto MAS06, seleccionado como referencia experimental para la validación del nodo IoT. En este sitio se efectuaron la toma de muestras de suelo, el registro de coordenadas geográficas mediante el sistema GNSS y la comparación entre las mediciones obtenidas con el sensor NPK y los resultados del análisis de laboratorio. La selección de un único punto permitió mantener la consistencia metodológica durante el desarrollo de las pruebas experimentales.

En consecuencia, el punto MAS06 constituyó una referencia experimental y espacial para la adquisición de datos, la georreferenciación y las pruebas de validación en condiciones de campo. Esta metodología permitió comparar los datos obtenidos mediante el nodo IoT con los valores reportados en el informe de laboratorio y contribuyó a la validación del sistema propuesto.

3.8.2. Recolección de muestras de suelo

En el sitio experimental MAS06, ubicado en el campus UPSE Manglaralto (Ecuador), se recolectaron muestras de suelo de acuerdo con un procedimiento para evitar la degradación de las muestras y la parcialidad de estas durante la validación del nodo IoT. Antes de la extracción, el sitio fue georreferenciado mediante el sistema GNSS integrado en el nodo sensor, de modo que existiera correspondencia entre el punto muestreado y las coordenadas geográficas registradas durante la captura de datos.

La toma de muestras de suelo se realizó con herramientas manuales adecuadas, procurando minimizar cambios en sus propiedades fisicoquímicas. Luego, se transfirió a un contenedor limpio y posteriormente se colocó en una bolsa plástica debidamente rotulada, evitando la contaminación cruzada que pudiera alterar sus propiedades hasta llegar al laboratorio para su análisis.

Una parte de la muestra se midió con un sensor NPK de fábrica y la otra mitad se envió al laboratorio para la determinación de las concentraciones de nitrógeno (N), fósforo y potasio mediante métodos clásicos. Este proceso garantizó que estas mediciones correspondieran al mismo punto de muestreo, permitiendo la comparación de resultados entre el laboratorio y el nodo IoT.

Figura 20. Proceso de recolección de la muestra de suelo en el punto MAS06.



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 20** demuestra el procedimiento para la recolección de muestras de suelo en el punto MAS06. La muestra recolectada se asignó tanto a las mediciones del sensor NPK como al análisis en laboratorio, garantizando que ambas evaluaciones se realizaran sobre el mismo material y permitiendo una comparación imparcial de los resultados obtenidos mediante cualquiera de los dos métodos.

3.8.3. Evaluación comparativa del sensor NPK mediante análisis de laboratorio

Con el propósito de evaluar el desempeño del nodo IoT y comparar las mediciones del sensor NPK, se realizó el análisis químico de la muestra de suelo recolectada en el punto experimental MAS06 en un laboratorio especializado. Este procedimiento permitió obtener

valores de referencia correspondientes a las concentraciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K).

El análisis de laboratorio se efectuó a partir de la misma muestra empleada para las mediciones realizadas mediante el nodo IoT, por lo que ambas evaluaciones correspondieron a condiciones de muestreo similares. Esta metodología permitió reducir la influencia de la variabilidad espacial del suelo y establecer condiciones comparables para ambos procedimientos.

Los resultados reportados por el laboratorio se utilizaron como valores de referencia para evaluar el desempeño del sensor NPK. De esta manera, fue posible comparar las mediciones proporcionadas por el nodo IoT con los valores obtenidos mediante los métodos analíticos aplicados por el laboratorio.

Figura 21. Informe de resultados del análisis de laboratorio de la muestra de suelo.

Nº Laborat.	Identificación del Lote	pH	* NH ₄	* P	K
80576	CÓDIGO MAS 01 PROF 0.35	7.4 PN	12 B	11 M	1309 A
80577	CÓDIGO MAS 02 PROF 0.35	7.1 PN	11 B	7 B	1031 A
80578	CÓDIGO MAS 03 PROF 0.20	7.3 PN	12 B	7 B	932 A
80579	CÓDIGO MAS 04 PROF 0.25	6.6 PN	11 B	16 M	1279 A
80580	CÓDIGO MAS 05 PROF 0.32	7.6 LAI	18 B	22 A	1546 A
80581	CÓDIGO MAS 06 PROF 0.27	7.9 LAI	7 B	13 M	850 A

Nota: Tomado de [9]

En la **Figura 21** se presentan los resultados del análisis de laboratorio efectuado sobre la muestra de suelo recolectada en el punto experimental MAS06. Los valores de nitrógeno, fósforo y potasio se emplearon como referencia para evaluar el desempeño del sensor NPK en la medición de las concentraciones de estos macronutrientes.

Este procedimiento permitió comparar los valores registrados mediante el sensor NPK con los resultados obtenidos a partir de los métodos analíticos aplicados a la misma muestra. Los

resultados de esta comparación y el análisis de las diferencias entre ambos procedimientos se presentan en el capítulo IV.

3.9. Entorno de desarrollo e implementación del firmware

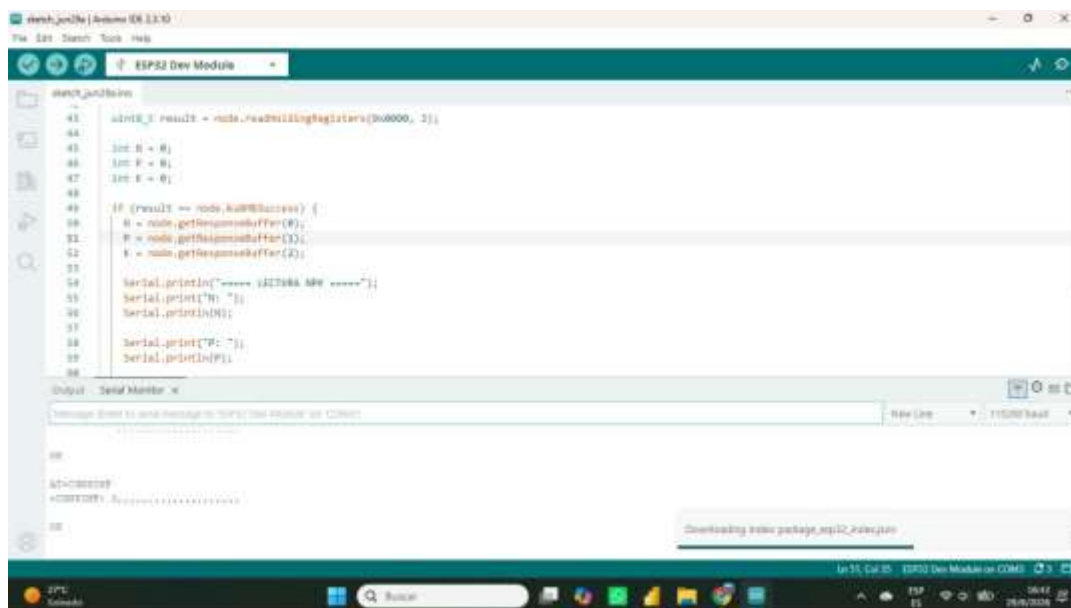
El firmware del nodo sensor se desarrolló mediante un conjunto de librerías de programación orientadas a la adquisición de datos, la comunicación serial con los periféricos, la georreferenciación, la gestión del enlace celular y la publicación de telemetría en la nube. Estas herramientas permitieron integrar de manera modular los subsistemas de medición, procesamiento local y transmisión inalámbrica de la arquitectura IoT propuesta. Asimismo, el entorno de desarrollo empleado permitió configurar la placa TTGO T-SIM7000G e implementar funciones de gestión energética, comunicación mediante Modbus RTU, procesamiento de datos GNSS y publicación de mensajes mediante MQTT.

3.9.1. Entorno de desarrollo

Para la programación del nodo se utilizó Arduino IDE, un entorno de desarrollo compatible con placas basadas en ESP32 que permitió compilar y cargar el firmware mediante una conexión USB-C, así como supervisar su ejecución a través del monitor serial. En este entorno, la lógica del sistema se organizó en bloques funcionales asociados con la inicialización del módem celular, la lectura del sensor NPK, la obtención de coordenadas geográficas y la transmisión de datos hacia la plataforma Blynk IoT. Esta estructura favoreció la legibilidad del código, la reutilización de funciones y su posterior ampliación.

El uso de Arduino IDE permitió integrar las tareas de programación, compilación, carga y verificación del firmware en un mismo entorno. Esto facilitó el desarrollo del sistema y la integración de los dispositivos que conformaron la arquitectura propuesta.

Figura 22. Entorno de desarrollo Arduino IDE empleado para la implementación del firmware del nodo IoT.



Nota: Elaboración propia.

En la **Figura 22** se presenta Arduino IDE, herramienta utilizada para desarrollar el firmware del nodo IoT. El código implementado gestiona la adquisición de datos mediante el sensor NPK, el procesamiento de las coordenadas geográficas obtenidas mediante el sistema GNSS y la transmisión de telemetría hacia la plataforma Blynk IoT mediante el protocolo MQTT. El entorno también permitió compilar y cargar el programa, así como supervisar su funcionamiento durante las pruebas experimentales mediante el monitor serial.

3.9.2. Librerías empleadas en el firmware

Con el propósito de identificar los recursos de *software* empleados en el desarrollo del *firmware*, se presentan las principales librerías utilizadas en la programación del nodo sensor, así como su función y aplicación dentro del proyecto.

Tabla 10. Librerías utilizadas en el desarrollo del firmware del nodo sensor

Librería	Función principal	Aplicación en el proyecto
TinyGSM	Gestión del módem celular SIM7000G	Establecimiento del enlace de datos sobre LTE-M/NB-IoT
PubSubClient	Implementación del protocolo MQTT	Publicación de telemetría hacia Blynk IoT Cloud
TinyGPSPlus	Procesamiento de datos GNSS	Obtención de latitud, longitud, fecha y hora
ModbusMaster	Comunicación Modbus RTU	Lectura de registros del sensor NPK sobre RS485
HardwareSerial	Comunicación serial UART	Interfaz entre ESP32, módem SIM7000G y adaptador MAX485
Wire	Comunicación I2C	Inicialización y soporte de periféricos
esp_sleep / funciones nativas del ESP32	Gestión de energía	Implementación del modo de suspensión profunda
Arduino Core para ESP32	Base de programación del microcontrolador	Configuración general del firmware y control de pines

Nota: Elaboración propia.

Como se observa en la **Tabla 10**, el firmware se desarrolló mediante un conjunto de librerías específicas orientadas a implementar las funciones principales del nodo IoT. Estas herramientas permitieron establecer la comunicación con el sensor NPK mediante Modbus RTU, procesar las coordenadas obtenidas mediante el sistema GNSS, gestionar la conexión celular a través del módulo SIM7000G y transmitir la telemetría mediante el protocolo MQTT. Asimismo, las librerías propias de la plataforma ESP32 proporcionaron funciones para configurar el hardware, gestionar los recursos del microcontrolador e implementar mecanismos de ahorro energético.

Las librerías seleccionadas permitieron organizar el firmware de manera modular, mediante la separación de los procesos de adquisición de datos, comunicación, georreferenciación, transmisión y gestión energética. Esta organización facilitó la integración de los componentes del

nodo sensor, el desarrollo del código y las posteriores tareas de mantenimiento, actualización o ampliación de la arquitectura IoT propuesta.

3.9.2.1. Implementación del protocolo MQTT y comunicación con Blynk IoT

El protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) se seleccionó como mecanismo para transmitir los datos generados por el nodo sensor. Su arquitectura ligera, basada en el modelo de publicación/suscripción, resultó adecuada para el intercambio de información entre dispositivos con recursos limitados y conectividad variable.

En la arquitectura propuesta, MQTT permitió transmitir la telemetría desde el nodo IoT, ubicado en el área agrícola, hacia la plataforma de monitoreo remoto. El módulo SIM7000G, integrado en la placa TTGO T-SIM7000G, proporcionó la conectividad celular mediante LTE-M o NB-IoT, sobre la cual se efectuó el envío de los paquetes de telemetría hacia la nube.

El funcionamiento de la comunicación mediante MQTT se estructuró en torno a tres elementos principales:

➤ Cliente publicador MQTT

El nodo sensor actuó como cliente publicador MQTT y generó los mensajes. La placa TTGO T-SIM7000G, con el microcontrolador ESP32, procesa los datos recibidos del sensor industrial NPK, organizándolos para luego enviarlos a la plataforma remota.

Dentro del paquete generado se incluyen las variables principales del sistema:

- Concentración de nitrógeno (N).
- Concentración de fósforo (P).
- Concentración de potasio (K).

- Coordenadas geográficas obtenidas mediante el sistema GNSS.
- Parámetros de calidad del enlace inalámbrico.

➤ **Bróker MQTT**

El bróker MQTT actuó como intermediario entre el nodo sensor y la plataforma receptora. Su función consistió en recibir los mensajes publicados por el dispositivo IoT y distribuirlos entre los clientes suscritos al tema correspondiente.

Este modelo permitió desacoplar el nodo sensor de la plataforma de visualización y facilitó la posible incorporación de nuevos nodos de adquisición.

➤ **Cliente MQTT suscriptor**

La plataforma IoT funcionó como cliente suscriptor encargado de recibir los mensajes publicados por el nodo sensor. En el sistema desarrollado, Blynk IoT utilizó la información recibida para almacenar y representar gráficamente los valores obtenidos durante el monitoreo del suelo.

➤ **Estructura del mensaje MQTT**

Antes de su publicación mediante MQTT, los datos adquiridos por el nodo sensor se organizaron en formato JSON, con el propósito de mantener una estructura uniforme en los mensajes de telemetría.

Ejemplo:

```
{
  "ID": "P01",
```

```

"N":115,

"P":161,

"K":322,

"Latitud":-1.843368,

"Longitud":-80.741730,

"RSSI":-78

}

```

La estructura del mensaje permite incluir en una sola trama de telemetría la información agronómica procedente del sensor NPK, la ubicación geográfica del punto de medición y los parámetros relativos a la calidad del enlace inalámbrico. Esta organización permite almacenar los datos históricos dentro de la plataforma IoT y representarlos espacialmente.

Tabla 11. Parámetros del mensaje MQTT generado por el nodo sensor

Campo	Descripción	Unidad
ID	Identificador del punto de medición	Texto
N	Concentración de nitrógeno	mg/kg
P	Concentración de fósforo	mg/kg
K	Concentración de potasio	mg/kg
Latitud	Coordenada GNSS	°
Longitud	Coordenada GNSS	°
RSSI	Nivel de señal recibida	dBm
PDR	Entrega de paquetes	%

Nota: Elaboración propia.

3.9.2.2. Justificación de las librerías seleccionadas

La librería TinyGSM se utilizó para controlar el módem SIM7000G y gestionar la conexión celular requerida para transmitir los datos desde el nodo sensor hacia la nube. Por su parte, PubSubClient proporcionó las funciones necesarias para implementar la comunicación mediante MQTT. La combinación de ambas librerías permitió transmitir periódicamente la información adquirida en campo mediante mensajes de telemetría de tamaño reducido.

Para la adquisición y contextualización de los datos, ModbusMaster se empleó para consultar los registros del sensor NPK mediante el protocolo Modbus RTU, mientras que TinyGPSPlus se utilizó para interpretar las sentencias de posicionamiento recibidas desde el sistema GNSS. Asimismo, la clase HardwareSerial permitió gestionar la comunicación UART entre el microcontrolador y los periféricos, mientras que las funciones de la API esp_sleep se emplearon para implementar los ciclos de suspensión profunda y reducir el consumo energético entre los periodos de actividad.

3.9.3. Relación entre el firmware y la arquitectura del sistema

Estas librerías se integran en el firmware y permiten que los bloques funcionales del sistema trabajen de manera coordinada. El sensor NPK proporciona los datos de concentración mediante la interfaz RS485 y el protocolo Modbus RTU; el ESP32 procesa localmente la información; el módulo GNSS proporciona las coordenadas geográficas; y el módem SIM7000G establece la conexión inalámbrica para publicar la telemetría mediante MQTT.

Finalmente, la estrategia de suspensión profunda (deep sleep) reduce el consumo energético entre los ciclos de medición, lo que favorece el funcionamiento autónomo del nodo mediante el subsistema energético basado en un panel solar y una batería de 12 V y 15 Ah. De esta

manera, el firmware se integra directamente con la arquitectura física del sistema y constituye un componente fundamental para la viabilidad funcional de la propuesta técnica.

3.10. Sistema GNSS y protocolo de información

En esta sección se presenta la integración del sistema GNSS en la arquitectura de telecomunicaciones propuesta y su función en la georreferenciación de las mediciones del nodo sensor. Asimismo, se describe el formato de los datos empleado para obtener las coordenadas geográficas y su integración con la telemetría transmitida mediante el enlace celular hacia la plataforma de monitoreo remoto.

La incorporación del sistema GNSS en el nodo sensor respondió a la necesidad de asociar cada medición de N, P y K con una ubicación geográfica dentro del terreno agrícola de la sede UPSE Manglaralto. Esta funcionalidad permitió generar información georreferenciada para el análisis agronómico y la evaluación del comportamiento del enlace inalámbrico en campo.

Mediante el sistema GNSS, las lecturas obtenidas por el sensor NPK se asociaron con parámetros de calidad de servicio, como la intensidad de la señal recibida (RSSI) y la tasa de entrega de paquetes (PDR). Esta integración permitió analizar conjuntamente las variables agronómicas, la ubicación geográfica y el desempeño del enlace inalámbrico.

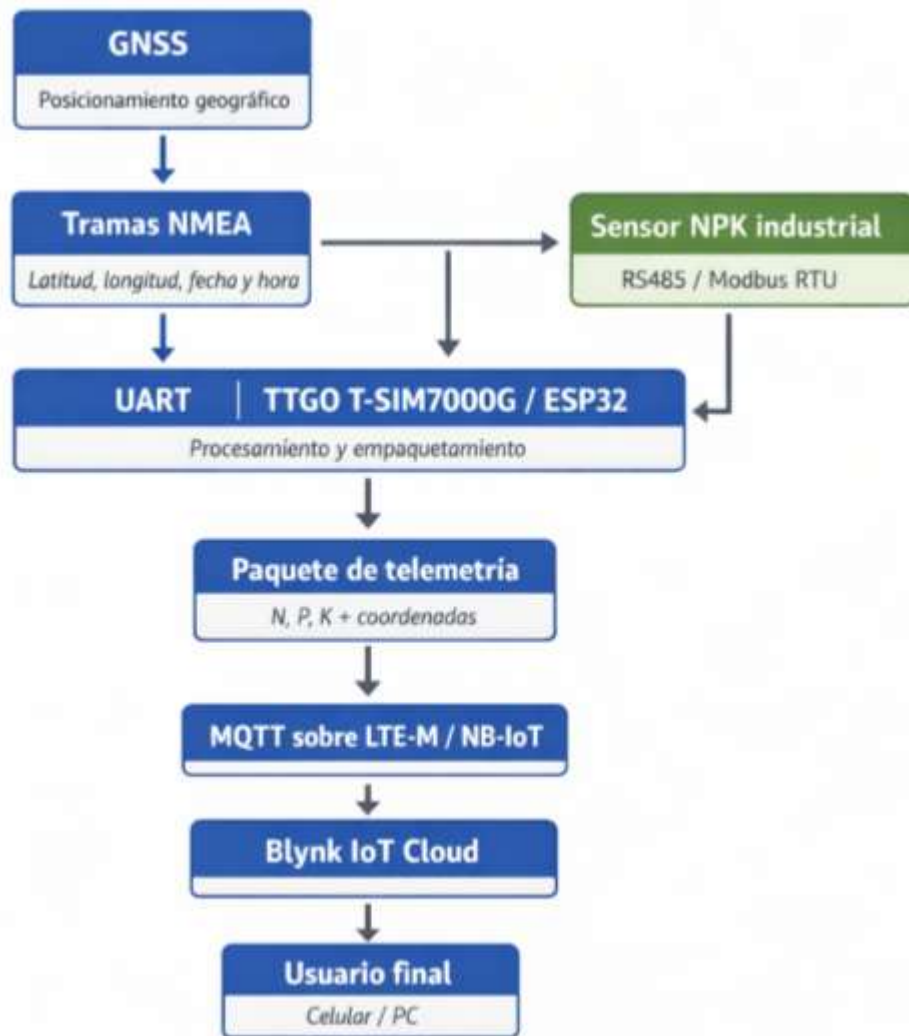
3.10.1. Protocolo de información GNSS

El módulo GNSS proporcionó la información de posicionamiento mediante tramas seriales estandarizadas, mediante tramas en formato NMEA, las cuales fueron recibidas por el microcontrolador a través de una interfaz UART.

