

Sistema portátil de sensores

**para la medición de nutrientes NPK en cultivos de
café orientado a la agricultura de precisión en Loja,
Ecuador**

*Franklin Jiménez Peralta¹,
Marianela Carrión González²*

¹Universidad Nacional de Loja, Facultad de la
Energía, las Industrias y los Recursos Naturales
no Renovables, Carrera de Ingeniería en
Telecomunicaciones, Loja, Ecuador,
<https://orcid.org/0000-0002-4976-1017>
franklin.g.jimenez@unl.edu.ec

²Universidad Nacional de Loja, Facultad de la
Energía, las Industrias y los Recursos Naturales
no Renovables, Carrera de Ingeniería en
Telecomunicaciones, Loja, Ecuador,
<https://orcid.org/0000-0002-4976-1017>
marianela.carrion@unl.edu.ec

DOI: 10.61854/rccedia.v1n1.002

Enviado: 13 de febrero de 2026

Aprobado: 09 de abril de 2026

Publicado: martes 14 de julio de 2026



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen

El monitoreo oportuno de nutrientes en suelos agrícolas es fundamental para optimizar la fertilización y mejorar la productividad en cultivos de café bajo esquemas de agricultura de precisión. El objetivo de este estudio fue desarrollar y evaluar preliminarmente un sistema portátil de monitoreo de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) basado en un microcontrolador Arduino y un sensor comercial con comunicación RS-485, aplicado en un cultivo de café en Loja, Ecuador. Se realizaron diez mediciones in situ en un terreno de aproximadamente tres hectáreas y los resultados fueron comparados con un análisis de laboratorio obtenido a partir de una muestra compuesta representativa del área de estudio. Los valores promedio obtenidos por el sistema fueron 32,71 ppm para N; 32,92 ppm para P; y 0,216 meq/100 ml para K. A la par, el laboratorio reportó 31,0 ppm, 34,0 ppm y 0,21 meq/100 ml, respectivamente. Los errores relativos fueron 5,5 % para N, -3,2 % para P y 2,9 % para K. Los resultados muestran una alta concordancia promedio entre el sistema propuesto y el análisis convencional, evidenciando su potencial como herramienta de monitoreo preliminar para la gestión nutricional en el cultivo de café.

Palabras clave:

*agrosensores, macronutrientes,
monitoreo de suelos, variabilidad
espacial, validación experimental.*

Introducción

La creciente demanda de alimentos y la necesidad de optimizar el uso de insumos agrícolas han impulsado el desarrollo de estrategias basadas en agricultura de precisión, orientadas a mejorar la eficiencia productiva y reducir el impacto ambiental. Este enfoque se fundamenta en la caracterización espacial y temporal de la variabilidad dentro de los sistemas agrícolas, permitiendo una gestión diferenciada del suelo y los cultivos (Nath, 2023). En este contexto, el monitoreo de nutrientes esenciales como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) resulta determinante para la sostenibilidad y rentabilidad de los sistemas productivos.

La producción de café constituye uno de los sistemas agrícolas más relevantes a nivel mundial, tanto por su impacto económico como por su importancia social en países en desarrollo. Se estima que más de 25 millones de familias dependen directamente del cultivo de café, especialmente en regiones tropicales de América Latina, África y Asia (International Coffee Organization [ICO], 2022). En este contexto, la sostenibilidad de los sistemas cafetaleros depende en gran medida del manejo adecuado de la fertilidad del suelo, particularmente del equilibrio de los nutrientes esenciales de N, P y K, cuya disponibilidad influye directamente en el crecimiento vegetativo, la floración, el llenado del fruto y la calidad del grano (Eponon y otros, 2023).

El nitrógeno es un componente estructural fundamental de proteínas y clorofila, siendo determinante en el desarrollo foliar y en la capacidad fotosintética del cultivo. El fósforo participa en procesos energéticos y en el desarrollo radicular, mientras que el potasio regula funciones osmóticas, apertura estomática y resistencia al estrés hídrico (Eponon y otros, 2023). Deficiencias o excesos de estos nutrientes pueden afectar significativamente el rendimiento y la calidad del café, así como incrementar costos de producción y riesgos ambientales asociados a lixiviación o escorrentía de fertilizantes (Sadeghian, 2022).

El análisis convencional de fertilidad del suelo se realiza mediante métodos de laboratorio estandarizados que ofrecen alta confiabilidad analítica. Sin embargo, estos procedimientos suelen implicar costos elevados, tiempos prolongados de procesamiento y limitaciones logísticas en zonas rurales. Estas restricciones dificultan la obtención de información oportuna y con suficiente resolución espacial para una adecuada toma de decisiones agronómicas. Aunque los sensores de suelo y las tecnologías de medición in situ han emergido como alternativas prometedoras, su implementación en sistemas productivos reales, especialmente en cultivos de café en regiones andinas, sigue siendo limitada (Riaño & Barrero Sánchez, 2023).

En este contexto, si bien diversos estudios han desarrollado dispositivos portátiles basados

en sensores para la estimación de propiedades del suelo, existe aún una brecha en cuanto a la validación de estos sistemas en condiciones específicas de campo y su capacidad para estimar con precisión concentraciones de NPK en cultivos cafetaleros. Esta limitación restringe su adopción como herramientas confiables para la gestión nutricional en agricultura de precisión, particularmente en entornos con alta variabilidad edáfica como los presentes en la provincia de Loja (Ecuador).

