

Desarrollo de una red de sensores para monitoreo de macronutrientes primarios para cultivo de café aplicado a un caso de estudio en Tecnicafé.

Johann Alexander Meneses Vidal

Simón Alexander Urrutia Quirá



Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Facultad de Ingenierías

Ingeniería Electrónica

Popayán, Colombia

2021

Desarrollo de una red de sensores para monitoreo de macronutrientes primarios para cultivo de café aplicado a un caso de estudio en Tecnicafé.

Johann Alexander Meneses Vidal

Simón Alexander Urrutia Quirá

Monografía presentada para optar al título de Ingeniero Electrónico

Mgs. Yamir Hernando bolaños

Codirector: Mgs(c). Geovanny Alberto Catamusca Medina

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Facultad de Ingenierías

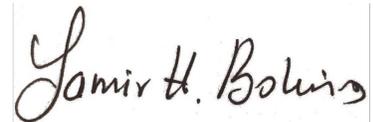
Ingeniería Electrónica

Popayán, Colombia

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca para optar al título de Ingeniero Electrónico



ING. Yamir Hernando Bolaños
Director



Jurado 1



Jurado 2

Popayán, 26 de noviembre del año 2021

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios y a mis padres María e Iván que siempre han estado apoyándome con mucho amor durante todo este proceso, al resto de mi familia por apoyarme en el transcurso de mi carrera, a mis compañeros y por siempre amigos por estar conmigo en tantos momentos dentro y fuera de la universidad. Este trabajo encierra el final de una etapa de formación profesional y no la última, llena de aprendizaje constante, tanto personal como académico con altas y bajas, pero con la satisfacción de haber entregado al máximo todas mis capacidades, por último, agradecer a todas aquellas personas que de alguna u otra manera ayudaron en la realización de este proyecto.

Johann Alexander Meneses Vidal

Doy gracias a Dios por permitirme estar con vida e ir avanzando en mi caminar profesional, alcanzando metas y logros propuestos, superando barreras y obstáculos que se presentan y aprendiendo de los errores que se cometen. También agradezco a mi familia, especialmente a mi madre María y mi tío Fabio que han estado conmigo siempre, apoyándome en todo, guiándome y aconsejándome con mucho amor y no han dejado de confiar en mis capacidades. Agradezco a los sacerdotes amigos, de la arquidiócesis de Popayán, en especial a los padres: Mario Enrique Gaviria, Jilbert Fabián Hurtado, Olivo Galíndez y Luis Felipe Yalanda que me han brindado su apoyo y acogida cuando más lo he necesitado durante mi formación

Simón Alexander Urrutia Quirá

Agradecemos a la universidad por brindarnos la oportunidad de formarnos como profesionales y a los docentes que con sus conocimientos han constituido la base fundamental de nuestra vida en el ámbito académico y laboral. Gracias a los ingenieros Yamir Bolaños y Geovanny Catamusca por su colaboración en el transcurso del desarrollo de este trabajo de investigación han sido un apoyo vital para lograr cumplir esta meta, gracias por sus enseñanzas y consejos en el ámbito académico y en el ámbito humano que hace también parte fundamental en nuestra formación como profesionales.

RESUMEN

La implementación de la tecnología en la agricultura ha permitido tener una mejor producción de los cultivos, reducir el impacto ambiental generado por los fertilizantes y pesticidas y por tanto una disminución en los costes económicos; lo cual la postula como una buena alternativa de solución. A nivel agro, es necesario el conocimiento del suelo, ya que se encuentran propiedades físicas y químicas que son fundamentales con respecto a la relación agua, suelo y planta; dentro de las propiedades químicas, la fertilidad permite conocer la cantidad disponible de nutrientes, concretamente aquellos requeridos en mayor cantidad, Nitrógeno(N); Fósforo(P) y Potasio(K) comúnmente llamado el trio NPK, por tanto, este trabajo de investigación que se realiza en un lote de cultivo de café, ubicado en el Parque Tecnológico Tecnicafé, se centrará principalmente en la medición de estas variables mediante un dispositivo que facilite la obtención de estos valores en tiempo real, los cuales se subirán a un servidor o nube, donde estarán disponibles para que puedan ser usados en un proceso de análisis de información, a través de la tecnología inalámbrica Sigfox, contribuyendo así, en un futuro a una mejor toma de decisión con respecto a la aplicación de fertilizantes; además, se hará una descripción de los métodos y materiales utilizados en el proyecto y la verificación del dispositivo con respecto a un análisis tradicional de suelos, en relación a los resultados obtenidos de ambos procesos de evaluación.

Palabras clave: Agricultura, fertilizantes, nitrógeno, fosforo, potasio, cultivo, café, servidor, sigfox, análisis de suelos.

ABSTRACT

The implementation of technology in agriculture has allowed for better crop production, reduced the environmental impact generated by fertilizers and pesticides and therefore a decrease in economic costs, which postulates it as a good alternative solution. At the agricultural level, it is necessary to know the soil, since there are physical and chemical properties that are fundamental with respect to the relationship between water, soil and plant; within the chemical properties, fertility allows knowing the available quantity of nutrients, specifically those required in greater quantity, Nitrogen (N), Phosphorus (P) and Potassium(K) commonly called the NPK trio, therefore, this research work that is carried out in a lot of coffee cultivation, located in the Tecnicafé Technological Park, will focus mainly on the measurement of these variables through a device that facilitates obtaining these values in real time, These values will be uploaded to a server or cloud, where they will be available to be used in a process of information analysis through Sigfox wireless technology, thus contributing in the future to a better decision making regarding the application of fertilizers; In addition, there will be a description of the methods and materials used in the project and the validation of the device with respect to a traditional soil analysis, in relation to the results obtained from both evaluation processes.

Keywords: Agriculture, fertilizers, nitrogen, phosphorus, potassium, crop, coffee, server, Sigfox, soil analysis.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	4
RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	6
INTRODUCCIÓN.....	15
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
JUSTIFICACION.....	19
OBJETIVOS	21
1. MARCO REFERENCIAL	22
1.2 TECNOLOGIAS IoT	22
1.2.1 TECNOLOGÍA ZIGBEE.....	22
1.2.1.1 Principio de funcionamiento de una red ZigBee.	23
1.2.1.2 Bandas de frecuencia usadas en ZigBee.....	24
1.2.1.3 Alcance dispositivos ZigBee.....	24
1.2.1.4 Velocidad de transmisión de ZigBee	24
1.2.2 TECNOLOGÍA IOT DE BANDA ESTRECHA (NB-IOT).....	25
1.2.2.1 Principio de Funcionamiento de la tecnología NB-IoT.....	25
1.2.2.2 Bandas de Frecuencia usadas en NB-IoT	25
1.2.2.3 Alcance de dispositivos NB-IoT	26
1.2.2.4 Velocidad de transmisión de NB-IoT	26
1.2.3 TECNOLOGÍA LORAWAN	26
1.2.3.1 Principio de funcionamiento de la tecnología LoRaWan	26
1.2.3.2 Bandas de Frecuencia usadas en LoRaWan	27
1.2.3.3 Alcance de dispositivos de LoRaWan	27
1.2.3.4 Velocidad de transmisión de LoRaWan	27

1.2.4 TECNOLOGÍA SIGFOX.....	27
1.2.4.1 Principio de funcionamiento de la tecnología Sigfox.....	28
1.2.4.2 Banda de Frecuencia usadas en Sigfox.....	29
1.2.4.3 Alcance de dispositivos de Sigfox.....	29
1.2.4.4 Velocidad de transmisión de Sigfox.....	29
1.2.5 CUADRO COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS.....	29
2. IMPLEMENTACION ESQUEMA DE COMUNICACIÓN IOT PARA PROTOTIPO DE MONITOREO DE VARIABLES NPK.....	32
2.1 RED INALÁMBRICA DE SENSORES – (WSN).....	32
2.2 ESQUEMA GENERAL DEL PROTOTIPO DE RED INALAMBRICA.....	33
2.2.1 Etapa de alimentación.....	34
2.2.2 Etapa de adquisición.....	34
2.2.3 Etapa de transmisión.....	34
2.2.4 Etapa de recepción.....	34
2.2.5 Etapa de visualización.....	35
2.3 DISEÑO DEL PROTOTIPO DE ADQUISICION DE MACRONUTRIENTES NPK.....	35
2.3.1 Requerimientos del sistema.....	35
2.3.1.1 Variables para determinar la calidad de nutrición en el cultivo de café.....	35
2.3.1.2 Requerimientos del sistema electrónico.....	36
2.3.2 Proceso selección de componentes.....	38
2.3.2.1 Sensor NPK.....	38
2.3.2.2 Sensores de humedad relativa y temperatura.....	40
2.3.2.4 Selección tecnología IoT.....	46
2.3.2.5 Modulo Sigfox.....	47
2.3.2.6 Microcontrolador.....	49

2.4 DISEÑO HARDWARE DE LA ETAPA DE ADQUISICION Y TRANSMISION.....	50
2.4.1 Etapa de Adquisición de datos.	50
2.4.1.2 Adquisición variables de temperatura y humedad.....	51
2.4.2 Etapa de Transmisión IOT.....	53
2.5 PLATAFORMA DE MONITOREO IOT.....	54
2.5.1 Recepción de datos en backend de Sigfox.....	54
2.5.2 Procesamiento en servidor de aplicación IoT.....	56
2.6 DISEÑO DE PROTOTIPO ELECTRÓNICO PARA ADQUISICIÓN DE DATOS ...	57
3. VERIFICACION DEL SISTEMA Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.	59
3.1 VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR NPK.	59
3.1.2 Prueba de funcionamiento del sensor NPK, previo a la aplicación de fertilizantes.	60
3.1.3 Prueba de funcionamiento del sensor NPK, post aplicación de fertilizantes. ...	61
3.2 DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	64
3.2.1 Planificación para el muestreo de suelo.....	65
3.2.1.1 Tipo de muestras en campo.....	65
3.2.1.2 Selección técnica de muestreo.....	66
3.2.1.3 Numero de muestras.....	66
3.2.1.4 Profundidad de las muestras.....	66
3.2.1.5 Mapa del sitio de muestreo.....	66
3.2.2 Manejo y toma de muestras en campo.....	68
3.2.2.1 Recorrido en zig-zag.....	68
3.2.2.2 muestreo utilizando pala.....	69
3.2.2.3 Preparación e identificación de la muestra.....	70
3.2.3 Prueba concentración de azucares en el grano de café.....	71

4. ANALISIS Y RESULTADOS	73
4.1 RESULTADOS PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO NUMERO 1	73
4.1.1 Comparación resultados de prototipo con análisis tradicional.	75
4.1.1.1 Resultado de muestra enviada con prototipo	76
4.1.1.2 Resultado de muestra obtenidos de laboratorio AGROSAVIA.....	76
4.1.2.3 Análisis de resultados.....	77
4.2 RESULTADOS PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO NUMERO 2	77
4.2.1 comparación de resultados de prototipo con análisis tradicional, prueba 2	80
4.2.1.1 Resultado de muestra enviada con prototipo	81
4.2.1.2 Resultados obtenidos por laboratorio AGROSAVIA.	81
4.2.1.3 Análisis de resultados prueba 2.....	82
4.3 RESULTADOS PRUEBA CONCENTRACION DE AZUCAR EN MUSILAGO.....	82
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
5.1 CONCLUSIONES	85
5.2 RECOMENDACIONES.....	87
6. BIBLIOGRAFIA.....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de las Tecnologías de comunicación IoT.	30
Tabla 2. Requerimientos del Dispositivo	37
Tabla 3. Características Sensor N P K	40
Tabla 4. Sensores De humedad relativa y temperatura del suelo	41
Tabla 5. Características el sensor de temperatura y humedad relativa AM2305.....	42
Tabla 6. Características técnicas del panel solar	44
Tabla 7. Características técnicas del controlador de carga	45
Tabla 8. Características técnicas de Batería Seca	46
Tabla 9. Especificaciones de algunos módulos compatibles con Sigfox	48
Tabla 10. Microcontroladores compatibles con arduino	49
Tabla 11. Etiqueta para la identificación de cada muestra	70
Tabla 12. Etiqueta para la identificación de la muestra 1	73
Tabla 13. Resultados obtenidos por el prototipo de monitoreo.....	74
Tabla 14. Resultado homogéneo de la muestra enviada al laboratorio	76
Tabla 15. Etiqueta para la identificación de la muestra 2.	77
Tabla 16. Resultados obtenidos por el prototipo para la prueba 2.	78
Tabla 17. Resultado homogéneo de la muestra 2 enviada al laboratorio	81
Tabla 18. Resultados obtenidos por concentración de azúcar en mucilago.....	83

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Estructura de la red de sensores inalámbrica IoT	33
Fig. 2. Sensor de macronutrientes NPK	39
Fig. 3. Sensor de temperatura y humedad relativa del suelo AM2305.....	42
Fig. 4. Panel solar.....	44
Fig. 5. Controlador de carga	45
Fig. 6. Batería Recargable de 12V/7Ah	46
Fig. 7. Cobertura de la red mundial de sigfox	47
Fig. 8. Módulo Sigfox	49
Fig. 9. Esquema electrónico interface RS485	51
Fig. 10. Protocolo de comunicación bus único	52
Fig. 11. Esquema electrónico comunicación sonda AM2305	52
Fig. 12. . Esquema electrónico de la etapa de transmisión.....	53
Fig. 13. Configuración id y pac en backend de sigfox	55
Fig. 14. Mensajes enviados por el sistema hardware	55
Fig. 15. Configuración de los callbaks	56
Fig. 16. Plataforma del IoT para monitoreo de variables	57
Fig. 17. Esquemático completo del prototipo electrónico	58
Fig. 18. Integración de etapas del prototipo electrónico	58
Fig. 19. Disposición de los sensores para la prueba uno	59
Fig. 20. . Datos obtenidos por el sensor NPK, previo a la fertilización	60
Fig. 21. Resultados temperatura y humedad, previo a fertilización	61
Fig. 22. Prueba funcionamiento sensor NPK, post fertilización	62
Fig. 23. . Datos obtenidos por el sensor NPK, post fertilización.....	63
Fig. 24. Resultados temperatura y humedad, post fertilización	63
Fig. 25. Implementación del sistema en campo	64
Fig. 26. . Mapa de la finca naranjos que representa diferentes lotes de plantación de café.....	67
Fig. 27. Recorrido en zig-zag.....	68
Fig. 28. Recolección de submuestra con pala.....	69

Fig. 29. Recolección de datos con prototipo	70
Fig. 30. Refractómetro manual.....	72
Fig. 31. Resultados análisis NPK con prototipo al lote 14	75
Fig. 32. Resultados medición temperatura y humedad.....	75
Fig. 33. Datos entregados por laboratorio AGROSAVIA, muestra 1	77
Fig. 34. Resultado análisis NPK con prototipo, prueba 2	80
Fig. 35. Resultados de temperatura y humedad	80
Fig. 36. Datos entregados por laboratorio AGROSAVIA, muestra 2	82
Fig. 37. Concentración de azúcares en grano.....	84
Fig. 38. Mezcla homogénea de tierra para análisis.....	88
Fig. 39. Envío de muestra para análisis de macronutrientes.....	89
Fig. 40. Resultado de análisis de suelo por laboratorio de la federación de cafeteros...90	
Fig. 41. Resultado de análisis de suelo por laboratorio de agrosavia.....	91
Fig. 42. Tasa de error en relación con los resultados obtenidos por laboratorios.....	92

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la tecnología ha aportado avances y cambios a la humanidad, mejorando así, la relación de los seres humanos con los entornos de trabajo, salud, educación, negocios, agricultura, fabricación etc.; por tanto, si su aplicación se hace de manera correcta, garantiza la automatización en los procesos, y aumenta la tasa de producción, lo cual, se traduce en un beneficio para el usuario [1].

Colombia es un país que tiene un enorme potencial en cuanto al sector agrícola, sin embargo, el panorama dentro de los procesos de innovación e implementación de mejoras en la agricultura es otro, por lo cual, no se ha tenido la mayor eficiencia, debido a múltiples factores que interfieren con el progreso en el campo, algunos de estos son: la falta de desarrollo tecnológico, falta de acceso a financiamiento, falta de inversión, mala asignación de recursos dentro del sector, entre otros[2].

Los productos agrícolas más rentables en Colombia son: Soja, maíz, algodón, naranja, café y caña de azúcar[3], dentro de los cuales, el café, es uno de los productos más posicionados en Colombia y beneficia a numerosas familias, concretamente, en el departamento del Cauca, es cultivado por 90.000 familias caficultoras que generan sus propios ingresos[4].

El rendimiento de un cultivo depende de la interrelación entre el suelo agrícola y las propiedades de la planta, además, se ve reflejado también por las condiciones biológicas, físicas y químicas del suelo. Los nutrientes disponibles en el terreno son absorbidos por la planta, a través de sus raíces, los cuales ayudan a un mejor desarrollo y proceso de los cultivos. Cuando hay ausencia de estos minerales, la producción se degrada y por tanto se llega a la necesidad de requerirlos nuevamente mediante el suministro de fertilizantes. Es de tener en cuenta que hay algunos nutrientes que son necesarios en mayor cantidad, los cuales reciben el nombre de macronutrientes[5]; el trabajo de investigación se enfocará principalmente en las variables NPK(nitrógeno, fósforo y potasio).

En muchas ocasiones no se hace el suministro adecuado de los fertilizantes porque no se tiene el pleno conocimiento de la cantidad necesaria y requerida, además no se cuenta con la suficiente asesoría técnica, para dar una solución pronta.[6].

Los análisis de suelos tradicionales pueden ser precisos, pero tienen la desventaja de que los resultados obtenidos en laboratorio tienen un periodo de tiempo elevado, el cual es de 15 a 30 días, por tanto ya no se contaría con una muestra fresca de suelo para su análisis[7].

Desde esta perspectiva, la aplicación tecnológica permite un mejor procesamiento y análisis de las variables, ya que se podrán adquirir en tiempo real ; dentro del mercado hay sensores de fácil acceso, en cuanto a sus bajos costos y su tamaño reducido, de igual modo, existen tecnologías IoT(Internet Of Things (Internet de las Cosas)) que reciben y transmiten la información desde un nodo sensor hacia un servidor, a través de un módulo de comunicación inalámbrica, posteriormente será procesada hacia una interfaz de usuario[8]. Este trabajo desarrollará una WSN (Wireless Sensor Networks (Red de Sensores Inalámbricos)) mediante la tecnología IoT para identificar macronutrientes esenciales NPK del suelo en un cultivo de café, en relación a un análisis tradicional, se implementará la red a partir de una de las técnicas de muestreo que utiliza el análisis tradicional para la toma de datos, evaluando así, el desempeño de la tecnología a través de la prueba de campo en el parque tecnológico Tecnicafé, ubicado en la vereda la Venta, Cajibío.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El mundo a través de su evolución ha generado avances en la ciencia y la tecnología, esto ha permitido mejorar cada vez más la producción agropecuaria, por ejemplo, la optimización de la aplicación de fertilizantes, que ahorra tiempo y dinero, creando así un campo más productivo [9]; los obstáculos que enfrenta Colombia para el avance de la ciencia, tecnología e innovación agropecuaria, son la falta de recursos financieros y humanos, una política clara y articulada, la debilidad del país en asuntos de propiedad intelectual y la ausencia de buenos procesos de planeación, seguimiento y evaluación [10]. Según la encuesta de Usabilidad TIC en el Sector Agropecuario (Utsa) realizada en el año 2016, siete (69.2%) de cada diez personas del campo no usan la tecnología por desconocimiento o por ausencia de energía eléctrica y falta de internet en algunos lugares, lo cual conlleva a situación de rezago en Colombia [11]. Actualmente la Pandemia del SARS-COV-2 a puesto al descubierto algunas falencias, entre ellas, la asistencia técnica en el sector agropecuario, pues solo el 16.5% de productores, la reciben, dentro de los cuales el 0.7 % emplean tecnologías para sistemas y equipos automatizados, y el 83,5% no tienen acceso a este servicio, limitando así una mejor respuesta a los retos de producción y abastecimiento en tiempos de pandemia global [12] [11].

Este trabajo se enfoca principalmente en la producción del café, que es uno de los productos agrícolas más posicionados en Colombia pues ocupa el tercer lugar, detrás de Brasil y Vietnam [13]. Dentro del país, el departamento del Cauca es el cuarto productor de café a nivel nacional, y hace parte de un proceso agrícola, que brinda, la oportunidad a 90.000 familias caficultoras de generar sus propios ingresos, de igual modo, es una fuente de empleo en el sector rural; los terrenos que abarca el cultivo de este producto suman hoy 93.000 hectáreas repartidas en 114 fincas; es así como el sector agrícola en el Cauca representa el 10% anual del PIB departamental [4].

A pesar del crecimiento y la proyección que ha tenido este sector, los suelos no presentan totalmente los requerimientos nutricionales que exige una producción agrícola económica y ambientalmente viable, dentro de tales demandas se encuentran los macronutrientes Nitrógeno(N), Fósforo(P) y Potasio(K), que son importantes para que el cultivo de café alcance su máximo potencial de producción, por tanto, se recurre

a la aplicación de fertilizantes como insumos, sin embargo, el desconocimiento acerca de éstos y la pobre asesoría técnica, lleva al suministro inadecuado, lo cual implica, el no cumplimiento de las necesidades de la planta para una buena producción, además, su alto costo acarrea menos utilidades para el productor y se traduce en un aumento de costos de la producción agropecuaria, que a su vez, se transfiere directamente a la canasta familiar [6][14]. Una de las alternativas para establecer la cantidad de fertilizantes que se debe aplicar a los cultivos, si se tiene la posibilidad de hacerlo, es el análisis de suelos tradicional que consiste en una toma de muestra de la zona agrícola, la cual es enviada a un laboratorio donde se realiza su respectivo proceso y luego se devuelven los resultados con las recomendaciones de fertilización, este informe demora hasta 30 días, que es mucho tiempo, además, carece de precisión, debido a que la muestra del suelo no es fresca [7]. De esta manera se plantea la pregunta de investigación ¿Cómo monitorear los macronutrientes NPK del suelo en un cultivo de café, obteniendo resultados en menor tiempo con relación al método tradicional de análisis por laboratorio para un terreno, caso de estudio en tecnicafé?