3.10.1.1. Integración del GNSS con el sistema de telemetría

Las coordenadas geográficas proporcionadas por el sistema GNSS se incorporaron al paquete de datos generado por el nodo sensor, junto con los valores de N, P y K.

Figura 23. Integración del sistema GNSS con la telemetría del nodo sensor



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 23** muestra la integración del sistema GNSS en el flujo de telecomunicaciones del nodo sensor. El ESP32 recibió, mediante la interfaz UART, las tramas NMEA generadas por el módulo GNSS, las cuales contenían la información de posicionamiento. Posteriormente, las

coordenadas geográficas se integraron con los valores de N, P y K obtenidos mediante el sensor NPK para formar un paquete de telemetría. Este paquete se transmitió mediante MQTT a través de las tecnologías celulares LTE-M/NB-IoT hacia la plataforma Blynk IoT.

3.11. Modelo tridimensional del prototipo

Se diseñó un modelo tridimensional del prototipo mediante el software Tinkercad, con el propósito de definir la distribución física de sus componentes. En la **Figura 24**, se presenta el diseño de la estructura portátil. El prototipo está constituido por una estructura metálica vertical tipo torre, diseñada para sostener de manera segura los principales elementos del sistema: el panel solar, la caja de control electrónico y el sensor NPK.

Figura 24. Modelo 3D del prototipo en el software Tinkercad



Nota: Elaboración propia.

3.11.1. Interpretación del prototipo

En la zona central se ubicó una caja de protección con grado IP55, en cuyo interior se alojaron los principales componentes electrónicos, como la placa TTGO T-SIM7000G con ESP32 y el módulo MAX485. Esta caja protegió los circuitos contra el ingreso limitado de polvo, los chorros de agua y el contacto accidental, condiciones relevantes para la instalación del prototipo en exteriores.

En la **Figura 25**, se observa que el cableado protegido sale de la parte inferior de la caja y se dirige hacia el sensor NPK, ubicado en la zona baja del prototipo. Las sondas de medición del sensor se insertaron en el suelo, lo que permitió obtener los valores de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en el terreno agrícola.

Figura 25. Interpretación del prototipo



Nota: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: VALIDACIÓN EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA DE TELEMETRÍA IoT

4.1. Escenario de validación del sistema IoT

El escenario de validación del sistema de telemetría IoT se desarrolló en el área agrícola de estudio mediante una estrategia progresiva de muestreo espacial.

El proceso de validación se organizó en tres etapas. En la primera, se definieron 9 puntos de muestreo, los cuales constituyeron la distribución inicial para verificar la organización espacial del levantamiento. Posteriormente, la malla se amplió a 15 puntos con el propósito de incrementar la cobertura del terreno. Finalmente, se estableció una malla consolidada de 30 puntos, la cual se utilizó como base principal para el análisis espacial y la posterior generación de mapas de calor.

Figura 26. Distribución inicial de 9 puntos de muestreo en el área de estudio



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 26** presenta la configuración espacial inicial, conformada por 9 puntos georreferenciados. Esta fase permitió establecer una base para organizar el muestreo y verificar la distribución preliminar de los puntos dentro del área agrícola.

Figura 27. Ampliación de la malla de muestreo a 15 puntos



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 27** presenta la segunda etapa de muestreo, correspondiente a la ampliación de la distribución inicial a 15 puntos. Esta configuración permitió incrementar la cobertura espacial del terreno y obtener una distribución más detallada de las mediciones.

Figura 28. Distribución consolidada de 30 puntos de muestreo



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 28** presenta la malla consolidada de 30 puntos de muestreo, utilizada como base para el análisis final del sistema. Esta distribución proporcionó una mayor densidad espacial de

datos para la posterior generación de mapas de calor de N, P y K, así como para la representación de los parámetros de conectividad.

Tabla 12. Condiciones generales del escenario de validación del sistema IoT

Parámetro	Descripción
Lugar de validación	Sucursal UPSE Manglaralto
Tipo de entorno	Terreno agrícola / entorno rural
Nodo de procesamiento	TTGO T-SIM7000G con ESP32
Módulo de comunicación	SIM7000G
Tecnología celular considerada	LTE-M / NB-IoT, según disponibilidad registrada
Sensor utilizado	Sensor NPK industrial
Interfaz de comunicación del sensor	RS485 / Modbus RTU
Adaptador de señal	MAX485
Variables agronómicas	Nitrógeno, fósforo y potasio
Unidad de medición NPK	mg/kg
Variables de red	RSSI, tecnología celular, PDR y latencia
Unidad RSSI	dBm
Protocolo de transmisión	MQTT
Plataforma de visualización	Blynk IoT
Georreferenciación	GNSS integrado
Número de puntos evaluados	30
Número de registros consolidados	30
Periodo de validación	16/06/2026 – 03/07/2026

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 12** presenta las condiciones técnicas bajo las cuales se llevó a cabo la validación del sistema. En este apartado no se interpretan los valores de N, P y K ni los parámetros de red, debido a que estos análisis se desarrollan en secciones posteriores del capítulo. La tabla presenta el entorno de prueba, los componentes utilizados y las variables consideradas para evaluar el desempeño general del sistema IoT en el entorno agrícola.

Tabla 13. *Etapas del muestreo espacial empleado en la validación del sistema IoT*

Etapas	Número de muestras	Finalidad
Etapas 1	9	Organización inicial del muestreo y validación preliminar de la distribución espacial
Etapas 2	15	Ampliación de la cobertura del terreno y mejora de la representatividad espacial
Etapas 3	30	Consolidación de la base de datos para análisis espacial y mapas de calor

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 13** resume la evolución progresiva del muestreo espacial empleado durante la validación del sistema IoT. El incremento del número de puntos de 9 a 15 y, finalmente, a 30 proporcionó una distribución de mediciones con mayor densidad, lo que aumentó el nivel de detalle espacial del análisis y proporcionó una base más amplia para la posterior interpretación de los datos.

Para efectuar el análisis espacial, cada punto de muestreo se consideró representativo de su entorno inmediato dentro del área evaluada. Este criterio se utilizó para organizar los registros georreferenciados y preparar los datos destinados al proceso de interpolación espacial. No obstante, esta consideración no implicó asumir una homogeneidad absoluta del suelo alrededor de cada punto, debido a la variabilidad natural que puede presentarse en las propiedades edáficas.

A partir de esta organización espacial, los registros de telemetría se estructuraron mediante la integración de las variables agronómicas N, P y K con parámetros técnicos de comunicación, como RSSI, tecnología celular, PDR y latencia. Esta estructura sirvió como base para validar el subsistema de adquisición de datos, analizar espacialmente los macronutrientes y evaluar el desempeño del enlace inalámbrico.

4.2. Validación del subsistema de adquisición de datos

La validación del subsistema de adquisición de datos se centró en comprobar la integración funcional del sensor NPK industrial, el transceptor MAX485 y la placa TTGO T-SIM7000G.

Se verificó que los valores de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) podían incorporarse al flujo de telemetría del nodo sensor mediante una estructura de datos compatible con el procesamiento local y la transmisión hacia la plataforma IoT.

El sensor NPK constituyó el elemento principal del subsistema de adquisición, debido a que permitió obtener los valores de N, P y K en el suelo. La comunicación entre el sensor y el microcontrolador ESP32 se estableció mediante la interfaz RS485/Modbus RTU y el transceptor MAX485.

Esta configuración permitió establecer un canal de comunicación digital entre el sensor NPK y la unidad de procesamiento local, adecuado para el funcionamiento del sistema en el entorno agrícola evaluado.

Durante esta fase, los datos de N, P y K se organizaron según cada punto de medición, de acuerdo con la distribución espacial definida previamente. Cada registro se identificó mediante un código de muestra y, posteriormente, se integró con parámetros de conectividad celular, como el indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI) y la tecnología de acceso registrada durante cada medición. Esta integración permitió evaluar conjuntamente el funcionamiento del subsistema de medición y el desempeño del enlace de telecomunicaciones.

Figura 29. Interconexión física del subsistema de adquisición de datos



Nota: Elaboración propia.

4.2.1. Evaluación comparativa del sensor NPK mediante análisis de laboratorio

Con el propósito de evaluar el desempeño del sensor NPK integrado en la arquitectura IoT desarrollada, se compararon las mediciones obtenidas mediante el prototipo con los resultados del análisis químico realizado por el laboratorio Estación Experimental Litoral del Sur. Para este análisis, se seleccionó la muestra MAS06 (Código MAS 06 PROF 0.27), debido a que correspondió al punto de muestreo en el que se efectuaron las pruebas de adquisición y transmisión de datos durante la validación experimental del sistema.

El informe de laboratorio presentó las concentraciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Las determinaciones de nitrógeno y fósforo se realizaron mediante el método Olsen, empleando una relación suelo-extractante de 2,5 g de suelo por cada 50 mL de solución extractante. Para comparar estos resultados con las mediciones obtenidas mediante el sensor NPK, se consideraron la relación suelo-extractante y el factor de dilución aplicado durante el procedimiento analítico.

Después de aplicar la conversión correspondiente, los resultados de nitrógeno y fósforo se expresaron en mg/kg, unidad utilizada por el sensor NPK para reportar las concentraciones de estos nutrientes en el suelo. Este procedimiento permitió establecer una unidad común y realizar la comparación directa entre los resultados del análisis de laboratorio y las mediciones obtenidas mediante el prototipo.

En el caso del potasio, no fue necesario efectuar una conversión adicional, debido a que el resultado proporcionado por el laboratorio ya se encontraba expresado en mg/kg. Su determinación se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica, por lo que se conservó el valor reportado en el informe para efectuar la comparación con la medición del sensor NPK.

4.2.1.1. Homologación de las unidades de nitrógeno y fósforo

El valor presentado por el laboratorio en $\mu g/mL$ corresponde a la concentración determinada en la solución extractante. Para expresar dicha concentración en mg/kg de suelo se consideraron los siguientes elementos del procedimiento analítico.

- Masa de suelo utilizada: 2,5 g
- Volumen de solución extractante: 50 mL
- Factor de dilución: 1,2
- Concentración inicial: expresada en $\frac{\mu g}{mL}$

La relación entre la masa del suelo y el volumen del extractante fue:

$$R_{se} = \frac{V_e}{m_s}$$

Donde:

- R_{se} = relación suelo-extractante
- V_e =volumen del extractante, expresado en mL.
- m_s = masa de suelo, expresada en g.

Al sustituir los valores:

$$R_{se} = \frac{50_{mL}}{2.5g}$$

$$R_{se} = 20 \frac{mL}{g}$$

El procedimiento de extracción produjo una relación suelo-extractante igual a 20. Posteriormente se incorporó el factor de dilución aplicado durante el procedimiento analítico.

$$F_T = R_{se} \times FD$$

Donde:

- F_T = factor total de conversión.
- R_{se} = relación suelo-extractante.
- FD = factor de dilución.

Al reemplazar los valores:

$$F_T = 20 \times 1,2$$

$$F_T = 24$$

De esta manera, la fórmula general utilizada para expresar las concentraciones de nitrógeno y fósforo en mg/kg fue:

$$C_{\frac{mg}{kg}} = \frac{C_{\mu g/mL} \times V_e \times FD}{m_s}$$

Donde:

- $C_{\frac{mg}{kg}}$ = concentración final expresada en mg/kg.
- $C_{\mu g/mL}$ = concentración reportada por el laboratorio.
- V_e = volumen del extractante.
- FD = factor de dilución.
- m_s = masa de suelo analizada.

Al sustituir la relación suelo-extractante y el factor de dilución, la expresión se simplificó de la siguiente manera:

- $C_{\frac{mg}{kg}} = C_{\mu g/mL} \frac{50}{2.5} \times 1.2$
- $C_{\frac{mg}{kg}} = C_{\mu g/mL} \times 20 \times 1.2$
- $C_{\frac{mg}{kg}} = C_{\mu g/mL} \times 24$

La concentración obtenida en el extracto se expresó por unidad de masa de suelo, considerando la relación suelo-extractante y el factor de dilución correspondiente.

Conversión del nitrógeno

El laboratorio reportó para la muestra MAS06 un valor de nitrógeno de:

$$N = 7 \mu g/mL$$

Aplicando la fórmula:

- $N_{\frac{mg}{kg}} = 7 \times \frac{50}{2.5} \times 1.2$
- $N_{\frac{mg}{kg}} = 7 \times 20 \times 1.2$
- $N_{\frac{mg}{kg}} = 7 \times 24$
- $N = 168 \text{ mg/kg}$

Conversión del fósforo

El laboratorio reportó para la muestra MAS06 un valor de fósforo de:

$$P = 13 \mu g/mL$$

Aplicando la fórmula:

- $P_{\frac{mg}{kg}} = 13 \times \frac{50}{2.5} \times 1.2$
- $P_{\frac{mg}{kg}} = 13 \times 20 \times 1.2$
- $P_{\frac{mg}{kg}} = 13 \times 24$
- $P = 312 \text{ mg/kg}$

Tratamiento del valor de potasio

Para el potasio no se aplicó la ecuación anterior, debido a que este elemento se determinó mediante espectrofotometría de absorción atómica y un procedimiento de extracción diferente del utilizado para el nitrógeno y el fósforo. Por esta razón, se conservó el valor de 850 mg/kg, de acuerdo con el criterio de homologación establecido para efectuar la comparación.

La aplicación de la conversión basada en el método Olsen no resultó apropiada para el potasio, debido a que las condiciones analíticas, el procedimiento de extracción y el principio instrumental fueron diferentes. En consecuencia, el valor reportado de potasio se incorporó directamente en la tabla comparativa.

Tabla 14. Homologación de los resultados de laboratorio para la muestra MAS06

Parámetro	Laboratorio original <i>μg/mL</i>	Factor aplicado	Laboratorio expresado en <i>mg/kg</i>
Nitrógeno	7	24	168
Fósforo	13	24	312
Potasio	850	No se aplicó conversión Olsen	850

Nota: Elaboración propia.

Los resultados de la conversión presentados en la **Tabla 14** permitieron expresar los valores de nitrógeno y fósforo en la misma unidad utilizada por el sensor NPK. Esta homologación permitió realizar una comparación cuantitativa entre ambas fuentes de información sin alterar los resultados analíticos originales, puesto que únicamente se efectuó una conversión de unidades considerando la relación suelo-extractante y el factor de dilución empleados durante el procedimiento analítico.

4.2.1.2. Comparación entre el sensor NPK y el análisis de laboratorio

Se compararon los valores obtenidos mediante el sensor NPK con los resultados del análisis químico de laboratorio. Durante la prueba realizada con la muestra MAS06, el sensor registró los siguientes valores:

- Nitrógeno: 169 mg/kg
- Fósforo: 268 mg/kg
- Potasio: 490 mg/kg

Tabla 15. Comparación entre las mediciones del sensor NPK y los resultados del laboratorio.

Parámetro	Sensor NPK (mg/kg)	Laboratorio original	Laboratorio homologado (mg/kg)
Nitrógeno	169	7 $\mu\text{g/mL}$	168
Fósforo	268	13 $\mu\text{g/mL}$	312
Potasio	490	850	850

Nota: Elaboración propia.

En la **Tabla 15** aunque la homologación permitió presentar los resultados en una escala común y facilitar su comparación, debe considerarse que el análisis químico de laboratorio y el sensor NPK emplean principios de funcionamiento diferentes. El laboratorio determinó la concentración de los nutrientes mediante procedimientos analíticos realizados en condiciones controladas, mientras que el sensor efectuó una estimación electrónica directamente en el suelo.

Evaluación del error absoluto

Para cuantificar la diferencia entre la medición obtenida mediante el sensor NPK y el resultado de referencia, se calculó inicialmente el error absoluto. Este indicador representa la diferencia numérica entre ambos valores, independientemente de que el sensor registre una concentración superior o inferior.

El error absoluto se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$EA = |V_s - V_l|$$

Donde:

- EA = error absoluto, expresado en mg/kg.
- V_s = valor obtenido mediante el sensor.
- V_l = valor del laboratorio expresado en mg/kg.
- $|$ = valor absoluto.

Error absoluto del nitrógeno

$$EA_N = |169 - 168|$$

$$EA_N = 1mg/kg$$

Error absoluto del fósforo

$$EA_P = |268 - 312|$$

$$EA_P = |-44|$$

$$EA_P = 44 mg/kg$$

Error absoluto del potasio

$$EA_K = |490 - 850|$$

$$EA_P = |-360|$$

$$EA_P = 360 mg/kg$$

Los resultados evidenciaron que el nitrógeno presentó la menor diferencia absoluta, seguido por el fósforo. En contraste, el potasio registró la mayor diferencia entre la lectura obtenida mediante el sensor NPK y el resultado del análisis de laboratorio.

Evaluación del error relativo porcentual

Aunque el error absoluto permitió conocer la diferencia entre ambos valores, este indicador no consideró la magnitud del resultado tomado como referencia. Por ello, también se calculó el error relativo porcentual utilizando el valor obtenido en el laboratorio como denominador.

El error relativo porcentual se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$ER(\%) = \frac{|V_s - V_l|}{V_l} \times 100$$

Tabla 16. *Error relativo porcentual entre las mediciones del sensor NPK y el análisis de laboratorio*

Parámetro	Sensor NPK (mg/kg)	Laboratorio homologado (mg/kg)	Error relativo (%)
Nitrógeno	169	168	0,60 %
Fósforo	268	312	14,10 %
Potasio	490	850	42,35 %

Los resultados del error relativo porcentual evidenciaron que el nitrógeno presentó la menor diferencia entre la medición del sensor NPK y el valor de referencia del laboratorio, con un error aproximado de 0,60 %. El fósforo presentó una diferencia intermedia de 14,10 %, mientras que el potasio registró la mayor variación con 42,35 %. Estas diferencias se relacionan con las características propias de cada método de medición, debido a que el análisis químico de laboratorio y la estimación electrónica del sensor NPK emplean principios de funcionamiento diferentes.