Por lo tanto, el problema de investigación radica en la falta de sistemas portátiles validados que permitan medir de manera rápida, confiable e *in situ* los niveles de N, P y K en suelos de cultivos de café, facilitando la toma de decisiones agronómicas basadas en información oportuna y espacialmente representativa. En este escenario, el desarrollo de soluciones tecnológicas accesibles adquiere especial relevancia, ya que puede contribuir a mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes, reducir costos de producción y minimizar impactos ambientales asociados al manejo inadecuado de nutrientes.

Bajo este marco, el presente estudio propone el desarrollo de un sistema portátil basado en sensores para la medición de nutrientes NPK, utilizando un microcontrolador y comunicación RS-485, aplicado en un cultivo de café en Loja, Ecuador. A partir de mediciones realizadas en distintos puntos de un lote productivo y su contraste con los resultados de laboratorio obtenidos mediante métodos convencionales, se evalúa el desempeño del dispositivo y su potencial como herramienta de apoyo para la gestión nutricional en agricultura de precisión.

Métodos

Tipo de estudio

El estudio desarrollado se centró netamente en una validación inicial del sistema portátil de monitoreo NPK, que se comparó con una muestra de laboratorio en una zona de cultivo de café para evaluar su precisión y respuesta mediante análisis estadístico.

Área de estudio

El estudio se desarrolló en un cultivo de café ubicado en la ciudad de Loja, Ecuador, a una altitud aproximada de 2 100 m s. n. m. La zona se caracteriza por condiciones agroecológicas andinas con variabilidad topográfica y suelos de origen volcánico, factores que influyen en la disponibilidad y dinámica de nutrientes (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2015). El lote evaluado posee una extensión aproximada de tres hectáreas, donde se seleccionaron diez puntos de muestreo distribuidos espacialmente para capturar la heterogeneidad interna del terreno.

Diseño experimental y variables de estudio

El estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental de tipo aplicado, orientado a la validación preliminar de un sistema portátil de monitoreo de nutrientes (N, P, K) en condiciones reales de campo. El diseño experimental se estructuró

como un muestreo puntual distribuido espacialmente dentro de un lote productivo, con el objetivo de evaluar el desempeño del sensor y su capacidad para detectar variabilidad intraparcela.

Variables de estudio

Se definieron como variables principales:

Variables dependientes:

- Concentración de nitrógeno (N) en ppm
- Concentración de fósforo (P) en ppm
- Concentración de potasio (K) en meq/100 ml

Variable independiente:

- Método de medición (sensor portátil vs. análisis de laboratorio)

Variables de control (no manipuladas):

- Profundidad de medición (0-20 cm)
- Tipo de suelo (suelo volcánico andino)
- Condiciones de campo al momento de la medición (no controladas experimentalmente)
- Posible humedad del suelo (no cuantificada)

Sistema de monitoreo NPK

Se diseñó e implementó un sistema portátil de adquisición de datos basado en un microcontrolador Arduino UNO (ATmega328P, 16 MHz). El dispositivo fue integrado con un sensor comercial de suelo capaz de estimar concentraciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en un rango de 0-1 999 mg/kg, utilizando comunicación RS-485 bajo protocolo Modbus RTU. La interfaz eléctrica se realizó mediante un módulo transceptor MAX485 en configuración *half-duplex*, permi-

tiendo la conversión de señal diferencial a niveles TTL compatibles con el microcontrolador.

La arquitectura embebida incluyó además un módulo de visualización LCD para mostrar lecturas en tiempo real. La adquisición de datos se efectuó a 9 600 bps, promediando diez lecturas consecutivas por punto, con el fin de reducir ruido eléctrico y variabilidad instantánea, práctica común en sistemas de censado embebido (Monk, 2016). El sistema fue alimentado mediante una fuente regulada de 5 V DC y este se muestra en la Figura 1.

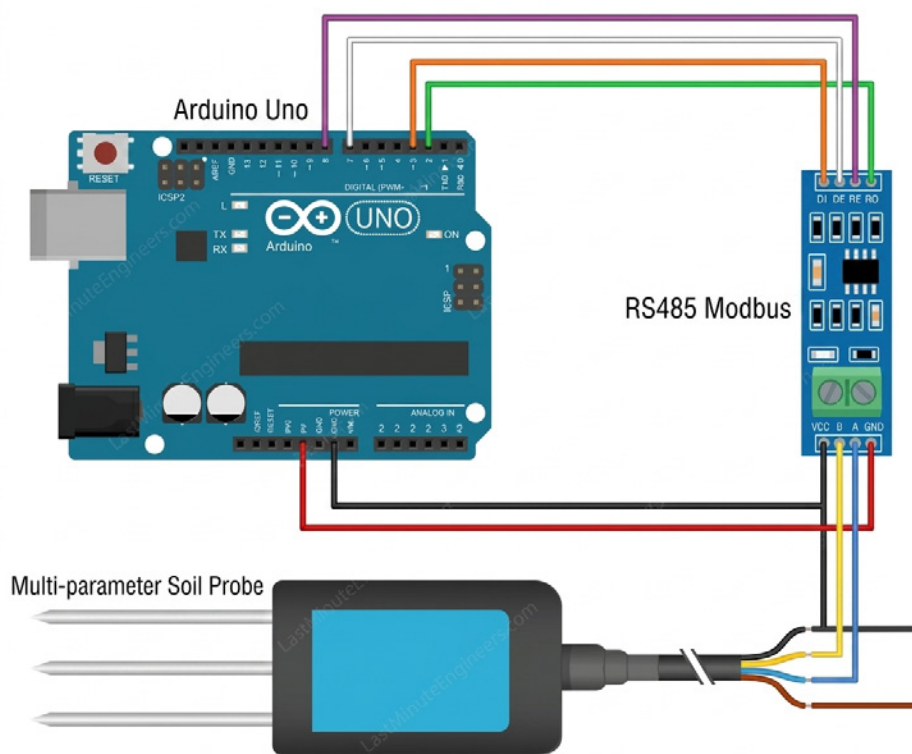


Figura 1

Diagrama del sistema

El sensor empleado estima los nutrientes de forma indirecta a partir de propiedades eléctricas del suelo y modelos internos de calibración del fabricante, lo que hace necesaria su evaluación comparativa frente a métodos de referencia (Viscarra Rossel y otros, 2011).