JUSTIFICACION

Según la revista Dinero y Semana, en medio del virus SARS-CoV-2 que ha golpeado casi a todos los sectores de la economía del país, se viene una gran expectativa en el sector agrario, la cual es mencionada y presentada por Roberto Vélez, gerente de la FNC (Federación Nacional de Cafeteros), pues la cosecha que la mayoría de los 602 municipios cafeteros de Colombia, es decir, más de la mitad del país, recogerá en el segundo semestre, será de 7.5 millones de sacos de 60 kg de café verde (aproximadamente 55% del volumen anual) cuyo valor superaría los 9 billones de pesos, cifra histórica que significaría para el país una mejoría económica, especialmente en la zona rural, y por tanto, para tal fin se requerirá de 165.000 recolectores; noticia positiva en medio de la pandemia [15][16]

En Colombia, las zonas propicias para el cultivo del café se encuentran en las tres cordilleras, Oriental, Central y Occidental, ya que los suelos, en su mayoría, provienen de cenizas volcánicas, lo que los hace muy ricos en materia orgánica y minerales [17]. El conocimiento del suelo, desde el punto de vista de la agricultura, es importante, ya que permite aprovechar sus cualidades, y así, mejorar su rendimiento, a través de un manejo sustentable, sin sobreexplotar, ni agotar este recurso, además, es un sistema sin equilibrio, pues se producen reacciones físicas, químicas y biológicas, que afectan las propiedades del suelo; los parámetros físicos y químicos son fundamentales para entender la relación agua – suelo – planta [18]. Por ello, dentro de las propiedades químicas, en el cultivo de café, la fertilidad, es necesaria para conocer la cantidad disponible de nutrientes, concretamente aquellos requeridos en mayor cantidad: Nitrógeno(N), Fósforo(P) y Potasio(K) (NPK) [19], pues, además de ser indispensables en el crecimiento de la planta, son también los principales componentes de los fertilizantes [20].

La aplicación tecnológica dentro del sector agrícola permite llegar a ser una fuente de ingresos y medios de vida muy favorables; las ventajas que proporciona al hacer uso de ella son: una mejor producción que al aumentar permitirá la erradicación del hambre, disminución en los índices de desnutrición, protección del medio ambiente al disminuirse considerablemente la presión física sobre los recursos naturales, precios más accesibles para las familias lo que mejoraría su calidad de vida, debido a que gran

parte de los recursos económicos de las familias colombianas es utilizado en alimentación; situación que conllevaría a una mayor comercialización de los productos dando como resultado un aporte al sector agrícola. [21]. Colombia necesita mejorar su producción y adoptar estas herramientas en los diferentes sectores agrícolas; concientizar y probar que la ciencia y la tecnología son vías para el crecimiento y desarrollo, e impulsar a través de éstas, la competitividad del agro colombiano en el mundo, logrando así una oferta extranjera profunda, pues es un país que se cataloga por su gran variedad y calidad de productos [22].

La FNC (Federación Nacional de Cafeteros) promueve el uso racional de fertilizantes - sustancias, que contienen elementos químicos como el estiércol o mezcla de nitratos que mejora el crecimiento de las plantas, dando nutrición a los cultivos - mediante el análisis de suelos, reduciendo los costos y la presión que se ejerce sobre el medio ambiente [23][24]. Una de las alternativas tecnológicas en el análisis de suelos, que contribuyen para alcanzar este fin, es la WSN, la cual, se destaca por su adaptación en diferentes ámbitos (medicina, industrial, vehículos, domótica, monitorización ambiental, vigilancia y seguridad etc.) además, proporciona ventajas, en cuanto al factor económico, su tamaño, potencia y flexibilidad [25]. Éste sistema WSN consiste, en la dispersión de los nodos sensores en distintos espacios del suelo agrícola que recolecta las variables requeridas y las transmiten a través de transceptores de radio por medio de módulos de comunicación inalámbrica, al servidor, donde se almacenan, y posteriormente se procesan y transfieren a una terminal de visualización, sea un Smartphone, Tablet o Pc[8]; Por tanto, el empleo de un sistema WSN proporcionara información en tiempo real, sin la necesidad de tomar muestras y llevarlos a un laboratorio [26], con una disminución en el costo económico y logrando el correcto suministro de fertilizantes a los cultivos de café que llevaran a un menor deterioro ambiental y a una mayor calidad del grano[23], mediante la percepción de los macronutrientes NPK.

OBJETIVOS

A. Objetivo general

Desarrollo de una red de sensores inalámbricos mediante la tecnología IOT para identificar macronutrientes esenciales NPK del suelo en un cultivo de café, en relación a un análisis tradicional.

B. Objetivos específicos

- Diseñar una red de sensores inalámbricos para capturar datos de macronutrientes esenciales NPK del suelo para el cultivo del café.
- Determinar la correlación de las propiedades físico-químicas con un análisis tradicional.
- Realizar proceso de estandarización de medida para cada uno de los macronutrientes sensados en correlación con los obtenidos por análisis tradicional mediante examen de análisis de suelos.
- Evaluar el desempeño de la tecnología desarrollada a través de prueba de campo en un terreno caso de estudio en Tecnicafé

1. MARCO REFERENCIAL

La intención de este capítulo es realizar un acercamiento teórico acerca de las tecnologías de comunicación inalámbricas basadas en IoT, conceptos importantes, limitaciones y características que hacen de estas una gran herramienta de vanguardia del internet de las cosas.

De acuerdo con el tema que se aborda en el presente trabajo de investigación, se tendrán en cuenta las siguientes tecnologías: ZigBee, LoRaWan, NB-IoT y Sigfox, con el fin de hacer una descripción y comparación entre éstas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), para así, elegir la que más se adecue a los requerimientos del proyecto.

1.2 TECNOLOGIAS IoT

El termino IoT (Internet of Things) es un concepto propuesto por Kevin Ashton en el año de 1999, tecnología que actualmente tiene relevancia en el mundo práctico, ya que se ha hecho útil en aplicaciones del mundo real, como, la seguridad, la medicina, la industria, la agricultura, la energía y para la creación de ciudades, hogares y dispositivos inteligentes. La idea fundamental de IoT es la transmisión de datos entre maquinas a través de tecnologías de vanguardia como las redes de sensores inalámbricos (WSN) y la identificación por radiofrecuencia (RFID) utilizando así, dispositivos de detección con la suficiente capacidad de tomar una decisión efectiva y algoritmos inteligentes, después de que una acción es realizada en consecuencia[27].

Dentro de las tecnologías de vanguardia para la conectividad de la IoT, se encuentra, la inalámbrica, que se clasifica en dos categorías, corto y largo alcance, cada una de ellas, con diferentes características y rendimiento para aplicaciones determinadas[28].

1.2.1 TECNOLOGÍA ZIGBEE

ZigBee es una tecnología inalámbrica de baja complejidad, baja velocidad de datos a niveles de energía muy bajos y bajos costos, fue fundada en 2004 por la ZigBee Alliance[29][30], trabaja en conjunto con la IEEE 802.15.4 para determinar toda la pila del protocolo, además, ofrece la facilidad de agregar o quitar nodos de la red y sigue la definición por capas del modelo de referencia de interconexión de sistemas abiertos

Opens System Interconnection (OSI)[31][30]. Su nombre se debe en gran parte, al movimiento en Zigzag utilizado por las abejas para su comunicación, quienes comparten, a través de este método, información que se relaciona, con la dirección, distancia y estado del alimento hallado, con los demás miembros de la colonia [32].

1.2.1.1 Principio de funcionamiento de una red ZigBee.

La principal función de ZigBee, es la realización de una comunicación entre varios dispositivos a través de una topología de red jerárquica, además añade características, como la autenticación, encriptación, asociación y servicios de aplicación de la capa superior [31].

La arquitectura de la pila de ZigBee está compuesta por un conjunto de bloques llamados capas. Cada capa contiene una entidad de servicios propios para la capa superior. Una entidad de datos suministra un servicio de transmisión de datos y, una entidad de gestión, todos los demás servicios. Cada entidad de servicio muestra una interfaz a la capa superior a través de un punto de acceso de servicio (SAP), y cada SAP soporta un número de servicios primarios para su correcto funcionamiento.

La norma IEEE 802.15.4 define las dos capas inferiores: la capa física (del inglés *the physical* (PHY)) y la subcapa de control de acceso al medio (MAC), por tanto, ZigBee Alliance en base a estas dos capas, proporciona la capa de red (NWK) y el marco de trabajo para la capa de aplicación. El marco de la capa de aplicación consiste en la subcapa de apoyo a la aplicación (APS) y los objetos del dispositivo ZigBee (ZDO). Los objetos de aplicación propios del fabricante utilizan el marco y comparten APS y servicios de seguridad con el ZDO.

La subcapa MAC controla el acceso al canal de radio mediante un mecanismo, acceso múltiple por detección de portadora y prevención de colisiones (del inglés ***Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*** (CSMA-CA)). De igual modo, incluye la transmisión de tramas de las balizas, la sincronización y el suministro de un mecanismo de transmisión fiable[33].

1.2.1.2 Bandas de frecuencia usadas en ZigBee

Un dispositivo debe ser compatible al menos con una de las siguientes opciones: O-QPSK PHY en la banda de frecuencia de 2,4 GHz o el BPSK PHY en ambas bandas de 868 MHz y 915 MHz. Cada una de las bandas de frecuencia incluye su propio conjunto de canales a través de una combinación de números y páginas de canales. Un dispositivo ZigBee debe utilizar la página de canales cero, cuyos números son: el canal 0 para la banda de 868 MHz, los canales del 1 al 10 para la banda de 915 MHz y los canales del 11 al 26 para la banda de 2450 MHz[33].

1.2.1.3 Alcance dispositivos ZigBee

ZigBee tiene un rango de cobertura de 10 a 100 metros, sin embargo, cabe tener en cuenta que esta tecnología es compartida, por lo que hay disponibles, módulos y chips de diferentes fabricantes para su interoperabilidad. Digi es una entidad que ofrece software y módulos de radio frecuencia (RF) integrados, dentro de los cuales se encuentra el módulo XBee certificado por la ZigBee Alliance, que beneficia y facilita el despliegue de las tecnologías inalámbricas, sobre todo en dispositivos electrónicos aplicados a ciudades inteligentes, agricultura de precisión, redes de sensores, automatización industrial, medicina y aplicaciones de seguimiento de activos, por tanto, existen módulos XBee que manejan largas distancias de comunicación, ejemplo, XBee Pro S3B, cuyo rango de cobertura puede llegar hasta los 45 Km, con la antena correcta [34] [35][36].

1.2.1.4 Velocidad de transmisión de ZigBee

ZigBee tiene una velocidad de transmisión de datos de 250 Kbps a 2.4 GHz, 40 Kbps en 915 MHz y 20 Kbps a 868 MHz. Se puede observar que, a una mayor frecuencia, la velocidad de transmisión de datos es superior, significando así, un buen rendimiento y una menor latencia; pero a una menor frecuencia se traduce en una mejor sensibilidad y proporciona un área mayor de cobertura[31].

1.2.2 TECNOLOGÍA IOT DE BANDA ESTRECHA (NB-IOT)

Es una tecnología de LPWAN, propuesta por el proyecto de asociación de tercera generación (3GPP) en septiembre de 2015 y fue estandarizada por el 3GPP en junio de 2016. NB-IoT esencialmente ha sido diseñada para un bajo costo, larga vida de la batería, alta cobertura y despliegue de un gran número de dispositivos. Utiliza las funciones básicas de la evolución a largo plazo (LTE), lo cual mejora su despliegue haciendo que sea rápido y sencillo. Emplea modulación por desplazamiento cuadrifásica (QPSK), Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA) en el enlace ascendente, y FDMA ortogonal (OFDMA) en el enlace descendente[37][38].

1.2.2.1 Principio de Funcionamiento de la tecnología NB-IoT

Con el fin de cumplir con los requerimientos de la arquitectura de NB-IoT, la arquitectura LTE ha sido modificada para tal finalidad [37];

- **NB-IoT UE:** establece la conexión y se comunica con eNodeB de forma inalámbrica a través de la radio.
- **eNodeB:** lleva a cabo el proceso de acceso a la interfaz aérea y la gestión de la célula. El eNodeB se comunica a través de la interfaz S1-lite al núcleo de paquetes evolucionados (EPC) de la IoT. Transmite mensajes del Estrato de No Acceso (NAS) al EPC de la IoT para su posterior procesamiento.
- **EPC de la IoT:** se conecta al NAS de la UE y envía los datos a la plataforma de IoT para su posterior procesamiento.
- **Plataforma de la IoT:** Reúne los datos de varias redes de acceso a IoT y los envía al servidor de aplicaciones.
- **Servidor de Aplicaciones:** El servidor de aplicaciones es el punto final de llegada de los datos que son procesados de acuerdo con las especificaciones y requisitos del cliente[39].

1.2.2.2 Bandas de Frecuencia usadas en NB-IoT

Dado a que el ancho de banda es limitado, NB-IoT puede desplegarse en tres modos diferentes, que son, autónomo, de banda y banda de guarda, en los modos de banda y banda de guarda ocupa bloques de recursos físicos (PRB) de 180 KHz en el espectro LTE tanto en el enlace ascendente (UL) como descendente (DL). Se asigna como

autónomo cuando ocupa el ancho de banda de 200 KHz “rearmando” el espectro del sistema global para las comunicaciones móviles (GSM)[40].

1.2.2.3 Alcance de dispositivos NB-IoT

La tecnología NB-IoT proporciona una cobertura profunda en zonas interiores y exteriores, tiene 20 dB más en comparación con LTE, soporta una pérdida máxima de acoplamiento (MCL) de 164 dB. De acuerdo con las normas 3GPP, al reducir el ancho de banda, disminuye la velocidad de los datos, pero, mejora la densidad espectral de potencia (PSD) del usuario y su cobertura, a la vez que, al incrementar el número de repeticiones en la transmisión de datos, aumenta la latencia y el consumo de energía del dispositivo. Tiene un rango de alcance de 1 Km en zona urbana y 10 Km en zona rural[37].

1.2.2.4 Velocidad de transmisión de NB-IoT

La velocidad máxima de transmisión de datos es de 200 kbps y 20 Kbps en el enlace descendente y ascendente , la vida útil de la batería, puede alcanzar una duración de 10 años, transmitiendo un promedio de 200 bytes por día[41].

1.2.3 TECNOLOGÍA LORAWAN

LoRaWan es una tecnología de control de acceso al medio (MAC) de código abierto, estandarizado por la Alianza LoRa, su publicación se realizó por primera vez en 2015 y tiene su funcionamiento en la parte superior de la capa física de LoRa, además, es aquella que permite que haya comunicación entre los múltiples dispositivos que están en contacto con el mundo real y las puertas de la red[42].

1.2.3.1 Principio de funcionamiento de la tecnología LoRaWan

La topología de la tecnología LoRaWan es una estrella de estrellas y la constituye tres componentes principales: i) servidores de red, ii) puertas de enlace (Gateway (GW)) y iii) los nodos finales. Los nodos finales se encargan de realizar la comunicación de datos, la cual, puede ser por modulación LoRa o FSK, al servidor de la red (o el servidor de datos) mediante las GW. Los servidores de red, administran las GW mediante

tecnología IP estándar y las tramas de datos enviadas y enrutadas a través de los tres componentes, permite así, solventar los problemas de gestión del medio y la congestión de la red [43].

1.2.3.2 Bandas de Frecuencia usadas en LoRaWan

La tecnología LoRaWan funciona en una banda de frecuencias industriales, científicas y médicas (ISM) de sub-giga Hertz sin licencia (banda de 863-870 MHz en Europa y 902-928 MHz en E.E.U.U). Utiliza el ancho de banda de 125 KHz, 250 KHz y 500 KHz según los parámetros regionales[44].

1.2.3.3 Alcance de dispositivos de LoRaWan

El alcance de las comunicaciones de la tecnología de LoRaWan depende de los ajustes de modulación LoRa que se hayan seleccionado; la distancia de comunicación de los dispositivos en la zona urbana va de 2 a 5 Km, mientras que en el sector rural varía desde 15 a 20 Km [45].

1.2.3.4 Velocidad de transmisión de LoRaWan

La velocidad de datos que ofrece LoRa está entre 300 bps y 3.7 kbps y con la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) alcanza una velocidad de 50 kbps. La longitud máxima de carga útil para cada mensaje es de 243 bytes[46].

1.2.4 TECNOLOGÍA SIGFOX

Sigfox es una tecnología de banda estrecha, originada en el año 2009 en Toulouse, Francia, por el operador de red Sigfox. En sus inicios, su comunicación era unidireccional y se realizaba por enlace ascendente; posteriormente evolucionó y se facilitó un canal que permite la comunicación por enlace descendente. Una de las ventajas que presenta Sigfox es que el hardware utilizado para cumplir con el proceso de comunicación inalámbrica puede ser de diferentes proveedores, teniendo en cuenta que sólo utiliza una única infraestructura de red gestionada. Es un sistema que envía pequeñas e infrecuentes cantidades de datos, lo cual es suficientemente apto para

utilizarlo en dispositivos como sistemas de alarma, agricultura, medidores de potencia simples y sensores ambientales[47].

1.2.4.1 Principio de funcionamiento de la tecnología Sigfox

Sigfox define su red a partir de dos capas: *El equipo de Red y el Soporte Sigfox*.

- El equipo de Red sigue una topología de red en estrella formada por las estaciones base y sus antenas, permitiendo de esta manera tener puntos finales, los cuales deben cumplir con requerimientos propios para aplicaciones, en donde es de gran importancia un bajo consumo energético y una banda de frecuencia eficiente para la transmisión de datos. Los sensores recogen los datos y los envían a la estación base que esté más cerca, ésta a la vez, después de haber recibido los datos, los reenvía al sistema de soporte Sigfox, a través de Backend, que consiste en un túnel VPN (red privada virtual), generalmente, basada en DSL (línea de abonado digital) con LTE y satélites como respaldo. Las estaciones base, utilizan esquemas de diversidad de tiempo y frecuencia, con el fin de compensar el rechazo de los mensajes que se puede presentar en su defecto. Cuando hay varias estaciones, cada una de ellas recibirá y procesará la información.
- El sistema de soporte Sigfox se encuentra en la nube, el cual a través de unos servicios u oficios permite, en su mayoría, llevar a cabo, el funcionamiento de la red; se dividen en cuatro grupos principales: **Los servidores Backend**, que tienen la tarea de vigilar y administrar las estaciones base, con las cuales su comunicación se hace de manera directa, además cumple la función de procesar la información obtenida por los sensores y que a su vez es enviada y recibida por la estación; si hay más de una estación que reciba el mensaje, los servidores tienen la capacidad de definir qué copia debe ser guardada. **El almacenamiento** es un servidor, en el cual, se encuentran dos bases de datos, una de ellas, almacena los datos procesados por el anterior servidor y aquellos obtenidos por los dispositivos y, la otra, almacena información que caracteriza los datos concernientes a cada dispositivo. **Los servidores frontales** solo realizan la comunicación con la base de datos que almacena la información que caracteriza

los datos concernientes a cada dispositivo, creando así una interfaz web al usuario, con el fin de que pueda administrar los dispositivos, configurar los permisos de usuario o grupo. **Los datos** se comunican con las bases de datos de mensajes y a través de una interfaz de programación de aplicaciones (API) basada en la Notación de Objetos de JavaScript (JSON) se tiene la posibilidad de recuperar los datos e integrarse con los sistemas comerciales. El sistema puede admitir ambas comunicaciones, tanto en el enlace, ascendente como descendente [48].

1.2.4.2 Banda de Frecuencia usadas en Sigfox

Se utiliza la modulación de banda ultra estrecha (UNB), que permite una mayor adaptabilidad de las antenas a diferentes circunstancias que la finalidad de la tecnología lo requiera, de igual modo, ofrece un ancho de banda de 100 Hz mejorando así, la seguridad en cuanto interferencias que se puedan presentar, para la transmisión de mensajes a las estaciones base, desde los dispositivos finales, los cuales, utilizan un canal de 200 KHz, operando así en las bandas ISM que dependen de la zona geográfica, ya que la configuración de red puede ser diferente en cada país [49] [45].

1.2.4.3 Alcance de dispositivos de Sigfox

El alcance de la tecnología varía según el entorno de aplicación, para zonas rurales tiene un rango de 30 Km a 50 Km y en zonas urbanas 3 Km a 10 Km[50].

1.2.4.4 Velocidad de transmisión de Sigfox

La velocidad con que se transmite los datos entre los diferentes dispositivos que componen la tecnología de Sigfox, es de 100 bps [41].

1.2.5 CUADRO COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS

Teniendo en cuenta la descripción general de las tecnologías que son más utilizadas en aplicaciones como la agricultura donde se requiere de ciertos parámetros de velocidad, cobertura, tiempo de respuesta entre otros, se realiza a continuación un cuadro comparativo (Tabla 1. Comparación de las Tecnologías de comunicación IoT [41]

[34][51].) de las tecnologías, resaltando lo más importante y aquello de gran utilidad para la consecución de un proyecto.

Tabla 1. Comparación de las Tecnologías de comunicación IoT [41] [34][51].

PARÁMETROS		ZIGBEE	LORA WAN	SIGFOX	NB-IOT
TIPO DE MODULACIÓN		BPSK/OQPSK	GFSK	DBPSK(UL), GFSK(DL)	QPSK
BANDA DE FRECUENCIA		868/915 MHz y 2.4 GHz	869/915 MHz	868/915 MHz	Bandas de Frecuencia LTE con Licencia
ANCHO DE BANDA DEL CANAL		2 MHz	<500 Hz	<100 Hz	200 KHz
VELOCIDAD DE DATOS		20, 40 y 250 kbps	50 kbps	100 bps	200 Kbps
LATENCIA		15 ms	1-10 ms	(190-350) ms	(10-13-18 y 21) ms
RANGO DE COMUNICACIÓN		100m, XBee Pro S3B (45 Km)	5 km(urbano), 20 Km(rural)	10 km(urbano), 40 Km(rural)	1 km(urbano), 10 Km(Rural)
LONGITUD MÁXIMO DE DATOS		127 bytes	243 bytes	12 bytes(UL), 8 bytes(DL)	1600 bytes
CAPACIDAD DE SEGURIDAD		128 bits AES	AES 128 bits	AES 128 bits	LTE Encriptación
NÚMERO DE MENSAJES POR DÍA		Ilimitado	Ilimitado	140(UL), 4(DL)	Ilimitado
CONSUMO DE ENERGÍA EN TX MODO		36,9 mW	100 mW	122 mW	
TOPOLOGÍA DE RED FÍSICA		P2P, árbol, estrella, malla	Estrella de las estrellas	Estrella	Maestro/Esclavo
BIDIRECCIONAL		Si/Half-Duplex	Si/Half-Duplex	Limitado/Half-Duplex	Si/Half-Duplex

2. IMPLEMENTACION ESQUEMA DE COMUNICACIÓN IOT PARA PROTOTIPO DE MONITOREO DE VARIABLES NPK.

En este capítulo se presentan las especificaciones de diseño del prototipo a desarrollar, así como también su implementación y cada uno de los elementos necesarios para el funcionamiento de este, se indica la metodología utilizada para el diseño del prototipo, cuya función es monitorear las variables principales NPK y las variables secundarias, humedad relativa y temperatura del suelo (Se ponen en este trabajo como variables adicionales que podrán ser de utilidad para futuros trabajos o investigaciones) que se aplicará al cultivo de café en el parque tecnológico tecnicafé; se hace una descripción gráfica mediante un diagrama de bloques (Fig. 1. Estructura de la red de sensores inalámbrica IoT), Se tiene en cuenta los requerimientos, el proceso de selección de componentes para el proyecto y finalmente se presentará un diseño electrónico.

