

El caficultor digital: una apuesta por la incursión de la tecnología en el agro

The digital coffee farmer a bet for the incursion of technology in agriculture

Recibido: 24 de Octubre de 2024

Aprobado: 18 de Diciembre de 2024

Cómo citar: W. Ruiz-Martinez, J. A. Arévalo, J. E. Herrera-Rubio, C. Osimani, "El caficultor digital: una apuesta por la incursión de la tecnología en el agro", *Mundo FESC*, VOL. 15, n. 31, 2025. DOI: 10.61799/2216-0388.1444

William Ruiz-Martinez^{1*}



Ingeniero de sistemas de la Universidad Autónoma de Colombia, especialista en gerencia de proyectos de la Universidad Autónoma de Colombia, Magister en Tics de la Universidad Internacional de Puerto Rico (UNINI). Docente tiempo completo Corporación universitaria Iberoamericana, correo electrónico: william.ruiz@ibero.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9617-9348> CVLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001101773

Jaime Andrés Arévalo²



Ingeniero agrónomo Universidad Nacional de Colombia, MBA - Alta gerencia- Universidad EAN. Docente medio tiempo Corporación universitaria Iberoamericana, correo electrónico: jaime.arevalo@ibero.edu.co

Jorge Enrique Herrera-Rubio³



Ingeniero eléctrico universidad de Pamplona, Especialista en Telecomunicaciones UAB, Magister en Electrónica Universidad experimental de Táchira, Doctor en gestión de ciencia y tecnología Universidad Privada Dr. Rafael Belloso Chacín. Docente tiempo completo Universidad de Pamplona, correo electrónico: jherrera@unipamplona.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9661-5450> CVLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001336694

Cesar Osimani⁵



Ingeniero de telecomunicaciones Universidad Blas Pascal (Córdoba -Argentina), Doctorado (C) en ciencias de las ingeniería Universidad nacional de Córdoba (Argentina), correo electrónico: cosimani@ubp.edu.ar ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0579-6231?lang=en>

***Autor para correspondencia:**

william.ruiz@ibero.edu.co



El caficultor digital: una apuesta por la incursión de la tecnología en el agro

Resumen

La realidad del agro colombiano en relación a la difusión y adopción de las tecnologías de la información y la comunicación es casi inexistente, por lo que actualmente procesos productivos relacionados con cultivos como el café, se siguen realizando en forma empírica o manual; Es por ello que en el presente trabajo presentamos un acercamiento a lo que hemos denominado el "Caficultor digital", donde se busca que los caficultores de la región puedan hacer uso de la tecnología para mejorar las condiciones de sus cultivos, es por ello que nos enfocamos por las redes inalámbricas de sensores (WSN) permitiendo que el caficultor a través del uso de esta herramienta se encuentre en capacidad de monitorear las variables agroambientales más importantes para su cultivo y mediante la aplicación de técnicas de aprendizaje automático se puedan determinar la incidencia de dichas variables en la proyección de futuras cosechas o en la producción esperada.

Palabras clave: Agricultura de precisión, Internet de las cosas, aprendizaje de máquina, cultivos de café, redes inalámbricas de sensores.

The digital coffee farmer a bet for the incursion of technology in agriculture

Abstract

The reality of Colombian agriculture in relation to the dissemination and adoption of information and communication technologies is almost non-existent, which is why currently productive processes related to crops such as coffee continue to be carried out empirically or manually; That is why in the present work we present an approach to what we have called the "Digital Coffee Farmer", where it is sought that coffee farmers in the region can make use of technology to improve the conditions of their crops, which is why we focus on wireless sensor networks (WSN) allowing the coffee farmer, through the use of this tool, to be able to monitor the most important agro-environmental variables for his crop and by applying automatic learning techniques to determine the incidence of these variables in the projection of future harvests or in the expected production.

Keywords: Precision agriculture, Internet of things, machine learning, coffee crops, wireless sensor networks.