Procedimiento de muestreo en campo

Las mediciones in situ se realizaron introduciendo la sonda del sensor a una profundidad aproximada de 0 a 20 cm, correspondiente a la zona activa de absorción radicular en cultivos de café. En cada uno de los diez puntos seleccionados se registraron valores de N, P y K, generando un conjunto de datos representativo de la variabilidad espacial del lote. El esquema de medición se muestra en la Figura 2.

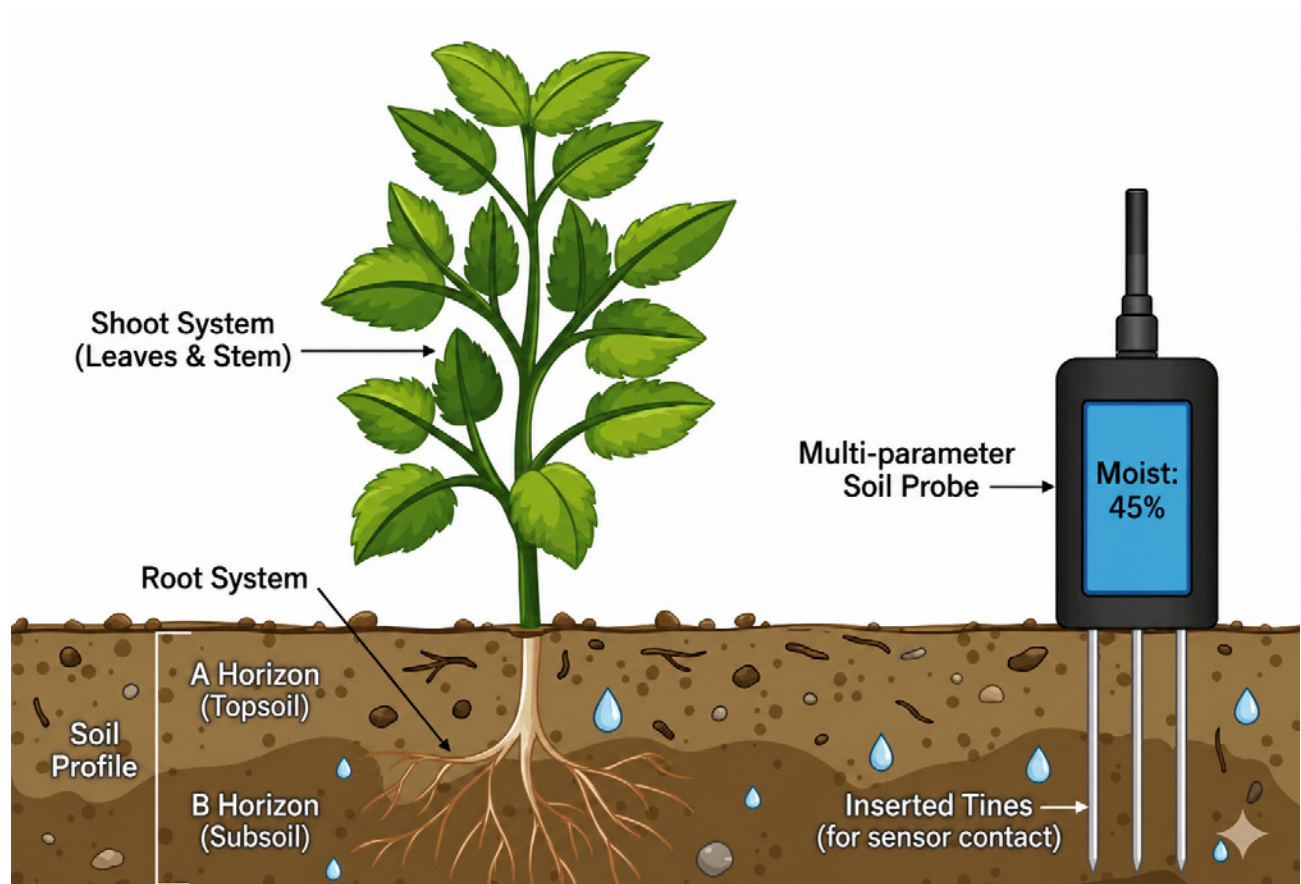


Figura 2

Esquema de medición

Posteriormente, se recolectaron submuestras de suelo en los mismos puntos evaluados, las cuales fueron homogeneizadas para conformar una muestra compuesta representativa del área total. Este procedimiento es común cuando se busca obtener una caracterización promedio

del lote, reduciendo costos analíticos de laboratorio (Havlin y otros, 2014). A continuación, en las tablas 1 y 2 se muestran tanto los datos de los diez puntos como los datos de la muestra de laboratorio.