4.2.2. Validación de comunicación RS485/Modbus RTU

El mecanismo principal de transferencia de datos consistió en la comunicación entre el sensor NPK industrial y la unidad de procesamiento mediante la interfaz física RS485 y el protocolo Modbus RTU. En esta configuración, la placa TTGO T-SIM7000G, mediante el microcontrolador ESP32, actuó como dispositivo maestro, mientras que el sensor NPK funcionó como dispositivo esclavo y respondió a las solicitudes de lectura de los registros correspondientes a N, P y K.

El transceptor MAX485 permitió convertir las señales diferenciales de la interfaz RS485 en señales lógicas para la comunicación con el microcontrolador ESP32. Esta etapa resultó fundamental, debido a que el ESP32 empleó señales lógicas de bajo voltaje, mientras que el sensor NPK utilizó una interfaz diferencial robusta, diseñada para la comunicación en entornos de campo.

El MAX485 funcionó como interfaz de adaptación entre el sensor NPK y el microcontrolador, lo que permitió establecer el intercambio bidireccional de datos entre ambos subsistemas.

La comunicación se validó mediante una estructura lógica de solicitudes y respuestas basada en el protocolo Modbus RTU. Esta configuración permitió leer localmente los registros correspondientes a N, P y K e incorporar posteriormente los valores obtenidos al paquete de telemetría del sistema IoT.

Tabla 17. Configuración de comunicación empleada para el sensor NPK

Parámetro	Configuración
Protocolo de comunicación	Modbus RTU
Interfaz física	RS485
Adaptador de señal	MAX485
Dispositivo maestro	TTGO T-SIM7000G / ESP32
Dispositivo esclavo	Sensor NPK industrial
Variables consultadas	Nitrógeno, fósforo y potasio
Unidad de lectura	mg/kg
Modo de comunicación	Semidúplex
Línea diferencial	A/B
Control de transmisión	Pin RE/DE del MAX485

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 17** resume la configuración técnica empleada para la comunicación entre el sensor NPK y la unidad de procesamiento. Esta configuración permitió estructurar el intercambio de datos mediante un esquema maestro-esclavo, adecuado para la lectura de registros digitales en aplicaciones agrícolas de monitoreo in situ.

4.2.3. Lecturas preliminares del sensor NPK

Las lecturas preliminares obtenidas mediante el sensor NPK permitieron organizar los valores de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) recopilados en los puntos de medición establecidos para la validación del sistema.

Estos registros constituyeron la base inicial para verificar la estructura del proceso de adquisición de datos y su posterior integración con los parámetros de telemetría celular.

Durante esta etapa, los valores de N, P y K se expresaron en mg/kg y se organizaron según cada punto de medición. Esta estructura permitió comprobar que el sistema fue capaz de adquirir las tres variables agronómicas e incorporarlas al conjunto de datos destinado al análisis espacial posterior. Asimismo, la asociación de los valores NPK con cada punto de muestreo proporcionó la base para generar los mapas de distribución y las superficies interpoladas.

Los datos sin procesar se organizaron en una tabla de registros, en la que cada fila correspondió a una muestra obtenida dentro del terreno agrícola.

Debido a que el análisis espacial completo se desarrolla en las secciones posteriores, en este apartado se presentan únicamente las lecturas preliminares utilizadas para mostrar la estructura del subsistema de adquisición.

Tabla 18. *Lecturas preliminares de macronutrientes NPK en 9 puntos de muestreo*

Punto	Nitrógeno N (mg/kg)	Fósforo P (mg/kg)	Potasio K (mg/kg)
P1	115	161	322
P2	116	161	323
P3	116	162	324
P4	114	160	321
P5	115	161	322
P6	116	162	323
P7	114	160	320
P8	115	162	323
P9	116	162	324

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 18** muestra los valores de N, P y K correspondientes a las lecturas preliminares obtenidas en cada punto de medición. Estos registros permitieron comprobar la coherencia de la estructura de datos utilizada por el sistema y verificar que las variables agronómicas podían asociarse posteriormente con las coordenadas geográficas y los parámetros de conectividad celular.

Figura 30. Visualización preliminar de lecturas NPK en el monitor serial



The image shows a screenshot of a serial monitor window titled "Output Serial Monitor X". It displays the output of an NPK sensor. The text is as follows:

```
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM3')
Potasio (K): 323 mg/kg
-----
Leyendo sensor NPK...
Respuesta HEX: 01 03 06 00 73 00 A1 01 42 F4 FD
Lectura correcta:
Nitrogeno (N): 115 mg/kg
Fosforo (P): 161 mg/kg
Potasio (K): 322 mg/kg
-----
Leyendo sensor NPK...
Respuesta HEX: 01 03 06 00 73 00 A1 01 43 35 3D
Lectura correcta:
Nitrogeno (N): 115 mg/kg
Fosforo (P): 161 mg/kg
Potasio (K): 323 mg/kg
-----
Leyendo sensor NPK...
Respuesta HEX: 01 03 06 00 74 00 A2 01 44 31 3F
Lectura correcta:
Nitrogeno (N): 116 mg/kg
Fosforo (P): 162 mg/kg
Potasio (K): 324 mg/kg
```

Nota: Elaboración propia.

En la **Figura 30** se presenta la visualización preliminar de los valores de N, P y K durante la fase de prueba del subsistema de adquisición. Esta salida permitió comprobar la organización de los valores de nitrógeno, fósforo y potasio antes de integrarlos con los parámetros de telemetría celular.

4.2.4. Consideraciones de equivalencia entre análisis químico y medición electrónica

El análisis químico de laboratorio se realizó mediante procedimientos estandarizados para determinar las propiedades fisicoquímicas del suelo. En este proceso se consideraron variables como el pH, el nitrógeno disponible, el fósforo, el potasio, la textura y otros elementos minerales presentes en las muestras. Estas fueron identificadas mediante los códigos MAS y se analizaron de acuerdo con los procedimientos establecidos para la caracterización de suelos con fines agrícolas.

Por su parte, el sensor NPK integrado en la arquitectura IoT estimó las concentraciones de los nutrientes a partir de la respuesta eléctrica de sus elementos de medición. Aunque su principio de funcionamiento fue diferente del empleado en el análisis químico de laboratorio, este dispositivo permitió efectuar mediciones rápidas en campo e integrarlas en un sistema de adquisición y transmisión remota de datos.

Esta diferencia metodológica implicó que los valores obtenidos mediante ambas técnicas no debían interpretarse como resultados analíticamente equivalentes, sino como mediciones comparables una vez expresadas en una unidad común. En consecuencia, se utilizó el miligramo por kilogramo de suelo (mg/kg) como unidad de referencia para comparar las concentraciones expresadas en relación con la masa de la muestra.

$$1 \frac{mg}{kg} = 1 ppm$$

Tabla 19. Correspondencia entre parámetros evaluados mediante laboratorio y sensor NPK

Parámetro evaluado	Análisis de laboratorio	Sensor NPK	Unidad utilizada
Nitrógeno	Nitrógeno disponible reportado mediante análisis químico (NH ₄)	Estimación de nitrógeno mediante sensor	mg/kg
Fósforo	Fósforo disponible en la muestra de suelo	Estimación de fósforo mediante sensor	mg/kg
Potasio	Potasio disponible/intercambiable	Estimación de potasio mediante sensor	mg/kg

Nota: Elaboración propia.

4.3. Consolidación y estructuración de los datos de telemetría del nodo IoT

La consolidación de los datos de telemetría del nodo IoT se realizó a partir de la estructura definida para el sistema propuesto. Esta fase permitió organizar los registros obtenidos durante la validación e integrar las variables agronómicas, las coordenadas geográficas y los parámetros de conectividad celular en una única base de datos. De esta manera, se obtuvo una representación funcional del comportamiento del nodo sensor durante los procesos de adquisición, procesamiento y transmisión de la información.

La estructuración de los datos no se planteó como un reemplazo del funcionamiento físico del sistema, sino como una etapa destinada a organizar y representar los registros generados por la arquitectura IoT durante la validación. Para ello, se consideraron los valores de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), así como la información de ubicación y las métricas de red asociadas con cada punto de medición. Esta estructura permitió verificar que el sistema fue capaz de integrar los datos agronómicos y de telecomunicaciones en un mismo modelo de telemetría.

En el escenario construido, cada registro se estructuró como un paquete de información generado por el nodo sensor. Este paquete incluyó el identificador del punto de medición, la fecha de adquisición, las coordenadas geográficas, los valores NPK y los parámetros de la red celular, como RSSI, tecnología de acceso, PDR y latencia.

El levantamiento se estructuró a partir de 30 puntos de medición georreferenciados, cada uno asociado con un registro consolidado de telemetría. Esta organización permitió disponer de una matriz espacial unificada para realizar la interpolación, generar los mapas de calor y evaluar el desempeño del enlace inalámbrico.

4.3.1. Modelo de datos de telemetría

El modelo de datos de telemetría se diseñó para integrar en un único registro las variables necesarias para evaluar el desempeño del sistema IoT. Esta estructura permitió vincular las lecturas del sensor NPK con las coordenadas geográficas del punto de medición y con las métricas de conectividad celular registradas durante la transmisión.

Cada registro de telemetría se estructuró mediante campos específicos, cuya información pudo utilizarse posteriormente en herramientas de análisis espacial y en la plataforma IoT para su visualización. La incorporación de variables agronómicas y parámetros de red en una misma estructura permitió evaluar tanto las concentraciones de N, P y K en el suelo como la capacidad del sistema para transmitir esta información en un entorno rural.

Tabla 20. Modelo de datos de telemetría utilizado para el nodo IoT

Campo	Descripción	Unidad / formato
ID	Identificador del punto de medición	P1, P2, P3, etc.
Fecha	Momento de adquisición del registro	dd/mm/aaaa hh:mm
Latitud	Coordenada geográfica del punto	Grados decimales
Longitud	Coordenada geográfica del punto	Grados decimales
N	Concentración de nitrógeno	mg/kg
P	Concentración de fósforo	mg/kg
K	Concentración de potasio	mg/kg
RSSI	Intensidad de señal recibida	dBm
Tecnología celular	Tecnología de acceso registrada	LTE-M / NB-IoT
PDR	Tasa de entrega de paquetes	%
Latencia	Tiempo de transmisión del paquete	ms

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 20** muestra los campos considerados para el modelo de telemetría del nodo IoT. Los valores de N, P y K correspondieron a los datos agronómicos del suelo, mientras que el RSSI, la tecnología celular, el PDR y la latencia constituyeron los parámetros utilizados para evaluar el comportamiento del enlace inalámbrico.

Por su parte, las coordenadas obtenidas mediante el sistema GNSS permitieron asociar cada medición con una ubicación específica dentro del área agrícola.

La estructura establecida para el modelo de telemetría permitió consolidar los registros obtenidos durante la etapa de validación. A cada muestra se asociaron coordenadas geográficas y las variables agronómicas correspondientes a las concentraciones de N, P y K.

Asimismo, se incorporaron parámetros relacionados con el desempeño del enlace inalámbrico, lo que permitió analizar conjuntamente la distribución espacial de los macronutrientes y el comportamiento de la comunicación celular.

La **Tabla 21** presenta las principales variables agronómicas, espaciales y de señal del registro consolidado. Los parámetros complementarios de tecnología celular, PDR y latencia se presentan en el **Anexo 14**.

Tabla 21. Registro consolidado de puntos de medición georreferenciados del nodo IoT

Punto	Longitud	Latitud	N	P	K	RSSI
P1	-80.741732	-1.843379	100	152	298	-78
P2	-80.741690	-1.843371	110	161	345	-79
P3	-80.741654	-1.843362	98	169	326	-81
P4	-80.741612	-1.843354	141	162	331	-82
P5	-80.741569	-1.843346	124	165	339	-84
P6	-80.741521	-1.843340	132	172	321	-85
P7	-80.741722	-1.843423	121	175	334	-77
P8	-80.741683	-1.843414	118	180	322	-78
P9	-80.741647	-1.843405	116	146	323	-80
P10	-80.741606	-1.843399	145	167	361	-82
P11	-80.741560	-1.843390	154	162	392	-83
P12	-80.741522	-1.843382	132	174	399	-84
P13	-80.741712	-1.843464	123	158	320	-79
P14	-80.741674	-1.843454	164	142	374	-80
P15	-80.741640	-1.843447	185	168	361	-82
P16	-80.741602	-1.843437	174	163	352	-84
P17	-80.741553	-1.843434	181	158	374	-85
P18	-80.741518	-1.843422	184	135	425	-87
P19	-80.741707	-1.843496	210	102	415	-77
P20	-80.741669	-1.843489	205	107	490	-79
P21	-80.741633	-1.843481	198	150	347	-81
P22	-80.741598	-1.843470	123	384	480	-85
P23	-80.741553	-1.843463	267	268	451	-86
P24	-80.741519	-1.843449	258	147	390	-90
P25	-80.741703	-1.843526	185	387	410	-75
P26	-80.741664	-1.843522	154	268	248	-77
P27	-80.741630	-1.843515	360	216	359	-78
P28	-80.741593	-1.843505	259	312	452	-82
P29	-80.741551	-1.843496	168	248	314	-86
P30	-80.741517	-1.843487	179	265	351	-90

Nota: Elaboración propia.

Para representar el funcionamiento del nodo, los datos se organizaron en registros de telemetría. Cada registro integró los datos obtenidos mediante el sensor NPK, la información de posicionamiento geográfico y las métricas de transmisión disponibles. Esta estructura representó el comportamiento observado durante las actividades de monitoreo en campo y fue compatible con

la lógica de transmisión mediante MQTT y con la posterior visualización de los datos en la plataforma IoT.

4.3.2. Distribución espacial de puntos de medición

La distribución espacial de los puntos de medición se estableció a partir de la malla consolidada de 30 puntos descrita en el escenario de validación. A cada punto se le asociaron coordenadas geográficas, lo que permitió representar espacialmente los valores de los macronutrientes y los parámetros de conectividad celular registrados dentro del área agrícola.

Esta distribución permitió analizar los registros de telemetría no solo como valores numéricos aislados, sino también como datos georreferenciados. De esta manera, cada lectura de N, P y K pudo relacionarse con una ubicación específica del terreno, lo que permitió identificar variaciones espaciales y preparar la información para generar los mapas de calor.

Para la representación espacial, se consideró un registro consolidado por cada punto de medición. Este criterio permitió trabajar con una matriz espacial ordenada, en la que cada ubicación contó con valores representativos de las variables agronómicas N, P y K, así como de los parámetros de red RSSI, tecnología celular, PDR y latencia.

Tabla 22. Criterio de organización de registros para el análisis espacial

Elemento	Descripción
Número de puntos espaciales	30 puntos de medición
Número total de registros	30 registros consolidados
Variable de identificación	ID del punto de medición
Criterio de organización	Un registro representativo por punto
Variables agronómicas procesadas	N, P y K
Variables de red procesadas	RSSI, tecnología celular, PDR y latencia
Uso posterior de los datos	Mapas de calor, interpolación y análisis QoS

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 22** presenta los criterios utilizados para organizar los registros de telemetría antes de efectuar el análisis espacial. Esta organización permitió transformar los datos obtenidos en una base estructurada y adecuada para comparar los puntos de medición, generar mapas de distribución y evaluar el comportamiento del enlace inalámbrico según la ubicación.

A partir de esta distribución espacial, el análisis posterior se orientó a identificar patrones de variación en las concentraciones de los macronutrientes del suelo y en los indicadores de conectividad.

En conjunto, esta organización permitió consolidar una base de datos georreferenciada que integró las variables NPK y los parámetros de comunicación. Esta información constituyó la base para el análisis espacial de los macronutrientes mediante interpolación y para la posterior evaluación del desempeño del enlace inalámbrico.

4.4. Análisis espacial de macronutrientes mediante interpolación

El análisis espacial de los macronutrientes se desarrolló a partir de la distribución georreferenciada de los puntos de muestreo definidos en el escenario de validación. Para este análisis, se utilizaron los valores de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) asociados con cada punto de medición, con el propósito de representar su variación dentro del área agrícola evaluada.

La interpolación espacial permitió estimar la distribución aproximada de cada macronutriente entre los puntos de muestreo conocidos, lo que generó una representación continua de las condiciones del suelo.

Esta técnica resulta útil en la agricultura de precisión, debido a que permite identificar zonas con concentraciones diferentes de nutrientes a partir de un conjunto de mediciones puntuales.

Para el análisis, se utilizó como referencia la malla consolidada de 30 puntos de muestreo. No obstante, con fines comparativos, también se incluyeron las etapas previas de 9 y 15 puntos, con el propósito de observar los cambios producidos en la representación espacial al aumentar la densidad de muestreo.

De esta manera, fue posible comparar el nivel de detalle visual de los mapas de calor generados en cada escenario. Se consideró que cada punto de muestreo era representativo de una microzona del terreno, de acuerdo con el criterio metodológico establecido previamente.

Por ello, los valores registrados en cada ubicación se utilizaron como base para generar las superficies interpoladas y obtener los mapas de calor correspondientes a N, P y K.

Para generar las superficies continuas de nitrógeno, fósforo y potasio se empleó el método de ponderación por distancia inversa (IDW, del inglés *Inverse Distance Weighting*), utilizando como referencia las coordenadas y los valores registrados en cada punto de muestreo.

Tabla 23. *Criterios empleados para la interpolación espacial de macronutrientes*

Criterio	Descripción
Área de análisis	Terreno agrícola de la sucursal UPSE Manglaralto
Variables interpoladas	Nitrógeno, fósforo y potasio
Unidad de análisis	mg/kg
Número de puntos inicial	9 puntos
Número de puntos intermedio	15 puntos
Número de puntos consolidado	30 puntos
Tipo de representación	Mapa de calor
Criterio espacial	Asociación de cada punto con su microzona circundante
Finalidad	Identificar variaciones espaciales de macronutrientes

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 23** presenta los criterios empleados para organizar el análisis espacial de los macronutrientes. La comparación entre las mallas de 9, 15 y 30 puntos permitieron observar los cambios producidos por la densificación del muestreo en la representación visual de los mapas de calor. A medida que aumentó el número de muestras, la distribución espacial presentó un mayor nivel de detalle y permitió reconocer con mayor claridad las zonas de variación dentro del terreno.

4.4.1. Distribución espacial del nitrógeno

Los valores de nitrógeno obtenidos en los puntos de muestreo se analizaron con el propósito de estudiar su distribución espacial. Este macronutriente desempeña una función esencial en el crecimiento vegetativo de las plantas, por lo que su representación espacial permitió identificar áreas con concentraciones diferentes dentro del terreno agrícola evaluado.