2.1 RED INALÁMBRICA DE SENSORES – (WSN))

En el entorno IoT, se hace referencia a una red de dispositivos y sensores interconectados a través de internet, los cuales recogen información y la comparten entre sí, permitiendo de esta manera obtener datos importantes para la toma de decisiones; dentro de los desarrollos tecnológicos que han hecho de IoT una herramienta muy útil a nivel global, se ha incluido otras tecnologías como la computación en la nube y las redes de sensores inalámbricos. Un factor importante dentro de este proceso para gestionar la información, es que los dispositivos se puedan interconectar con estándares abiertos[52][53].

La WSN consta de una red de adquisición de datos, que constituyen, sensores y un módulo compatible con la tecnología seleccionada, asimismo, una red de distribución de datos, cuya función es la de transmitir la información adquirida a una estación central mediante la técnica de disposición inalámbrica, perteneciente a LPWAN, para ser almacenada, analizada y visualizada en la nube cumpliendo el requerimiento del proyecto [53], [54]. Es de tener en cuenta, la movilidad y heterogeneidad del nodo, la escalabilidad para el despliegue de la red, la capacidad de soportar las duras condiciones ambientales, además de la facilidad de uso; garantizando así el buen funcionamiento en el campo agrícola [54]. La WSN asistirá en la optimización de la

producción, mejorando la utilización de algunos recursos y parámetros agrícolas, minimizando así el impacto ambiental y proporcionando monitoreo en línea [55].

2.2 ESQUEMA GENERAL DEL PROTOTIPO DE RED INALAMBRICA

Para poder desarrollar el sistema electrónico que se propone, se divide e ilustra en el siguiente diagrama de bloques, ver (Fig. 1. Estructura de la red de sensores inalámbrica IoT, donde se tiene un bloque de entrada, como es la alimentación y los sensores que toman la información del punto de medición, luego, se lleva a cabo la transmisión de datos a través de una red de comunicación inalámbrica, para lo cual, se hará la selección de la tecnología que más se ajuste al proyecto, al realizar este proceso, se suben a la nube o servidor dichos datos, los cuales estarán disponibles mediante alguna interfaz que pueda ser de fácil acceso al usuario.

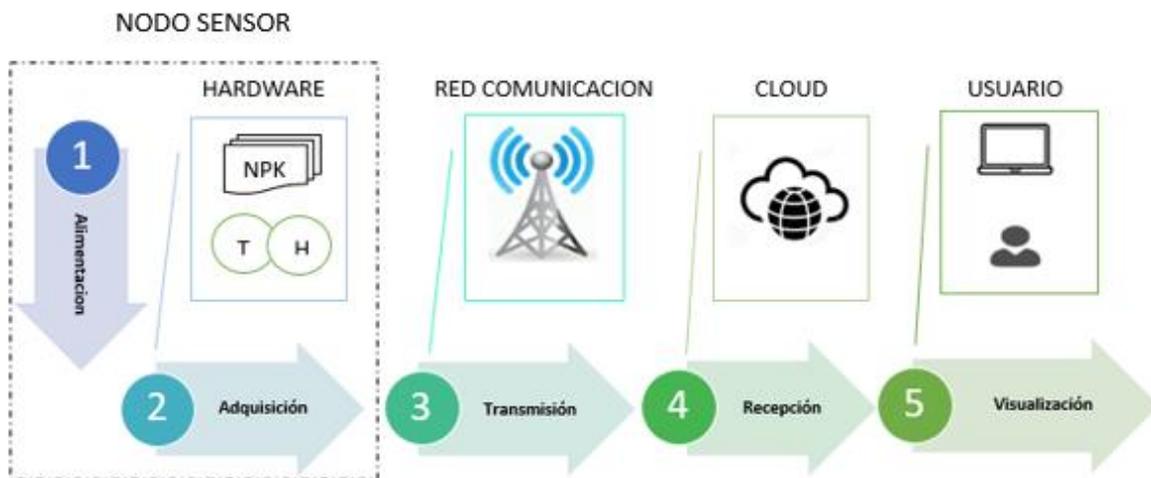


Fig. 1. Estructura de la red de sensores inalámbrica IoT

Fuente: Elaboración propia

Para mayor detalle en la descripción del diagrama de bloques, de la arquitectura del sistema, se presenta una explicación detallada de cada uno de los bloques que componen el sistema propuesto:

2.2.1 Etapa de alimentación

Se encarga de suministrar la energía necesaria para el correcto funcionamiento de los componentes electrónicos que conforman el dispositivo, proponiendo una fuente de alimentación estándar, para lo cual se optó por utilizar un sistema basado en batería de 12 VDC, ya que es comúnmente utilizada en este tipo de proyectos, apoyado de un sistema de energía fotovoltaica. Se encuentran diferentes elementos electrónicos, tales como, paneles solares y reguladores de carga que permiten adaptarse de manera rápida y eficiente a las baterías de 12V que son altamente comerciales.

2.2.2 Etapa de adquisición

Será conformada por diferentes sensores transductores que convierten la información de las variables físico-químicas en señales eléctricas, las cuales, son entregadas al sistema de recolección local en el nodo para ser transmitidas. Los macronutrientes NPK, así como la temperatura y humedad, son datos de alta precisión y velocidad, que son tomados del mundo real, por tanto, se hace el empleo de un microcontrolador donde se realiza la manipulación de estas variables, a través de la programación, para posteriormente ser enviados a la estación base donde se procesarán y llegarán al usuario final.

2.2.3 Etapa de transmisión

Dentro del sistema, es la encargada de realizar la transferencia de las variables físicoquímicas convertidas en valores o unidades de ingeniería, en la anterior etapa, a través de un canal de comunicación inalámbrica, que permite el flujo digital de bits hacia otros medios de almacenamiento.

2.2.4 Etapa de recepción

Los datos son enviados en forma de paquetes, que son entregados o recolectados por el backend, dejándolos a disposición para ser consumidos por un software de aplicación donde se podrán visualizar y analizar. Es una cuenta de configuración de los módulos para cada usuario, que permite autenticar cada dispositivo, además de exportar los datos registrados a plataformas de interpretación de resultados.

2.2.5 Etapa de visualización

La función de esta etapa es tomar y almacenar los datos de cada una de las variables, entregados por el módulo base, a través de la interfase, de la técnica de distribución inalámbrica, con el objetivo de desarrollar una aplicación IoT, permitiendo de esta manera al usuario, el acceso a la información, acerca del comportamiento del sistema y el pronóstico de todas las variables que se están monitoreando. Característica que le da el verdadero potencial a la tecnología.

2.3 DISEÑO DEL PROTOTIPO DE ADQUISICION DE MACRONUTRIENTES NPK.

A continuación, se presentará los elementos de hardware y software de las etapas principales de cada uno de los módulos que hacen parte del prototipo. Las etapas fueron diseñadas, probadas y ajustadas de manera individual antes de hacer parte de un solo prototipo final.

2.3.1 Requerimientos del sistema

Teniendo en cuenta el lugar donde se desarrollará el proyecto y la información a recolectar, se determinaron, las variables de mayor importancia, presentes en el suelo, en un cultivo de café, y posteriormente, se plantearon algunos requerimientos funcionales del sistema electrónico (Tabla 2. Requerimientos del Dispositivo).

2.3.1.1 Variables para determinar la calidad de nutrición en el cultivo de café.

Existen múltiples variables que permiten determinar la calidad de nutrición en un cultivo de café, para lo cual se deben considerar diferentes factores entre los cuales se destacan la relación entre suelo, aire, agua y temperatura y sus propiedades químicas, que al combinarse con las características físicas permite a la planta un mejor desarrollo y capacidad de absorción de los nutrientes [56]; de todas las variables posibles, para el presente trabajo, se ha considerado el sensado de:

- a) **N P K**: son las variables esenciales en la nutrición y el crecimiento de las plantas. El **N (nitrógeno)** es el nutriente que incide directamente en el

crecimiento de las plantas, la capacidad fotosintética y síntesis de clorofila. El **P (fósforo)** es de gran importancia para el desarrollo de las raíces, madurez de los frutos y en la producción de semillas, además, está presente en los procesos de fotosíntesis, respiración y transferencia de energía; es un elemento constituyente en el ADN y ARN (ácido ribonucleico) de las plantas. El **K(Potasio)** contribuye en los procesos fisiológicos y metabólicos como la homeostasis del PH citoplasmáticos, activación enzimática, actividad estomática, translocación de fotoasimilados y el potencial osmótico, además, permite que las plantas puedan tolerar temperaturas extremas, tanto de frío, como de calor, sequias y plagas, hace que se realice un uso eficiente del agua y modifica los azúcares en almidón cuando los granos se están formando [57][24].

b) Humedad relativa: Es un factor climático, que se presenta en ciertas circunstancias, el cual permite establecer la relación, entre el aire que se encuentra cargado con una cantidad de agua y la cantidad de vapor de agua; tiene afinidad con la transpiración, que es la capacidad que tiene el suelo para posibilitar el paso de aire o agua en su estructura y es indispensable para llevar a cabo el intercambio gaseoso y la fotosíntesis; la humedad relativa tiene su expresión en unidades de medida de porcentaje, el ambiente en el que se desarrolla la planta de café es superior al 75% de humedad relativa, sin embargo, no debe sobrepasar valores que pueden llegar a perjudicar el rendimiento del cultivo [58][59][60].

c) Temperatura del suelo: Se determina por la radiación solar que durante el día absorbe la superficie terrestre y en la noche es esparcida, generando enfriamiento; las plantas emplean esta energía, ya que ayuda a su crecimiento, además, tiene una estrecha relación con el consumo de agua y nutrientes para su desarrollo [59].

2.3.1.2 Requerimientos del sistema electrónico.

Considerando las características necesarias para poder obtener las variables planteadas en el presente proyecto se establecen unos requerimientos iniciales que el

sistema electrónico deberá cumplir, garantizando su funcionamiento, la fiabilidad y autonomía del nodo sensor.

Tabla 2. Requerimientos del Dispositivo

REQUISITOS	DESCRIPCION	JUSTIFICACION
RF1	Capturar variables primarias NPK	Las variables relevantes para realizar el sensado del suelo, son los macronutrientes primarios, Nitrógeno, Fósforo y Potasio (NPK), presentes en éste, para el buen desarrollo de las plantas en el cultivo de café.
RF2	Capturar variables de temperatura del suelo y humedad relativa	Además del sensado de las variables NPK se requiere que el dispositivo, pueda también, medir las variables de temperatura y humedad presentes en el suelo.
RF3	Muestrear variables a tiempos definidos	Versatilidad de poder cambiar el periodo de muestreo para la realización de análisis o caracterización de las variables que se van a medir.
RF4	Contar con alimentación que permita tener un sistema portable	Es necesario contar con un sistema de alimentación que permita ser portable y que garantice el funcionamiento eléctrico y electrónico de todos los componentes que van a conformar el prototipo de captura; debe tener un ciclo de vida útil de larga duración, por tanto, además de la frecuencia con que se toman los datos, se debe implementar una alternativa para la recarga de las baterías.
RF5	Capacidad para operar en ambientes exteriores ante condiciones de intemperie como luz de sol o lluvia.	Es fundamental que el dispositivo, esté en la capacidad de soportar las diferentes circunstancias que el medio ambiente proporciona en ciertas temporadas, como lluvia, calor, y otros factores que interfieran en el buen funcionamiento.

2.3.2 Proceso selección de componentes

Las investigaciones que se han realizado en el sector agrícola y la evolución de la tecnología a nivel agro, posibilita la obtención de datos en tiempo real, a través de varios tipos de sensores, los cuales, son de fácil acceso, tanto en tamaño, como en factor económico[61]. En el mercado, actualmente, se disponen de sensores de suelo para la medición de variables de suelo tales como, PH (Potencial de Hidrógeno, determina la acidez o alcalinidad de los suelos), conductividad eléctrica, temperatura y humedad relativa y macronutrientes, entre otros, que utilizan varios tipos de técnicas de medición para la obtención de datos físico-químicos, requeridos en la agricultura.

2.3.2.1 Sensor NPK

En cuanto a las variables principales NPK, que sensorarán en el presente proyecto, en tiempo real, cabe nombrar, que el análisis químico se lleva a cabo mediante tres métodos, los cuales son: conductividad, óptico y electroquímico; sin embargo, de entre las tres disponibles, la mayoría de sensores emplean las técnicas, óptica y electroquímica[62][61].

El principio de funcionamiento de los sensores ópticos, es la interacción entre la luz incidente y las propiedades de la superficie del suelo, es decir, la luz reflejada tiene una variación que depende de las propiedades físicas y químicas disponibles en el terreno; los resultados obtenidos por estos dispositivos son fiables, la desventaja que tienen, es el tiempo por muestra, la complejidad y el alto costo[62].

El principio de funcionamiento de los sensores electroquímicos, es el ajuste de una capa químicamente selectiva, la cual se denomina elemento de reconocimiento, a un transductor electroquímico. Básicamente, cuando el ion que se requiere, para obtener la información, entra en contacto con el elemento de reconocimiento, se produce una energía química, la cual es convertida por el transductor en una señal eléctrica[61]. El método electroquímico, ha sido ampliamente utilizado para la evaluación de la fertilidad del suelo, logrando así tener éxito en este proceso, que se hace de manera directa; por tanto, es una de las principales aplicaciones de los sensores en agricultura de precisión, lo cual, lo hace ver como una alternativa para el desarrollo e implementación en los

cultivos de la región, contribuyendo así, al mejoramiento del rendimiento y calidad de los productos[63].

Teniendo en cuenta la aplicación de los sensores electroquímicos, para la medición de las variables en tiempo real, se hizo la consulta de sensores comerciales que tuvieran la capacidad de tomar los datos NPK del suelo, además, que fuera asequible en cuanto al costo económico. Al realizar una búsqueda de estos dispositivos, se halló el sensor RS-NPK-N01-TR, el cual se inserta de manera sencilla en el suelo, facilitando así su colocación en áreas del campo donde se desea implementar, además de que su costo no es tan alto (Fig. 2. Sensor de macronutrientes NPK).

Es una sonda que mide las variables de nitrógeno, fosforo y potasio, presentes en el suelo, facilita al agricultor la evaluación que se realiza mediante este dispositivo, para determinar la cantidad necesaria de macronutrientes requeridos en los cultivos; este sensor se inserta en el suelo con la capacidad de una larga duración de tiempo en él, ya que tiene resistencia: electrolítica, a la oxidación, a la sal y a la corrosión alcalino; así mismo cuenta con parámetros (Tabla 3. Características Sensor N P K) que permiten un mejor funcionamiento del instrumento. Se puede utilizar con cualquier microcontrolador a través de un módulo de comunicación Modbus, que es el RS485 [64].



Fig. 2. Sensor de macronutrientes NPK

Fuente: Elaboración propia

Las características del sensor, de referencia RS-NPK-N01-TR se describen en la siguiente tabla.

Tabla 3. Características Sensor N P K

PARÁMETROS	VALORES Y UNIDADES
LONGITUD	Aprox. 11.5 cm/ 4,5 pulgadas
ANCHO	Aprox. 4 cm/1,6 pulgadas
PESO	Aprox. 203 g/7,2 oz
RANGO DE MEDICIÓN	0 – 1999 mg/kg
HUMEDAD DE FUNCIONAMIENTO	5 – 95% (humedad relativa). Sin condensación
PRECISION DE MEDICIÓN	+/- 2% F.s
RESOLUCIÓN	1 mg/kg (mg/l)
ÍNDICE DE BAUDIOS	2400/4800/9600
TIEMPO DE RESPUESTA	(T 90, segundos): menos de 10
PUERTO DE COMUNICACIÓN	RS485
TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	5 a 45° C
FUENTE DE ALIMENTACIÓN	12V – 24V DC
CLASE DE PROTECCIÓN	IP68
PRECIO	133 USD

2.3.2.2 Sensores de humedad relativa y temperatura

Tienen la capacidad de medir la humedad relativa y la temperatura del suelo, generalmente están cubiertos con una carcasa de acero inoxidable u otro material para protegerlo de las condiciones físicas y ambientales que puedan ocasionar daños en el dispositivo. Son instrumentos ideales para implementarlos en la agricultura (Tabla 4. Sensores De humedad relativa y temperatura del suelo). En la actualidad existen varios métodos que son de utilidad para determinar la humedad relativa del suelo, de entre los cuales, el más utilizado es, el capacitivo, debido a, su fácil aplicación, entrega de valores eléctricos y el monitoreo que se realiza constantemente en diferentes profundidades [65]. El principio de funcionamiento de los sensores que emplean este

método, es el cambio en el dieléctrico del condensador, el cual es un material higroscópico (absorbe o emite humedad) que responde a la humedad, después de conocer el contenido de agua en la atmosfera[66].

Hay varios sensores de humedad relativa y temperatura existentes en el mercado, que a continuación se hará la caracterización general de tres de ellos, mediante un cuadro comparativo (Tabla 4. Sensores De humedad relativa y temperatura del suelo) para determinar cuál, es más adecuado en la medición de las variables; es de tener en cuenta su capacidad de precisión, tiempo de respuesta, el coste económico y la robustez del dispositivo ante la intemperie.

Tabla 4. Sensores De humedad relativa y temperatura del suelo

SENSORES	AM2305	RK520-01	SHT10
			
RESOLUCIÓN	0.1% RH 0.1 °C	0.1% RH 0.1 °C	0,05% RH 0.01% RH
RANGO	(0 - 99.9) % RH (-40 a 125) °C	(0-100) %RH (-30 a 70) °C	(0%-100%) RH (-40 a 123.8) °C
PRECISIÓN	+/- 2% RH +/- 0.1 °C	+/- 3% +/- 0.2 °C	+/- 4.5% +/- 0.5 °C
TIEMPO RESPUESTA	< 5s	<1s	8s 5 a 30 s
PRECIO	16.53 USD	58.00 USD	19.58 USD

Sensor AM2305

Es un módulo digital de humedad y temperatura con una salida de señal digital. El dispositivo, en su interior contiene un sensor capacitivo para adquirir la información de la humedad relativa del suelo y un elemento de medición de temperatura del suelo de alta precisión. El sensor tiene una respuesta rápida, capacidad anti-interferencia, es pequeño, de bajo consumo energético y la distancia de transmisión de la señal es de 20

metros o más, entre otras características (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.[67]).



Fig. 3. Sensor de temperatura y humedad relativa del suelo AM2305

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen las especificaciones técnicas del sensor de humedad relativa y temperatura AM2305 (Tabla 5. Características el sensor de temperatura y humedad relativa AM2305).

Tabla 5. Características el sensor de temperatura y humedad relativa AM2305

PARÁMETROS	CONDICIONES	MIN	TIPO	MAX	UNIDADES
VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN		3.3	5	5.5	V
CONSUMO DE ENERGÍA	Sleep	10	15		uA
	Measurement		500		uA
	Average		300		uA
LOW LEVEL OUTPUT VOLTAGE		0		300	mV
HIGH-LEVEL OUTPUT VOLTAGE	Rp<25 KΩ	90%		100%	VDD

LOW INPUT VOLTAGE	Decline	0%	30%	VDD
HIGH-LEVEL INPUT VOLTAGE	Rise	70%	100%	VDD
RPU	VDD = 5V VIN = VSS	30	45	60
SAMPLING PERIOD		2		S
OUTPUT CURRENT	Open		8	mA
	Tri State (Off)	10	20	uA

2.3.2.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para el despliegue de la red, exige la necesidad de que el dispositivo esté conectado a una fuente de alimentación, la cual, debe contar con la capacidad de suplir la energía suficiente para su buen funcionamiento en tiempos extendidos, requiriendo de esta manera que el nodo sea autoalimentado[68]. Es un sistema eficiente de recolección de energía solar, la extrae y la convierte en energía eléctrica, a través de las células fotovoltaicas; su importancia radica en que es una fuente de energía renovable, la cual, es obtenida mediante la utilización de los recursos naturales, reduciendo de esta manera el impacto ambiental generado por combustibles fósiles[69][70]. A continuación, se nombran y describen los componentes del sistema para utilizar la energía solar, como energía eléctrica.

- **Panel Solar**

Elemento fundamental de la instalación; convierte la energía del sol en energía eléctrica (corriente continua), está compuesto por células de material fotovoltaico, las cuales se pueden conectar en configuraciones tipo serie (aumento de voltaje) y paralelo (aumento de capacidad de corriente). Hay tipos de paneles fabricados con materiales diferentes, como son: el silicio policristalino, monocristalino y amorfo; para el proyecto se utilizó un panel solar portátil hecho a base de silicio policristalino[69].



Fig. 4. Panel solar

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta las especificaciones técnicas del panel solar, utilizado para la consecución del proyecto en el parque tecnológico tecnicafé (Tabla 6. Características técnicas del panel solar).

Tabla 6. Características técnicas del panel solar

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
POTENCIA MÁXIMA	12 w
PRODUCCIÓN DE TOLERANCIA	0~+3 %
CORRIENTE MÁXIMA DE POTENCIA (IMP)	0.68 A
VOLTAJE MÁXIMO DE POTENCIA (VMP)	17.89 V
CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO (ISC)	0.75A
VOLTAJE EN CIRCUITO ABIERTO (VOC)	21.48 V
PESO	3.5 Kg
DIMENSIONES	39*29*2.3 (cm)
MÁXIMO VOLTAJE DEL SISTEMA	1000 (VDC)
MARCA	Jarret

- **Controlador de carga**

Un regulador de carga, es un equipo electrónico que controla el estado de carga de las baterías, con el fin de que su carga sea óptimo, garantizando larga duración; se implementa entre el panel solar y la batería, controlando el flujo de energía entre ambos y protegiendo la batería de posibles sobrecargas y descargas[71]. Ver (Fig. 5).