Introducción

En los tiempos actuales donde la transformación digital empieza a ser parte importante de las empresas y en general de todos los sectores productivos, entre ellos uno de los más importantes y el cual es objeto de estudio del presente documento es sin duda el agro; Tomando como referentes los cuestionamientos anteriores podemos afirmar que tecnologías como el IdC (Internet de las cosas) y la analítica de datos se presentan como alternativas para impactar de forma positiva en el modelo de negocio de las organizaciones de sectores productivos como la agricultura. La recolección y adquisición de datos que reflejen el comportamiento de los distintos procesos en relación con la siembra, recolección y producción, aun son llevados por los caficultores en forma manual o muchas veces ni siquiera existen porque se manejan de forma empírica teniendo como referente el conocimiento ancestral del agricultor. Es por ello que el elegir soluciones e implementaciones de IdC (Internet de las cosas) se presentan como una opción acorde a esta necesidad. Hoy en día podemos asegurar que, en el sector de la agricultura las soluciones de IdC se han convertido en una estrategia ideal para la adquisición y recolección de datos sobre cultivos, aplicación de fungicidas, pesticidas y abonos entre otros. Esta creciente necesidad promueve el uso de tecnologías que permitan la instalación de sensores, para la recolección permanente de datos, combinando mediciones muy precisas y variadas, con valores en distintas magnitudes y formatos. Es por ello que, al contar con un elevado volumen de datos, se requiere de tecnologías que recolecten, preparen y procesen estos datos en forma adecuada, para así obtener información que aporte valor y soporte a la toma de decisiones para el agricultor y propender por minimizar la inversión y maximizar la ganancia sin sacrificar la calidad. De acuerdo con [1], la agricultura moderna ha sido transformada mediante el empleo de máquinas agrícolas inteligentes, control de plagas inteligentes, drones para monitorizar los cultivos y el uso de estaciones que captan variables agroclimáticas que han permitido la recolección y adquisición de grandes cantidades de datos críticos a mínimos costos, lo que bien representa un proceso agrícola más enfocado a analizar e interpretar la información para potenciar sus procesos hacia la productividad y la eficiencia. Por otra parte, el tiempo es cada vez más impredecible, lo que complica el control de las plagas, la aplicación de abonos y fungicidas y por lo tanto el control de las variables agroambientales de todo tipo de cultivos.

Las implementaciones de soluciones IdC (Internet de las cosas), se pueden encargar de brindar ayuda para alcanzar un mejor aprovechamiento y rendimiento del suelo, además de minimizar el detrimento del medio ambiente. Desde otro punto de vista la implementación adecuada de IdC (Internet de las cosas) permite disponer de información valiosa para tomar decisiones que requieren del análisis de diversos aspectos, entre otros: una correcta topología de red, sensores adecuados, conectividad óptima, sistema de almacenamiento, estrategias para corregir desviaciones en los datos según [2], métodos de procesamiento y análisis de información, algoritmos de Aprendizaje de maquina

(Machine Learning), además de métodos para realizar predicciones [3]. Todos estos avances en cuanto a sensorización y el uso de las nuevas tecnologías en la agricultura enfocadas en mejorar la producción en relación a calidad y cantidad permiten la reducción de costos y ayudan a minimizar el impacto ambiental y dar lugar al concepto de agricultura inteligente. Es por ello que un agricultor requiere tomar decisiones acertadas y para ello, necesita de información precisa y confiable. El escenario ideal es que el agricultor disponga de un Dashboard (Tablero informativo) con la adecuada cantidad de información posible, estos datos serán indispensables para tomar decisiones acertadas en base a su propia experiencia, decisiones que posiblemente un algoritmo no esté en capacidad de tomar, o tal vez porque el propio agricultor teme que automatizar esa toma de decisiones, ya que son aspectos críticos que influyen en la estrategia de su negocio. Llegamos al punto donde la principal necesidad de un agricultor sea la de conseguir la mayor cantidad posible de su producto con la máxima calidad. Si nos colocamos en el escenario de un cafetal, un caficultor desea obtener la máxima producción de granos de café de la mejor calidad, sabiendo que esto influirá necesariamente en una mejor comercialización de su producto.