En la fase inicial de 9 puntos, la representación del nitrógeno permitió observar una distribución general del nutriente, aunque con un nivel limitado de detalle espacial. Mediante la

mallla de 15 puntos, se obtuvo una mayor definición de las variaciones registradas dentro del área de estudio.

La malla consolidada de 30 puntos generó un mapa de calor con mayor continuidad espacial, lo que permitió diferenciar con mayor claridad las zonas con distintas concentraciones relativas.

Los datos de nitrógeno presentaron diferencias entre los puntos de muestreo, lo que evidenció una distribución espacial heterogénea dentro del área evaluada. Estas diferencias generaron variaciones visibles en el mapa de calor, especialmente al emplear la malla con mayor densidad de muestreo.

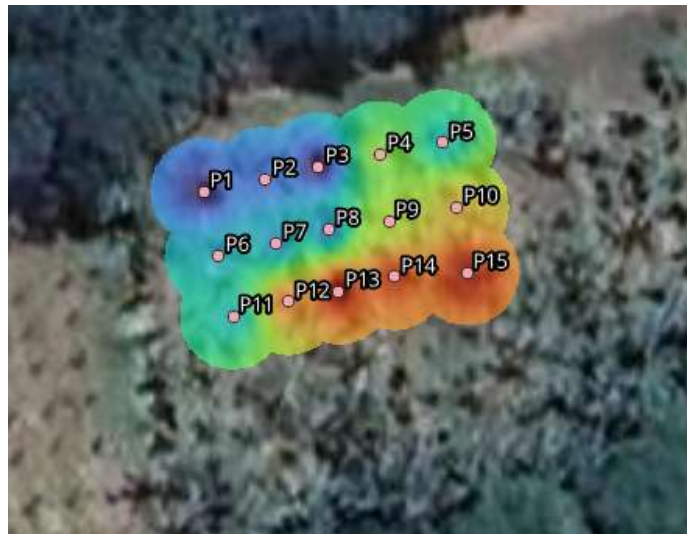
***Figura 31.** Mapa de distribución espacial del nitrógeno utilizando 9 puntos de muestreo*



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 31** presenta la distribución preliminar del nitrógeno mediante la primera configuración espacial, conformada por 9 puntos de medición. Debido a la cantidad limitada de muestras, la representación obtenida permitió identificar únicamente una tendencia general del comportamiento del nutriente dentro del área evaluada.

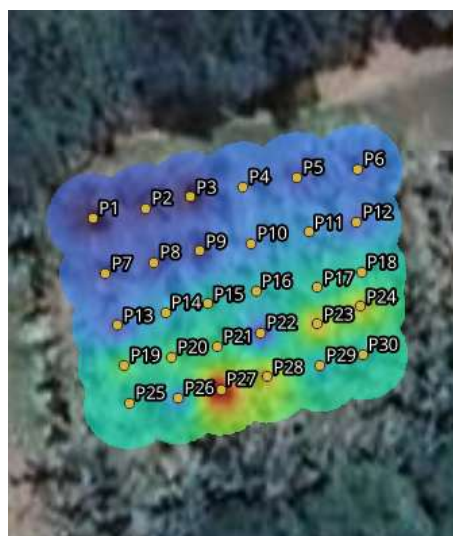
Figura 32. Mapa de distribución espacial del nitrógeno utilizando 15 puntos de muestreo



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 32** presenta la distribución espacial del nitrógeno mediante 15 puntos de muestreo. La ampliación de la malla incrementó el nivel de detalle espacial del análisis y generó una transición más definida entre las zonas con diferentes concentraciones de nitrógeno. La incorporación de nuevos puntos de referencia permitió obtener una representación visual más detallada que la del escenario inicial.

Figura 33. Mapa de distribución espacial del nitrógeno utilizando 30 puntos de muestreo



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 33** presenta la distribución espacial del nitrógeno mediante la configuración consolidada de 30 puntos. Esta configuración permitió obtener una representación con mayor continuidad espacial, debido al incremento de la información disponible para el proceso de interpolación.

En esta etapa fue posible identificar con mayor detalle las variaciones locales del nitrógeno dentro del área agrícola evaluada.

Los resultados indicaron que la concentración de nitrógeno presentó una variación espacial marcada dentro del área evaluada. El valor mínimo se registró en el punto P3, con 98 mg/kg, mientras que el valor máximo se presentó en el punto P27, con 360 mg/kg.

Esta diferencia evidenció una distribución heterogénea del nutriente, con concentraciones relativamente más altas hacia el sector inferior de la malla consolidada.

La interpolación espacial permitió visualizar los cambios graduales en la concentración del nutriente y evidenció zonas con valores relativamente más altos, así como zonas en las que la concentración fue menor.

El comportamiento observado mostró que el aumento de la densidad de muestreo proporcionó una representación espacial más detallada.

Mientras que la malla inicial de 9 puntos permitió obtener una aproximación general, la configuración de 30 puntos ofreció un mayor nivel de detalle para el análisis de la distribución del nitrógeno en el área agrícola evaluada.

Tabla 24. Resumen estadístico de concentración de nitrógeno

Parámetro	Valor
Número de puntos	30
Unidad	mg/kg
Valor mínimo	98 mg/kg
Punto mínimo	P3
Valor máximo	360 mg/kg
Punto máximo	P27
Promedio	168,93 mg/kg

Nota: Elaboración propia.

4.4.2. Distribución espacial del fósforo

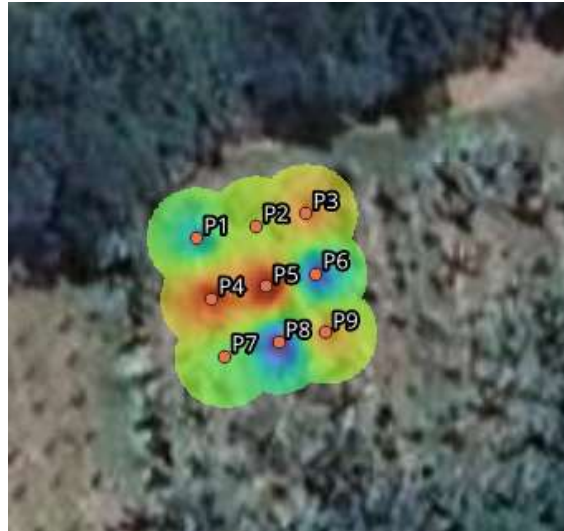
El análisis espacial del fósforo permitió representar la variación de este macronutriente dentro del área agrícola evaluada. El fósforo desempeña funciones importantes en el desarrollo radicular, la floración y los procesos energéticos de las plantas; por ello, su monitoreo espacial contribuyó a la interpretación de las condiciones de fertilidad del suelo.

En la fase inicial de 9 puntos, el mapa de calor proporcionó una primera visualización de la distribución del fósforo. Sin embargo, la baja densidad de muestreo limitó el nivel de detalle en algunas zonas del terreno. Al ampliar la malla a 15 puntos, se obtuvo una representación más definida de la transición entre los sectores.

Finalmente, la malla consolidada de 30 puntos permitió obtener una superficie interpolada con mayor continuidad y nivel de detalle espacial.

Los valores de fósforo presentaron una variación espacial considerable dentro del área agrícola evaluada. El valor mínimo se registró en el punto P19, con 102 mg/kg, mientras que el valor máximo se identificó en el punto P25, con 387 mg/kg. Esta diferencia permitió observar concentraciones relativamente más altas hacia el sector inferior izquierdo de la malla consolidada, así como concentraciones menores en determinados puntos del área evaluada.

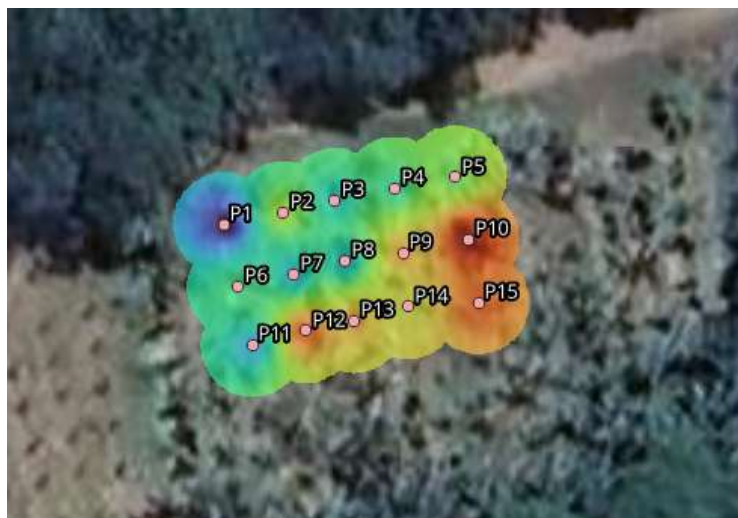
Figura 34. Mapa de distribución espacial del fósforo utilizando 9 puntos de muestreo



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 34** presenta el mapa de calor del fósforo correspondiente a la configuración inicial de 9 puntos. La superficie interpolada permitió reconocer tendencias generales en la concentración del nutriente; sin embargo, el nivel de detalle espacial fue limitado debido a la menor densidad de puntos. En este contexto, la distribución obtenida proporcionó una primera aproximación, pero no permitió reconocer detalladamente las transiciones internas del área evaluada.

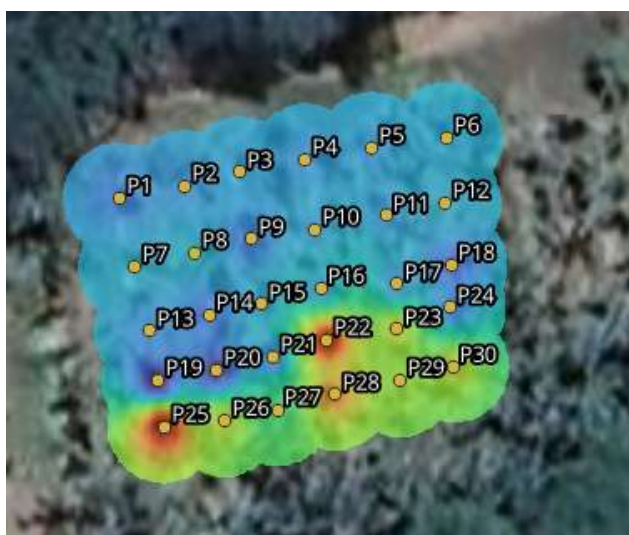
Figura 35. Mapa de distribución espacial del fósforo utilizando 15 puntos de muestreo



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 35** presenta la superficie interpolada correspondiente a la configuración intermedia de 15 puntos, en la cual se observó una mayor continuidad espacial y una definición más clara de las zonas de transición. El aumento de la densidad de muestreo proporcionó mayor claridad en la representación de la distribución del fósforo y redujo las transiciones abruptas observadas en la malla inicial. En comparación con la configuración de 9 puntos, esta representación facilitó la interpretación visual del patrón espacial del nutriente dentro del terreno agrícola.

Figura 36. Distribución espacial del fósforo con 30 puntos de muestreo



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 36** presenta el mapa de calor del fósforo correspondiente a la malla consolidada de 30 puntos. Esta configuración proporcionó una representación espacial más detallada y continua. La mayor densidad de datos permitió identificar con más detalle las zonas con concentraciones relativamente mayores y menores del nutriente. El punto P19 presentó el valor mínimo de 102 mg/kg, mientras que el punto P25 registró el valor máximo de 387 mg/kg.

Asimismo, se obtuvo un promedio general de 192,10 mg/kg. Estos resultados evidenciaron una variación espacial considerable del fósforo dentro del área de estudio.

Tabla 25. Resumen estadístico de concentración de fósforo en la malla consolidada de 30 puntos

Parámetro	Valor
Número de puntos	30
Unidad	mg/kg
Valor mínimo	102 mg/kg
Punto mínimo	P19
Valor máximo	387 mg/kg
Punto máximo	P25
Promedio	192,10 mg/kg

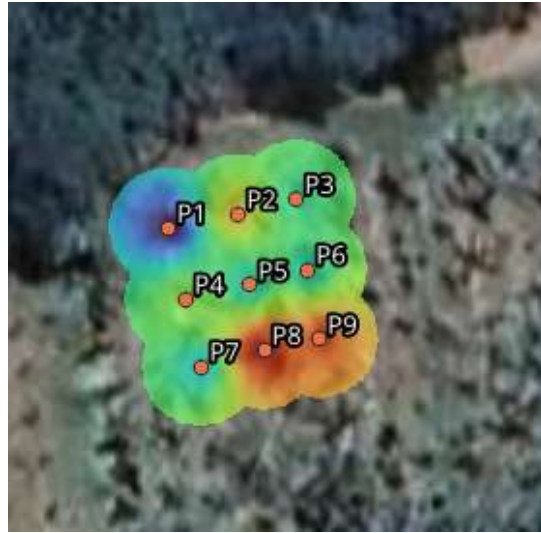
Nota: Elaboración propia.

La comparación de los tres escenarios mostró que el incremento progresivo del número de puntos proporcionó un mayor nivel de detalle en la representación espacial del fósforo. La malla de 9 puntos ofreció una visión general, mientras que las configuraciones de 15 y 30 puntos permitieron reconocer con mayor claridad la heterogeneidad espacial del nutriente. Por tanto, la densificación del muestreo favoreció una representación visual más detallada del proceso de interpolación.

4.4.3. Distribución espacial del potasio

Esta comparación permitió analizar los cambios producidos en el nivel de detalle de la superficie interpolada y en la representación espacial del macronutriente al aumentar la densidad de muestreo en el área agrícola estudiada.

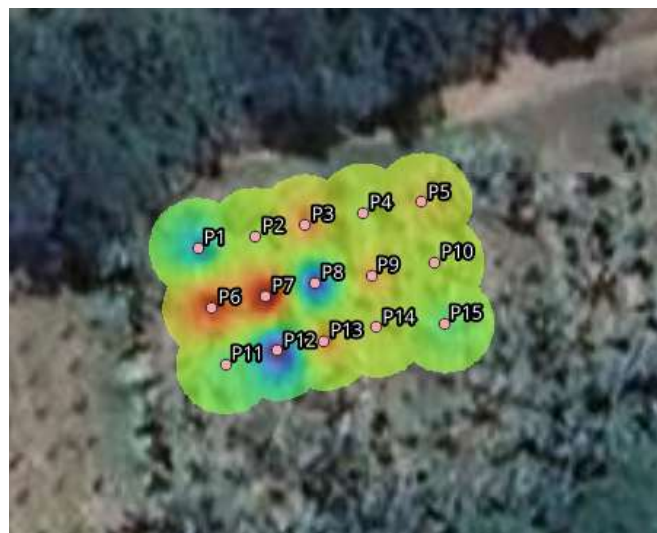
Figura 37. Distribución espacial del potasio con 9 puntos de muestreo



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 37** presenta el mapa de calor del potasio correspondiente a la configuración inicial de 9 puntos. La distribución observada permitió distinguir zonas generales con diferentes concentraciones relativas; sin embargo, la menor cantidad de puntos produjo una superficie simplificada, con un nivel limitado de detalle para representar las transiciones espaciales internas.

Figura 38. Distribución espacial del potasio con 15 puntos de muestreo



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 38** presenta la superficie interpolada del potasio correspondiente a la configuración intermedia de 15 puntos. En comparación con la configuración inicial, esta malla

mostró una mayor continuidad espacial y una diferenciación más clara entre los sectores con distintas concentraciones. La incorporación de nuevos puntos proporcionó una representación más detallada y facilitó la visualización de las zonas de transición dentro del terreno agrícola.

Figura 39. Distribución espacial del potasio con 30 puntos de muestreo



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 39** presenta el mapa de calor del potasio correspondiente a la configuración consolidada de 30 puntos. Esta malla mostró una distribución con mayor continuidad y nivel de detalle espacial, lo que permitió identificar con más claridad los sectores con distintas concentraciones relativas del nutriente.

El punto P26 presentó el valor mínimo de 248 mg/kg, mientras que el punto P20 registró el valor máximo de 490 mg/kg. Asimismo, se obtuvo un promedio general de 366,80 mg/kg. Estos resultados evidenciaron una distribución espacial heterogénea del potasio dentro del área evaluada.

Tabla 26. Resumen estadístico de la concentración de potasio en la malla consolidada de 30 puntos

Parámetro	Valor
Número de puntos	30
Unidad	mg/kg
Valor mínimo	248 mg/kg
Punto mínimo	P26
Valor máximo	490 mg/kg
Punto máximo	P20
Promedio	366,80 mg/kg

Nota: Elaboración propia.

La comparación de los tres escenarios mostró que el aumento del número de puntos georreferenciados proporcionó un mayor nivel de detalle en la representación espacial del potasio. La malla de 30 puntos generó una superficie más continua y detallada, lo que facilitó la interpretación visual de la variabilidad del nutriente. En este sentido, una mayor densidad de muestreo favoreció la representación espacial del potasio para su análisis en aplicaciones de agricultura de precisión.

4.5. Evaluación del desempeño del enlace inalámbrico

La evaluación del desempeño del enlace inalámbrico constituyó una etapa fundamental dentro del proceso de validación del sistema de telemetría IoT propuesto, debido a que la confiabilidad de la información adquirida por el nodo sensor se encuentra condicionada por la capacidad de la red de comunicación para transmitir los datos hacia la plataforma de monitoreo remoto.

A diferencia de los sistemas tradicionales de adquisición local, en los que la información permanece almacenada en el dispositivo de medición, la arquitectura planteada requirió establecer un enlace de comunicación capaz de transmitir los registros obtenidos mediante el sensor NPK, junto con la información geográfica asociada con cada punto de muestreo. Por esta razón, fue

necesario estudiar el comportamiento del canal inalámbrico bajo las condiciones del entorno agrícola evaluado.

Como referencia complementaria para el análisis experimental del enlace inalámbrico, se consideraron los mapas preliminares de cobertura celular disponibles para el área de estudio. Estos mapas permitieron contextualizar la variabilidad espacial observada posteriormente en las mediciones de RSSI obtenidas directamente mediante el nodo IoT.

El análisis del enlace se fundamentó en parámetros de calidad de servicio (Quality of Service, QoS), los cuales permitieron determinar la estabilidad, la eficiencia y la confiabilidad de la comunicación entre el nodo sensor ubicado en el campo y la plataforma IoT encargada del almacenamiento y la visualización de los datos.

En esta evaluación se consideraron tres métricas principales:

- **Intensidad de señal recibida (RSSI):** permitió conocer la potencia de la señal inalámbrica recibida por el módulo de comunicación celular y analizar su relación con factores como la vegetación, la distancia, los obstáculos físicos y la ubicación del nodo dentro del terreno agrícola.
- **Tasa de entrega de paquetes (PDR):** permitió cuantificar la confiabilidad del enlace mediante la relación entre los paquetes transmitidos por el nodo sensor y los paquetes recibidos correctamente por la plataforma IoT.
- **Latencia MQTT:** permitió analizar el tiempo requerido para completar el envío de información desde el nodo IoT hasta la plataforma de visualización remota.