Fig. 5. Controlador de carga
Fuente: Elaboración propia

Se indican las características técnicas más relevantes del controlador de carga (Tabla 7).

Tabla 7. Características técnicas del controlador de carga

PARÁMETROS	CARACTERISTICAS
MODO DE CARGA	Modo PWM
CORRIENTE	3 A
VOLTAJE DE TRABAJO	6 V / 12 V
CLASE DE PROTECCIÓN	IP 40 (Impermeable)

- **Batería**

Es un dispositivo de almacenamiento de energía recargable, utilizado para alimentar el nodo sensor, principalmente durante los periodos donde hay carencia de luz o la luminosidad es insuficiente. Para este proyecto se utiliza una batería seca marca energy (Fig. 6).



Fig. 6. Batería Recargable de 12V/7Ah

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se especifican las características técnicas más relevantes de la batería utilizada (Tabla 8).

Tabla 8. Características técnicas de Batería Seca

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
VOLTAJE NOMINAL	12 v
CAPACIDAD	7 Ah
DIMENSIONES	9.2*15.1*9.8 (cm)

2.3.2.4 Selección tecnología IoT

Teniendo en cuenta los requerimientos del sistema, la cantidad de datos que se recolectaran a través del dispositivo y la cobertura, se optó por la selección de la tecnología Sigfox, ya que se ajusta a las necesidades del proyecto; a diferencia de ZigBee que trabaja a distancias cortas y el consumo de energía es mayor, las características de red de área amplia de bajo consumo y largo alcance de cobertura, facilita la implementación de Sigfox en el campo de trabajo; así mismo En comparación con LoRaWan que necesitan de un Gateway para gestionar su red, Sigfox incluye varios proveedores de hardware con una única infraestructura de red; y con respecto a NB-IoT, que trabaja en bandas de frecuencia licenciadas, Sigfox tiene la ventaja de no pagar el uso del espectro, es una tecnología que en Colombia ha ido aumentando su despliegue, lo cual lo postula como una de las mejores opciones para aplicaciones de

monitoreo en la industria agrícola, que se centra en los datos de manera precisa e inteligente. En la siguiente figura se puede observar la cobertura mundial de la red Sigfox.

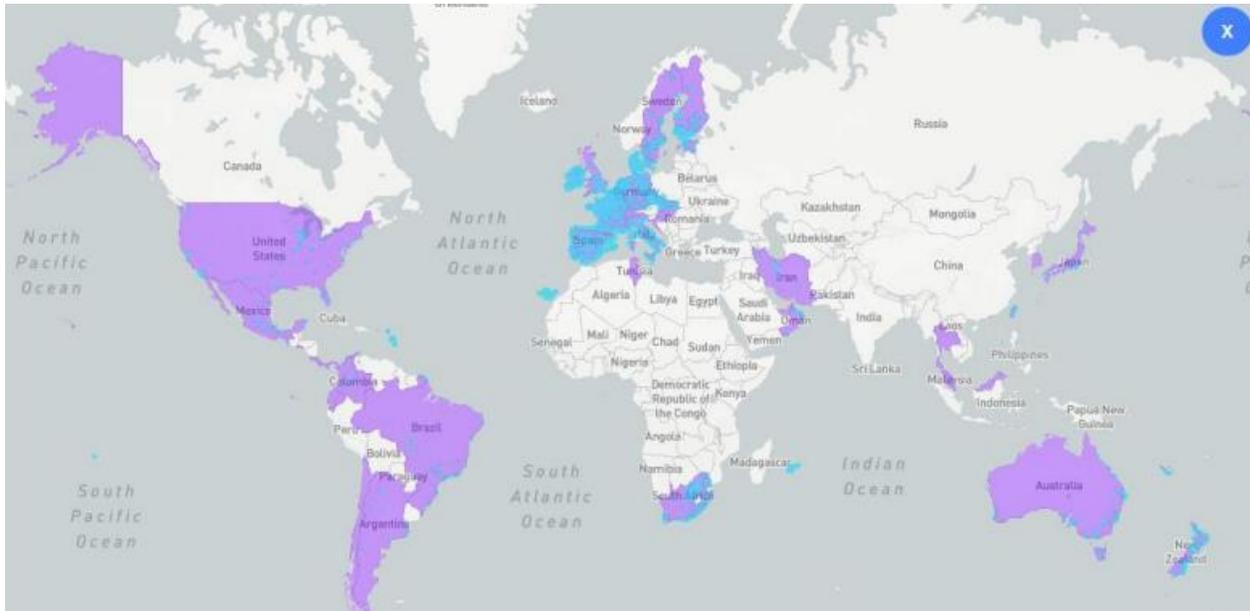


Fig. 7. Cobertura de la red mundial de Sigfox
Fuente: <https://www.sigfox.com/en/coverage>

2.3.2.5 Modulo Sigfox

Para la implementación de Sigfox, en el proyecto, se hace necesaria la integración de un módulo de radio compatible con dicha tecnología; dado al enfoque abierto que tiene Sigfox en cuanto a la incorporación de hardware de diferentes fabricantes, existen varios módulos que son compatibles, en el mercado; un criterio a tener en cuenta para la selección es que la configuración de la red difiere de un país a otro, por leyes o restricciones operativas locales. Para tal caso las operaciones globales se han dividido geográficamente en 7 zonas que van desde RC1 a RC7, cada una se rige bajo ciertos parámetros, por los cuales, el hardware depende de ellos[72]. A continuación, se realiza la descripción de algunos módulos compatibles con Sigfox y la zona RC4 a la cual Colombia pertenece (Tabla 9).

Tabla 9. Especificaciones de algunos módulos compatibles con Sigfox



ESPECIFICACIONES	UPLINX-M-RCZ24	WSSFM10R2AT	WSSFM11R2DAT
RANGO DE FRECUENCIA	ISM 915 MHz (902-928 MHz)	TX 902.2 MHz RX 905.5 MHz	TX 920.8 RX 922.3
POTENCIA MAXIMA DE TRANSMISIÓN	22 dBm	22.5 dBm	22.5 dBm
CONSUMO DE CORRIENTE	130 mA Tx a 23 dBm	TX 200 mA RX 32 mA	TX 170 mA RX 32 mA
SUMINISTRO DE VOLTAJE	3.4V – 5.5 V	2.7 V – 3.6 V	2.7 V – 3.6 V
DIMENSIONES	24mm x 13.5mm	13mm x 20mm x 2.21mm	13mm x 20mm x 2.21mm
CONSUMO EN STANDBY	50 nA	2.5uA	2.3 uA

El módulo que se implementó en el proyecto, es **el módulo WSSF11R2DAT** (Fig. 8), el cual es compatible con dos zonas RC2(Estados Unidos, México, Puerto Rico y Brasil) y RC4(América Latina y Asia Pacífico), ideal para diferentes aplicaciones, dentro de las cuales se encuentran los sensores ambientales, que se adaptan al trabajo que se realiza[73].



Fig. 8. Módulo Sigfox
Fuente: Elaboración propia

2.3.2.6 Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado que contiene todos los componentes necesarios para emplear el funcionamiento de su tarea asignada, sus periféricos de entrada y salida permiten la conexión de diversos dispositivos sensores y actuadores independientemente de las variables que se deseen analizar. Sus pequeñas medidas permiten que este dispositivo además de sus costos muy bajos pueda ser incluido en el mismo sistema hardware al cual va a controlar. Existen diferentes tipos de microcontroladores (Tabla 10) a continuación se describen algunas de las características más relevantes de algunos de estos[74].

Tabla 10. Microcontroladores compatibles con arduino

	ATMEGA328P	ATMEGA2560	ATSAMD21G18
MICROCONTROLADOR			
VELOCIDAD DE RELOJ	16MHZ	16MHZ	48MHZ
VOLTAJE DE TRABAJO	5V	5V	1,62 a 3,63V
VOLTAJE DE ENTRADA	7,5 A 12V	7,5 A 12V	6V
PINOUT	23 Pines digitales 6(PWM) 8 Pines analógicos	54 Pines digitales 15(PWM) 16 Pines	48 Pines 20(PWM) 14 Pines analógico

PUERTOS SERIE	analógicos		
	1	3	6
MEMORIA	32KB FLASH RAM 2KB	256KB FLASH RAM 8KB	256KB FLASH RAM 32KB

ATSAMD21G18

Es un microcontrolador compatible con el lenguaje de programación que se puede utilizar en la plataforma de código abierto de arduino, y que permite ser muy fácil y flexible para los desarrolladores. son mucho más potentes que los microcontroladores de 8 bits y solucionan algunos de los problemas de memoria de código y memoria RAM de otras placas arduino. En este se pueden conectar distintos tipos de periféricos que trasladan la información hasta el microcontrolador[75].

2.4 DISEÑO HARDWARE DE LA ETAPA DE ADQUISICION Y TRANSMISION.

En este apartado se tiene como objetivo mostrar los diferentes componentes electrónicos presentes en el prototipo hardware del sistema, el microcontrolador encargado de gobernar el sistema y los protocolos de comunicación de cada uno de los sensores, así como también el esquemático del nodo de adquisición y comunicación IoT que se integran de manera conjunta para gestionar la red de sensores inalámbrica bajo su ya denominado nombre, modulo base.

2.4.1 Etapa de Adquisición de datos.

Para la adquisición de los datos a intercambiar, se puede realizar a través de señales digitales o analógicas, dependiendo del dispositivo de adquisición que se desee implementar. El prototipo tiene distintos métodos de adquisición para la captura de los datos por medio de los sensores que se utiliza en este proyecto, tanto, con las variables, NPK, como las de, temperatura y humedad relativa del suelo.

Para lograr que cada uno de los sensores enviaran la información de manera adecuada, se diseñó un circuito que permite hacer la captura de estos datos, teniendo en cuenta su respectivo nivel de capa física, ya que los ajusta, de manera que toda esa información recolectada de cada una de las variables a identificar, sea transmitida.

2.4.1.1 Adquisición variables NPK

La información emitida por el sensor de macronutrientes, es de alta precisión y velocidad, adecuados por un microcontrolador interno, que responde al marco de consulta de cada una de las variables, la longitud del dato es de 8 bits, con valores hasta de 255mg/kg; para la transmisión de datos, requiere de un nivel de capa física RS485, lo cual, es óptimo, dado a que la comunicación se realiza a grandes distancias, tal módulo, requiere de una fuente de 3.3 VDC para polarizar, además, permite tener un enlace con múltiples transmisores y receptores. Las características relevantes del dispositivo es su bajo costo, capacidad de interconexión, rapidez y longitud de enlace. Durante las pruebas de funcionamiento de la etapa, se utilizó el transceptor RS485 y un microcontrolador, de tal manera que los datos obtenidos por el sensor de macronutrientes, fueran transmitidos y visualizados en el monitor serie de arduino. En la figura (Fig. 9. Esquema electrónico interface RS485) se presenta el diseño de la interface de comunicación RS485 necesaria para la transmisión de los datos desde el sensor NPK hacia el microcontrolador

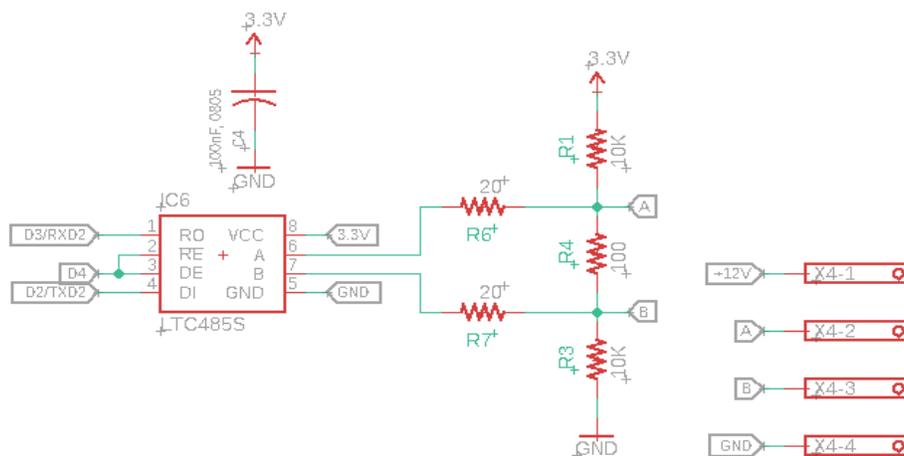


Fig. 9. Esquema electrónico interface RS485

Fuente: Elaboración propia

2.4.1.2 Adquisición variables de temperatura y humedad

ONE-WIRE es un protocolo en serie bidireccional y half-duplex diseñado por dallas semiconductor, basado en un solo bus de comunicación, un maestro y varios esclavos

por una sola línea de datos, por medio de la cual se realiza el intercambio de información, ver (Fig. 10), donde cada dispositivo tiene una identificación única de 64 bits[76]. La sonda AM2305 utiliza este protocolo para transmitir los datos recolectados por el sensor de temperatura y el sensor capacitivo de humedad con el microcontrolador. Se requiere de una resistencia externa pull-up, de esta forma, si el bus de comunicación está inactivo, se mantendrá en alto. En la (Fig. 11) se observa el modelo de protocolo único para la sonda, enviando una longitud de 40 datos de temperatura y humedad[67].

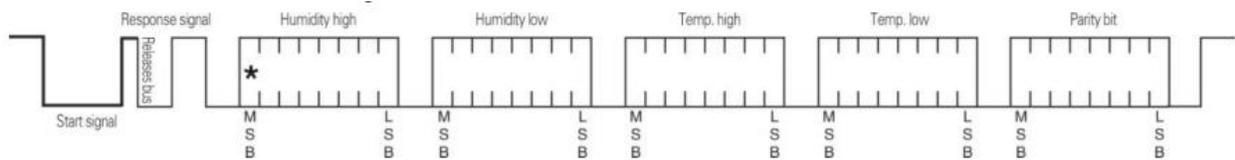


Fig. 10. Protocolo de comunicación bus único

Fuente:<https://kaimte.com/upload/attach/20200514/6fd7abb34c719d215511e916e101af22.pdf>

El protocolo de comunicación ONE-WIRE es la manera en que la sonda de temperatura y humedad relativa transmite los datos de sus variables hasta el microcontrolador (Fig. 10).

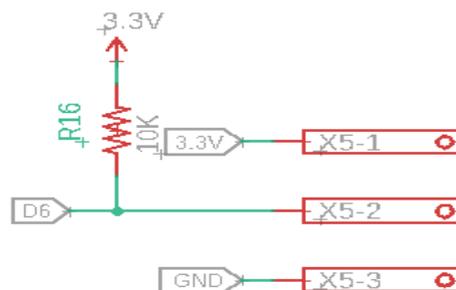


Fig. 11. Esquema electrónico comunicación sonda AM2305

Fuente: Elaboración propia

2.4.2 Etapa de Transmisión IOT.

En la etapa de transmisión, una vez el microprocesador tenga toda la información de cada una de las variables anteriormente mencionadas, las procesa y ajusta de forma que puedan ser transmitidas por medio de un módulo de comunicación inalámbrica IoT, en este caso, el módulo **WSSFM11R2DAT** compatible con Sigfox. La tecnología LPWAN cuenta con un servidor en la nube que permite gestionar los datos que serán interpretados por el usuario final.

La etapa que cuenta con el módulo de comunicación inalámbrica Sigfox seleccionado y utilizado para hacer la transmisión de las variables con el servidor en la nube se puede observar en la (Fig. 12).

Los módulos de esta tecnología permiten transmitir a largas distancias. El módulo utilizado en este proyecto es compacto, con medidas de 37,6 x 15,0 x 3,8 mm, además permite utilizar las tecnologías de consumo ultra bajo del microcontrolador, la corriente que utiliza para la transmisión es de 250 mA cuando está operando y su alimentación es de 3.3v. La flexibilidad de esta tecnología permite crear comunicaciones para solucionar los diversos desafíos que se encuentran en la supervisión agrícola.

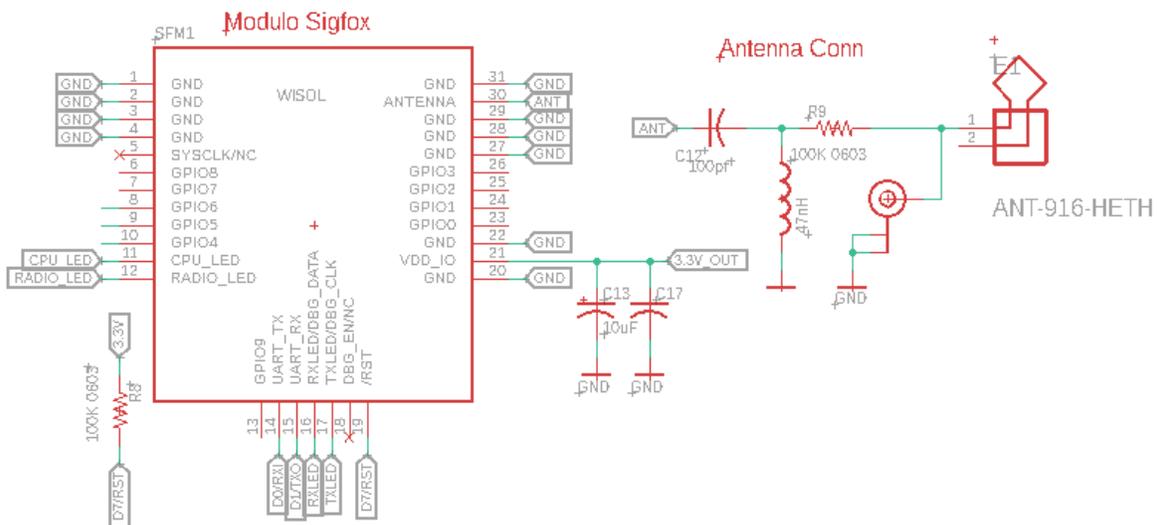


Fig. 12. . Esquema electrónico de la etapa de transmisión

Fuente: Elaboración propia

2.5 PLATAFORMA DE MONITOREO IOT

En esta sección se desarrolla la configuración de las plataformas tecnológicas presentes en el sistema, que en coordinación con las etapas anteriores permiten el funcionamiento de la red de sensores inalámbrica. Una de las plataformas recibe los datos que provienen desde el módulo base, adecuándose de tal modo que se puedan exportar hacia un servidor de IoT, el cual, podrá ilustrarlos en un aplicativo de acceso al usuario, facilitando así el análisis nutricional de su cultivo.

2.5.1 Recepción de datos en backend de Sigfox

Para la etapa de recepción, se utiliza la plataforma de tecnología de comunicación Sigfox que tiene un límite de 140 mensajes por día, por lo cual, los datos se pueden enviar cada 10 minutos, sin embargo, al tener en cuenta que la variación en tiempo de macronutrientes en el suelo, es baja, la información se podrá enviar a intervalos de 60 minutos.

Dentro de la interfase de esta tecnología, se configura el módulo de transmisión con su respectivo id, ya que para la distribución geográfica de Sigfox a nivel global, esta identificación es diferente; cuando la comunicación es correcta, los datos enviados llegaran de forma hexadecimal, lo que no permitirá tener un contexto adecuado de los resultados, por tanto, se necesitara de otro servidor de aplicaciones con el fin de poder visualizar los datos, de tal manera que puedan ser interpretados por el usuario.

El proceso a realizar es el siguiente, se ingresa el id que trae por defecto el módulo para poder enrutar y autenticar el dispositivo Sigfox con el servidor, dentro de éste, se puede configurar ciertos parámetros que permiten gestionar la integración de otras tecnologías. En la trama del mensaje la información de las variables debe tener un tamaño máximo de 12 bits hexadecimales. Realmente estos datos que llegan, son de poco valor interpretativo para el usuario, de tal manera que se deben de configurar los callbaks para poder integrar otras tecnologías que permitan analizar la información.

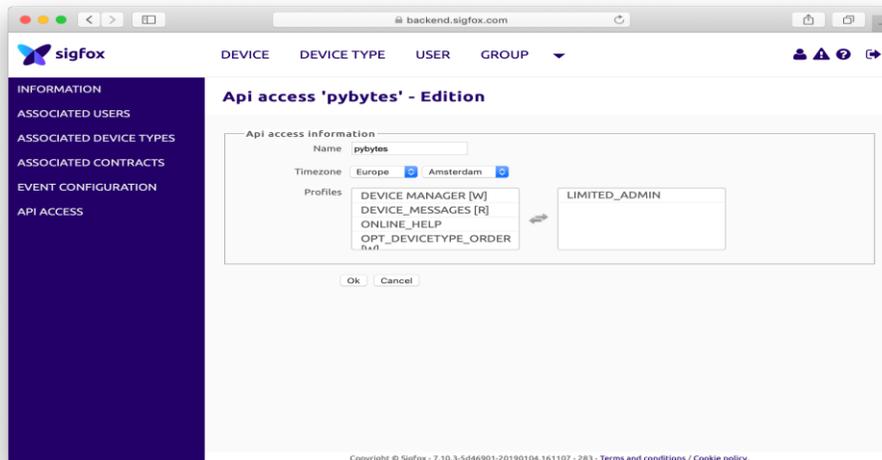


Fig. 13. Configuración id y pac en backend de sigfox
Fuente: <https://www.sigfox.com>

Observar mensajes recibidos en backend de sigfox

Una vez se ha realizado el envío de algún mensaje mediante el módulo, se procederá a visualizarlo en el Backend y así comprobar si realmente se ha reenviado la información al servidor propietario. En el apartado “Messages” de esta página, se visualizan todos los mensajes transmitidos por el dispositivo a Sigfox.

Time	Data / Decoding	Location	Link quality	Callbacks
2018-03-04 18:28:59	31392e373038382e393030			
2018-03-04 18:28:22	31392e373038382e373030			
2018-03-04 18:27:39	31392e383039302e333030			
2018-03-04 18:26:59	31392e383039302e353030			
2018-03-04 18:26:19	31392e373039302e343030			
2018-03-04 18:25:39	31392e373039302e333030			
2018-03-04 18:24:58	31392e373039302e323030			
2018-03-04 18:24:22	31392e373039302e313030			
2018-03-04 18:23:39	31392e373039302e323030			
2018-03-04 18:22:59	31392e373039302e333030			
2018-03-04 18:22:19	31392e373039302e343030			
2018-03-04 18:21:38	31392e373038392e373030			
2018-03-04 18:20:59	31392e373039302e363030			
2018-03-04 18:20:19	31392e383038392e363030			

Fig. 14. Mensajes enviados por el sistema hardware
Fuente: <https://www.sigfox.com>

2.5.2 Procesamiento en servidor de aplicación IoT

La tarea a realizar por parte del sistema de red inalámbrica, en esta etapa de procesamiento, es permitir la exportación de todos los datos de las variables registradas a plataformas de manejo de la información, es decir una interfaz que permita al agricultor, visualizar los datos obtenidos y transmitidos a través de la tecnología LPWAN. En la etapa de procesamiento se utilizó un servidor de aplicaciones de monitoreo disponible para la integración con la plataforma de Sigfox.