Es valioso para el caficultor poder disponer de aquella información que le permita decidir sobre los posibles cambios en hipotéticos escenarios que debe implementar en las distintas fases del cultivo, de forma tal que se pueda maximizar la producción y por tanto la calidad del grano. En este artículo se propone el diseño de una red experimental IdC (Internet de las cosas) que le permita al caficultor recolectar información sobre las variables agroambientales de un cultivo de café en la finca "Las Acacias", del municipio de Salento (Quindío), de forma tal que se pueda efectuar la recolección de datos sobre el cultivo, y se puedan tomar decisiones sobre los parámetros presentados y sus posibles desviaciones con respecto a los valores normales, asimismo el poder maximizar la producción de café acorde con los parámetros de calidad que el mercado y el caficultor demanda según los estándares nacionales e internacionales.

Materiales y Métodos

En esta sección se presenta la metodología para la elección de la tecnología IdC (Internet de las cosas) que permita al caficultor adquirir los datos relevantes sobre el cultivo del café. Se relaciona información obtenida directamente con el propietario y trabajadores de campo en la finca "Las Acacias", las cuales proporcionan una perspectiva valiosa sobre los desafíos y oportunidades en relación con el cultivo del café. Estos datos y conocimientos complementan el análisis y guían hacia una solución integral en torno a la caficultura. La combinación entre tecnología y conocimiento empírico buscan mejorar la eficiencia y calidad de los cultivos, permitiendo pronosticar un futuro prometedor para el sector cafetalero.

Metodología de la investigación

La investigación se enmarca como aplicada con un enfoque experimental y descriptivo,

ya que buscamos encontrar una forma más eficiente de recolectar y almacenar datos sobre las variables agroambientales en un cultivo de café con la finalidad de disponer de información real y precisa en cada momento con el objetivo de optimizar el proceso de toma de decisiones ante comportamientos anómalos o inesperados en determinados momentos o etapas del cultivo.

Metodología propuesta para la red experimental de sensores IdC

El proceso de la implementación de un sistema de monitoreo y control con tecnología IoT para un cultivo de café se establece a través de la siguiente metodología estándar, ya sea a, nivel industrial o experimental como se describe en la Fig. 1 distribuida en las siguientes fases según [4].

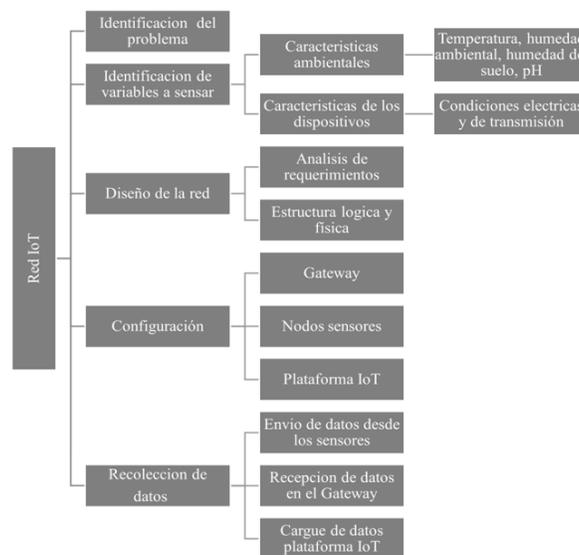


Figura 1. Metodología propuesta para la red de sensores

A continuación, se hace una explicación más detallada de la metodología propuesta para la red de sensores.