Tabla 1
Datos del sensor NPK

Número de muestra (sensor)	Nitrógeno (N) (ppm)	Fósforo (P) (ppm)	Potasio (K) (meq/100ml)
1	38,4	19,0	0,33
2	30,7	33,6	0,30
3	28,9	39,1	0,28
4	35,4	21,8	0,21
5	27,0	23,3	0,15
6	25,2	33,6	0,22
7	31,8	45,0	0,20
8	40,7	31,1	0,11
9	36,7	44,4	0,18
10	32,3	38,3	0,18

Tabla 2
Datos del análisis de laboratorio

Número de muestra (laboratorio)	Nitrógeno (N) (ppm)	Fósforo (P) (ppm)	Potasio (K) (meq/100ml)
1	31,0	34,0	0,21

Análisis de laboratorio

La muestra compuesta fue sometida a análisis de fertilidad mediante métodos estandarizados. El nitrógeno fue determinado por digestión y cuantificación según el método Kjeldahl; el fósforo se determinó mediante extracción química y lectura espectrofotométrica; y el potasio fue cuantificado mediante fotometría de llama, expresándose los resultados en ppm para N y P, y en meq/100 ml para K, conforme a procedimientos agronómicos convencionales (Jones, 2001).

Análisis comparativo

Dado que el laboratorio proporcionó un valor único representativo del lote (muestra compuesta), la comparación se realizó entre el valor promedio de las diez mediciones del sensor y el valor reportado por el laboratorio. Se calculó el error relativo porcentual para cada nutriente, de acuerdo con la expresión

$$Error(\%) = \frac{Valor_{sensor} - Valor_{laboratorio}}{Valor_{laboratorio}} * 100$$

Asimismo, se evaluó la variabilidad interna del sensor mediante el rango y análisis descriptivo de los datos obtenidos en el sitio, con el fin de examinar su capacidad para detectar heterogeneidad espacial dentro del lote productivo. Este enfoque metodológico corresponde a una validación preliminar bajo condiciones reales de campo, orientada a analizar la concordancia promedio del sistema embebido frente al método convencional de referencia (Bland & Altman, 1986).

Resultados

Comportamiento descriptivo de las mediciones del sistema portátil

Las mediciones realizadas con el sistema portátil de monitoreo NPK en los diez puntos distribuidos dentro del lote de aproximadamente tres hectáreas evidenciaron una variabilidad espacial

apreciable en las concentraciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Estos valores se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3
Comportamiento estadístico de los datos del sistema portátil

Variables	Rango	Media	Desviación estándar	Coficiente de variación (CV%)	Tipo de variabilidad
Nitrógeno (N)	25,2 – 40,7 ppm	32,71	5,06	15,47	Moderada
Fósforo (P)	19,0 – 45,0 ppm	32,92	8,69	26,41	Alta
Potasio (K)	0,11 – 0,33 meq/100 ml	0,22	0,07	31,94	Alta

Estos resultados confirman la presencia de heterogeneidad intraparcels, característica común en sistemas agrícolas andinos, donde factores como la topografía, el manejo agronómico y la

distribución de materia orgánica influyen significativamente en la dinámica de nutrientes del suelo (Gebbers & Adamchuk, 2010).

Comparación con análisis de laboratorio

El análisis de laboratorio de la muestra compuesta reportó concentraciones de 31,0 ppm para N, 34,0 ppm para P y 0,21 meq/100 ml para K. Al comparar los valores promedio obtenidos por

el sistema portátil con los resultados del laboratorio, se determinaron los errores relativos que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4
Error relativo

Variables	Error relativo (%)
Nitrógeno (N)	5,5
Fósforo (P)	-3,2
Potasio (K)	2,9

Las diferencias observadas fueron inferiores al 6 % en todos los casos, lo que indica una alta concordancia promedio entre el sistema propuesto y el método convencional de referencia. En términos prácticos, estos niveles de desviación pueden considerarse aceptables para aplicacio-

nes preliminares de diagnóstico nutricional en el sitio, especialmente cuando el objetivo es identificar tendencias generales o variabilidad espacial más que reemplazar completamente el análisis de laboratorio (Adamchuk y otros, 2004).

Variabilidad interna del lote

El análisis descriptivo de las mediciones del sensor permitió identificar diferencias notables entre puntos dentro del mismo terreno. El fósforo mostró la mayor amplitud de variación (26 ppm de diferencia entre valores mínimo y máximo), seguido del nitrógeno y el potasio.

Esta capacidad del sistema para detectar diferencias espaciales resulta relevante desde la perspectiva de la agricultura de precisión, donde la gestión diferenciada de fertilización depende de la identificación de zonas con distinta disponibilidad de nutrientes (Gebbers & Adamchuk, 2010). La obtención de datos *in situ* en tiempo real facilita la generación de mapas de variabilidad y la toma de decisiones sitio-específicas.

Limitaciones

Es importante señalar que el análisis realizado se basa en una comparación entre el promedio de las mediciones del sensor y un único valor de referencia de laboratorio, lo que limita la posibilidad de aplicar métodos estadísticos inferenciales como correlación o regresión. En este sentido, los resultados deben interpretarse como una validación inicial o preliminar del sistema.

Se recomienda que futuros estudios incluyan un mayor número de muestras de laboratorio y un mayor número de mediciones del terreno, lo que permitiría realizar análisis de regresión, cálculo de error cuadrático medio (RMSE) y evaluación de concordancia mediante metodologías más robustas.

El tamaño muestral de 10 puntos se justifica por tratarse de una validación inicial del sistema, donde el objetivo principal es evaluar su desempeño funcional en condiciones reales. La selección de puntos distribuidos espacialmente en un terreno de tres hectáreas permite capturar la variabilidad intraparcela, mientras que el uso de valores promedio reduce la necesidad de grandes tamaños muestrales. Además, se consideraron restricciones operativas propias del muestreo en el campo y del análisis de laboratorio.