Una vez que se tiene la información en la plataforma de Sigfox, se podrán configurar eventos como los callbaks que permitirán decodificar los datos que llegan a la nube y enviarlos al servidor de aplicaciones para este proyecto ubidots, de tal manera poder observar los datos que se han transmitido.

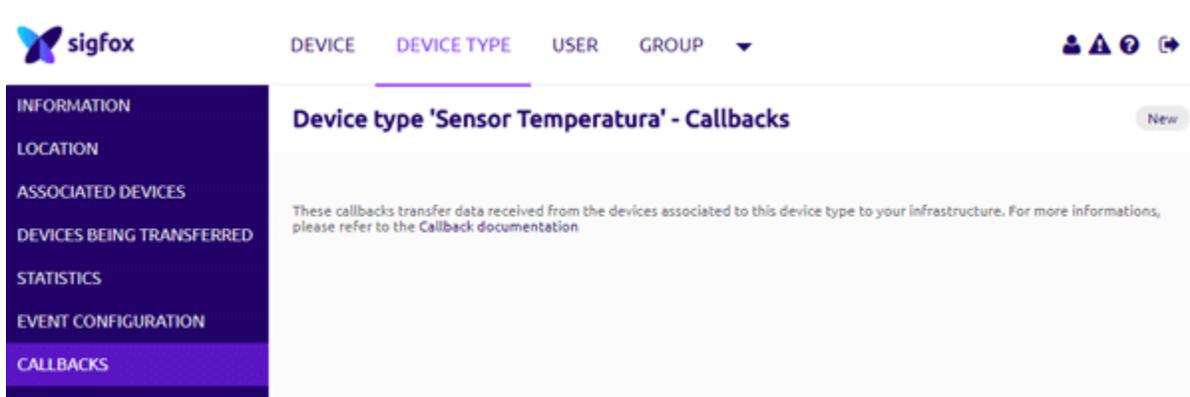


Fig. 15. Configuración de los callbaks

Fuente: <https://www.sigfox.com>

La plataforma del IoT ubidots ayuda a enviar de forma simple y segura los datos adquiridos por los nodos a la nube, desde cualquier dispositivo que se encuentre conectado a la red de internet, está enfocada en los proyectos que se ven relacionados con el monitoreo, control y automatización de los procesos, permitiendo configurar distintas acciones que sean basadas en el análisis de todos los datos. La tecnología de manejo de información permite organizar de manera autónoma la presentación de los datos, teniendo en cuenta las características del mismo. Es importante para poder interpretar los datos recibidos, siendo de gran utilidad para el agricultor a la hora de gestionar la toma de decisiones en cuanto al rendimiento del cultivo se refiere. El

usuario podrá ingresar a monitorear su terreno desde cualquier dispositivo u ordenador que tenga acceso a la red.

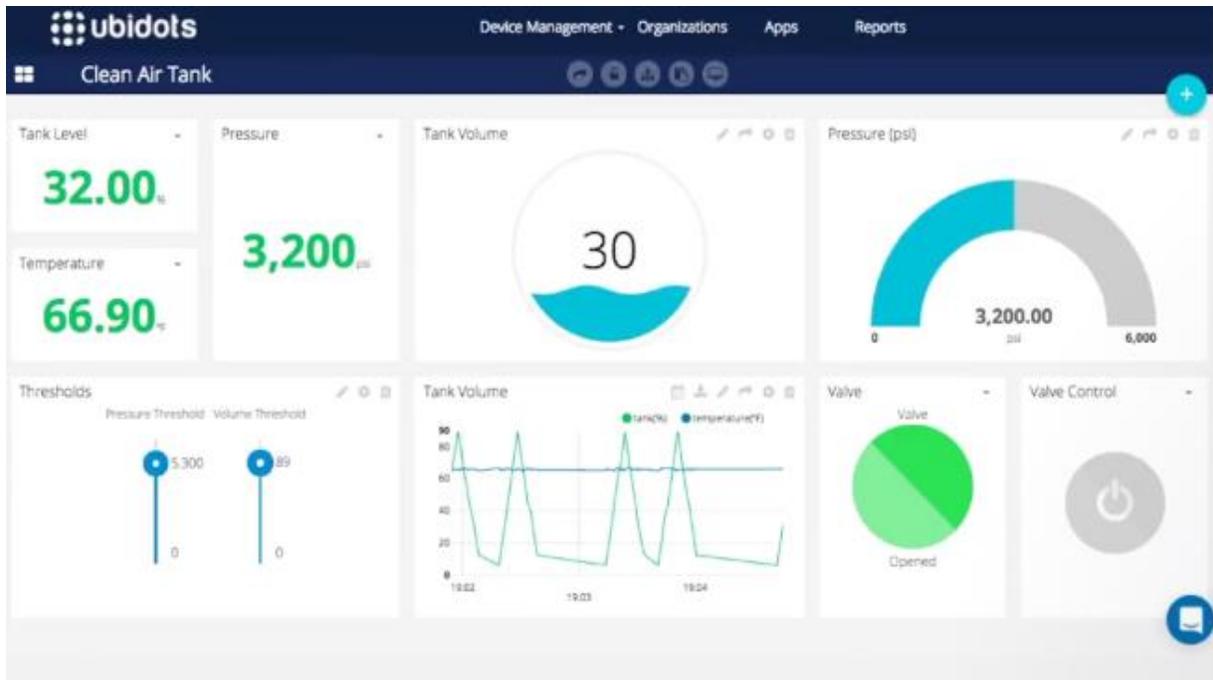


Fig. 16. Plataforma del IoT para monitoreo de variables

Fuente: www.ubidots.com

2.6 DISEÑO DE PROTOTIPO ELECTRÓNICO PARA ADQUISICIÓN DE DATOS

En esta sección se muestra el resultado del diseño del prototipo que se obtuvo luego de haber probado y realizado ajustes de manera individual a las etapas del sistema electrónico. Se logró un esquema electrónico que está conformado por la unión de una etapa de alimentación, una etapa de control, basada en un microcontrolador ATMEL de la familia ATSAMD21, para la parte de comunicación IoT se seleccionó un módulo de comunicación wisol con cobertura en dos zonas, la RC2 y la RC4 a la cual pertenece Latinoamérica. De igual algunos elementos extras que se unieron al microcontrolador, módulo Sigfox y las fuentes reguladas con el voltaje adecuado para el funcionamiento óptimo de cada uno de los dispositivos presentes en el hardware. Toda esta información se presenta en el diagrama esquemático de la (Fig. 17).

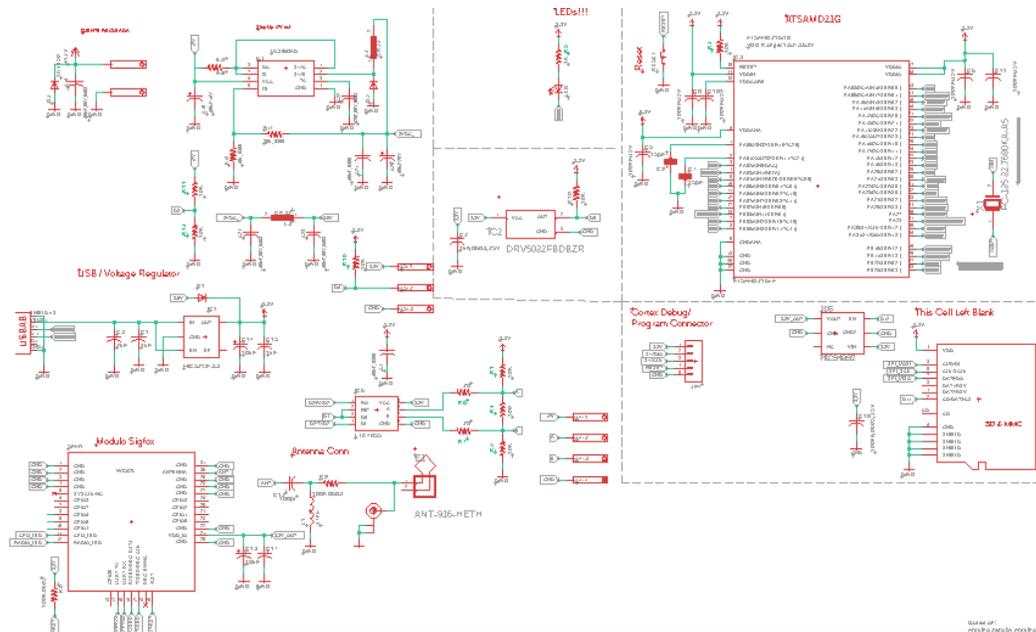


Fig. 17. Esquemático completo del prototipo electrónico

Fuente: Elaboración propia

La implementación del sistema se presenta en la (Fig. 18), en ella se señalan las distintas etapas que contiene el sistema; “A” corresponde a la etapa de alimentación, “B” a la etapa de control, “C” a la etapa de acondicionamiento de sensores, “D” etapa de almacenamiento y “E” a la etapa de transmisión.

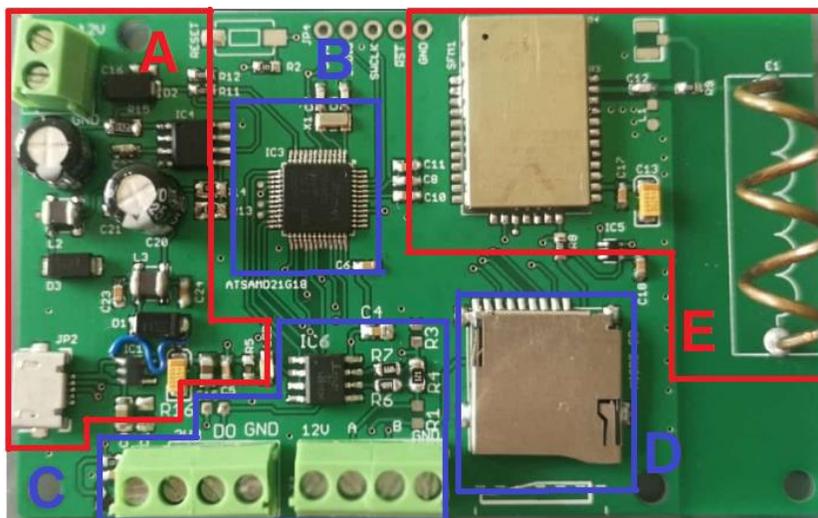


Fig. 18. Integración de etapas del prototipo electrónico

Fuente: Elaboración propia

3. VERIFICACION DEL SISTEMA Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.

Para poder validar el sistema se diseñaron dos pruebas que se describen a continuación, la primera, se realizó en un ambiente controlado donde se utilizó una maceta con tierra para verificar el funcionamiento de los sensores para cada una de las variables, la segunda, es en campo, aplicada a dos lotes de tecnifé con un cultivo de café ya establecido, que permita comparar los resultados del sistema, con los obtenidos por un análisis tradicional, con el fin de validar el funcionamiento de medición de las variables del suelo. El prototipo contiene un Datalogger donde se almacenan los datos de las variables en una memoria flash de tipo micro SD.

3.1 VERIFICACION DE FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR NPK.

Con el objetivo de validar el funcionamiento general del sistema, se realizaron dos pruebas de funcionamiento, un antes y después del proceso de fertilización característico del suelo. El escenario y los procedimientos, para cada uno de los casos, se describen a continuación; se utilizó un recipiente plástico de 29 cm de largo x 22.5 cm de ancho x 12.5 cm de alto, con una disposición total de 10 kg de tierra extraída de una plantación de café; la colocación de los sensores dentro del recipiente fue centrada, luego de acondicionarlos, se procede a energizar el circuito de prueba, con una fuente de 12vdc, para realizar las mediciones y comparaciones, que permitan validar los datos recibidos durante la prueba uno del sistema. En la (Fig. 19) se observa la ubicación de los sensores en el entorno de prueba.



Fig. 19. Disposición de los sensores para la prueba uno

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Prueba de funcionamiento del sensor NPK, previo a la aplicación de fertilizantes.

En la prueba uno de funcionamiento, el circuito se configura para hacer la lectura de los macronutrientes durante tres días, con un periodo de tiempo de una hora, teniendo en cuenta la poca variabilidad de los macronutrientes en el suelo; se utilizó la misma cantidad de tierra sin realizar proceso de fertilización. La (Fig. 20) muestra, en color azul, la lectura adquirida, correspondiente a la variable de nitrógeno, en naranja la variable de fosforo y en color gris la variable de potasio, sus valores tienen una leve desviación, esto mientras el sensor se estabiliza, después de este periodo las variables se comportan de manera constante, debido a la baja tasa de variación que poseen los nutrientes NPK. Se compararon los datos de cada una de las lecturas y se encontró que la etapa de adquisición realiza su función de manera deseada, permitiendo validar el correcto funcionamiento de la adquisición de los datos.

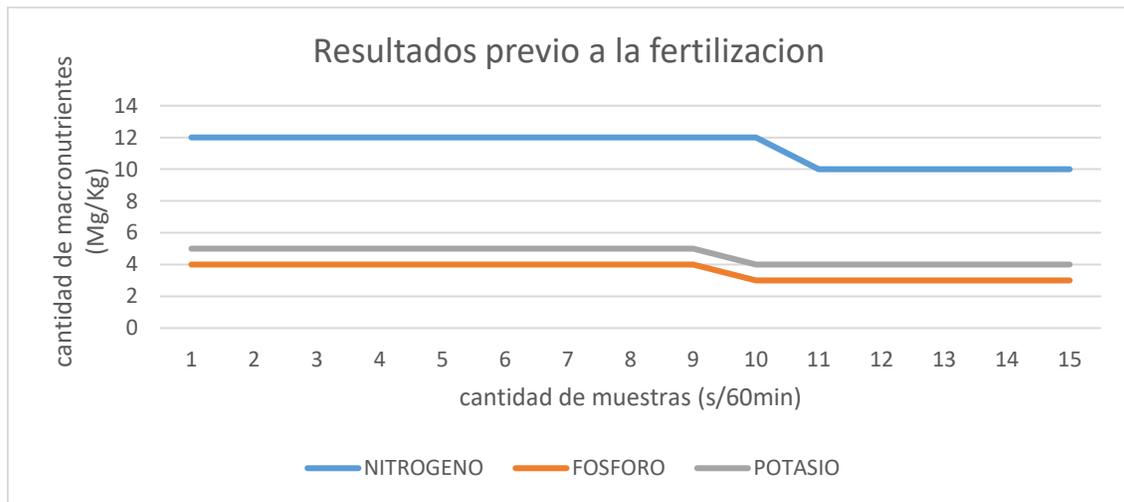


Fig. 20. . Datos obtenidos por el sensor NPK, previo a la fertilización

Fuente: Elaboración propia

En la (Fig. 21) se ilustran los datos correspondientes a la toma de temperatura y humedad que se presentaban en el entorno controlado durante el periodo de pruebas, observándose la humedad constante durante el proceso de adquisición de datos y unos cambios de temperatura no muy relevantes, debido al tiempo de respuesta del dispositivo.

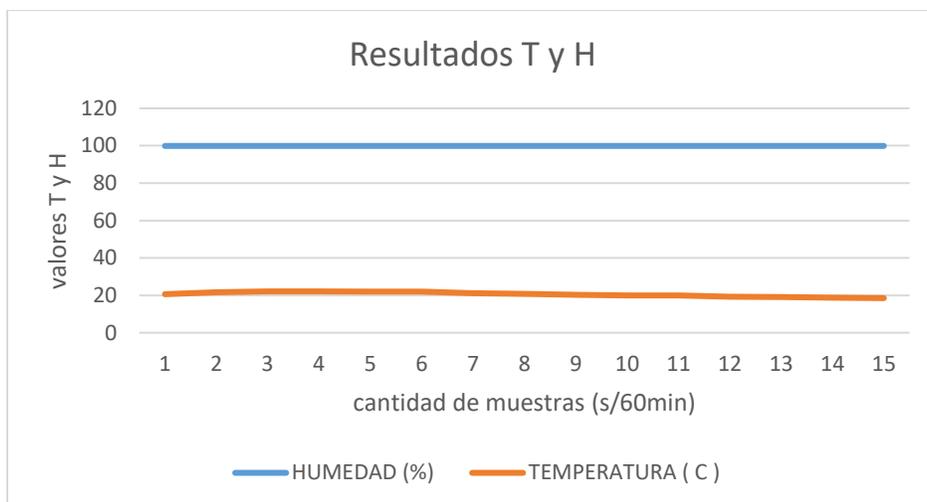


Fig. 21. Resultados temperatura y humedad, previo a fertilización

Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Prueba de funcionamiento del sensor NPK, post aplicación de fertilizantes.

Para validar el funcionamiento del prototipo en este segundo caso, se realizó la misma configuración, a diferencia de la anterior prueba, se le agregaron 40 gramos de fertilizante granulado 10-30-10 (N=10, P=30, K=10), usualmente utilizado en los cultivos de café, este valor, es el promedio de la cantidad sugerida para una planta, la cual es de 100 gramos, y que equivale aproximadamente la cantidad necesaria para esta prueba a modo de experimento. Luego de comprobar el funcionamiento de la etapa de adquisición, se procede a observar la manera en que estas lecturas varían después de aplicar el fertilizante.



Fig. 22. Prueba funcionamiento sensor NPK, post fertilización

Fuente: Elaboración propia

En la (Fig. 23), se muestra, en color azul la variable del nitrógeno, en naranja la variable de fosforo y en gris la variable de potasio, que luego de un periodo de tiempo determinado y después de una fertilización, se observa, cómo es aprovechado el abono por el suelo, se evidencia que los niveles de cada una de las variables tuvieron un aumento considerable en comparación con el caso anterior. De esta manera se permite evidenciar el funcionamiento adecuado del sensor para calcular la disposición de minerales antes y después de una fertilización.

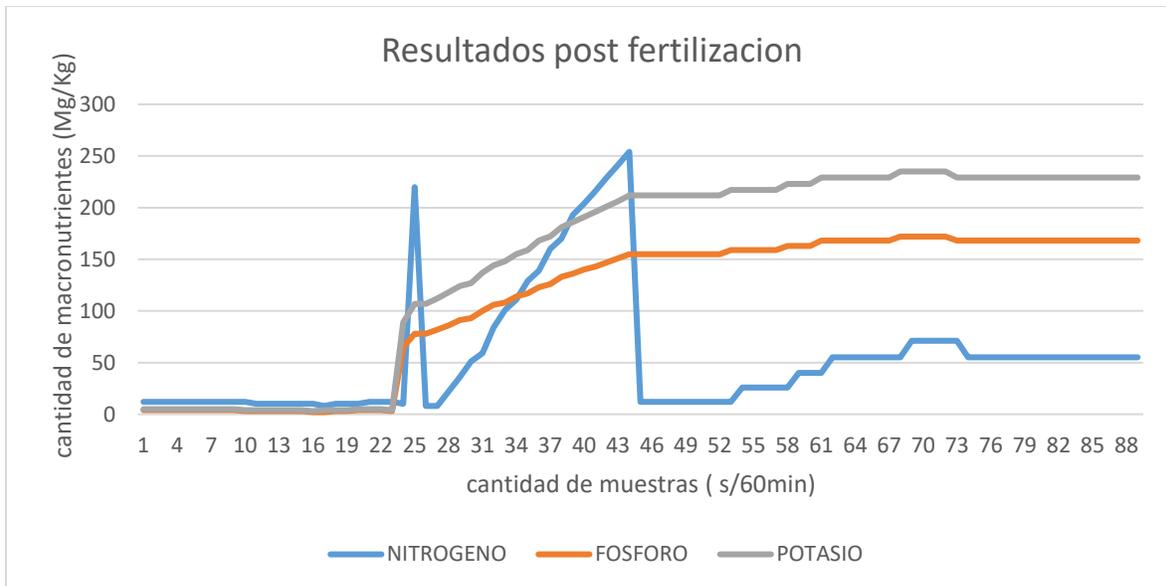


Fig. 23. . Datos obtenidos por el sensor NPK, post fertilización
Fuente: Elaboración propia

En la (Fig. 24) se ilustran los resultados de temperatura y humedad, donde se observan variaciones leves en la temperatura entre la noche y el día, estos producidos por la rotación de la tierra, la humedad se encuentra estable durante todo el proceso de prueba.

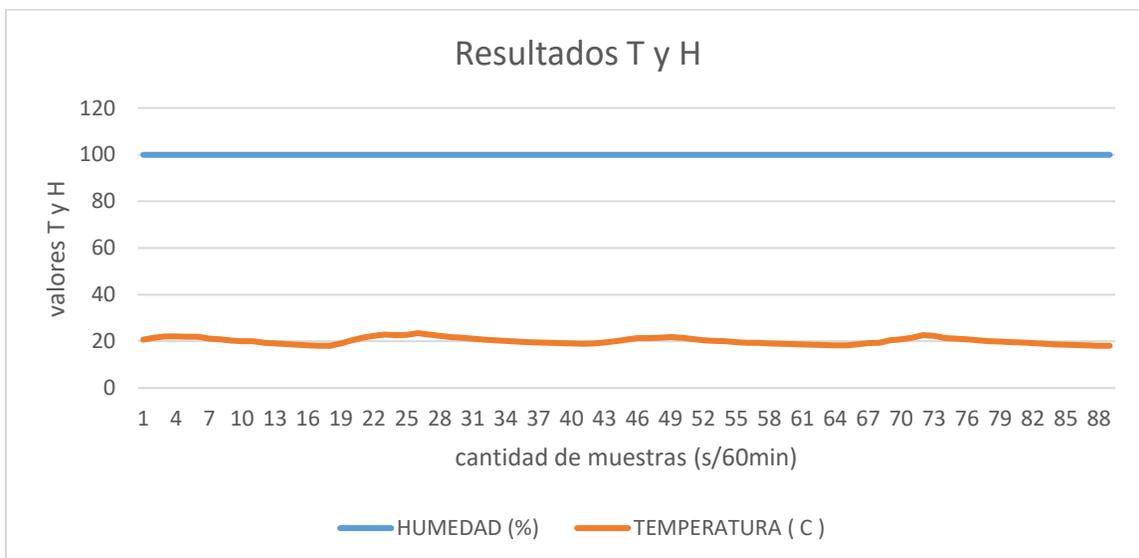


Fig. 24. Resultados temperatura y humedad, post fertilización
Fuente: Elaboración propia

3.2 DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

Con el objetivo de comprender el funcionamiento del prototipo en diferentes circunstancias, se realizaron varias pruebas para su posterior análisis. En este apartado se describe la manera y los distintos escenarios en los que se llevaron a cabo dichas pruebas, con el fin de mirar el comportamiento del prototipo en el suelo con un cultivo de café. A diferencia de las pruebas de verificación, las de funcionamiento del prototipo se realizaron en un terreno de propiedad de Supracafé, ubicado en el departamento del Cauca, en el municipio de Cajibío, con un cultivo establecido en su totalidad de diferentes variedades de café.