Identificación del problema

Es el trabajo de campo que se realiza para caracterizar el ambiente donde se encuentra el cultivo de café con la finalidad de identificar las variables que se van a parametrizar [5], para la obtención de la data que va a ser procesada, analizada y demás procesos, en esta etapa se pueden utilizar instrumentos como observación directa, entrevistas a caficultores, formato de encuestas, técnicas bibliométricas e investigación documental según lo expuesto por [6] para representar la solución al problema.

Identificación de variables a sensor

En Esta etapa se deben identificar las variables agroambientales más importantes para el cultivo que se desea sensorizar y resolver mediante una conversión análoga a formato digital los datos que son recolectados a través de los diferentes tipos de sensores, en este caso específico se busca identificar los aspectos críticos que deben ser monitoreados y controlados en un cafetal a través del uso de la tecnología IdC (Internet de las cosas) [7] como es el caso de: temperatura y humedad ambiental, temperatura y humedad del suelo, índice pluviométrico, la luminosidad, la calidad del agua y características del suelo entre otros según lo expuesto por [8].

Diseño de la red

En esta fase se lleva a cabo como primera actividad el análisis de requerimientos; el cual nos permite establecer la cantidad de nodos sensores a implementar, la ubicación del Gateway, la ubicación de los lotes de café a sensorizar, así como también determinar la variedad del cafetal, por otra parte se determina el diseño lógico y físico de la red de sensores, en la parte lógica se establece el diseño de la red de acuerdo a la topología seleccionada, estrella en este caso por ser la topología más eficiente y más rápida de implementar. a continuación, se procederá con el diseño físico donde se ubicarán cada uno de los dispositivos en su lugar designado.

De igual forma dentro del entorno a analizar se debe tener en cuenta: el tipo de suelo, clima, variedades de café, control de plagas y enfermedades, métodos de riego, cosecha y procesamiento, condiciones estas que se deben monitorear y controlar para garantizar que el café resultante sea de buena calidad [9]. Para el caso de los cultivos se puede utilizar una matriz de decisión para evaluar y comparar diferentes opciones en función de los criterios presentados por [10], cómo podemos observarlo en el ejemplo de la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios de selección de sensores inalámbricos

Criterio de evaluación	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
Precisión	2	3	4	5
Fiabilidad	5	4	3	2
Costo	2	3	4	5
Facilidad de configuración	4	4	4	5
Peso significativo	13	10	15	17

Selección y configuración de los sensores

Se consideran aspectos técnicos de los componentes electrónicos como: rango de medición, exactitud, precio, consumo energético, entre otros; permitiendo así seleccionar los dispositivos que mejor se adapten a los requerimientos para lograr un funcionamiento óptimo e integral. En la tabla II podemos apreciar con más claridad las principales características técnicas de los dispositivos seleccionados para el proyecto.

Tabla II. Características técnicas de nodos sensores y Gateway

Cantidad	Tipo de dispositivo	Marca
1	Gateway LoRaWAN Pico LG308N	Dragino
2	Sensores de temperatura y humedad ambiental LoRaWAN LSN50v2-S31	Dragino
2	Sensores de humedad del suelo y EC con LoRaWAN-LSE01-AU915	Dragino

Plataforma IoT

Es la infraestructura Backend que permiten la recolección y el análisis de datos en tiempo real, las más populares son: Azure IoT, AWS IoT, Google Cloud IoT o en su defecto la implementación de un servidor local o Web propietario. De acuerdo con [11], Para que una plataforma IoT pueda considerarse como opción dentro del desarrollo de un producto de este tipo, esta deberá poder gestionar de manera solvente la información, esto quiere decir:

- Ser capaz de recoger la información enviada por el dispositivo.
- Ser capaz de almacenar y/o analizar la información.
- Ser capaz de representar o exponer la información de forma que el usuario pueda hacer uso de esta.