La evaluación de estos parámetros se realizó considerando la distribución espacial de los puntos de medición definidos dentro del área agrícola de estudio. De esta manera, cada registro de telemetría se asoció con una ubicación geográfica mediante el sistema GNSS integrado, lo cual permitió analizar la relación entre las condiciones espaciales del terreno y el comportamiento del enlace inalámbrico.

Tabla 27. *Parámetros del desempeño del enlace inalámbrico*

Parámetro	Descripción	Unidad
RSSI	Potencia de señal recibida	dBm
PDR	Porcentaje de paquetes entregados correctamente	%
Latencia MQTT	Tiempo de transmisión del paquete	ms
Tecnología de acceso	Tipo de red utilizada	LTE-M/NB-IoT
Ubicación	Coordenadas del punto evaluado	Latitud/Longitud

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 27** presenta los parámetros empleados para caracterizar el comportamiento del enlace inalámbrico. Estas métricas permitieron evaluar no solo la disponibilidad de la comunicación, sino también la capacidad del sistema para mantener una transmisión confiable de la información agrícola en un entorno rural.

4.5.1. Análisis del indicador RSSI

Para evaluar el comportamiento del enlace inalámbrico establecido mediante el módulo de comunicación SIM7000G, integrado en la placa TTGO T-SIM7000G, se empleó el indicador de intensidad de la señal recibida (Received Signal Strength Indicator, RSSI) como métrica básica.

Este parámetro permitió determinar la potencia de la señal recibida por el nodo sensor IoT desde la estación base celular y aportó información relevante sobre las condiciones de propagación del canal inalámbrico en el entorno agrícola estudiado.

El RSSI se expresa en decibelios referidos a un milivatio (dBm) y corresponde a una medida logarítmica de la potencia recibida con respecto a una potencia de referencia de 1 mW. Cuando la potencia recibida es inferior a 1 mW, los valores de RSSI se expresan con signo negativo. Los valores más cercanos a cero representan una mayor potencia recibida, mientras que los valores más negativos indican una menor intensidad de señal.

Para interpretar los resultados obtenidos, se utilizó la siguiente clasificación técnica:

Tabla 28. Resultados obtenidos del RSSI

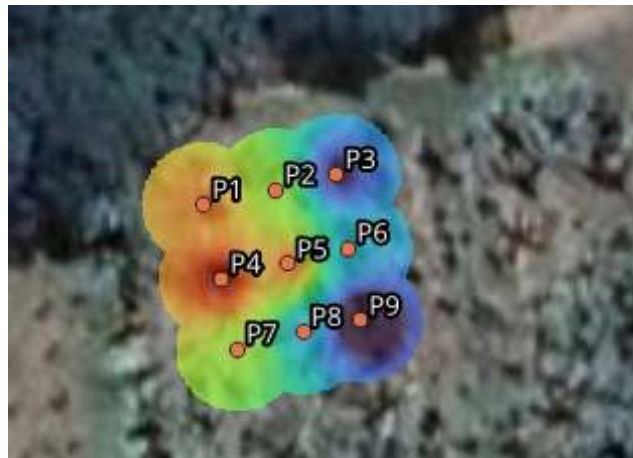
RSSI	Calidad del enlace
> -70 dBm	Excelente
-90 dBm a -70 dBm	Aceptable
-110 dBm a < -90 dBm	Débil
< -110 dBm	Crítica

Nota: Elaboración propia.

La evaluación se realizó considerando los puntos georreferenciados definidos dentro del área agrícola de estudio. Cada medición de RSSI se asoció con la posición proporcionada por el sistema GNSS, lo que permitió analizar la variación espacial de la potencia recibida y su relación con las características físicas del entorno.

En zonas rurales, la propagación de la señal celular puede verse afectada por la atenuación causada por la vegetación, la humedad del suelo, los obstáculos naturales y los cambios en la distancia respecto de la infraestructura de telefonía móvil disponible. Por tanto, el análisis del RSSI permitió identificar las áreas en las que el nodo IoT mantuvo condiciones adecuadas de comunicación para la transmisión periódica de datos agrícolas.

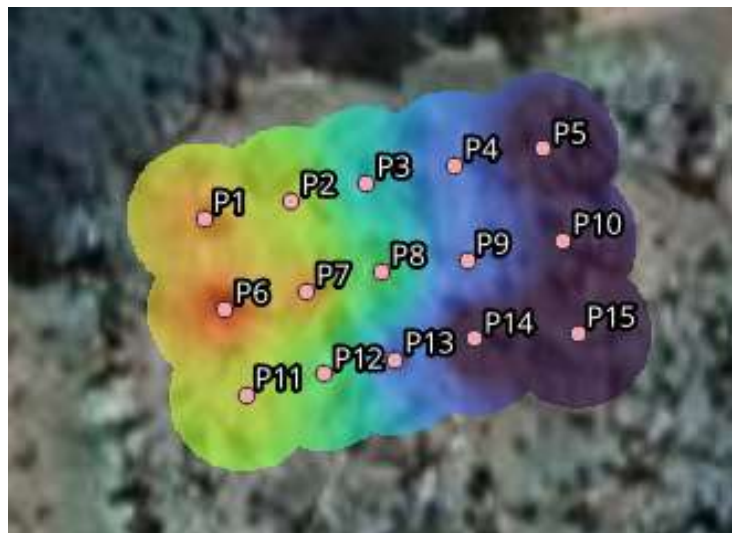
Figura 40. Distribución espacial del RSSI con 9 puntos de muestreo



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 40** muestra la distribución inicial del RSSI mediante 9 puntos de muestreo. Esta representación permitió identificar una tendencia general en el comportamiento de la señal dentro del área evaluada, aunque con una resolución espacial limitada.

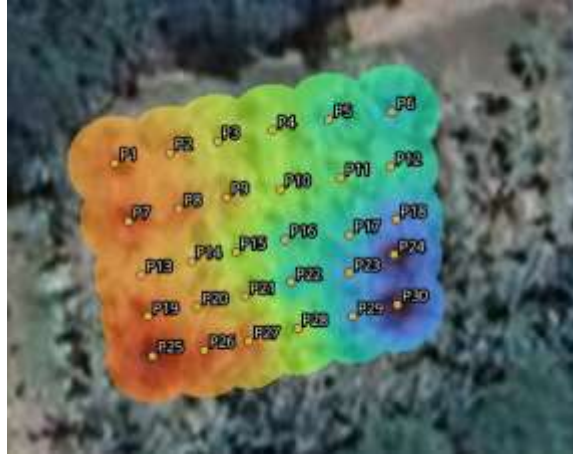
Figura 41. Distribución espacial del RSSI con 15 puntos de muestreo



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 41** presenta la distribución espacial del RSSI mediante 15 puntos de muestreo. La ampliación de la malla permitió mejorar la representación del comportamiento de la señal mediante la incorporación de nuevos puntos de referencia y la reducción de la incertidumbre visual respecto del escenario inicial.

Figura 42. Distribución espacial del RSSI con 30 puntos de muestreo



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 42** muestra la distribución consolidada del RSSI mediante 30 puntos de muestreo. Esta configuración permitió identificar con mayor claridad las zonas con mayor y menor intensidad de señal. Los puntos P24 y P30 destacaron como los sectores con menor desempeño relativo.

Los valores registrados indicaron que el enlace inalámbrico mantuvo un comportamiento funcional dentro del área agrícola evaluada. En la malla consolidada de 30 puntos, el mejor valor de intensidad de señal se registró en el punto P25, con -75 dBm, mientras que los valores más bajos se presentaron en los puntos P24 y P30, con -90 dBm. Esta variación evidenció que la potencia recibida no fue uniforme dentro del terreno y podría estar asociada con las condiciones físicas del entorno rural.

De acuerdo con la clasificación técnica empleada, la mayor parte de los puntos se mantuvo dentro del rango aceptable de señal, correspondiente a valores de entre -70 dBm y -90 dBm. Sin embargo, los puntos P24 y P30 se ubicaron en el límite inferior de dicho rango, lo que permitió identificarlos como zonas con menor desempeño relativo en términos de cobertura celular.

La variación observada entre los diferentes puntos sugirió una posible influencia del entorno físico sobre la propagación electromagnética. La presencia de vegetación, obstáculos naturales, humedad y diferencias de exposición a la infraestructura celular puede producir pérdidas por absorción, dispersión y atenuación de la señal. Aun así, los valores registrados permitieron sostener que el sistema conservó condiciones adecuadas para la transmisión periódica de telemetría agrícola de baja tasa de datos.

El análisis espacial del RSSI también mostró que el incremento progresivo del número de puntos de medición permitió caracterizar con mayor detalle el comportamiento de la señal en el terreno. La malla inicial de 9 puntos proporcionó una aproximación general; la malla de 15 puntos mejoró la resolución espacial; y la malla consolidada de 30 puntos permitió identificar con mayor claridad los sectores con mayor y menor cobertura relativa.

A pesar de estas variaciones, todos los puntos evaluados se mantuvieron dentro de un rango funcional para la transmisión de datos de baja tasa, característica propia de las aplicaciones agrícolas IoT basadas en LTE-M/NB-IoT. Este resultado indicó que la arquitectura propuesta presentó condiciones adecuadas de conectividad para la transmisión periódica de la información obtenida mediante el sensor NPK.

Tabla 29. *Evolución del RSSI según densidad de muestreo*

Configuración	Puntos evaluados	RSSI mínimo	RSSI máximo	RSSI promedio
Inicial	9	-85 dBm	-77 dBm	-80,44 dBm
Intermedia	15	-85 dBm	-77 dBm	-80,93 dBm
Consolidada	30	-90 dBm	-75 dBm	-81,87 dBm

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 29** muestra que el RSSI promedio se mantuvo dentro del rango aceptable en las tres configuraciones evaluadas. La configuración consolidada de 30 puntos presentó un valor

promedio de $-81,87$ dBm, ligeramente inferior al de las configuraciones inicial e intermedia. Esta diferencia se relacionó con la incorporación de puntos ubicados en zonas con menor cobertura relativa. No obstante, el enlace se mantuvo funcional para aplicaciones agrícolas IoT de monitoreo periódico.

4.5.2. Evaluación de confiabilidad mediante PDR

La tasa de entrega de paquetes (Packet Delivery Ratio, PDR) permitió evaluar la confiabilidad del enlace inalámbrico entre el nodo sensor IoT y la plataforma de visualización remota. Esta métrica representa el porcentaje de paquetes generados por el nodo que fueron recibidos correctamente por la plataforma IoT y constituye un indicador del desempeño de la transmisión de telemetría.

El RSSI proporciona información sobre la potencia de la señal recibida, mientras que el PDR permite analizar el desempeño efectivo del proceso de comunicación, considerando las posibles pérdidas durante la transmisión inalámbrica, la comunicación mediante MQTT y la recepción de los datos en la plataforma Blynk IoT. Por esta razón, esta métrica resultó fundamental para validar la capacidad del sistema para mantener una comunicación confiable en un entorno agrícola rural.

El PDR se calculó mediante la relación entre la cantidad de paquetes recibidos correctamente y el número total de paquetes enviados por el nodo sensor:

$$PDR(\%) = \frac{P_{recibidos}}{P_{enviados}} \times 100$$

Donde:

- $P_{recibidos}$ corresponde al número de paquetes correctamente almacenados en la plataforma IoT.
- $P_{enviados}$ representa la cantidad total de paquetes generados por el nodo durante el periodo de evaluación.

Para validar el sistema, se utilizó un escenario de transmisión periódica en el que cada punto georreferenciado correspondió a una medición efectuada por el nodo sensor en el área agrícola de estudio. En cada punto se analizaron las pérdidas de paquetes producidas durante la comunicación inalámbrica, lo que permitió conocer la estabilidad del enlace bajo distintas condiciones del entorno.

Tabla 30. PDR promedio por escenario de muestreo

Escenario	Puntos evaluados	PDR promedio
9 puntos	9	98,1%
15 puntos	15	97,9%
30 puntos	30	97,5%

Nota: Elaboración propia.

La incorporación progresiva de puntos permitió evaluar el PDR en una mayor cantidad de ubicaciones dentro del área agrícola. Los valores promedio presentaron variaciones reducidas entre los escenarios; sin embargo, no debe atribuirse esta variación únicamente al incremento del número de puntos, debido a que también se incorporaron ubicaciones con distintas condiciones de cobertura.

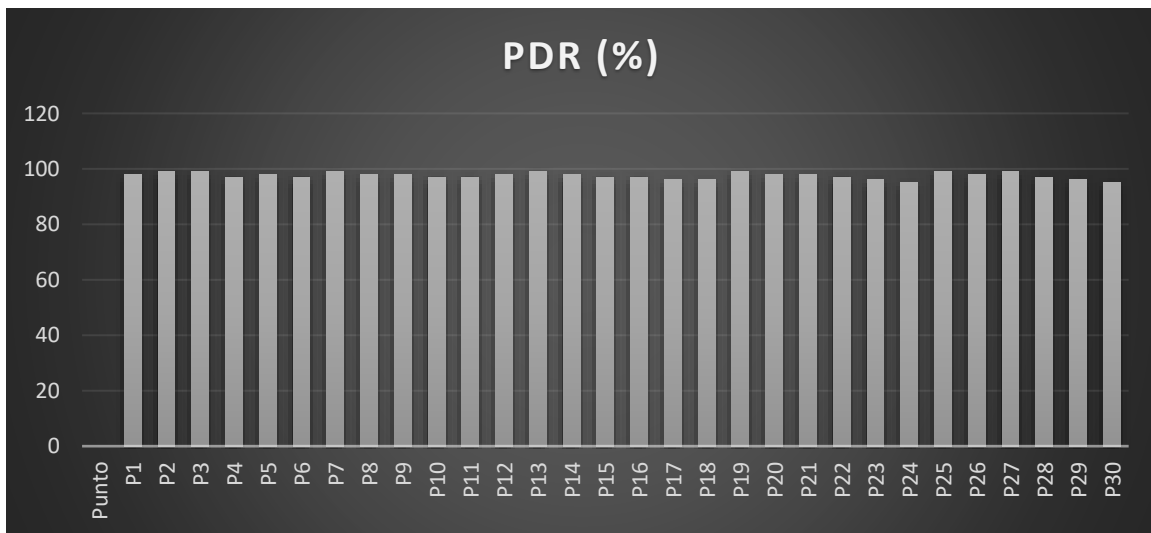
Tabla 31. Evaluación del Packet Delivery Ratio por escenario de muestreo

Escenario	Puntos evaluados	PDR mínimo	PDR máximo	PDR promedio	Interpretación
Inicial	9	97 %	99 %	98,11 %	Alta confiabilidad de entrega
Intermedio	15	97 %	99 %	97,93 %	Enlace estable sin pérdida crítica
Consolidado	30	95 %	99 %	97,50 %	Confiabilidad funcional en entorno rural

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 31** muestra que el PDR promedio se mantuvo por encima del 97 % en los tres escenarios evaluados. Este comportamiento evidenció que la mayoría de los paquetes generados por el nodo sensor fueron recibidos correctamente por la plataforma IoT. Aunque en la malla consolidada de 30 puntos se observó una ligera reducción del PDR promedio, el sistema conservó una confiabilidad adecuada para aplicaciones de monitoreo agrícola periódico.

Figura 43. Distribución del PDR registrado en los puntos de medición de la malla consolidada.



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 43** presenta la variación del PDR obtenido en los diferentes puntos de medición. Los resultados muestran una ligera variación entre las configuraciones evaluadas, aunque los valores se mantuvieron por encima del 97 %. Este comportamiento evidenció que el enlace

conservó una tasa funcional de entrega de paquetes durante las mediciones realizadas en el área agrícola.

De manera específica, los valores más bajos de PDR se registraron en los puntos P24 y P30, ambos con un 95 %. Estos puntos coincidieron con zonas de menor intensidad de señal RSSI, lo que sugirió una relación entre la disminución de la intensidad de señal y la ligera reducción de la tasa de entrega de paquetes. No obstante, todos los valores se mantuvieron dentro de un rango funcional para la telemetría IoT agrícola.

Los resultados del PDR mostraron que la arquitectura de telemetría IoT mantuvo una comunicación confiable en el área agrícola evaluada. La disminución observada en determinados puntos no representó una falla crítica del sistema, sino una variación que podría estar asociada con las condiciones del entorno rural, como la vegetación, la ubicación del nodo y la disponibilidad de cobertura celular. De esta manera, el sistema mantuvo una tasa de entrega adecuada para el monitoreo in situ de N, P y K mediante la transmisión de datos con MQTT.

4.5.3. Análisis de latencia MQTT

La latencia de comunicación se evaluó como un parámetro fundamental dentro del análisis de calidad de servicio (QoS), debido a que permitió determinar el tiempo requerido para completar la transferencia de información desde el nodo sensor IoT hasta la plataforma de visualización remota.

En el sistema propuesto, la latencia correspondió al tiempo transcurrido entre el momento en que el microcontrolador ESP32 generó el paquete de telemetría con los datos obtenidos mediante el sensor NPK y el instante en que la plataforma Blynk IoT recibió y procesó dicho paquete mediante el protocolo MQTT.

A diferencia de las aplicaciones que requieren tiempos de respuesta extremadamente reducidos, los sistemas de monitoreo agrícola presentan una dinámica temporal diferente, debido a que las variables del suelo no experimentan cambios instantáneos. Por ello, el sistema requirió principalmente un equilibrio entre la confiabilidad, el consumo energético y la disponibilidad de la información.

El análisis de la latencia permitió evaluar el comportamiento de la arquitectura de comunicación considerando los tres escenarios espaciales definidos durante la validación:

- malla inicial de 9 puntos;
- malla intermedia de 15 puntos; y
- malla consolidada de 30 puntos.

Esta estrategia permitió comparar los tiempos de transmisión de los paquetes MQTT registrados en los diferentes escenarios de muestreo.

Tabla 32. Resultados de latencia MQTT para los escenarios evaluados

Escenario	Número de puntos	Latencia mínima	Latencia máxima	Latencia promedio
Inicial	9 puntos	380 ms	490 ms	426,67 ms
Intermedio	15 puntos	380 ms	490 ms	435,33 ms
Consolidado	30 puntos	380 ms	590 ms	459,67 ms

Nota: Elaboración propia.

Los resultados de la **Tabla 32** mostraron que la latencia promedio del sistema se mantuvo en un intervalo similar en los tres escenarios de medición. En la configuración inicial de 9 puntos, la latencia promedio fue de 426,67 ms; en la configuración intermedia de 15 puntos fue de 435,33 ms; y en la configuración consolidada de 30 puntos alcanzó 459,67 ms.

La diferencia observada entre los escenarios analizados fue reducida. Los paquetes de telemetría generados por el nodo presentaron una baja carga de datos y se transmitieron mediante MQTT, protocolo orientado al intercambio de mensajes en aplicaciones IoT con restricciones de ancho de banda y consumo energético.

Las latencias más elevadas registradas podrían estar asociadas con variaciones de la red móvil, como los procesos internos de conexión, la disponibilidad del canal radioeléctrico y las condiciones dinámicas de la infraestructura LTE-M/NB-IoT.