En la (Fig. 25), se observa la implementación del dispositivo en campo, con cada uno de sus componentes de funcionamiento (sensor de macronutrientes, sonda de temperatura y humedad, panel solar, mástil de soporte para panel, sistema de alimentación y prototipo de adquisición.)



Fig. 25. Implementación del sistema en campo

Fuente: Elaboración propia

Las variables relacionadas para las pruebas de funcionamiento son:

- Tipo de muestra
- Técnica de muestreo
- Número de muestras
- Profundidad de muestreo
- Mapa de muestreo

3.2.1 Planificación para el muestreo de suelo

Este es un proceso que se realiza con un periodo de anticipación previo, que permite organizar la información antes de proceder al campo de prueba, se especifican las actividades a realizar y se preparan los criterios fundamentales para la toma de cada una de las muestras, además de plantear los objetivos y reconocer los implementos o equipos que se deben utilizar durante todo el proceso[77], se integra el dispositivo de monitoreo de macronutrientes ya antes descrito para la toma de datos en campo.

3.2.1.1 Tipo de muestras en campo

El muestreo de suelos se realiza mediante una recolección de varias muestras que se definen como un dato representativo y que presenta las mismas propiedades fisicoquímicas del terreno. Existen dos tipos de muestras para un cultivo, **las muestras simples**, que se realizan de una sola extracción de tierra en un punto determinado cuando el terreno tiene un contenido homogéneo en su capacidad nutricional y **las muestras compuestas**, que se obtiene de la agrupación o mezcla de varias muestras simples del terreno cuando su estado nutricional no es homogéneo, la extracción que se realiza en los diferentes puntos debe tener la misma profundidad; es uno de los métodos más utilizados para el análisis nutricional [77].

Con el objetivo de estudiar el comportamiento del prototipo desarrollado, se propuso realizar dos pruebas de funcionamiento, el cual, determina la tasa de error en la medición del sensor NPK, para el primer caso, en cada uno de los puntos ubicados en el lote, se inserta el dispositivo, después de haber extraído la muestra simple, en forma tradicional; para el segundo caso, primero se realiza la toma de datos con el dispositivo

y luego se procede a retirar la muestra simple en el mismo punto donde se insertó el sensor.

3.2.1.2 Selección técnica de muestreo

La selección de una técnica de muestreo depende mucho de las condiciones del sitio al cual se le realizará el estudio, la accesibilidad al sitio, así como también, la calidad y cantidad de las muestras que se tomarán, ya que está en función del tipo de cultivo o uso que se tenga, para disposición de la tierra; el tipo de enmienda es muy importante ya que determina, si el estudio es para fertilizar, encalar o levante, de tal manera que se pueda seleccionar la técnica más adecuada[77].

3.2.1.3 Numero de muestras

El número de muestras depende mucho de la variabilidad del sitio y del tamaño del área al cual se realiza el estudio, para este proyecto se decide tomar 2 muestras por cada conjunto de lotes preseleccionados; en cuanto a la muestra 1, se recogerá un total de 15 muestras simples y con respecto a la muestra 2 se tomarán un total de 24 muestras simples, cada una de ellas pertenecientes a lotes y profundidades diferentes.

3.2.1.4 Profundidad de las muestras

En cuanto a la profundidad de muestreo, se determina por el tipo de cultivo que se encuentre establecido o desee sembrar; para este proyecto, el cultivo específico sembrado, es el café, en el cual se ha especificado una profundidad de 0 a 20 cm, y una distancia de un radio de 50 cm desde el árbol hasta el punto de extracción de la muestra simple [77].

En cuanto a la adquisición de datos y con respecto a la profundidad de las muestras simples, se realizó una prueba en ambos casos: en el caso 1, se insertó el dispositivo a una profundidad de 20 cm y en el caso 2, a 6cm. Las pruebas se realizaron de la misma forma para cada una de las muestras simples de cada caso y, con ambos sensores.

3.2.1.5 Mapa del sitio de muestreo

Es importante realizar un croquis del terreno productivo para identificar por lotes o parcelas, los lugares donde se desea realizar el estudio, de igual manera, permite llevar

a cabo un control evaluativo del comportamiento del terreno en el tiempo. El mapa presentado a continuación delimita los lotes que se encuentran ubicados en la finca “los Naranjos” perteneciente a Supracafé.

En la (Fig. 26), se observa la disposición de plantaciones de café, divididas por lotes y variedades diferentes, en color amarillo podemos observar las plantaciones de variedades tradicionales, en color azul tienen las variedades de alta calidad y en rojo tienen las plantaciones orgánicas.

Para el caso de estudio número 1 del prototipo se escogió el lote 14 que se encuentra justo en frente del parque tecnológico de tecnicafé, donde se tomaron datos de 15 muestras simples a una profundidad de 20 cm en un terreno de características semiplanos. Para el caso de estudio número 2 se escogieron los lotes orgánicos 5, 6, 7 donde se tomaron 24 muestras simples a una profundidad de 6cm, por sugerencia del asesor experto de tecnicafé en ambos casos a un radio de 50 cm de el árbol.



Fig. 26. . Mapa de la finca naranjos que representa diferentes lotes de plantación de café.

Fuente: Supracafé.

3.2.2 Manejo y toma de muestras en campo

Existen diferentes tipos de recorridos para estudio de fertilización de suelos, entre estos tenemos, recorrido en forma de cuadrícula, X y zig-zag.

3.2.2.1 Recorrido en zig-zag

Se decide optar por el recorrido en zig-zag - dado a que es el método con mayor eficiencia y seguridad[78] y, además, es una técnica utilizada en los lotes de Supracafé para el análisis de suelos - durante el cual, se hace el siguiente proceso, primero, se hace la toma de la muestra simple, que es recolectada en un recipiente limpio, luego, se inserta el dispositivo en el punto donde se extrajo la sub-muestra; es de anotar que entre cada punto de muestreo se hace una separación de 5 a 6 surcos de distancia, realizando este recorrido para cada lote; al reunir el número de muestras simples determinados por cada lote en el recipiente, se procede a realizar una mezcla homogénea que será considerada como la muestra del terreno en estudio y, con el prototipo de medición, se realiza una prueba a esa misma muestra, con el fin de hacer un análisis de los resultados que se obtengan.



Fig. 27. Recorrido en zig-zag

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.2 muestreo utilizando pala

Es uno de los métodos más utilizados y sencillos de realizar; es indispensable, tanto, para la recolección tradicional, como para la medición del prototipo, que el punto, donde se va a tomar el dato y las submuestras, se encuentre limpia, eliminando la cobertura vegetal y piedras que se encuentren sobre esta, tener también la pala y los demás elementos totalmente limpios para evitar que la muestra se pueda contaminar.

En la (Fig. 29), se muestra el procedimiento de limpieza del lugar específico donde se realizará la toma de datos por parte del prototipo, en ambos casos, se utiliza el mismo procedimiento variando la profundidad. En la (Fig. 28), se observa los diferentes pasos para utilizar la pala y obtener la submuestra de suelo en cada uno de los puntos del recorrido.



Fig. 28. Recolección de submuestra con pala.

Fuente: Elaboración propia

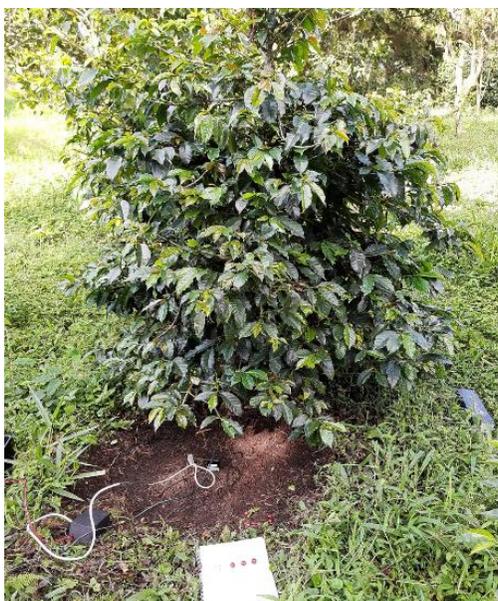


Fig. 29. Recolección de datos con prototipo
Fuente: Elaboración propia

3.2.2.3 Preparación e identificación de la muestra

Una vez que se realiza el muestreo del terreno es importante en el análisis tradicional, tener un manejo cuidadoso de la muestra para que no se contamine; cuando está terminado el proceso de mezclar el suelo se retira un kilogramo en total de toda la muestra homogénea y se introduce en una bolsa completamente nueva y limpia, retirando la mayor cantidad de aire posible en su interior, luego de este procedimiento se etiqueta y se envía al laboratorio el mismo día de la toma. Con los datos y el posterior análisis de los resultados, obtenidos por el prototipo, se realiza una evaluación a cada punto de medición, sacando promedios de datos, de cada grupo y un dato general de la muestra total del terreno seleccionado, de tal manera que permita hacer una comparación con los resultados entregados por el laboratorio. En la (Tabla 11), se muestra la etiqueta que permitirá identificar la muestra tomada por el prototipo en cada uno de los lotes a los cuales se le realizó el análisis de datos.

Tabla 11. Etiqueta para la identificación de cada muestra

INFORMACION DEL CLIENTE

Nombre y Apellido		Cedula	
Correo Electrónico		Numero Celular	
INFORMACION DE LA MUESTRA			
Departamento		Municipio	
Vereda		Finca	
Fecha de Muestra		Código de Muestra	
Profundidad		Ubicación o Lote	

3.2.3 Prueba concentración de azúcares en el grano de café

Es una prueba adicional al proyecto que permite analizar la correlación que tiene la nutrición en este caso macronutrientes NPK, para las pruebas realizadas, con ayuda de un refractómetro manual (Fig. 30), que mide los grados brix en el grano, lo que se define como la concentración de azúcares en el mucilago del grano en árbol, siendo una de las variables importantes para determinar la calidad del café en taza, estas pruebas se llevaron a cabo en cada uno de los puntos determinados para cada submuestra en campo del lote 5, 6 y 7.



Fig. 30. Refractómetro manual
Fuente: Elaboración propia

4. ANALISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al implementar las pruebas de funcionamiento de prototipo descritas con anterioridad en el pasado capítulo, además de ello se presenta el análisis que permite describir la correlación del prototipo desarrollado con respecto a las principales variables NPK, que dan como resultado de un análisis tradicional.

4.1 RESULTADOS PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO NUMERO 1

Debido a que las pruebas se tienen que analizar con los resultados de un análisis tradicional, se deben tener en cuenta las siguientes observaciones, primero no debe haber caído lluvia durante el día anterior a las pruebas, segundo los datos deben ser adquiridos todos en un solo día con el objetivo de que las alteraciones sean lo más baja posibles.

En la (Tabla 12), se realiza la etiqueta para la prueba número uno del dispositivo en el lote 14 del parque tecnicafé.

Tabla 12. Etiqueta para la identificación de la muestra 1

INFORMACION DEL CLIENTE			
Nombre y Apellido	TECNICAFE	Cedula	
Correo Electrónico		Numero Celular	
INFORMACION DE LA MUESTRA			
Departamento	CAUCA	Municipio	CAJIBIO
Vereda	LA VENTA	Finca	LOS NARANJOS
Fecha de Muestra	29 de octubre de 2021	Código de Muestra	000001
Profundidad	20CM	Ubicación o Lote	LOTE 14

Luego de ajustar el dispositivo en campo, se realizaron las pruebas de adquisición de datos para cada punto seleccionado como una submuestra en este terreno de café, los datos obtenidos se pueden observar en la (Tabla 13). se ilustra el promedio obtenido de 100 datos para cada una de las submuestras.

Tabla 13. Resultados obtenidos por el prototipo de monitoreo

PRUEBA #1						
SUBMUESTRA	PROMEDIO SENSOR NPK Mg/Kg			PROMEDIO SONDA T Y H		MUESTRA
	N	P	K	T(c)	H %	
1	0	0	0	22.18	99.90	1
2	12	4	5	18.90	99.90	
3	88	26	35	23.70	99.90	
4	0	0	0	20.10	99.90	
5	0	0	0	21.20	99.90	
6	1	0	0	19.90	99.90	
7	24	7	9	19.70	99.90	
8	0	0	0	19.50	99.90	
9	0	0	0	20.40	99.90	
10	0	0	0	20.70	99.90	
11	12	4	5	18.30	99.90	
12	6	2	2	17.20	99.90	
13	0	0	0	18.10	99.90	
14	38.64	11.69	15.69	19.50	99.90	
15	19	6	7	18.60	99.90	

En la (Fig. 31), se tienen los resultados del análisis del suelo que se obtuvieron con el prototipo de monitoreo de macronutrientes. Los resultados obtenidos, permiten visualizar las variaciones que tienen los macronutrientes NPK, en cada punto de medición del terreno, observándose que la concentración nutricional de estos no es homogénea en el suelo, en la (Fig. 32), se pueden visualizar los resultados de las variables de temperatura y humedad adquiridas para cada punto de medición durante el proceso de pruebas.

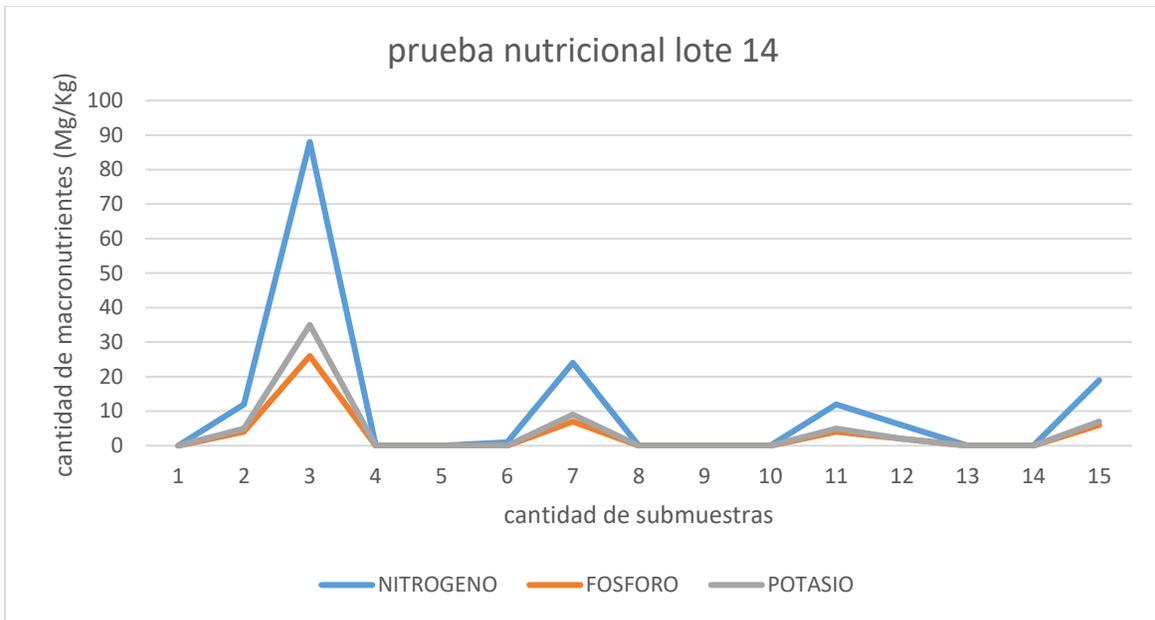


Fig. 31. Resultados análisis NPK con prototipo al lote 14
Fuente: Elaboración propia

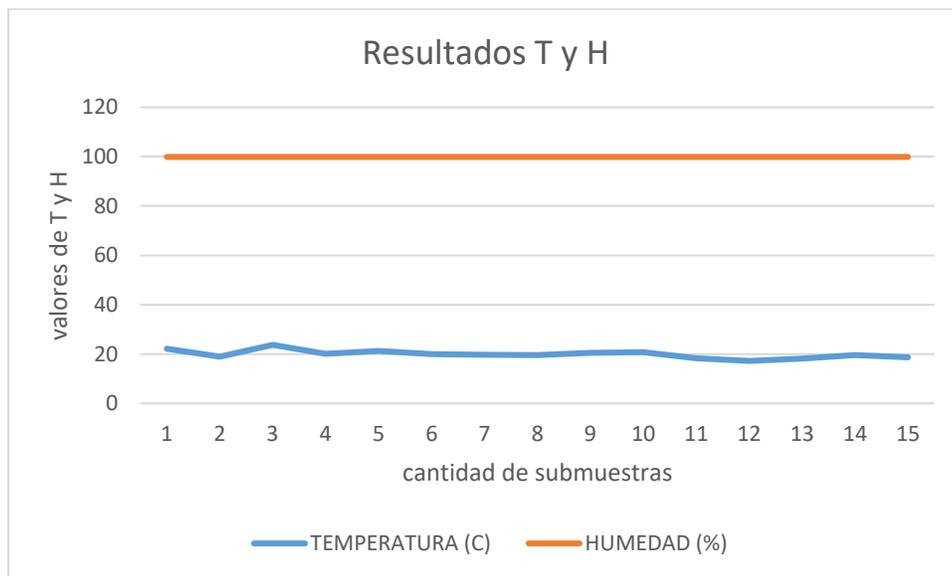


Fig. 32. Resultados medición temperatura y humedad
Fuente: Elaboración propia

4.1.1 Comparación resultados de prototipo con análisis tradicional.

Se determina la correlación que se obtiene después de mirar el comportamiento de cada una de las variables NPK del prototipo, con los resultados que se entregaron por

parte de agrosavia a la muestra que se envió del lote número 14 para la realización de análisis tradicional

4.1.1.1 Resultado de muestra enviada con prototipo

La muestra que se envió al laboratorio de agrosavia se sacó de la mezcla de tierra de cada una de las submuestras del terreno, donde se empaco la cantidad de un kilogramo, antes del envío se adquirieron datos con el prototipo para poder comparar estos con el análisis, y observar que variación tienen los macronutrientes en una muestra final. En la (Tabla 14), se tienen los datos que registro el prototipo a la muestra número 1.

Tabla 14. Resultado homogéneo de la muestra enviada al laboratorio

Prueba #1 (Muestra final)						
Muestra	Resultado sensor NPK. (Mg/Kg)			Resultado sonda AM2305		Profundidad
1	N	P	K	T(c)	H(%)	20CM
	4	1	1	16,90	99,90	

4.1.1.2 Resultado de muestra obtenidos de laboratorio AGROSAVIA.

Los datos entregados por el laboratorio de AGROSAVIA, donde se realizaron los análisis nutricionales de la muestra para determinar las concentraciones NPK, entraron en el proceso 3 días después de enviada la muestra y su tiempo de respuesta fue después de 15 días hábiles. Los resultados se pueden evidenciar en la (Fig. 33).

DETERMINACIÓN ANALÍTICA	UNIDAD	MÉTODO	VALOR	INTERPRETACION*
pH (1:2.5)	Unidades de pH	GA-R-46, versión 05 de 2019-10-02	5.66	Moderadamente ácido
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	dS/m	NTC 5596-2008 Calidad del suelo: Determinación de la conductividad eléctrica, Método B, Medición en suspensión suelo/agua relación 1:5 (Peso/volumen)	0.22	No salino
Materia Orgánica (MO)	g/100g	Cálculo según NTC 5403 Walkey & Black	6.33	Alto
Carbono Orgánico (CO)	g/100g	GA-R-119 versión 2 2019-09-20	3.67	
Fosforo (P) Disponible (Bray II)	mg/kg	GA-R-48, versión 05 de 2019-10-02.	20.28	Medio
Azufre (S) disponible	mg/kg	Fosfato monobásico de calcio	8.53	Bajo
Capacidad Interc. Catiónica Efect (CICE)	cmol(+)/kg	Cálculo	8.81	Baja
Boro (B) Disponible	mg/kg	Fosfato monobásico de calcio	0.27	Medio
Acidez (Al+H)	cmol(+)/kg	KCl	ND	No Indica
Aluminio (Al) Intercambiable	cmol(+)/kg	KCl	ND	Sin restricción
Calcio (Ca) disponible	cmol(+)/kg	GA-R-050 versión 7 de 2019-10-02	5.65	Medio
Magnesio (Mg) Disponible	cmol(+)/kg	GA-R-050 versión 7 de 2019-10-02	1.35	Bajo
Potasio (K) Disponible	cmol(+)/kg	GA-R-050 versión 7 de 2019-10-02	1.72	Alto

Fig. 33. Datos entregados por laboratorio AGROSAVIA, muestra 1

Fuente: AGROSAVIA

4.1.2.3 Análisis de resultados

Para la prueba 1, al realizar la correlación de las variables NPK entregadas por el sensor y las obtenidas por análisis tradicional, se observa que existe una tasa de error para el nitrógeno del 36% de su valor real, para el fósforo una tasa de error del 95% y del potasio una tasa de error del 41%, evidenciando que la caracterización de medida para esta prueba, no es la adecuada, cabe aclarar que los resultados entregados por laboratorio pueden variar con respecto al prestador del servicio.

4.2 RESULTADOS PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO NUMERO 2

Las observaciones de la prueba anterior se deben de tomar en cuenta para realizar esta segunda toma de adquisición de datos, a diferencia de la anterior en esta se realiza un ajuste en la profundidad de la muestra dejando tan solo una distancia de 6cm, también se toma la muestra de suelo tan solo después de haber puesto en funcionamiento el prototipo para cada una de las submuestras. El terreno que se escogió para esta prueba está determinado por los lotes 5, 6 y 7 que presentan una variedad de café orgánico. En la (Tabla 15), se realiza la etiqueta para el procedimiento de esta segunda prueba en los lotes ya descritos.

Tabla 15. Etiqueta para la identificación de la muestra 2.