Lo que se busca con el estudio de validación preliminar es verificar el funcionamiento del sistema portátil, identificar tendencias y estimar errores iniciales. Además, los 10 puntos permiten una cobertura básica de la variabilidad espacial del terreno, suficiente para una caracterización exploratoria del comportamiento del sensor.

Síntesis de resultados

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que el sistema portátil de monitoreo NPK presenta una adecuada concordancia promedio con el análisis convencional de laboratorio, con errores relativos inferiores al 6 % para nitrógeno, fósforo y potasio. Esta proximidad entre valores sugiere que el dispositivo es capaz de estimar de manera confiable el nivel nutricional promedio del suelo en condiciones reales del terreno, lo que respalda su viabilidad como herramienta de diagnóstico preliminar.

Desde una perspectiva práctica, estos resultados indican que el sistema puede emplearse como una alternativa operativa para la evaluación rápida del estado nutricional del suelo, especialmente en contextos donde los análisis de laboratorio resultan limitados por factores económicos, logísticos o de tiempo. En este sentido, el dispositivo permite generar información oportuna que puede apoyar la toma de decisiones agronómicas, tales como la identificación de posibles deficiencias o excesos de nutrientes, la priorización de zonas de intervención y el seguimiento de tendencias nutricionales a lo largo del tiempo.

Un aspecto relevante del estudio es la capacidad del sistema para detectar variabilidad espacial dentro del lote evaluado. Las diferencias observadas entre los puntos de muestreo, particularmente en el caso del fósforo y el potasio, evidencian la presencia de heterogeneidad intraparcela, condición característica de sistemas agrícolas en entornos andinos. En términos agronómicos, esta variabilidad implica que prácticas de

fertilización homogénea pueden resultar ineficientes, generando desequilibrios en la disponibilidad de nutrientes. En este contexto, el sistema portátil ofrece una ventaja significativa al permitir identificar zonas con distinto comportamiento nutricional, contribuyendo potencialmente a la implementación de estrategias de fertilización diferenciada y al uso más eficiente de insumos.

Asimismo, el hecho de que los valores reportados por el laboratorio se encuentren dentro del rango de variación de las mediciones del sensor refuerza la capacidad del sistema para representar adecuadamente el comportamiento global del suelo. Este resultado sugiere que el dispositivo no solo proporciona estimaciones promedio consistentes, sino que también captura la dinámica espacial de los nutrientes en el terreno, lo cual es fundamental en aplicaciones de agricultura de precisión.

No obstante, es importante señalar que el alcance de estos resultados se enmarca en una validación preliminar del sistema. La comparación realizada entre el promedio de las mediciones del sensor y un único valor de referencia de laboratorio, obtenido a partir de una muestra compuesta, limita la posibilidad de evaluar la precisión

individual de las mediciones y de aplicar análisis estadísticos inferenciales más robustos. En consecuencia, los resultados no permiten establecer relaciones cuantitativas detalladas entre ambos métodos ni generalizar el desempeño del sensor a otras condiciones edáficas o productivas.

En este sentido, el sistema debe ser considerado, en esta etapa, como una herramienta complementaria para el monitoreo nutricional en campo y no como un sustituto del análisis químico convencional. Su principal valor radica en la posibilidad de realizar mediciones rápidas, frecuentes y de bajo costo, facilitando la obtención de información preliminar que puede orientar la toma de decisiones y optimizar la gestión de la fertilización.

Finalmente, los hallazgos obtenidos evidencian el potencial del sistema para su integración en esquemas de agricultura de precisión, particularmente si se complementa con herramientas de georreferenciación y análisis espacial. Futuras investigaciones que incorporen un mayor número de muestras, validaciones punto a punto y modelos de calibración específicos permitirán ampliar el alcance del dispositivo y consolidar su aplicabilidad en contextos productivos reales.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que el sistema portátil de monitoreo NPK desarrollado presenta una concordancia promedio elevada frente al análisis convencional de laboratorio, con errores relativos inferiores al 6 % para nitrógeno, fósforo y potasio. Esta magnitud de desviación se encuentra dentro de rangos considerados aceptables para herramientas de diagnóstico preliminar en agricultura de precisión, especialmente cuando el propósito principal es la identificación de tendencias espaciales más que la sustitución absoluta del análisis químico de referencia (McBratney y otros, 2005; Naderi-Boldaji y otros, 2013).

Comparativa con trabajos previos

Diversos estudios han reportado que los sensores comerciales de nutrientes basados en propiedades eléctricas del suelo pueden presentar errores variables dependiendo de condiciones edáficas y ambientales. La estimación indirecta de NPK suele estar influenciada por la conductividad eléctrica, contenido de humedad y composición mineralógica del suelo (Viscarra Rossel y otros, 2011; Muñoz-Huerta y otros, 2013). En investigaciones realizadas en sistemas agrícolas templados, se han observado errores que pueden superar el 15 % cuando no se aplican calibraciones locales específicas (Shaviv, 2001).

En comparación con dichos reportes, los errores promedio obtenidos en el presente estudio resultan relativamente bajos. Esta concordancia puede atribuirse a varios factores:

- Homogeneidad relativa del lote evaluado.
- Uso de promediado de lecturas para reducir ruido.
- Comparación frente a muestra compuesta, lo que suaviza variaciones puntuales.