Al comparar los resultados de latencia con los parámetros analizados previamente, se observó que los puntos con menor intensidad de señal recibida presentaron mayores tiempos para completar la transmisión mediante MQTT. Sin embargo, los valores obtenidos se mantuvieron dentro de los intervalos establecidos para el funcionamiento del sistema de monitoreo agrícola periódico.

4.5.4. Análisis comparativo de parámetros QoS

El análisis comparativo de los parámetros de calidad de servicio (QoS) permitió evaluar de manera integrada el comportamiento del enlace inalámbrico empleado por el sistema de telemetría IoT. Para ello, se analizaron conjuntamente la intensidad de la señal recibida, la tasa de entrega de paquetes y la latencia de transmisión mediante MQTT, considerando los tres escenarios de muestreo definidos durante la validación: 9, 15 y 30 puntos.

A diferencia del análisis individual de cada métrica, esta comparación permitió observar la relación general entre la cobertura, la confiabilidad y el tiempo de transmisión. El RSSI permitió caracterizar la intensidad de la señal recibida por el nodo sensor; el PDR permitió cuantificar la

proporción de paquetes entregados correctamente; y la latencia MQTT permitió determinar el tiempo requerido para que los paquetes de telemetría llegaran a la plataforma de monitoreo remoto.

Los registros consolidados de telemetría se utilizaron para realizar el análisis comparativo. Cada punto de medición incluyó coordenadas geográficas, datos NPK, RSSI, tecnología de acceso, PDR y latencia. A partir de estos datos, se calcularon los valores mínimos, máximos y promedio correspondientes a cada escenario de muestreo.

Tabla 33. Comparación general de parámetros QoS por escenario de muestreo

Escenario	Puntos evaluados	RSSI mín.	RSSI máx.	RSSI prom.	PDR prom.	Latencia prom.	Interpretación general
Inicial	9	-85 dBm	-77 dBm	-80,44 dBm	98,11 %	426,67 ms	Enlace aceptable y estable
Intermedio	15	-85 dBm	-77 dBm	-80,93 dBm	97,93 %	435,33 ms	Ligera variación sin degradación crítica
Consolidado	30	-90 dBm	-75 dBm	-81,87 dBm	97,50 %	459,67 ms	Mayor variabilidad espacial con enlace funcional

Nota: Elaboración propia.

En los tres escenarios evaluados, el RSSI promedio se mantuvo dentro del rango aceptable, como se muestra en la **Tabla 33**. En la configuración inicial de 9 puntos, se obtuvo un promedio de $-80,44$ dBm, mientras que, en la configuración intermedia de 15 puntos, el valor promedio fue de $-80,93$ dBm. En la malla consolidada de 30 puntos, el RSSI promedio descendió ligeramente hasta $-81,87$ dBm. Esta variación coincidió con la incorporación de puntos ubicados en zonas con condiciones de propagación más heterogéneas.

A pesar de esta variación, los valores de RSSI permanecieron dentro de condiciones funcionales para las aplicaciones de telemetría agrícola evaluadas. En el escenario de 30 puntos, se registraron valores mínimos cercanos a -90 dBm, los cuales representaron el límite inferior del

rango aceptable empleado en este estudio. Esta situación podría estar asociada con la presencia de vegetación, obstáculos físicos y variaciones en la ubicación relativa del nodo respecto de la infraestructura celular disponible.

Los resultados del PDR evidenciaron una alta confiabilidad en la entrega de paquetes. En los tres escenarios, el PDR promedio permaneció por encima del 97 %, lo que indicó que la mayoría de los paquetes generados por el nodo sensor fueron recibidos correctamente por la plataforma de monitoreo. Aunque en la configuración de 30 puntos se observó una ligera reducción del PDR promedio, el sistema mantuvo una tasa de entrega funcional para las aplicaciones IoT de baja tasa de datos evaluadas.

Los valores promedio de latencia MQTT presentaron variaciones entre los escenarios evaluados. La malla inicial registró una latencia promedio de 426,67 ms; la malla intermedia, 435,33 ms; y la malla consolidada, 459,67 ms.

Estos valores resultaron compatibles con el funcionamiento establecido para el sistema, debido a que este se orientó al monitoreo periódico de N, P y K en el suelo, cuyas mediciones no requirieron respuestas instantáneas.

El comportamiento conjunto de las métricas mostró que los tres escenarios mantuvieron condiciones funcionales de comunicación. La incorporación de más puntos proporcionó una caracterización espacial más detallada del terreno y del comportamiento de la red. Las variaciones observadas entre las ubicaciones podrían estar asociadas con las condiciones físicas del entorno agrícola, como la vegetación, la humedad, los obstáculos y la disponibilidad de cobertura celular.

Desde el punto de vista técnico, los resultados mostraron que la arquitectura basada en la placa TTGO T-SIM7000G, el protocolo MQTT y la conectividad celular mantuvo un desempeño

adecuado para el envío de telemetría agrícola georreferenciada. El sistema conservó niveles aceptables de RSSI, porcentajes elevados de entrega de paquetes y valores de latencia compatibles con el esquema de monitoreo *in situ* evaluado.

En síntesis, el análisis comparativo de los parámetros de QoS mostró que el sistema de telemetría IoT presentó un comportamiento estable y funcional en el área agrícola estudiada. Los valores de RSSI dentro del rango de aceptabilidad empleado, los porcentajes de PDR superiores al 97 % y los valores promedio de latencia inferiores a 500 ms respaldaron la viabilidad técnica del enlace inalámbrico para el monitoreo de N, P y K en un entorno rural.

4.6. Relación espacial entre los parámetros de red y la ubicación geográfica

La relación entre los parámetros de red y la ubicación geográfica se estableció a partir de los registros georreferenciados obtenidos durante la validación del sistema de telemetría IoT. A cada punto de medición se le asociaron coordenadas de latitud y longitud, así como parámetros de desempeño del enlace inalámbrico, como RSSI, tecnología de acceso, PDR y latencia MQTT. Esta relación permitió analizar la posible influencia de las condiciones espaciales del terreno en la calidad de la comunicación celular del nodo sensor.

La ubicación geográfica constituyó un elemento fundamental para el análisis, debido a que el entorno agrícola no presentó condiciones homogéneas de propagación. La potencia de la señal recibida y, por consiguiente, la entrega de paquetes y los tiempos de transmisión pudieron verse afectados por la presencia de vegetación, las variaciones del terreno, los obstáculos naturales y las diferencias de exposición a la infraestructura celular.

Figura 44. Distribución espacial comparativa entre RSSI, PDR y latencia en la malla consolidada de 30 puntos



Nota: Elaboración propia.

La **Figura 44** ilustra la relación espacial entre los parámetros de red registrados en la malla consolidada de 30 puntos. El color de los puntos representa la intensidad de la señal RSSI; el tamaño del marcador, la latencia MQTT; y la etiqueta, el PDR registrado en cada punto. Se observa que los sectores ubicados a la derecha del área evaluada presentaron una menor intensidad de señal, marcadores de mayor tamaño y una ligera reducción del PDR, especialmente en los puntos P24 y P30. Estos resultados sugieren una tendencia asociada entre la ubicación geográfica y las variaciones observadas en el comportamiento del enlace inalámbrico del sistema de telemetría IoT.

Para este análisis, se utilizó como referencia la malla consolidada de 30 puntos de muestreo. A partir de ella, se compararon las coordenadas de cada punto con los valores registrados de RSSI, PDR y latencia. De esta manera, se pudieron identificar las zonas con mejor comportamiento de red y los sectores en los que la señal presentó una mayor degradación.

En términos generales, se observó que los puntos ubicados en los sectores oeste y suroeste del área evaluada presentaron mejores condiciones de conectividad, con valores de RSSI menos negativos, PDR más alto y menor latencia. En contraste, algunos puntos localizados en los sectores

este y sureste presentaron una disminución de la potencia recibida, acompañada de una ligera reducción del PDR y un aumento de la latencia MQTT.

Tabla 34. Relación espacial entre ubicación y desempeño del enlace inalámbrico

Zona aproximada del área de estudio	Puntos representativos	RSSI observado	PDR observado	Latencia observada	Interpretación
Sector occidental / suroccidental	P19, P25, P26	-77 a -75 dBm	98 % a 99 %	380 a 410 ms	Mejor condición relativa del enlace
Sector central	P10, P11, P15, P16, P17	-82 a -85 dBm	96 % a 97 %	450 a 510 ms	Enlace funcional con variación moderada
Sector oriental / nororiental	P18, P23, P24	-87 a -90 dBm	95 % a 96 %	540 a 590 ms	Mayor degradación de señal y aumento de latencia
Sector suroriental	P29, P30	-86 a -90 dBm	95 % a 96 %	530 a 580 ms	Zona con menor desempeño relativo de red

Nota: Elaboración propia.

En la **Tabla 34** se observa que los puntos con mayor intensidad de señal, como P25, presentaron valores cercanos a -75 dBm, un PDR del 99 % y una latencia aproximada de 380 ms. Estos resultados indican una condición favorable para la transmisión de datos mediante el sistema de telemetría IoT. De igual manera, los puntos P19 y P26 mantuvieron valores adecuados de RSSI y latencia, lo que evidencia que los sectores oeste y suroeste del área evaluada presentaron mejores condiciones relativas de conectividad.

Por otra parte, los puntos P24 y P30 presentaron los valores de RSSI más bajos, cercanos a -90 dBm. En estos puntos también se registró un PDR del 95 % y latencias superiores a 580 ms. Este comportamiento muestra que la reducción de la intensidad de la señal coincidió con una

disminución del desempeño del enlace inalámbrico, lo que muestra una tendencia conjunta entre ambos parámetros. Aunque los valores se mantuvieron dentro de un rango funcional para las aplicaciones IoT evaluadas, estas zonas presentaron las mayores limitaciones relativas de cobertura dentro del área de estudio.

Los resultados mostraron una tendencia al incremento de la latencia a medida que el RSSI adquirió valores más negativos. Una señal más débil puede requerir un mayor tiempo para completar los procesos de transmisión, validación y recepción del paquete en la plataforma IoT. Esta tendencia fue más evidente en los puntos localizados en los sectores este y sureste, donde se registraron los mayores tiempos de transmisión.

También se observó que los puntos con menor RSSI tendieron a presentar una ligera reducción del PDR. En los puntos donde la señal fue más intensa, se alcanzó un PDR de entre el 98 % y el 99 %, mientras que, en aquellos donde la señal fue más débil, el PDR se situó entre el 95 % y el 96 %. Esta diferencia no representó un fallo crítico del sistema, pero mostró una asociación entre la ubicación geográfica y la fiabilidad de la entrega de paquetes.

Es importante destacar que en los puntos P24 y P30 se registró el uso de la tecnología NB-IoT. Estos puntos coincidieron con los valores de RSSI más bajos y las latencias más altas del conjunto evaluado. Este comportamiento es consistente con las características operativas de NB-IoT, orientada a aplicaciones de baja tasa de datos y cobertura extendida; sin embargo, las condiciones específicas del enlace también dependieron de la infraestructura celular disponible.

Desde una perspectiva espacial, la relación observada mostró que la calidad de la conexión inalámbrica no dependió únicamente del hardware empleado, sino también de la ubicación del nodo en el terreno. Las variaciones registradas entre los puntos evidenciaron la importancia de

integrar la georreferenciación mediante GNSS en el sistema de telemetría, puesto que esta permitió relacionar cada lectura de red con una ubicación específica y generar una interpretación espacial del desempeño de la comunicación.

La combinación de las coordenadas geográficas con los parámetros de calidad de servicio aportó valor técnico al estudio, debido a que permitió identificar las zonas en las que el sistema presentó mayor estabilidad y aquellas donde podrían requerirse mejoras, como el aumento de la altura de la antena, el ajuste de su orientación, el uso de antenas externas o la selección de la tecnología celular más adecuada. De esta manera, el análisis espacial no solo facilitó la interpretación agronómica de los datos NPK, sino que también permitió identificar posibles mejoras en la infraestructura de telecomunicaciones.

La relación entre la ubicación geográfica y los parámetros de red indicó que el sistema de telemetría IoT presentó un desempeño funcional dentro del área agrícola estudiada, aunque se identificaron variaciones espaciales asociadas con las condiciones del entorno físico.

Los sectores con mayor RSSI presentaron un PDR más alto y una menor latencia, mientras que los sectores con señales más débiles registraron incrementos moderados en el tiempo de transmisión.

Los resultados obtenidos respaldaron la importancia de considerar la georreferenciación no solo para el monitoreo de macronutrientes, sino también para la evaluación técnica del enlace inalámbrico en entornos rurales.

4.7. Evaluación energética del nodo sensor

4.7.1. Consideraciones del consumo energético del sistema

La capacidad del nodo sensor para funcionar con autonomía energética resultó fundamental para mantener la continuidad operativa del sistema de telemetría IoT en el entorno agrícola. Debido a que el nodo fue diseñado para operar in situ, donde no existe disponibilidad permanente de alimentación eléctrica convencional, fue necesario evaluar el comportamiento energético de los principales bloques que conformaron la arquitectura propuesta.

El análisis consideró las principales etapas de operación del nodo:

- ✓ Adquisición de variables mediante el sensor NPK industrial
- ✓ Procesamiento local mediante el SoC ESP32 integrado en la placa TTGO T-SIM7000G;
- ✓ Adquisición de coordenadas mediante el sistema GNSS;
- ✓ Transmisión de datos mediante LTE-M/NB-IoT y el protocolo MQTT; y
- ✓ Periodo de suspensión profunda.

La estrategia energética implementada se fundamentó en un funcionamiento cíclico, en el cual el nodo permaneció la mayor parte del tiempo en modo de bajo consumo y activó sus periféricos únicamente durante los procesos de medición y transmisión de información.

4.7.2. Modelo energético del ciclo de operación

Se analizó el consumo energético del nodo sensor considerando un ciclo periódico de adquisición y transmisión. En cada ciclo, el sistema pasó por distintos estados operativos, en los cuales cada componente presentó un consumo energético diferente.

La energía total consumida durante un ciclo se expresó mediante la siguiente ecuación:

$$E_{total} = E_{sensado} + E_{procesamiento} + E_{GNSS} + E_{comunicación} + E_{sleep}$$

Donde:

- ✓ $E_{sensado}$: energía utilizada durante la lectura del sensor NPK.
- ✓ $E_{procesamiento}$: energía consumida por el ESP32 durante la gestión de datos.
- ✓ E_{GNSS} : energía requerida para la adquisición de coordenadas.
- ✓ $E_{comunicación}$: energía asociada a la conexión LTE-M/NB-IoT y transmisión MQTT.
- ✓ E_{sleep} : energía consumida durante el modo de suspensión profunda.

La arquitectura implementada redujo el consumo energético promedio, debido a que los módulos con mayor demanda permanecieron activos únicamente durante periodos cortos del ciclo operativo.

Tabla 35. Distribución estimada del consumo energético por etapa de operación

Etapas de operación	Tiempo estimado	Corriente aproximada	Función
Inicialización del sistema	10 s	120 mA	Activación del ESP32 y periféricos
Lectura sensor NPK RS485	2 s	90 mA	Adquisición de valores N, P y K
Procesamiento local ESP32	5 s	80 mA	Conversión y empaquetamiento JSON
Activación GNSS	30 s	45 mA	Obtención de coordenadas geográficas
Transmisión LTE-M/NB-IoT MQTT	20 s	250 mA	Envío de telemetría hacia Blynk
Suspensión profunda del ESP32	3600 s	0,01 mA	Conservación energética entre mediciones

Nota: Elaboración propia.

4.7.3. Cálculo de la corriente promedio del nodo

Considerando un ciclo de operación compuesto por 67 s de actividad y 3600 s de suspensión profunda, el tiempo total considerado fue de 3667 s.

$$I_{prom} = \frac{\sum(I_i t_i)}{T}$$

Donde:

- ✓ I_i : corriente consumida durante cada etapa.
- ✓ t_i : duración de cada etapa.
- ✓ T : tiempo total del ciclo.

Aplicando los valores estimados:

$$I_{prom} = \frac{(120)(10) + (90)(2) + (80)(5) + (45)(30) + (250)(20) + (0.01)(3600)}{3600}$$

$$I_{prom} = 2.62mA$$

Por lo tanto, la corriente promedio aproximada del nodo durante un ciclo de monitoreo es:

$$I_{prom} = 2.62mA$$

Este resultado evidencia que la estrategia basada en ciclos de actividad y suspensión profunda permite reducir la corriente promedio demandada durante el ciclo de operación.

4.7.4. Evaluación de autonomía energética

Para estimar la autonomía del sistema, se consideró la capacidad nominal de la batería utilizada.

La batería empleada posee una capacidad nominal de:

$$C = 15000mAh$$

La autonomía teórica puede calcularse mediante:

$$Autonomía = \frac{C}{I_{prom}}$$

Reemplazando:

$$Autonomía = \frac{15000mAh}{2.62mA}$$

$$Autonomía = 5725h$$

Transformando a días:

$$Autonomía = \frac{5725}{24}$$

$$Autonomía = 238 \text{ días}$$

Sin embargo, debido a las pérdidas propias del sistema, asociadas a los siguientes factores:

- ✓ eficiencia del regulador de carga;
- ✓ variaciones de radiación solar;
- ✓ temperatura ambiental;
- ✓ degradación de la batería; y
- ✓ consumo adicional del módem celular;

Para obtener una estimación conservadora de la autonomía, se adoptó un margen de corrección del 40 % asociado con las pérdidas y variaciones consideradas.

Por lo tanto:

$$Autonomía_{real} = 238 (0.6)$$

$$Autonomía_{real} = 142 \text{ días}$$

4.7.5. Aporte del sistema fotovoltaico

El aporte del panel solar de 10 W se evaluó mediante una estimación de la energía teórica disponible durante las horas de radiación solar.

La energía requerida diariamente es:

$$E_d = V \times I_{prom} \times 24$$

Considerando la batería de 12 V y 15 Ah utilizada en el sistema:

$$E_d = 12 \times 0.00262 \times 24$$

$$E_d = 0.75Wh/día$$

Bajo el supuesto de cuatro horas solares efectivas, la energía teórica disponible diariamente mediante el panel fotovoltaico se estimó en:

$$E_{solar} = 10W \times 4h$$

$$E_{solar} = 40Wh/día$$

Comparando:

$$40Wh/día \gg 0.23Wh/día$$

Esta estimación indica que la energía teórica disponible mediante el sistema fotovoltaico puede superar el requerimiento energético estimado del nodo bajo las condiciones consideradas.

4.8. Integración funcional de la arquitectura IoT

La integración funcional de la arquitectura IoT permitió comprobar que los distintos subsistemas propuestos trabajaron de manera coordinada dentro del flujo completo de telemetría agrícola. Esta integración no se limitó al funcionamiento individual de cada componente, sino que permitió validar la continuidad del proceso desde la adquisición de los datos en campo hasta su transmisión, almacenamiento, visualización y posterior análisis.