INFORMACION DEL CLIENTE

Nombre y Apellido	TECNICAFE	Cedula	
Correo Electrónico		Numero Celular	
INFORMACION DE LA MUESTRA			
Departamento	CAUCA	Municipio	CAJIBIO
Vereda	LA VENTA	Finca	LOS NARANJOS
Fecha de Muestra	01de noviembre de 2021	Código de Muestra	000002
Profundidad	6CM	Ubicación o Lote	LOTE 5, 6 y 7

Con el dispositivo ya ajustado con las nuevas especificaciones de funcionamiento para este caso, se inicia con la adquisición de datos para estos lotes de cada una de las variables sensadas, en esta prueba se realizó la toma de 24 submuestras, debido a que el terreno era más extenso que el anterior, los datos obtenidos se pueden evidenciar en la (Tabla 16).

Tabla 16. Resultados obtenidos por el prototipo para la prueba 2.

PRUEBA #2						
SUBMUESTRA	PROMEDIO SENSOR NPK Mg/Kg			PROMEDIO SONDA T Y H		MUESTRA
	N	P	K	T(c)	H %	
1	0	0	0	20,10	99,90	2
2	12	4	5	18,60	99,90	
3	12	4	5	19,90	99,90	
4	15	4	6	22,12	99,90	
5	40	12	16	22,10	99,90	
6	27	8	10	19,90	99,90	
7	19	6	7	23,50	99,90	
8	59	17	24	22,80	99,90	
9	17	5	7	21,00	99,90	
10	12	4	5	24,40	99,90	
11	15	4	6	24,30	99,90	
12	6	2	2	21,30	99,90	

13	8	2	3	25,30	99,90
14	6	2	2	22,10	99,90
15	24	7	9	21,50	99,90
16	1	0	0	22,70	99,90
17	32	9	13	22,30	99,90
18	29	9	11	23,80	99,90
19	0	0	0	20,50	99,90
20	3	1	1	21,30	99,90
21	27	8	10	21,10	99,90
22	6	2	2	20,30	99,90
23	17	5	7	20,10	99,90
24	15	4	6	20,80	99,90

En la (Fig. 34), se tienen los resultados del análisis del suelo que se obtuvieron con el prototipo de monitoreo de macronutrientes. Los resultados obtenidos, permiten visualizar las variaciones que tienen los macronutrientes NPK, en cada punto de medición del terreno, observándose que la concentración nutricional de estos no es homogénea en el suelo, en la (Fig. 35), se pueden visualizar los resultados de las variables de temperatura y humedad adquiridas para cada punto de medición durante el proceso de pruebas.

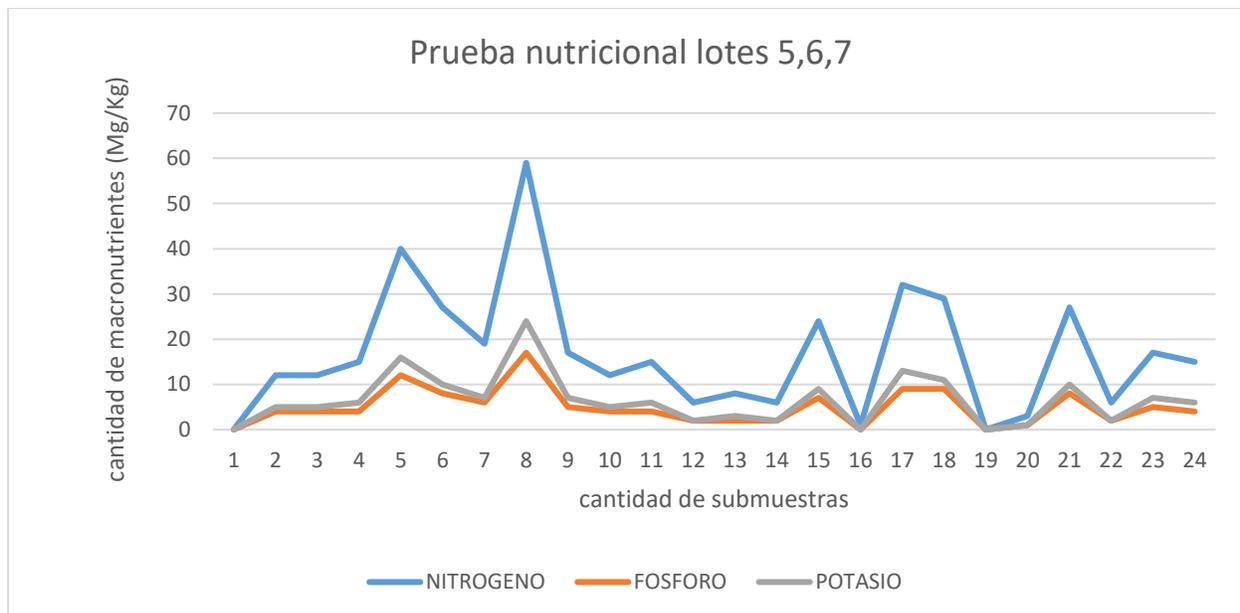


Fig. 34. Resultado análisis NPK con prototipo, prueba 2
Fuente: Elaboración propia

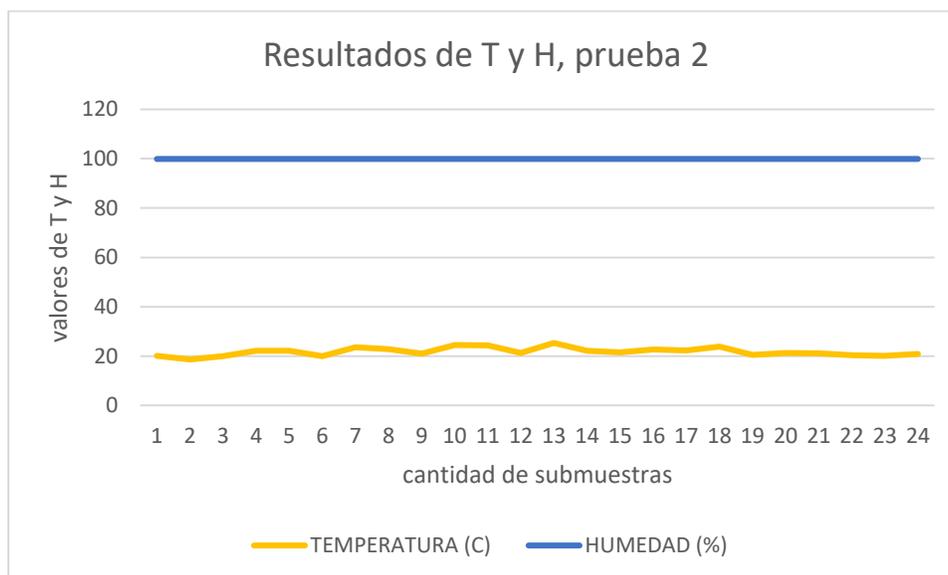


Fig. 35. Resultados de temperatura y humedad
Fuente: Elaboración propia

4.2.1 comparación de resultados de prototipo con análisis tradicional, prueba 2

Se determina la correlación que tienen los resultados de esta segunda prueba, con los parámetros que se le cambiaron y el método en que se adquirieron los datos, con los

obtenidos con análisis tradicional para los lotes 5 ,6 y 7 de tecnicafé, con el objetivo de analizar el comportamiento de las variables NPK.

4.2.1.1 Resultado de muestra enviada con prototipo

Para esta segunda prueba de funcionamiento de prototipo se realizan los mismos pasos del caso anterior, se obtienen datos de la muestra a enviar a AGROSAVIA con el dispositivo electrónico, para determinar las concentraciones de macronutrientes de la misma, permitiendo analizarlas con las entregadas por laboratorio. En la (Tabla 17), se obtienen los datos de registro para la muestra número 2.

Tabla 17. Resultado homogéneo de la muestra 2 enviada al laboratorio

Prueba #2 (Muestra final)						
Muestra	Resultado sensor NPK. (Mg/Kg)			Resultado sonda AM2305		Profundidad
1	N	P	K	T(c)	H(%)	6CM
	12	2	2	21,10	99,90	

4.2.1.2 Resultados obtenidos por laboratorio AGROSAVIA.

Los datos entregados por el laboratorio de AGROSAVIA, donde se realizaron los análisis nutricionales de la muestra 2 para determinar las concentraciones NPK, entraron en el proceso 3 días después de enviada la muestra y su tiempo de respuesta fue después de 15 días hábiles. Los resultados se pueden evidenciar en la (Fig. 36).

DETERMINACIÓN ANALÍTICA	UNIDAD	MÉTODO	VALOR	INTERPRETACION*
pH (1:2,5)	Unidades de pH	GA-R-46, versión 05 de 2019-10-02	5.42	Fuerte a extremadamente ácido
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	dS/m	NTC 5596:2008 Calidad del suelo: Determinación de la conductividad eléctrica, Método B. Medición en suspensión suelo/agua relación 1:5 (Peso/volumen)	0.36	No salino
Materia Orgánica (MO)	g/100g	Cálculo según NTC 5403 Walkey & Black	10.69	Alto
Carbono Orgánico (CO)	g/100g	GA-R-119 versión 2 2019-09-20	6.20	
Fosforo (P) Disponible (Bray II)	mg/kg	GA-R-48, versión 05 de 2019-10-02.	25.15	Medio
Azufre (S) disponible	mg/kg	Fosfato monobásico de calcio	11.73	Medio
Capacidad Interc Catiónico Efect (CICE)	cmol(+)/kg	Cálculo	11.01	Media
Boro (B) Disponible	mg/kg	Fosfato monobásico de calcio	0.23	Medio
Acidez (Al+H)	cmol(+)/kg	KCl	0.71	No Indica
Aluminio (Al) Intercambiable	cmol(+)/kg	KCl	0.59	Sin restricción
Calcio (Ca) disponible	cmol(+)/kg	GA-R-050 versión 7 de 2019-10-02	6.30	Alto
Magnesio (Mg) Disponible	cmol(+)/kg	GA-R-050 versión 7 de 2019-10-02	2.10	Medio
Potasio (K) Disponible	cmol(+)/kg	GA-R-050 versión 7 de 2019-10-02	1.81	Alto

Fig. 36. Datos entregados por laboratorio AGROSAVIA, muestra 2

Fuente: AGROSAVIA

4.2.1.3 Análisis de resultados prueba 2

Para la prueba 2, al realizar la correlación de las variables NPK entregadas por el sensor y las obtenidas por análisis tradicional, se observa que existe una tasa de error para el nitrógeno del 12% de su valor real, para el fósforo una tasa de error del 92% y del potasio una tasa de error del 10%, evidenciando que la caracterización de medida para esta prueba, es más acertada que la anterior, reduciendo considerablemente la tasa de error para el nitrógeno y potasio, el fósforo tiene una leve reducción pero al igual que la prueba anterior aún no existe consistencia con los resultados de laboratorio.

4.3 RESULTADOS PRUEBA CONCENTRACION DE AZUCAR EN MUSILAGO.

Al realizar las pruebas de adquisición de variables NPK, se optó por incluir una prueba adicional al proyecto para determinar la relación que tiene la nutrición en las plantas de café con la concentración de azúcar en el mucilago de su grano, al igual que la adquisición de datos para las pruebas anteriores, esta se realizó en cada punto donde se implementó el dispositivo para los lotes 5, 6 y 7 de Tecnicafé. En la (Tabla 18) se visualizan los resultados obtenidos por medio de un refractómetro manual.

Tabla 18. Resultados obtenidos por concentración de azúcar en mucilago.

SUBMUESTRA	VALOR DE AZUCAR EN MUSILAGO POR GRANO.			PROMEDIO POR MUESTRA
	G#1	G#2	G#3	
1	16	15	14	15
2	14	16	17	15,6
3	16	14	21	17
4	15	20	18	17,6
5	15	16	19	16,6
6	17	18	22	19
7	18	19	22	19,6
8	16	18	21	18,3
9	14	15	16	15
10	19	18	20	19
11	17	16	21	18
12	18	19	20	19
13	18	19	18	18,3
14	19	17	17	17,6
15	16	18	19	17,6
16	16	18	19	17,6
17	18	19	20	19
18	16	19	21	18,6
19	13	14	17	14,6
20	20	19	21	20
21	21	23	24	22,6
22	19	18	19	18,6
23	16	14	15	15
24	12	17	18	15,6

En la (Fig. 37), Se observan los resultados en concentración de azúcares que se obtuvieron en conjunto con la prueba 2, en los lotes 5, 6 y 7, donde se puede evidenciar

que en las submuestras donde las variables de macronutrientes NPK tuvieron concentraciones bajas, son directamente proporcionales con los resultados de azúcar en el grano de café.

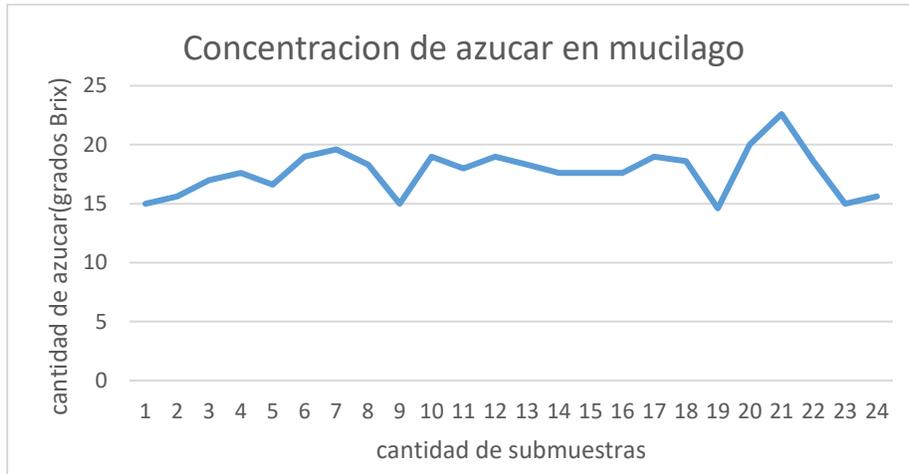


Fig. 37. Concentración de azucares en grano

Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan las conclusiones a las que se llegó a lo largo del desarrollo del prototipo implementado, así como los posibles trabajos futuros que podrían realizarse a partir de lo encontrado y descrito en este documento.

5.1 CONCLUSIONES

- Se desarrolló un sistema para comunicación basado en IoT, capaz de adquirir lectura de las variables NPK, humedad relativa y temperatura del suelo, el cual permite monitorear el terreno en cultivos de café y recolectar información con el fin de realizar un análisis de nutrición.

- En el desarrollo de este trabajo, se integró un sensor comercial electroquímico de macronutrientes NPK y una sonda de temperatura y humedad relativa que se adaptaron al sistema por su bajo costo y sencillez de procesamiento para leer el valor de las variables. El prototipo implementado logró operar en los dos métodos de verificación de funcionamiento planteados para un análisis previo y post fertilización de una muestra de suelo, lo cual, permite aprovechar la información para poder entender si el suelo está absorbiendo los nutrientes aplicados, observándose así ciertas características en los datos obtenidos.

- Dentro de la metodología para el desarrollo del presente trabajo se seleccionó la tecnología de comunicación IoT Sigfox, que, resulta eficiente para monitorear el tipo de variables del caso de estudio, y debido a su comportamiento lento, en periodos de tiempos cortos, la capacidad de transmisión de la tecnología se adapta a esas necesidades. Además, Sigfox tiene un operador que tiene la red desplegada, lo cual implica menos trabajo para el desarrollo de este tipo de sistemas ya que se encarga de todo el transporte de los datos desde las bases de recepción hasta llevarlos al backend.

- En el desarrollo de este trabajo, se integró un sensor electroquímico de macronutrientes NPK, el cual, no pretende reemplazar un examen o prueba de

laboratorio, ya que la sonda no va a entregar toda la información que se adquiere a partir de un análisis de suelos realizado en lugares equipados con instrumentos para tal proceso, sin embargo, el comportamiento de los valores de las variables que arroja el dispositivo, podrá permitir al usuario realizar una interpretación de los datos adquiridos y basándose en ello, ejecutar una acción de control sobre el cultivo; por tanto, el sistema procederá como una herramienta de apoyo preliminar para que en tiempo real se tenga una idea acerca del avance del cultivo y no tener que esperar esos tiempo elevados para la obtención de esa información.

- La muestra compuesta que es llevada al laboratorio para ser analizada proporciona más variables y datos precisos, sin embargo, es el resultado de la mezcla de varias submuestras de un lote, lo cual puede presentar inconvenientes, mientras que con la implementación del sistema y si se tiene la posibilidad de adaptar más nodos sensores se podría focalizar en varios puntos, obteniendo de esta manera, mayor cantidad de información que lo que representa un examen
- Se encontró que los cambios de niveles de profundidad para la lectura de datos, donde se probó el prototipo, mostro que estos tienen un efecto considerable en su funcionamiento, para cada una de las pruebas realizadas, debido a la disposición de los detectores en campo y la distribución nutricional en el suelo.
- Se encontró que las variables que influyen de manera fundamental en el comportamiento del sistema, tienen variaciones en los resultados de prototipo, en relación con los entregados por análisis tradicional, esto puede ser debido al proceso de adquisición en campo donde el suelo se encuentra compacto y los sensores pueden tener mejor porcentaje de funcionamiento, a diferencia de los obtenidos para la muestra donde influyen variables externas que pueden alterar los resultados. (transporte, temperatura, humedad, tiempo).

- La limitación en los resultados obtenidos, podrían obedecer a la concentración de las variables NPK, más evidenciada en el P, con un margen de error alto en comparación al análisis de suelo en laboratorio. Esta limitación se debe, a que se utilizan métodos diferentes de medida en cada caso, y el tiempo de respuesta varía considerablemente uno del otro.

5.2 RECOMENDACIONES

- Con el objetivo de continuar con una investigación más profunda acerca de la tecnología de comunicaciones IoT basadas en el monitoreo de macronutrientes NPK del suelo, se proponen los siguientes trabajos futuros:
- Se sugiere complementar el funcionamiento del prototipo, adicionando sensores o transductores para adquisición de variables como **PH y conductividad eléctrica**, las cuales son importantes para complementar el análisis del cultivo.
- Se sugiere trabajar en la implementación de un sistema de posicionamiento global o un sistema GPS que permitirá tener información tridimensional, es decir, la posición y altitud en la que se encuentra el prototipo, la cual se puede relacionar con aplicaciones que tienen mapas de calor con puntos GPS y pueden permitir establecer, como es la variación de los nutrientes con respecto a la geografía (zona alta, pendiente, plana, etc.)
- Se sugiere la realización de un sistema de procesamiento que permita capturar un volumen de datos más amplio, para poder hacer un análisis y emplear un plan de nutrición para las plantas, una enmienda precisa para los requerimientos nutricionales de cada cultivo en estudio.
- desarrollar un sistema complementario para la adquisición de micronutrientes presentes en el suelo para cultivos diferentes al del café y compararlos de igual modo con un análisis tradicional.

ANEXO

Para realizar una comparación de medida entre dispositivo y laboratorios se realiza una tercera prueba donde se determina la correlación entre 2 laboratorios y el sistema de monitoreo de macronutrientes. Para esto, se recoge una muestra de tierra de la finca el cortijo en la vereda Julumito, se obtienen los datos NPK del prototipo en un sistema de almacenamiento local que tiene una memoria flash de tipo microSD y se divide la muestra en 2. Una para el laboratorio de AGROSAVIA y la otra para la federación de cafeteros.

En la (Fig. 38) se observa la mezcla homogénea de todas las submuestras de tierra recolectadas para el análisis de NPK.



Fig. 38. Mezcla homogénea de tierra para análisis

Fuente: Propia

Los resultados obtenidos por el sistema de monitoreo de macronutrientes, temperatura y humedad para este caso se pueden observar en la siguiente (Tabla 19).

Tabla 19. Resultado homogéneo de la muestra enviada al laboratorio

Prueba #3

Muestra	Resultado sensor NPK. (Mg/Kg)			Resultado sonda AM2305		Profundidad
	N	P	K	T(c)	H(%)	
3	12	6	3	17,70	99,90	20CM

Las muestras para los laboratorios se enviaron un día después de la recolección de las mismas, estas se hacen con las especificaciones de cada uno de ellos, en la (Fig. 40) se observa el método de envío de la tierra.



Fig. 39. envío de muestra para análisis de macronutrientes

Fuente: Propia

Los resultados dados por el laboratorio de la federación de cafeteros del cauca, tuvo un periodo de tiempo más extenso para su obtención, los datos se pueden observar en la siguiente (Fig. 41).



MULTILAB AGROANALITICA
Reporte suelos Fertilidad

SOLICITANTE : CMTE CAUCA	ORDEN : 5841
PROPIETARIO : JOHAN ALEXANDER MENESES	No. MUESTRAS : 1
FINCA : EL CORTIJO	FECHA RECIBO : 17/12/2021 0:00:00
PROYECTO : CAFÉ	FECHA DE REPORTE : 24/12/2021 10:22:38
MUNICIPIO : POPAYAN,Cauca	
VEREDA : LA LAJA	

Nlab	Referencia	pH	N	MO	P	K	Ca	Mg	Al	Textura
			%		mg Kg ⁻¹		cmol(+)kg ⁻¹			
7910	EL CORTIJO	5,5	0,75	24,1	22	0,65	4,91	0,32	0,4	F.Ar.A

Fig. 40. resultado de análisis de suelo por laboratorio de la federación de cafeteros.

Los resultados por el laboratorio de agrosavia se pueden observar en la siguiente (Fig. 42), este laboratorio tiene un tiempo de respuesta en comparación con el anterior mucho más corto para el reporte de resultados.