Sin embargo, es importante reconocer que la comparación promedio puede subestimar discrepancias locales que solo podrían identificarse mediante análisis pareados individuales. La literatura recomienda que la validación robusta de sensores incluya análisis punto a punto y aplicación de métricas como RMSE, coeficiente de determinación (R^2) y análisis de concordancia de Bland–Altman (Bland & Altman, 1986; Giavarina, 2015). En este sentido, el presente trabajo sienta las bases para investigaciones posteriores de mayor profundidad estadística.

Condiciones ambientales

Un aspecto crítico que debe considerarse en la interpretación de los resultados es el efecto de las condiciones ambientales sobre la respuesta del sensor. Estudios previos han demostrado que variables como la humedad del suelo, la conductividad eléctrica y la temperatura influyen directamente en las mediciones de sensores basados en propiedades eléctricas (Viscarra Rossel y otros, 2011; Muñoz-Huerta y otros, 2013). En particular, la presencia de humedad, ya sea por condiciones naturales del suelo o por eventos recientes de lluvia, puede alterar la conductividad eléctrica y, en consecuencia, afectar la estimación indirecta de nutrientes.

En el presente estudio no se controlaron ni registraron de manera sistemática estas variables, lo que introduce una fuente potencial de incertidumbre. Por ejemplo, un aumento en la humedad del suelo podría generar una sobreestimación o subestimación de los nutrientes dependiendo de las condiciones específicas del medio, lo cual debe ser considerado al interpretar los resultados.

Asimismo, la realización de mediciones en un único momento temporal limita la capacidad de evaluar la estabilidad del sistema frente a variaciones climáticas. La posible ocurrencia de lluvias previas al muestreo, no documentadas en el estudio, podría haber influido en la distribución y disponibilidad de nutrientes, así como en la respuesta del sensor. En este sentido, la ausencia de control sobre estas variables reduce la posibilidad de generalizar los resultados a otras condiciones ambientales o épocas del año.

Tamaño muestral

Otra limitación relevante es el tamaño muestral y el uso de una única muestra de laboratorio como referencia. Si bien este enfoque es aceptable en estudios de validación preliminar, limita la aplicación de análisis estadísticos inferenciales y la evaluación de concordancia punto a punto. Como consecuencia, los resultados deben interpretarse como una aproximación inicial al desempeño del sistema, más que como una validación definitiva. La literatura recomienda que la validación de sensores incluya un mayor número de muestras independientes y análisis estadísticos robustos para garantizar la confiabilidad de los resultados (Bland & Altman, 1986; Giavarina, 2015).

Variabilidad espacial y su relevancia agronómica

La variabilidad intraparcela observada en los resultados coincide con hallazgos ampliamente documentados en agricultura de precisión, donde incluso en parcelas de tamaño moderado pueden existir diferencias significativas en disponibilidad de nutrientes (McBratney y otros, 2005; Gebbers & Adamchuk, 2010). En cultivos de café establecidos en terrenos andinos con pendiente variable, la redistribución natural de nutrientes por escorrentía y procesos erosivos puede generar patrones heterogéneos de fertilidad.

El fósforo mostró la mayor amplitud de variación entre los nutrientes evaluados. Este comportamiento es consistente con su baja movilidad en el suelo y su tendencia a formar complejos insolubles en ambientes ácidos o con alto contenido de óxidos de hierro y aluminio, características comunes en suelos volcánicos andinos (Havlin y otros, 2014). La detección de esta variabilidad mediante el sistema portátil sugiere que la herramienta podría ser útil para delimitar zonas específicas que requieran ajustes diferenciados de fertilización fosfatada.

En el caso del nitrógeno, la variabilidad observada podría estar asociada a diferencias en mineralización de materia orgánica, historia de fertilización o variaciones microambientales en humedad. El potasio, por su parte, presentó menor rango absoluto, aunque suficiente para evidenciar diferencias agronómicamente relevantes.

Implicaciones para la sostenibilidad y eficiencia en el uso de fertilizantes

El uso excesivo o ineficiente de fertilizantes nitrogenados y fosfatados ha sido identificado como una de las principales fuentes de contaminación ambiental en sistemas agrícolas intensivos, debido a procesos de lixiviación y escorrentía que pueden afectar cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Tilman y otros, 2002). En este contexto, la implementación de herramientas que permitan monitoreo más frecuente y localizado de nutrientes podría contribuir a reducir aplicaciones innecesarias y mejorar la eficiencia del uso de insumos.

Desde el punto de vista económico, la posibilidad de realizar mediciones *in situ* sin recurrir constantemente a análisis de laboratorio distantes, demorados y costosos puede representar una ventaja significativa para productores de pequeña y mediana escala. Aunque el análisis químico continúa siendo el estándar de referencia, su costo puede limitar la frecuencia de monitoreo. Un sistema portátil de bajo costo puede complementar dichos análisis, permitiendo evaluaciones intermedias entre campañas de laboratorio.

Comparativa con sensores comerciales

En relación con sensores comerciales disponibles, diversos estudios han destacado que los dispositivos basados en tecnologías de sensado proximal pueden ofrecer mediciones rápidas y no destructivas, aunque con limitaciones en precisión dependiendo de las condiciones de uso (Riaño & Barrero Sánchez, 2023; Viscarra Rossel y otros,

2011). En comparación, el sistema propuesto en este estudio presenta varias ventajas relevantes.