El sistema se organizó en torno a una cadena funcional constituida por el subsistema de medición, la adaptación de señales, la unidad de procesamiento local, el sistema de georreferenciación, la comunicación inalámbrica, la plataforma de visualización y el subsistema energético. Cada una de estas etapas cumplió una función específica dentro de la arquitectura; sin embargo, su verdadero valor radicó en la combinación de sus funciones para producir un registro de telemetría útil, georreferenciado y transmisible.

Los valores de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) del suelo se obtuvieron mediante el sensor NPK industrial, integrado en el subsistema de medición. Los datos se enviaron a través de la interfaz RS485/Modbus RTU, empleando el transceptor MAX485 como elemento de adaptación entre el sensor y el microcontrolador ESP32. Esta integración permitió establecer una comunicación digital adecuada entre el sensor NPK industrial y la placa TTGO T-SIM7000G.

Posteriormente, la unidad de procesamiento local procesó los datos obtenidos por el sensor e incorporó la ubicación geográfica proporcionada por el sistema GNSS integrado. De esta manera, cada lectura de N, P y K pudo relacionarse con una coordenada específica dentro del área agrícola evaluada. Esta característica resultó fundamental para la construcción de la base de datos georreferenciada y la posterior generación de mapas de calor e indicadores espaciales.

Durante la fase de comunicación inalámbrica, los registros se enviaron mediante MQTT a través de las tecnologías celulares LTE-M/NB-IoT, según la disponibilidad de red observada. Este subsistema de comunicación fue responsable de transmitir la información desde el nodo sensor hasta la plataforma Blynk IoT, lo que permitió que los datos no se almacenaran únicamente en el dispositivo local, sino que también fueran accesibles de forma remota. Además, durante este proceso se registraron parámetros de calidad de servicio, como RSSI, PDR y latencia, los cuales permitieron evaluar el comportamiento técnico del enlace.

La integración con la plataforma Blynk IoT permitió completar el ciclo funcional del sistema, puesto que los datos enviados por el nodo se organizaron para su visualización y almacenamiento. Esta fase correspondió a la capa de aplicación de la arquitectura, en la cual la información recolectada en campo se convirtió en un recurso útil para el monitoreo remoto y el apoyo a la toma de decisiones.

Tabla 36. Integración funcional de los subsistemas de la arquitectura IoT

Capa o subsistema	Componente principal	Función integrada	Resultado funcional
Medición	Sensor NPK industrial	Captura de valores de nitrógeno, fósforo y potasio	Obtención de datos agronómicos en mg/kg
Adaptación de señales	MAX485	Conversión entre RS485 y señales compatibles con ESP32	Comunicación digital con el sensor
Procesamiento local	TTGO T-SIM7000G / ESP32	Lectura, organización y empaquetamiento de datos	Generación de registros de telemetría
Georreferenciación	GNSS integrado	Asociación de coordenadas a cada medición	Datos NPK vinculados a ubicación espacial
Comunicación inalámbrica	SIM7000G	Transmisión mediante LTE-M/NB-IoT y MQTT	Envío remoto de datos hacia la nube
Plataforma IoT	Blynk IoT	Recepción, almacenamiento y visualización de datos	Monitoreo remoto del sistema
Evaluación QoS	RSSI, PDR y latencia	Medición del desempeño del enlace inalámbrico	Validación técnica de la comunicación celular
Energía	Panel solar, batería y suspensión profunda	Suministro y optimización energética	Operación autónoma del nodo sensor

Nota: Elaboración propia.

La **Tabla 36** resume la forma en que cada subsistema intervino en la arquitectura IoT implementada. En ella se observa que el funcionamiento del sistema no dependió de un solo componente, sino de la interacción ordenada entre el hardware, el firmware, los protocolos de comunicación, la plataforma de visualización y la gestión energética.

Desde el punto de vista funcional, la arquitectura permitió consolidar un flujo completo de operación. En primer lugar, el sensor NPK obtuvo los valores de N, P y K del suelo; posteriormente, el ESP32 procesó los datos y los integró con las coordenadas GNSS. A

continuación, el módulo SIM7000G transmitió la telemetría mediante MQTT y, finalmente, la plataforma Blynk IoT permitió la recepción y visualización remota de los registros.

Esta integración también permitió relacionar las variables agronómicas con los parámetros de red. De esta manera, el sistema no solo funcionó como una herramienta para la medición de N, P y K, sino que también sirvió como plataforma para evaluar el desempeño de la comunicación inalámbrica en un entorno rural. Para ello, el RSSI, el PDR y la latencia se incorporaron al modelo de telemetría, con el propósito de analizar la estabilidad del enlace y su relación con la ubicación geográfica.

La integración energética del sistema permitió respaldar la operación autónoma del nodo sensor. La combinación del panel solar, la batería y los ciclos de suspensión profunda permitió reducir el consumo medio del dispositivo y mantener un esquema de funcionamiento adecuado para aplicaciones de monitoreo periódico. Esta condición resultó relevante, debido a que el sistema fue diseñado para operar en campo, donde no siempre existe disponibilidad de alimentación eléctrica convencional.

En conjunto, la arquitectura IoT validada permitió demostrar la viabilidad funcional del sistema de telemetría agrícola. Los resultados obtenidos evidenciaron que el nodo sensor fue capaz de obtener datos NPK, asociarlos con una ubicación geográfica, transmitirlos mediante una red celular, registrar métricas de comunicación y mantener su funcionamiento mediante una estrategia de eficiencia energética.

Por tanto, la integración funcional constituyó el cierre técnico de la validación del sistema. Mediante esta integración se confirmó que la propuesta no correspondió únicamente a un conjunto de componentes conectados, sino a una arquitectura IoT articulada, capaz de integrar la medición,

las telecomunicaciones, la georreferenciación, el análisis espacial y la autonomía energética dentro de un mismo flujo operativo.

La arquitectura desarrollada cumplió con los requisitos funcionales establecidos para el monitoreo *in situ* de nitrógeno, fósforo y potasio en un entorno agrícola rural. La adecuada interacción entre el sensor NPK, el microcontrolador, el módulo celular, el sistema GNSS, el protocolo MQTT, la plataforma IoT y el sistema energético permitió sustentar la viabilidad técnica del sistema propuesto para aplicaciones de agricultura de precisión.

CONCLUSIONES

- La implementación de la arquitectura de telemetría IoT permitió integrar los componentes de medición, procesamiento, comunicación, georreferenciación y visualización requeridos para el monitoreo in situ de macronutrientes N, P y K. La integración del sensor NPK, la interfaz RS485/Modbus RTU, el transceptor MAX485, la placa TTGO T-SIM7000G, el sistema GNSS y la plataforma Blynk IoT permitió establecer un flujo completo de adquisición, procesamiento, georreferenciación y transmisión de datos agrícolas.
- La comparación entre las mediciones del sensor NPK y los resultados del análisis de laboratorio evidenció una menor diferencia para nitrógeno y fósforo, mientras que el potasio presentó una mayor variación, por lo que el sensor demostró utilidad para monitoreo periódico, pero requiere evaluaciones adicionales bajo diferentes condiciones del suelo.
- El análisis espacial mediante interpolación evidenció una distribución heterogénea de los macronutrientes en el área estudiada. Con la malla consolidada de 30 puntos se identificaron concentraciones entre 98 y 360 mg/kg para el nitrógeno, entre 102 y 387 mg/kg para el fósforo y entre 248 y 490 mg/kg para el potasio. La georreferenciación de los registros permitió caracterizar espacialmente las variaciones observadas dentro del terreno evaluado.
- La evaluación del enlace inalámbrico evidenció condiciones funcionales para la transmisión periódica de datos agrícolas. En la malla consolidada de 30 puntos se obtuvo un RSSI promedio de $-81,87$ dBm, un PDR promedio de 97,50 % y una latencia promedio

de 459,67 ms. Estos resultados mostraron la viabilidad funcional de la transmisión de telemetría mediante LTE-M/NB-IoT y MQTT en el escenario rural evaluado.

- La evaluación energética permitió estimar el comportamiento del nodo durante los ciclos de operación y analizar la contribución del panel solar, la batería y el modo de suspensión profunda. Los resultados teóricos mostraron que la operación cíclica puede reducir la demanda energética entre mediciones; sin embargo, la autonomía efectiva depende de la capacidad útil de la batería, las pérdidas del sistema y la energía fotovoltaica disponible.

RECOMENDACIONES

- Ampliar la evaluación comparativa del sensor NPK mediante un mayor número de muestras comparativas con análisis de laboratorio y bajo diferentes condiciones de humedad del suelo. La incorporación de indicadores estadísticos, como el error medio absoluto, la desviación estándar y el coeficiente de correlación, permitiría determinar con mayor precisión la concordancia entre las mediciones obtenidas mediante el nodo IoT y los valores de referencia.
- Optimizar el enlace inalámbrico mediante pruebas con diferentes alturas y orientaciones de antena, así como con antenas de mayor ganancia, especialmente en los sectores donde se identificaron menores niveles de RSSI. Asimismo, se recomienda incorporar almacenamiento local temporal para conservar los datos durante pérdidas de cobertura y sincronizarlos cuando se restablezca la conectividad.
- Extender la arquitectura hacia una red distribuida de múltiples nodos sensores para incrementar la cobertura espacial y obtener mapas nutricionales estimados de mayor resolución. Esta ampliación podría complementarse con herramientas de análisis histórico, generación de alertas y modelos predictivos orientados a aplicaciones avanzadas de agricultura de precisión.
- Realizar mediciones experimentales de corriente y potencia en la alimentación del nodo durante ciclos completos de operación, así como pruebas de autonomía de la batería y generación fotovoltaica durante periodos prolongados. Estas pruebas permitirían validar el modelo energético propuesto y cuantificar las pérdidas reales asociadas con los componentes del sistema.

ANEXOS

Anexo 1. Registro fotográfico del terreno antes de las pruebas.



Anexo 2. Recolección de muestras de suelo en el punto MAS06.



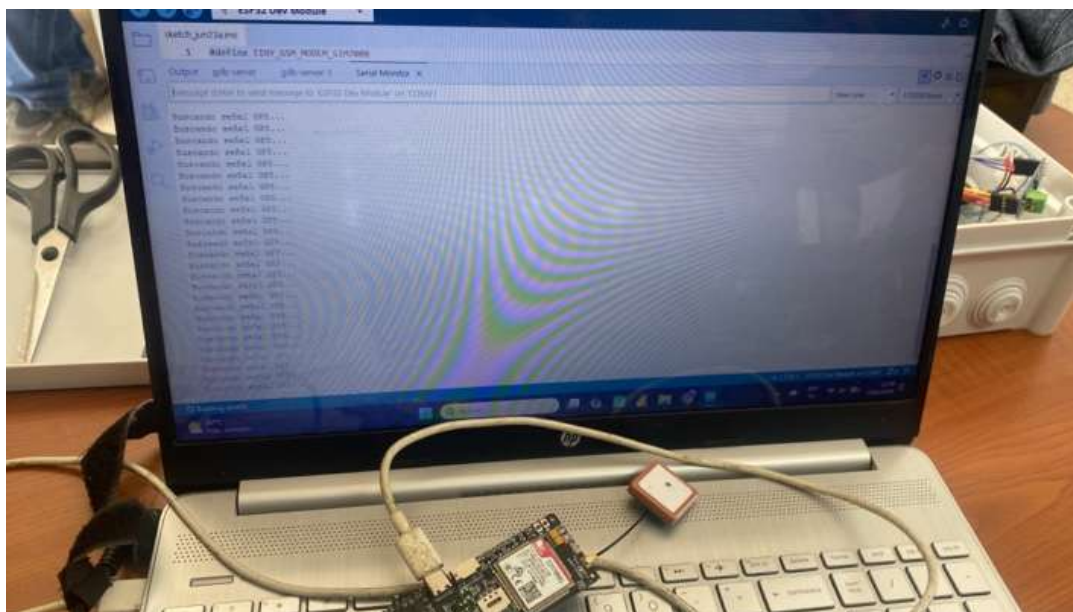
Anexo 3. Prototipo funcional inicial del nodo IoT.



Anexo 4. Verificación del funcionamiento de la antena LTE-M/NB-IoT del nodo IoT.



Anexo 5. Pruebas preliminares del módulo GNSS integrado en la placa TTGO T-SIM7000G.



Anexo 6. Preparación de las muestras de suelo para la evaluación comparativa del sensor NPK.



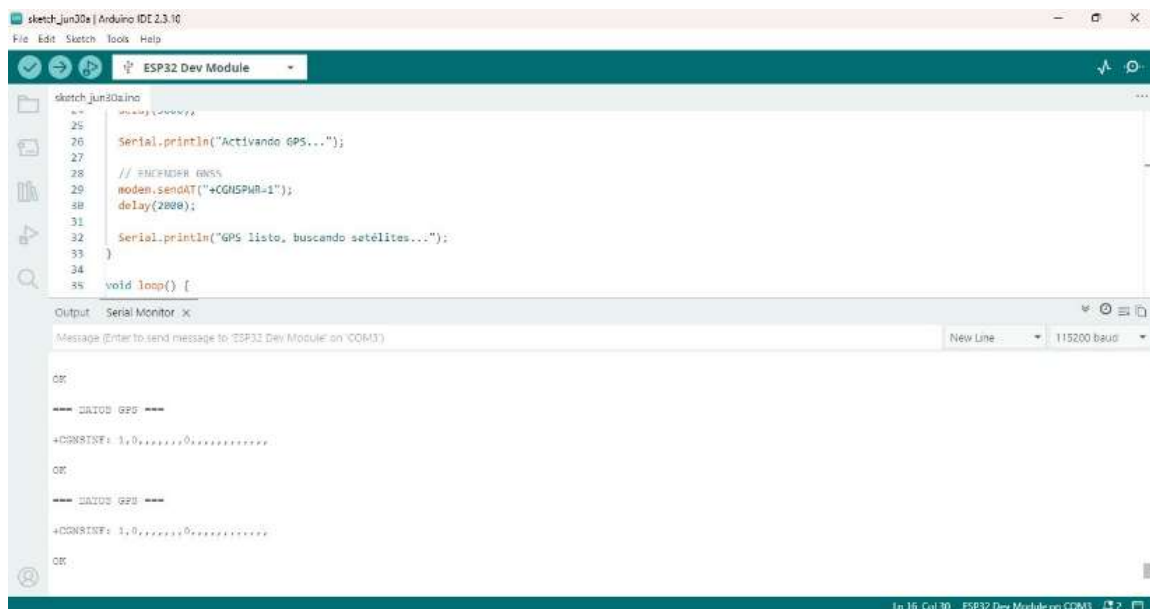
Anexo 7. Recolección de muestras de suelo en el punto MAS06



Anexo 8: Validación de infraestructura metálica del sistema IoT.



Anexo 9. Verificación del funcionamiento del módulo GNSS.



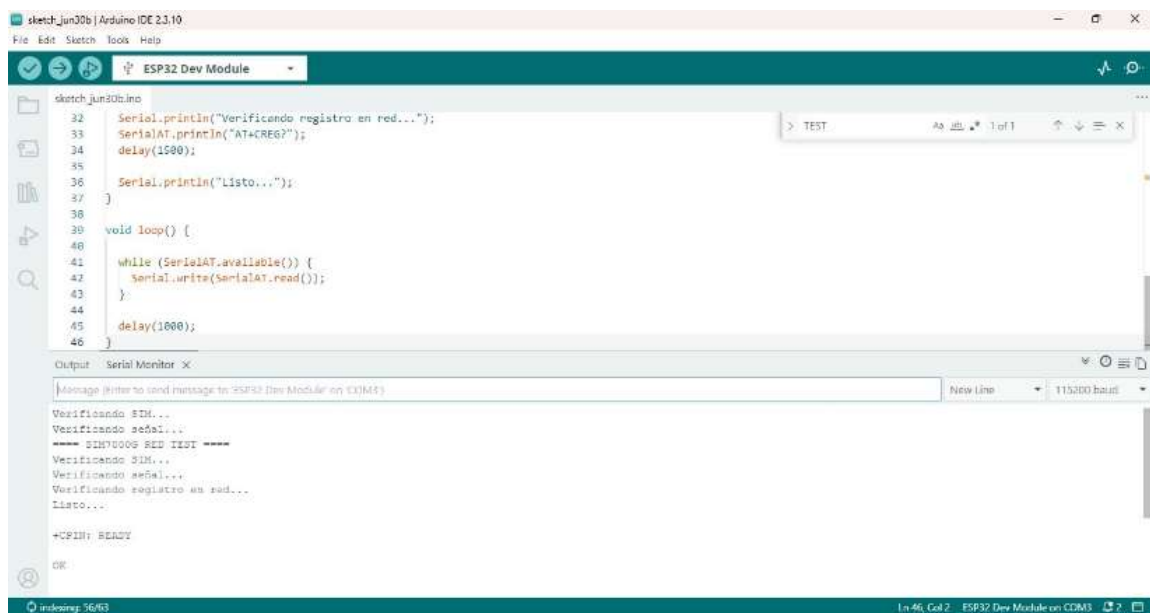
The screenshot shows the Arduino IDE interface with the sketch 'sketch_jun30a.ino' open. The code is as follows:

```
25
26 Serial.println("Activando GPS...");
27
28 // INICIALIZAR GNSS
29 modem.sendAT("+CGSPWRL=1");
30 delay(2000);
31
32 Serial.println("GPS listo, buscando satélites...");
33 }
34
35 void loop() {
```

The Serial Monitor shows the following output:

```
OK
--- DATOS GPS ---
+CGSRSTF: 1,0,,,,,0,,,,,,,,,
OK
--- DATOS GPS ---
+CGSRSTF: 1,0,,,,,0,,,,,,,,,
OK
```

Anexo 10. Verificación del registro del módem SIM7000G en la red celular.