FECHA DE RECEPCIÓN 2021-12-13

FECHA DE ANÁLISIS: De 2021-12-17 a 2022-01-10

FECHA DE REPORTE: 2022/01/12

Yeni Rodríguez Giraldo (E6968)

Coordinador técnico del laboratorio de Química Analítica

DETERMINACIÓN ANALÍTICA	UNIDAD	MÉTODO	VALOR	INTERPRETACION*
pH (1:2,5)	Unidades de pH	GA-R-46, versión 05 de 2019-10-02	5.59	Moderadamente ácido
Conductividad eléctrica (CE) (1:5)	dS/m	NTC 5596:2008 Calidad del suelo: Determinación de la conductividad eléctrica, Método B. Medición en suspensión suelo/agua relación 1:5 (Peso/volumen)	0.32	No salino
Materia Orgánica (MO)	g/100g	Cálculo según NTC 5403 Walkey & Black	20.84	Alto
Carbono Orgánico (CO)	g/100g	GA-R-119 versión 2 2019-09-20	12.09	
Fosforo (P) Disponible (Bray II)	mg/kg	GA-R-48, versión 05 de 2019-10-02.	8.18	Bajo
Azufre (S) disponible	mg/kg	Fosfato monobasico de calcio	7.83	Bajo
Capacidad Interc Catiónico Efect (CICE)	cmol(+)/kg	Cálculo	5.39	Baja
Boro (B) Disponible	mg/kg	Fosfato monobasico de calcio	0.11	Bajo
Acidez (Al+H)	cmol(+)/kg	KCl	ND	No Indica
Aluminio (Al) Intercambiable	cmol(+)/kg	KCl	ND	Sin restricción
Calcio (Ca) disponible	cmol(+)/kg	GA-R-050 versión 7 de 2019-10-02	3.84	Medio
Magnesio (Mg) Disponible	cmol(+)/kg	GA-R-050 versión 7 de 2019-10-02	0.67	Bajo
Potasio (K) Disponible	cmol(+)/kg	GA-R-050 versión 7 de 2019-10-02	0.81	Alto

Fig. 41 resultado de análisis de suelo por laboratorio de agrosavia.

Una vez obtenidos todos los resultados de los sistemas en comparación, es preciso concluir que existen diferencias entre cada uno de ellos, que se pueden generar debido a muchos factores que en los rangos de tiempo de respuesta alteran los resultados. En el siguiente esquema se ilustra el porcentaje de error entre dispositivo y laboratorios para una misma muestra de suelo.

La tasa de error del sistema de monitoreo para macronutrientes en relación con los obtenidos por los laboratorios de análisis de suelo indica que existe una variación en la medida en cada uno de ellos. Entre el sistema y el laboratorio de agrosavia, el dato obtenido para el nitrógeno se tiene un 42% de error, para el fósforo un 26% y para el potasio un 270% en correlación con los obtenidos por el sistema de monitoreo.

Los datos arrojados por el sistema de monitoreo de macronutrientes y el laboratorio de la federación de cafeteros, permite establecer una tasa de error para el nitrógeno del 50,2%, en el fósforo del 72% y por último para el potasio de 361%, con lo que se puede concluir que no existe una medida 100% precisa entre sistemas de medición de macronutrientes.

Factores como el tiempo de respuesta, temperatura, humedad y métodos de detección de macronutrientes inciden en la respuesta de los métodos de análisis de suelo.

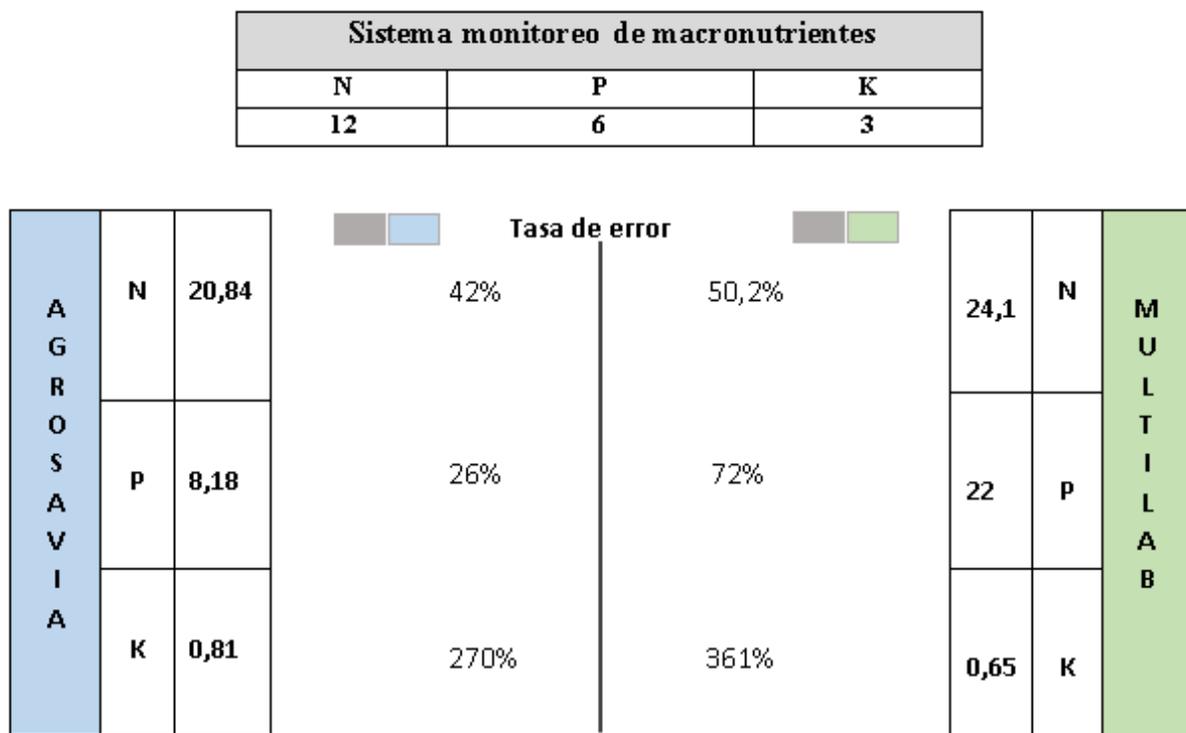


Fig. 42. Tasa de error en relación con los resultados obtenidos por laboratorios

Fuente: Propia

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] I. A. Magomedov, M. S. U. Khaliev, and L. V. Ibragimova, "The need for introducing new technology in agriculture to ensure a sustainable future," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 548, no. 3, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/548/3/032026.
- [2] M. I. Jiménez, P. Abbott, and K. Foster, *Estimación y análisis de la Productividad Agrícola en Colombia*, vol. 22, no. 47. 2019.
- [3] "¿Cuáles los productos agrícolas más rentables? - Robustec." <https://www.robustec.ind.br/es/blog/cuales-los-productos-agricolas-mas-rentables/> (accessed Nov. 25, 2021).
- [4] "Café bendito del Cauca, un sacrilegio no tomarlo." <https://diariolaeconomia.com/tomemos-cafe/item/4803-cafe-bendito-del-cauca-un-sacrilegio-no-tomar-lo.html> (accessed Nov. 23, 2021).
- [5] T. Adhikary, A. K. Das, M. A. Razzaque, M. E. H. Chowdhury, and S. Parvin, "Test implementation of a sensor device for measuring soil macronutrients," *Proc. 2015 Int. Conf. Netw. Syst. Secur. NSysS 2015*, 2015, doi: 10.1109/NSysS.2015.7042951.
- [6] N. E. Castaño Giraldo and M. A. Cardona Gómez, "Factores determinantes en la inestabilidad del sector agrícola colombiano," *En-Contexto. Rev. Investig. en Adm. Contab. Econ. y Soc.*, pp. 91–107, 2014.
- [7] A. More, A. Mouria, N. Panchal, and K. Bathe, "Soil Analysis Using Iot," *SSRN Electron. J.*, 2019, doi: 10.2139/ssrn.3366756.
- [8] P. Mishra *et al.*, "Testing/Monitoring of Soil Chemical Level Using Wireless Sensor Network Technology," *14th Int. Conf. Precis. Agric.*, vol. 4, no. 11, pp. 114–117, 2018, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1808.07381>.
- [9] D. O. Prieto Poveda, "La tecnificación como herramienta para incrementar la productividad agropecuaria en Colombia," Fundación Universidad de América, 2019.
- [10] DNP, "Misión para la transformación del campo - Diagnóstico económico del campo colombiano," *Inf. la misión para la Transform. del campo*, p. 63, 2015, [Online]. Available: https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Agriculturapecuarioforestal_y_pesca/Diagnostico_Economico_del_Campo_Colombiano.pdf.
- [11] "Semana Rural | Estos son los 'gadgets' para el campo colombiano." <https://semanarural.com/web/articulo/como-se-esta-tecnificando-el-campo-colombiano-/1159> (accessed Nov. 26, 2021).
- [12] "Ante la pandemia global, una respuesta integral de la agricultura." <https://www.lasillavacia.com/historias/historias-silla-llena/carrillo-hace-ruido-pero-no-dana-hasta-ahora-los-planes-de-penalosa/> (accessed Nov. 26, 2021).
- [13] "La producción de café en Colombia septiembre de 2019 | Economía | Portafolio." <https://www.portafolio.co/economia/la-produccion-de-cafe-en-colombia-septiembre-de-2019-534262> (accessed Nov. 26, 2021).
- [14] Pérez, "Uso de los fertilizantes y su impacto en la producción agrícola," *Univ. Nac. Colomb.*, p. 126, 2014, [Online]. Available: <http://www.bdigital.unal.edu.co/39459/1/71782231.2014.pdf>.

- [15] “Cafeteros recogerán 14 millones de sacos en el año más duro para la economía.” <https://www.semana.com/economia/articulo/en-pandemia-asi-sera-la-mayor-cosecha-cafetera-en-colombia-en-2020noticias-hoy/691568/> (accessed Nov. 26, 2021).
- [16] “Pese a la pandemia, exportaciones de café crecieron 1% en julio.” <https://www.semana.com/pais/articulo/exportaciones-de-cafe-en-colombia-en-julio-de-2020/294837/> (accessed Nov. 26, 2021).
- [17] “Los 10 mayores productores de café del mundo – 2019 – Qué Café!” <https://quecafe.info/mayores-productores-de-cafe-en-el-mundo/> (accessed Nov. 26, 2021).
- [18] “Propiedades del suelo - Hortalizas.” <https://www.hortalizas.com/cultivos/propiedades-del-suelo/> (accessed Nov. 26, 2021).
- [19] “El Suelo Óptimo para el cultivo de café - | Coffee Media .
- <https://www.yoamoelcafedecolombia.com/2016/08/31/el-suelo-optimo-para-el-cultivo-de-cafe/> (accessed Nov. 26, 2021).
- [20] S. Laskar and S. Mukherjee, “Optical Sensing Methods for Assessment of Soil Macro-nutrients and other Properties for Application in Precision Agriculture:: A review,” *ADBU-Journal Eng. Technol. AJET*, vol. 4, no. 1, p. 206, 2016.
- [21] H. S. Abdullahi, F. Mahieddine, and R. E. Sheriff, “Technology impact on agricultural productivity: A review of precision agriculture using unmanned aerial vehicles,” *Lect. Notes Inst. Comput. Sci. Soc. Telecommun. Eng. LNICST*, vol. 154, pp. 388–400, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-25479-1_29.
- [22] “Un reto tecnológico para el agro colombiano - ANEIA - Universidad de Los Andes.” https://agronegocios.uniandes.edu.co/2018/08/29/un-reto-tecnologico-para-el-agro-colombiano/#_ftnref1.. (accessed Nov. 26, 2021).
- [23] S. Sadeghian Khalajabadi, “Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. Guía práctica,” *Boletín Técnico Cenicafe*, vol. 32, pp. 1–44, 2008.
- [24] V. Bhatnagar and R. C. Poonia, “A prototype model for decision support system of NPK fertilization,” *J. Stat. Manag. Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 631–638, 2018, doi: 10.1080/09720510.2018.1471266.
- [25] K. Kapis and M. Ombeni, “A Framework for Deployment of Easy to Use Wireless Sensor Networks for.pdf.”
- [26] J. Espinosa, “Manejo integrado de nutrientes,” no. 1, pp. 1–11, 2017.
- [27] S. Balaji, K. Nathani, and R. Santhakumar, “IoT Technology, Applications and Challenges: A Contemporary Survey,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 108, no. 1, pp. 363–388, 2019, doi: 10.1007/s11277-019-06407-w.
- [28] J. Ding, M. Nemat, C. Ranaweera, and J. Choi, “IoT connectivity technologies and applications: A survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 67646–67673, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2985932.
- [29] B. Kampfer and T. Haspl, “Zigbee vs. 6LoWPAN,” *Alpen-Adria Univ. Klagenfurt*, pp. 1–10, 2020, [Online]. Available: <https://pervasive.aau.at/BR/teaching/sn/t6-rep.pdf>.
- [30] P. Papageorgiou, “Wireless Sensor Networks An Overview,” *Am. Sci. Res. J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 64, no. 1, pp. 53–63, 2020, [Online]. Available: https://asrjetsjournal.org/index.php/American_Scientific_Journal/article/view/5562.

- [31] C. Alberto, V. Romero, J. Erickson, B. Jaimes, D. Carolina, and P. González, "La Tecnología ZigBee estudio de las características de la capa física ZigBee Technology study of the characteristics of the physical layer," *Sci. Tech.*, vol. 22, no. 3, pp. 238–245, 2017.
- [32] M. Loyola and P. Becerra, "Manual para la aplicación de la Tecnología Zigbee para edificios Inteligentes," pp. 1–138, 2015, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7986/1/UPS-CT004855.pdf>.
- [33] Z. Alliance, "ZigBee Specificarion," *Stand. Oct*, 2015.
- [34] H. M. Jawad, R. Nordin, S. K. Gharghan, A. M. Jawad, and M. Ismail, "Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 8, pp. 1–46, 2017, doi: 10.3390/s17081781.
- [35] "XBee vs. Zigbee: A Simple Comparison Guide | Digi International." <https://www.digi.com/blog/post/xbee-vs-zigbee-a-simple-comparison-guide> (accessed Apr. 29, 2021).
- [36] DIGI, "¿Qué es XBee? XBee.cl - Comunicación Inalámbrica para Tus Proyectos." <https://xbee.cl/que-es-xbee/> (accessed Nov. 11, 2020).
- [37] E. Rastogi, N. Saxena, A. Roy, and D. R. Shin, "Narrowband Internet of Things: A Comprehensive Study," *Comput. Networks*, vol. 173, 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107209.
- [38] A. D. Zayas and P. Merino, "The 3GPP NB-IoT system architecture for the Internet of Things," *2017 IEEE Int. Conf. Commun. Work. ICC Work. 2017*, pp. 277–282, 2017, doi: 10.1109/ICCW.2017.7962670.
- [39] K. K. Nair, A. M. Abu-Mahfouz, and S. Lefophane, "Analysis of the narrow band internet of things (NB-IoT) technology," *2019 Conf. Inf. Commun. Technol. Soc. ICTAS 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/ICTAS.2019.8703630.
- [40] C. B. Mwakwata, H. Malik, M. M. Alam, Y. Le Moullec, S. Parand, and S. Mumtaz, "Narrowband internet of things (NB-IoT): From physical (PHY) and media access control (MAC) layers perspectives," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 11, 2019, doi: 10.3390/s19112613.
- [41] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT," *2018 IEEE Int. Conf. Pervasive Comput. Commun. Work. PerCom Work. 2018*, pp. 197–202, 2018, doi: 10.1109/PERCOMW.2018.8480255.
- [42] J. Haxhibeqiri, E. De Poorter, I. Moerman, and J. Hoebeke, "A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 11, 2018, doi: 10.3390/s18113995.
- [43] M. A. Ertürk, M. A. Aydın, M. T. Büyükakkaşlar, and H. Evirgen, "A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies," *Futur. Internet*, vol. 11, no. 10, p. 216, 2019, doi: 10.3390/fi11100216.
- [44] R. Kufakunesu, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, "A survey on adaptive data rate optimization in lorawan: Recent solutions and major challenges," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 18, pp. 1–25, 2020, doi: 10.3390/s20185044.
- [45] T. G. Durand, L. Visagie, and M. J. Booyesen, "Evaluation of next-generation low-power communication technology to replace GSM in IoT-applications," *IET Commun.*, vol. 13, no. 16, pp. 2533–2540, 2019, doi: 10.1049/iet-com.2019.0168.
- [46] A. Raychowdhury and A. Pramanik, "Survey on LoRa Technology :," *Adv. Intell.*

- Syst. Comput.*, vol. 1148, pp. 259–271, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-3914-5>.
- [47] K. Hofer-Schmitz and B. Stojanović, “Towards formal verification of IoT protocols: A Review,” *Comput. Networks*, vol. 174, no. March, 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107233.
- [48] B. Buurman, J. Kamruzzaman, G. Karmakar, and S. Islam, “Low-Power Wide-Area Networks: Design Goals, Architecture, Suitability to Use Cases and Research Challenges,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 17179–17220, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968057.
- [49] “Radio Configurations | Sigfox build.” <https://build.sigfox.com/sigfox-radio-configurations-rc> (accessed Jul. 06, 2021).
- [50] L. Krupka, L. Vojtech, and M. Neruda, “The issue of LPWAN technology coexistence in IoT environment,” *Proc. 2016 17th Int. Conf. Mechatronics - Mechatronika, ME 2016*, 2017.
- [51] S. Al-Sarawi, M. Anbar, K. Alieyan, and M. Alzubaidi, “ICIT 2017 : the 8th International Conference on Information Technology : Internet of Things IoT : conference proceedings : May 17th - 18th, 2017, Amman, Jordan.,” *Int. Conf. Inf. Technol. Internet*, pp. 697–702, 2017.
- [52] H. F. Atlam and G. B. Wills, *Technical aspects of blockchain and IoT*, 1st ed., vol. 115. Elsevier Inc., 2019.
- [53] N. Amparo, G. Girón, R. El, and C. Agropecuario, “Selección de tecnologías LPWAN para la implementación de un sistema IoT aplicado a la lombricultura,” *EXPOTECH 2020 Ciencia, Ing. y Soc. “tecnologías exponenciales para la consolidación la Ind.*, vol. 4.0, 2020.
- [54] S. R. J. Ramson and D. J. Moni, “Applications of Wireless Sensor Networks – A Survey,” no. 978, pp. 325–329.
- [55] Y. Hamouda and M. Msallam, “Variable sampling interval for energy-efficient heterogeneous precision agriculture using Wireless Sensor Networks,” *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 32, no. 1, pp. 88–98, 2020, doi: 10.1016/j.jksuci.2018.04.010.
- [56] J. Arcila, “Factores que determinan la productividad del cafetal,” *Sist. Prod. Café en Colomb.*, pp. 61–86, 2007.
- [57] C. H. Ramírez-soler and L. U. Z. M. Melgarejo, “Efecto de dosis de nitrógeno , fósforo y potasio sobre el crecimiento del tomate de árbol (Solanum betaceum Cav .) en etapa vegetativa Effect of nitrogen , phosphorus , and potassium doses on tree tomato (Solanum betaceum Cav .) growth in the vegetative,” *Rev. Colomb. Ciencias Hortícolas*, vol. 12, no. 1, pp. 31–40, 2018.
- [58] D. S. Galindo-araque, M. C. Vargas-sarmiento, and J. P. Corredor-gómez, “Caracterización de Temperatura y Humedad de Suelos Agrícolas.”
- [59] A. Herrón O, “Producción de café en zonas no tradicionales,” *PhD Propos.*, vol. 1, p. 32, 2013.
- [60] “La humedad relativa en invernadero - Nutricontrol.” <https://nutricontrol.com/es/la-humedad-relativa-en-invernadero/> (accessed Jul. 13, 2021).
- [61] L. Burton, K. Jayachandran, and S. Bhansali, “Review—The ‘Real-Time’ Revolution for In situ Soil Nutrient Sensing,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 167, no. 3, p. 037569, 2020, doi: 10.1149/1945-7111/ab6f5d.
- [62] L. C. Gavade and A. . Bhoi, “N , P , K Detection & Control for Agriculture

- Applications using PIC Controller : A Review,” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 6, no. 04, pp. 638–641, 2017, [Online]. Available: www.ijert.org.
- [63] N. J. Chapungo and O. Postolache, “Sensors and Communication Protocols for Precision Agriculture,” *12th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng. ATEE 2021*, 2021, doi: 10.1109/ATEE52255.2021.9425126.
- [64] “Mida los nutrientes del suelo con el sensor Arduino y Soil NPK.” <https://how2electronics.com/measure-soil-nutrient-using-arduino-soil-npk-sensor/> (accessed Jul. 27, 2021).
- [65] L. B. CASTRO, “SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO TIPO SONDA CON SISTEMA DE MONITOREO PARA APLICACIONES EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN,” vol. 85, no. 1, pp. 2071–2079, 2016.
- [66] A. Yadav, “Classification and Applications of Humidity Sensors: A Review,” *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 4, pp. 3686–3699, 2018, doi: 10.22214/ijraset.2018.4616.
- [67] A. M. P. Manual, “Digital Temperature and Humidity Sensor AM2305,” pp. 1–4, 2016, [Online]. Available: [http://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Digital_Temperature_and_Humidity_sensor_\(With_Stainless_Steel_Probe\)_\(SKU:SEN0148\)](http://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Digital_Temperature_and_Humidity_sensor_(With_Stainless_Steel_Probe)_(SKU:SEN0148)).
- [68] H. Sharma, A. Haque, and Z. A. Jaffery, “An efficient solar energy harvesting system for wireless sensor nodes,” *2018 2nd IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2018*, no. July, pp. 461–464, 2018, doi: 10.1109/ICPEICES.2018.8897434.
- [69] “Solar Photovoltaic System Design Basics,” *Off. Energy Effic. Renew. Energy*, 2013, [Online]. Available: <https://energy.gov/eere/energybasics/articles/solar-photovoltaic-system-design-basics>.
- [70] “Tipos de energías renovables - Factorenergia.” <https://www.factorenergia.com/es/blog/noticias/energias-renovables-caracteristicas-tipos-nuevos-retos/> (accessed Nov. 11, 2021).
- [71] “¿Qué es un regulador de carga? | Blog AutoSolar.” <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/que-es-un-regulador-de-carga> (accessed Nov. 11, 2021).
- [72] “Radio Chipsets & Modules | Sigfox build.” <https://build.sigfox.com/radio-chipsets> (accessed Nov. 09, 2021).
- [73] N. Zelanda and H. Kong, “WSSFM11R2DAT : MODULO LPWAN SIGFOX DUAL RC2 + RC4.”
- [74] G. L. y S. Margni, “Funcionamiento de microcontroladores,” 2015, [Online]. Available: <http://www.fing.edu.uy/~pgconrob%0Apgconrob@fing.edu.uy%0A>.
- [75] C. Mcu and A. Analog, “SAM D21 / DA1 Family,” 2021.
- [76] M. E. Cambroner Piqueras, “Modelado y Análisis Formal del Protocolo de Comunicación de Sensores One Wire,” p. 35, 2017.
- [77] R. Mendoza and A. Espinoza, “Guía Técnica para muestreo de suelos.,” *Univ. Nac. Agrar.*, pp. 1–56, 2017, [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/151729876.pdf%0Ahttp://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>.
- [78] C. C. Anterior *et al.*, “Muestreo de Suelos y preparación de muestras Muestreo de Suelos y preparación de muestras,” 2012.