En primer lugar, su bajo costo de implementación, basado en plataformas de hardware abierto como Arduino, lo convierte en una alternativa accesible para pequeños y medianos productores, a diferencia de sensores comerciales de alto costo. En segundo lugar, la capacidad de obtener mediciones en tiempo real directamente en el terreno representa una ventaja significativa frente a los análisis de laboratorio, que requieren mayor tiempo y recursos logísticos. Finalmente, los niveles de error observados sugieren que, bajo condiciones controladas, el sistema puede ofrecer una precisión comparable a la de dispositivos comerciales de gama media, al menos en términos de estimación promedio.

No obstante, es importante reconocer que los sensores comerciales avanzados suelen incorporar calibraciones específicas, compensación por variables ambientales y algoritmos de procesamiento más sofisticados, lo que puede mejorar su desempeño en condiciones fluctuantes. En este contexto, el sistema propuesto aún requiere procesos de calibración local y validación extendida para alcanzar niveles de robustez equivalentes.

Robustez tecnológica del sistema embebido

El desempeño estable del sistema durante las mediciones de campo indica que la arquitectura basada en Arduino y comunicación RS-485 resultó adecuada para entornos agrícolas. La transmisión diferencial RS-485 ofrece ventajas frente a interfaces analógicas simples, al reducir susceptibilidad a interferencias eléctricas (Modbus

Organization, 2012). La implementación del protocolo Modbus RTU permitió una lectura confiable de registros del sensor, sin evidencia de pérdidas de datos o inconsistencias durante la adquisición.

La modularidad del diseño facilita futuras mejoras, tales como:

- Incorporación de almacenamiento en tarjeta SD.
- Integración con módulos de comunicación inalámbrica (LoRa, WiFi).
- Georreferenciación mediante GPS.
- Integración con plataformas de análisis en la nube.

Estas posibilidades alinean el sistema con tendencias actuales de agricultura digital y agricultura 4.0, donde la interconectividad y el análisis de datos juegan un papel central (Zhang y otros, 2002).Proyección futura

Proyección futura y aplicabilidad

La ampliación del estudio hacia diseños experimentales más robustos permitiría desarrollar modelos de calibración específicos para suelos andinos de la región sur del Ecuador. Asimismo, la integración del sistema con herramientas de mapeo espacial podría facilitar la construcción de mapas de fertilidad intraparcels, apoyando decisiones de fertilización diferenciada. El desarrollo continuo de soluciones tecnológicas locales, adaptadas a contextos productivos específicos, puede contribuir a reducir brechas tecnológicas en regiones donde la adopción de la agricultura de precisión aún es limitada.

En términos de aplicabilidad, los resultados coinciden con la literatura en señalar que los sensores portátiles deben considerarse como herramientas complementarias al análisis de laboratorio, más que como sustitutos (Naderi-Boldaji y otros, 2013). Su principal valor radica en la posibilidad de realizar monitoreos frecuentes, identificar tendencias y apoyar la toma de decisiones en campo de manera oportuna. En particular, en sistemas cafetaleros como los evaluados en este estudio, donde la variabilidad espacial y las limitaciones de acceso a servicios de laboratorio son factores relevantes, el uso de este tipo de tecnologías puede contribuir a mejorar la eficiencia en la gestión de nutrientes y reducir el uso innecesario de fertilizantes.

Finalmente, el presente estudio debe entenderse como una validación preliminar del sistema bajo condiciones reales de operación. Futuras investigaciones deberán incorporar un mayor número de muestras, validaciones punto a punto, registro de variables ambientales y modelos de calibración específicos para condiciones edáficas locales. Asimismo, la integración del sistema con herramientas de georreferenciación y análisis espacial permitirá ampliar su alcance hacia aplicaciones más avanzadas en agricultura de precisión, como la generación de mapas de fertilidad y la implementación de estrategias de manejo sitio-específicas (McBratney y otros, 2005; Zhang y otros, 2002).

Conclusiones

El desarrollo e implementación de un sistema portátil de monitoreo de nutrientes NPK basado en un microcontrolador Arduino y comunicación RS-485 demostró viabilidad técnica y operativa bajo condiciones reales de campo en un cultivo de café ubicado en Loja, Ecuador. La arquitectura embebida diseñada permitió la adquisición estable de datos, procesamiento mediante promediado de lecturas y visualización en tiempo real, evidenciando un desempeño adecuado del conjunto microcontrolador-sensor en entornos agrícolas.

Los resultados obtenidos mostraron una alta concordancia promedio entre las mediciones del sistema portátil y el análisis convencional de laboratorio, con errores relativos inferiores al 6 % para nitrógeno, fósforo y potasio. Aunque la comparación se realizó frente a una muestra compuesta representativa del lote, la proximidad entre valores sugiere que el dispositivo puede constituir una herramienta preliminar confiable para el monitoreo nutricional en el campo. Esta concordancia es particularmente relevante considerando que el sensor empleado realiza estimaciones indirectas basadas en propiedades eléctricas del suelo.

La variabilidad intraparcela detectada en las mediciones confirma la presencia de heterogeneidad nutricional dentro del lote evaluado, fenómeno característico de sistemas agrícolas andinos con topografía variable. La capacidad del sistema para identificar diferencias espaciales en la disponibilidad de nutrientes refuerza su potencial aplicación

en esquemas de agricultura de precisión orientados a la gestión diferenciada de fertilización.

Desde una perspectiva tecnológica, la modularidad del sistema permite su escalabilidad e integración futura con herramientas de georreferenciación, almacenamiento de datos y transmisión inalámbrica, facilitando su incorporación en plataformas de agricultura digital. Asimismo, el uso de componentes de bajo costo amplía las posibilidades de adopción por parte de productores de pequeña y mediana escala, contribuyendo a reducir brechas tecnológicas en regiones cafetaleras.