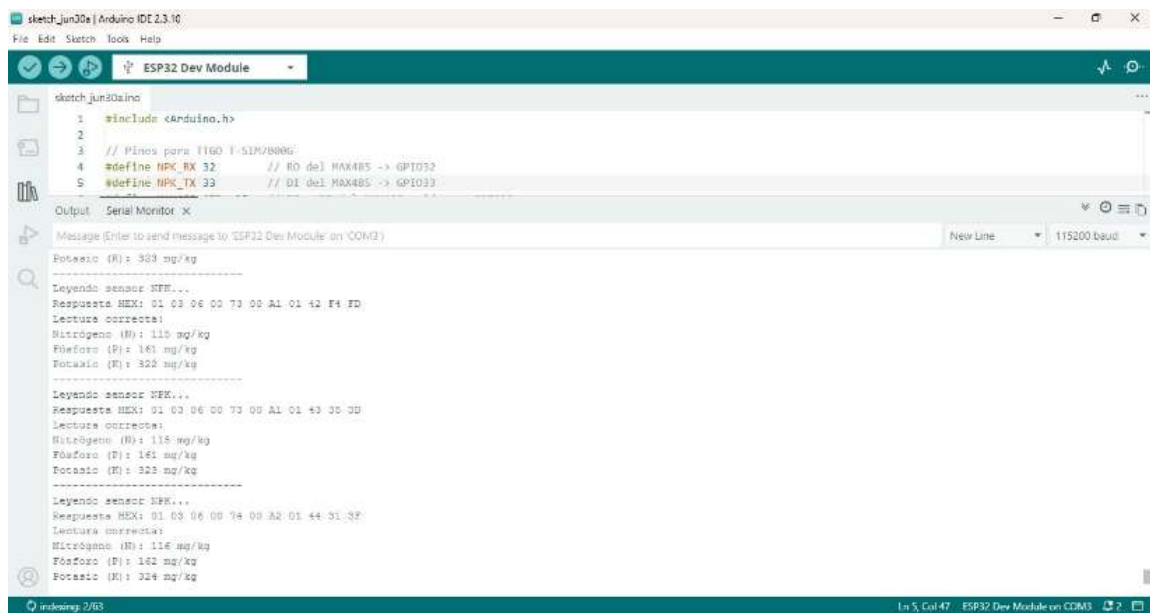
The screenshot shows the Arduino IDE interface with the sketch 'sketch_jun30b.ino' open. The code is as follows:

```
32 Serial.println("Verificando registro en red...");
33 SerialAT.println("AT+CREG?");
34 delay(1500);
35
36 Serial.println("Listo...");
37 }
38
39 void loop() {
40
41 while (SerialAT.available()) {
42   Serial.write(SerialAT.read());
43 }
44
45 delay(1000);
46 }
```

The Serial Monitor shows the following output:

```
Verificando SIM...
Verificando señal...
--- SIM7000G RED TEST ---
Verificando SIM...
Verificando señal...
Verificando registro en red...
Listo...
+CPIN: READY
OK
```

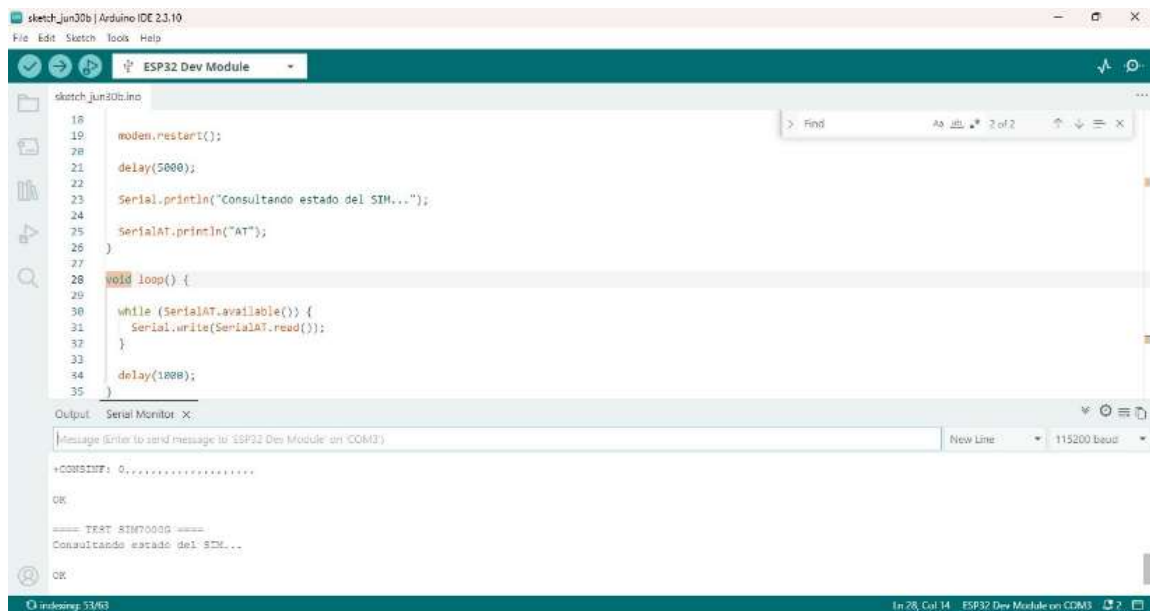
Anexo 11. Prueba de adquisición de datos del sensor NPK mediante Modbus RTU.



The screenshot shows the Arduino IDE interface with the file `sketch_jun30a.ino` open. The code defines pins for an NPK sensor and uses the `ModbusRTU` library to communicate with it. The Serial Monitor displays the following output:

```
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM3')
Potasio (K): 383 mg/kg
-----
Leyendo sensor NPK...
Respuesta HEX: 01 03 06 00 73 00 A1 01 42 F4 FD
Lectura correcta!
Nitrogeno (N): 115 mg/kg
Fosforo (P): 141 mg/kg
Potasio (K): 323 mg/kg
-----
Leyendo sensor NPK...
Respuesta HEX: 01 03 06 00 73 00 A1 01 43 3D 3D
Lectura correcta!
Nitrogeno (N): 115 mg/kg
Fosforo (P): 141 mg/kg
Potasio (K): 323 mg/kg
-----
Leyendo sensor NPK...
Respuesta HEX: 01 03 06 00 74 00 A2 01 44 31 3F
Lectura correcta!
Nitrogeno (N): 116 mg/kg
Fosforo (P): 142 mg/kg
Potasio (K): 324 mg/kg
```

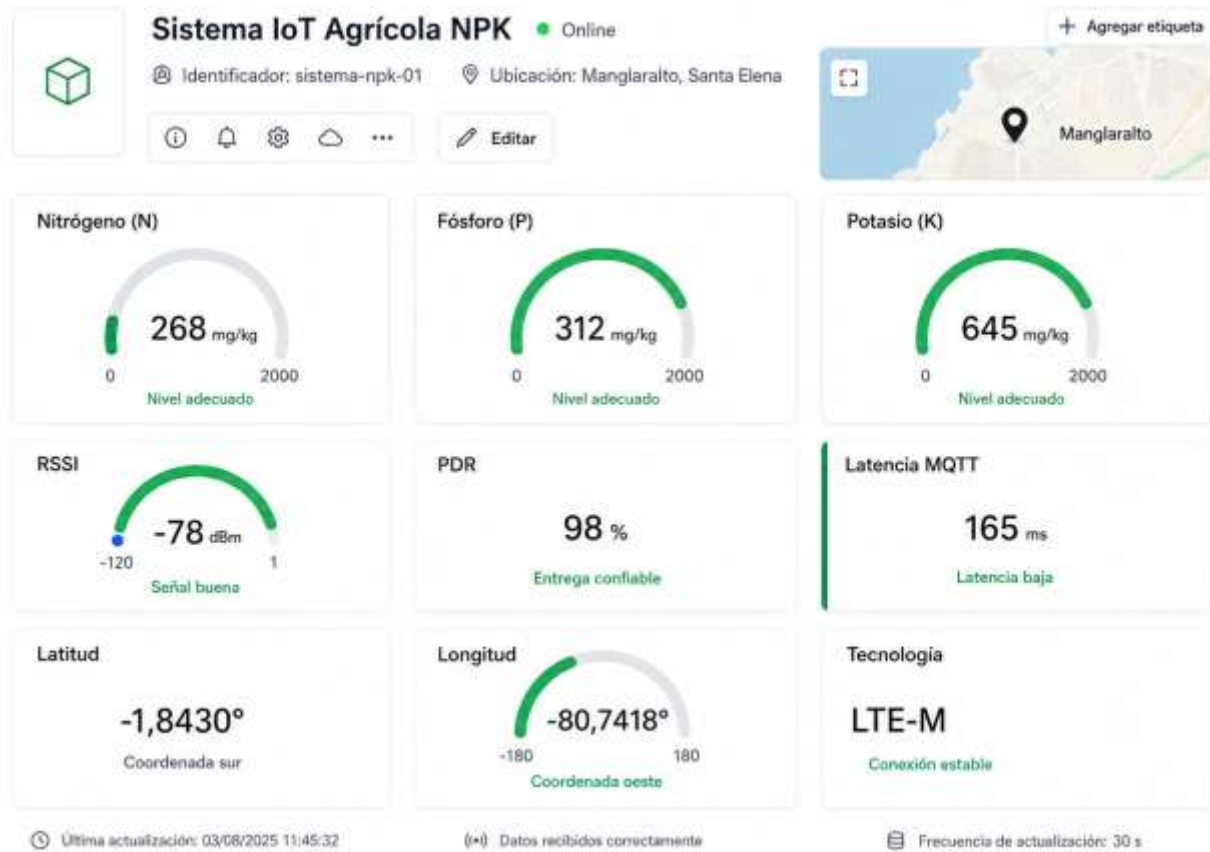
Anexo 12. Verificación del estado operativo del módem SIM7000G mediante comandos AT.



The screenshot shows the Arduino IDE interface with the file `sketch_jun30b.ino` open. The code initializes the modem and prints its status. The Serial Monitor displays the following output:

```
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM3')
+CONSINF: 0,.....
OK
===== TEST SIM7000G =====
Consultando estado del SIM...
OK
```

Anexo 13. Verificación de la plataforma Blynk con los datos obtenidos.



Nota: Los valores mostrados corresponden a una prueba funcional de visualización de la plataforma Blynk IoT. Los valores empleados para la comparación experimental del sensor NPK corresponden al punto MAS06 descrito en el apartado 4.2.1.2.

Anexo 14. Registro consolidado de puntos de medición georreferenciados del nodo IoT.

Punto	Longitud	Latitud	N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	RSSI (dBm)	Tecnología	PDR (%)	Latencia (ms)
P1	-80.741732	-1.843379	100	152	298	-78	LTE-M	98	420
P2	-80.741690	-1.843371	110	161	345	-79	LTE-M	99	390
P3	-80.741654	-1.843362	98	169	326	-81	LTE-M	99	380
P4	-80.741612	-1.843354	141	162	331	-82	LTE-M	97	450
P5	-80.741569	-1.843346	124	165	339	-84	LTE-M	98	470
P6	-80.741521	-1.843340	132	172	321	-85	LTE-M	97	490
P7	-80.741722	-1.843423	121	175	334	-77	LTE-M	99	400
P8	-80.741683	-1.843414	118	180	322	-78	LTE-M	98	410
P9	-80.741647	-1.843405	116	146	323	-80	LTE-M	98	430
P10	-80.741606	-1.843399	145	167	361	-82	LTE-M	97	460
P11	-80.741560	-1.843390	154	162	392	-83	LTE-M	97	480
P12	-80.741522	-1.843382	132	174	399	-84	LTE-M	98	470
P13	-80.741712	-1.843464	123	158	320	-79	LTE-M	99	410
P14	-80.741674	-1.843454	164	142	374	-80	LTE-M	98	420
P15	-80.741640	-1.843447	185	168	361	-82	LTE-M	97	450
P16	-80.741602	-1.843437	174	163	352	-84	LTE-M	97	480
P17	-80.741553	-1.843434	181	158	374	-85	LTE-M	96	510
P18	-80.741518	-1.843422	184	135	425	-87	LTE-M	96	540
P19	-80.741707	-1.843496	210	102	415	-77	LTE-M	99	400
P20	-80.741669	-1.843489	205	107	490	-79	LTE-M	98	430
P21	-80.741633	-1.843481	198	150	347	-81	LTE-M	98	440
P22	-80.741598	-1.843470	123	384	480	-85	LTE-M	97	520
P23	-80.741553	-1.843463	267	268	451	-86	LTE-M	96	560
P24	-80.741519	-1.843449	258	147	390	-90	NB-IoT	95	590
P25	-80.741703	-1.843526	185	387	410	-75	LTE-M	99	380
P26	-80.741664	-1.843522	154	268	248	-77	LTE-M	98	410
P27	-80.741630	-1.843515	360	216	359	-78	LTE-M	99	420
P28	-80.741593	-1.843505	259	312	452	-82	LTE-M	97	470
P29	-80.741551	-1.843496	168	248	314	-86	LTE-M	96	530
P30	-80.741517	-1.843487	179	265	351	-90	NB-IoT	95	580

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Espinosa, D. Ponte, S. Gibeaux y C. González, «Estudio de Sistemas IoT Aplicados a la Agricultura Inteligente,» *Revista Plus Economía*, vol. 9, nº 1, pp. 33-42, 30 Enero-Junio 2021.
- [2] P. Rajak, A. Ganguly, S. Adhikary y S. Bhattacharya, «Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges,» *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 14, p. 100776, Diciembre 2023.
- [3] A. Soussi, E. Zero, R. Sacile, D. Trincherro y M. Fossa, «Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review,» *Sensor* 2024, vol. 24, nº 8, p. 2647, 2024.
- [4] L. García, L. Parra, J. M. Jimenez, J. Lloret y P. Lorenz, «IoT-Based Smart Irrigation Systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture,» *Sensors*, vol. 20, nº 4, p. 1042, 14 Febrero 2020.
- [5] M. R. & R. N. R. Motsara, Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis, vol. 19, Roma: Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations., 2008, pp. 101-122.
- [6] S. A. B. M. Prabu, H. Narayanan, S. S. Sugandhi y R. D., «DESIGN OF WATER QUALITY AND SOIL MACRONUTRIENTS MEASURING DEVICE USING TDS AND NPK SENSOR,» *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 18, nº 16, pp. 1-9, 2023.
- [7] E. Systems, «Arduino core for the ESP32 documentation,» 2026. [En línea]. Available: <https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/en/latest/>. [Último acceso: 28 Abril 2026].
- [8] E. Systems, «ESP32 series datasheet,» 2025. [En línea]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. [Último acceso: 28 Abril 2026].
- [9] G. A. Balseca Guamán, «Desertificación de los suelos de Manglaralto. Uso de compost como alternativa nutricional para la extensión de UPSE en Manglaralto - Santa Elena,» 15 Octubre 2021.
- [10] L. L. S. M. N. M. T. A. T. N. A. & K. K. C. Kumar, «Monitoring of soil nutrients using soil npk sensor and arduino.,» *Ecology, Environment and Conservation*, vol. 30, pp. 285-290, 2024.
- [11] M. Rafi y M. R. A. Behjati, «Reliable and Cost-Efficient IoT Connectivity for Smart Agriculture: A Comparative Study of LPWAN, 5G, and Hybrid Connectivity Models,» *International Conference on Smart Computing and Informatics*, vol. 1682, p. 389–411, 08 Enero 2026.
- [12] Analog Devices, «MAX485: Low-power, slew-rate-limited RS-485/RS-422 transceiver,» [En línea]. Available: <https://www.analog.com/en/products/max485.html>. [Último acceso: 25 Mayo 2026].
- [13] S. W. Solutions, «SIM7000G: Cat-M/NB-IoT/GSM module,» 25 Mayo 2026. [En línea]. Available: <https://en.simcom.com/product/SIM7000G.html>. [Último acceso: 29 Abril 2026].

- [14] LilyGO, «LilyGO T-SIM7000G repository. GitHub,» 2025. [En línea]. Available: <https://github.com/Xinyuan-LilyGO/LilyGO-T-SIM7000G>. [Último acceso: 12 Mayo 2026].
- [15] Blynk, «Device MQTT API,» 2024. [En línea]. Available: <https://docs.blynk.io/en/blynk.cloud-mqtt-api/device-mqtt-api>. [Último acceso: 17 Abril 2026].
- [16] N. Cameron, «ESP32 Microcontroller. In: ESP32 Formats and Communication. Maker Innovations Series.,» *Apress, Berkeley, CA*, pp. 1-54, 01 Julio 2023.
- [17] A. Andreadis, G. Giambene y R. Zambon, «Low-Power IoT for Monitoring Unconnected Remote Areas,» *Sensors*, vol. 23, n° 9, p. 4481, 2023.
- [18] D. M. & A. A. Sobhy, «Soil Nutrient Monitoring Technologies for Sustainable Agriculture: A Systematic Review,» *Sustainability*, vol. 17, n° 18, p. 8477, 22 Septiembre 2025.
- [19] N. I. Mohamed Osman, «Performance Evaluation of LoRa and Sigfox LPWAN Technologies for IoT,» *Academic Journal of Research and Scientific Publishing*, vol. 4, n° 10, p. 52132, 05 Junio 2022.
- [20] Blynk, «Blynk documentation: Introduction.,» 2026. [En línea]. Available: <https://docs.blynk.io/en>. [Último acceso: 03 Abril 2026].
- [21] OASIS, «MQTT version 5.0: OASIS standard.,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.oasis-open.org/standard/mqtt-v5-0-os/>. [Último acceso: 04 Abril 2026].
- [22] S. W. Solutions, «SIM7000 series hardware design V1.07,» 2020. [En línea]. Available: https://cdn.geekfactory.mx/sim7000g/SIM7000%20Hardware%20Design_V1.07.pdf. [Último acceso: 02 Mayo 2026].
- [23] LilyGO, «LilyGo-Modem-Series. GitHub,» 2025. [En línea]. Available: <https://github.com/Xinyuan-LilyGO/LilyGo-Modem-Series>. [Último acceso: 12 Mayo 2026].
- [24] Analog Devices, «MAX481/MAX483/MAX485/MAX487–MAX491/MAX1487 low-power transceivers for RS-485 and RS-422 communication,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.analog.com/MAX481/datasheet>. [Último acceso: 25 Mayo 2026].
- [25] V. Shymansky, «TinyGSM: A small Arduino library for GSM modules. GitHub,» [En línea]. Available: <https://github.com/vshymansky/TinyGSM>. [Último acceso: 20 Mayo 2026].
- [26] N. Knolleary, «PubSubClient: Arduino client for MQTT. GitHub.,» [En línea]. Available: <https://github.com/knolleary/pubsubclient>. [Último acceso: 20 Mayo 2026].
- [27] M. Hart, «TinyGPSPlus: A new, customizable Arduino NMEA parsing library. GitHub.,» [En línea]. Available: <https://github.com/mikalhart/TinyGPSPlus>. [Último acceso: 22 Mayo 2026].
- [28] D. Walker, «ModbusMaster: Enlighten your Arduino to be a Modbus master. GitHub,» [En línea]. Available: <https://github.com/4-20ma/ModbusMaster>. [Último acceso: 22 Mayo 2026].
- [29] Arduino, «TinyGPSPlus. Arduino Libraries,» [En línea]. Available: <https://docs.arduino.cc/libraries/tinygpsplus/>. [Último acceso: 23 Mayo 2026].

- [30] Arduino, «ModbusMaster. Arduino Libraries.,» [En línea]. Available: <https://docs.arduino.cc/libraries/modbusmaster/>. [Último acceso: 22 Mayo 2026].
- [31] G. C.-M. P. B.-B. J. & M.-C. F. Herrera-Franco, «Participatory socio-ecological system: Manglaralto, Santa Elena, Ecuador.,» *Geology, Ecology, and Landscapes.*, vol. 2, 12 Junio 2018.
- [32] P. Carrión Mero, F. Morante Carballo, G. Herrera Franco, M. Jaya Montalvo, D. Rodríguez, C. Loor Flores de Valgas y E. Berrezueta, «Community-University Partnership in Water Education and Linkage Process. Study Case: Manglaralto, Santa Elena, Ecuador,» *Santa Elena*, vol. 13, nº 15, 22 Mayo 2021.