No obstante, es importante reconocer que el carácter preliminar del estudio, el tamaño muestral limitado y el uso de muestra compuesta de laboratorio restringen el alcance estadístico de las conclusiones. Se recomienda, en futuras investigaciones, realizar validaciones con muestras pareadas individuales, incrementar el número de puntos de medición e incorporar métricas estadísticas robustas que permitan evaluar concordancia punto a punto y desarrollar modelos de calibración específicos para condiciones edáficas locales.

En síntesis, el sistema portátil propuesto representa una alternativa tecnológica prometedora para el monitoreo preliminar de nutrientes en cultivos de café, con potencial para fortalecer estrategias de fertilización más eficientes, sostenibles y adaptadas a la variabilidad espacial del suelo.

Declaración de conflictos de interés

Quienes firman este artículo declaran no tener conflictos de interés.

Fuentes de financiación

El presente trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto 41-DI-FEIRNR-2025 denominado: Desarrollo de prototipos tecnológicos para

monitoreo y caracterización de cultivos de café. Financiado por la Universidad Nacional de Loja.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Durante la preparación de este manuscrito, se utilizó la herramienta ChatGPT (OpenAI, modelo GPT-5.3) con el propósito de apoyar en la mejora de la redacción, claridad del lenguaje académico y organización estructural del contenido. El uso de esta herramienta se limitó exclu-

sivamente a tareas de asistencia en la escritura y edición del texto.

Los autores revisaron críticamente todo el contenido generado, realizaron las modificaciones necesarias y asumen plena responsabilidad por la integridad, exactitud y originalidad del manuscrito.

Declaración de contribución de autoría (CRedit)

Franklin Gustavo Jiménez Peralta: Conceptualización; metodología; validación; análisis formal; investigación; gestión de datos; administración del proyecto.

Marianela del Cisne Carrión González: Conceptualización; metodología; validación; investigación; redacción - borrador original; redacción - revisión y edición; supervisión.

Referencias

- Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T., & Upadhyaya, S. K. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(1), 71–91.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002>
- Bland, J. M., & Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 327(8476), 307–310.
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8)
- Eponon, E. C., Kassi, K., Kouame, K. D., Snoeck, D., Ouattara, T., Camara, M., Chérif, M., & Koné, D. (2023). The soil diagnostic method to formulate fertilizer requirements for coffee trees in côte d'Ivoire. *Archives of Current Research International*, 23(4), 51–59.
<https://doi.org/10.9734/acri/2023/v23i4569>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2015). Status of the world's soil resources (SWSR): *Main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831.
<https://doi.org/10.1126/science.1183899>
- Giavarina, D. (2015). Understanding Bland–Altman analysis. *Biochemia Medica*, 25(2), 141–151.
<https://doi.org/10.11613/BM.2015.015>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson.
- International Coffee Organization [ICO]. (2022). *Coffee development report 2022*.
- Jones, J. B. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC Press.
- McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., & Bouma, J. (2005). Future directions of precision agriculture. *Precision Agriculture*, 6(1), 7–23.
<https://doi.org/10.1007/s11119-005-0681-8>
- Modbus Organization. (2012). *Modbus application protocol specification V1. 1b3*.
<https://www.modbus.org/file/secure/modbusprotocolspecification.pdf>

- Monk, S. (2016). *Programming Arduino: Getting started with sketches* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Muñoz-Huerta, R. F., Guevara-Gonzalez, R. G., Contreras-Medina, L. M., Torres-Pacheco, I., Prado-Olivarez, J., & Ocampo-Velazquez, R. V. (2013). A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: Advantages, disadvantages and recent advances. *Sensors*, 13(8), 10823–10843.
<https://doi.org/10.3390/s130810823>
- Naderi-Boldaji, M., Alimardani, R., & Sharifi, A. (2013). Design and development of a soil nutrient measurement system for precision agriculture. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 15, 651–662.
- Nath, S. (2024). A vision of precision agriculture: Balance between agricultural sustainability and environmental stewardship. *Agronomy Journal*, 116(3), 1126–1143.
<https://doi.org/10.1002/agj2.21405>
- Pérez-Expósito, J. P., Fernández-Caramés, T. M., Fraga-Lamas, P., & Castedo, L. (2017). VineSens: An eco-smart decision-support viticulture system. *Sensors*, 17(3), 465.
<https://doi.org/10.3390/s17030465>
- Raun, W. R., Solie, J. B., Johnson, G. V., Stone, M. L., Lukina, E. V., Thomason, W. E., & Schempers, J. S. (2005). Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Agronomy Journal*, 97(3), 815–820.
<https://doi.org/10.2134/agronj2004.0271>
- Riaño, S., & Barrero Sánchez, F. H. (2023). Implementación de los nodos de una red inalámbrica de sensores aplicada en cultivos de café. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería.
<https://doi.org/10.26507/paper.3180>
- Sadeghian, S. (2022). Nutrición de cafetales: Fertilice con mayor eficiencia agronómica y económica. *Memorias Seminario Científico Cenicafé*, 71(1), e71138.
<https://doi.org/10.38141/10795/71138>
- Shaviv, A. (2001). Advances in controlled-release fertilizers. *Advances in Agronomy*, 71, 1–49.
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(01\)71011-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(01)71011-5)
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671–677.
<https://doi.org/10.1038/nature01014>

Viscarra Rossel, R. A., McBratney, A. B., & Minasny, B. (2011). Proximal soil sensing. *Geoderma*, 162(1–2), 1–5.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.017>

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture: A worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2–3), 113–132.
[https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0)