Por lo tanto, una plataforma IoT debería estar constituida, al menos, por los siguientes módulos o bloques [11]:

- **Conectividad y normalización:** Permitir la conexión mediante protocolos, y la recepción de diferentes formatos de datos en una interfaz que garantice la precisa transmisión de datos y la interacción con los dispositivos.
- **Almacenamiento de datos:** Los datos deben ser almacenados para un posterior análisis, representación o integración con una herramienta propia o de terceros.
- **Procesamiento y gestión de la acción:** Los datos deben ser procesados para, según un conjunto de normas reglas o disparadores, ejecutar acciones dependiendo del valor resultante.
- **Analítica y Visualización:** Los datos deben de poder ser analizados y transformados, para luego poder ser visualizados mediante gráficos o expuestos en APIs para aplicaciones externas a la plataforma. En la figura 2. Podemos apreciar la arquitectura de una plataforma IoT.

Recolección de datos

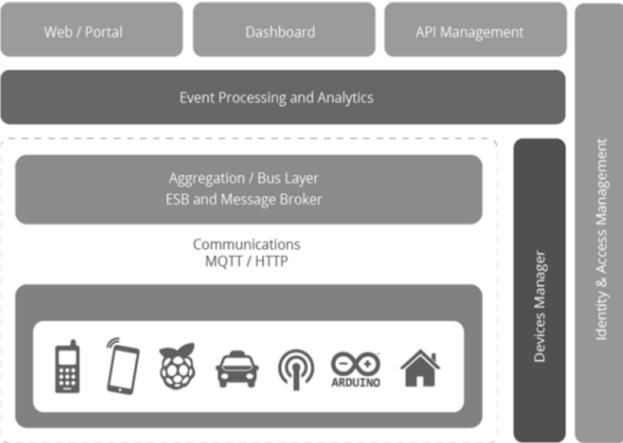


Figura 2. Arquitectura de una plataforma IoT (Fuente: [12])

El primer paso, es el proceso de recolección de datos a través de los nodos sensores instalados en el cultivo de café y que recolectaran los datos sobre las diferentes variables agroambientales como: Temperatura y humedad ambiental, temperatura, humedad y conductividad eléctrica del suelo, cuyo monitoreo es indispensable y donde se hace presente el término "Agricultura de precisión" según [12]. Como Segundo paso los datos son enviados en forma remota a la pasarela o Gateway [13], como tercer paso los datos son conmutados desde el Gateway al router y de este dispositivo los datos son enviados a una plataforma IoT en la nube cuya infraestructura puede ser diferente segun el tipo de tecnología y cantidad de servicios de control y monitoreo que sean necesarios, los componentes base lo conforman: los dispositivos IoT, El Gateway, la red de comunicaciones inalámbrica y los protocolos de comunicación a utilizar [14], en la figura 3. Podemos apreciar un diagrama de flujo simplificado del proceso anteriormente descrito.

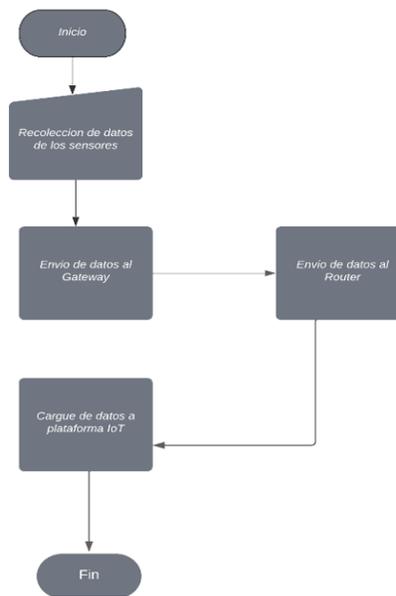


Figura 3. Proceso de recolección de datos

Procesamiento de los datos

Una vez que los datos son enviados a la plataforma IoT desde el router estos empiezan a ser almacenados teniendo en cuenta la información enviada por cada uno de los sensores que esta recolectando datos sobre una variable agroambiental en especial [15]. En la figura 4. podemos apreciar una medición arrojada por los sensores y almacenada en la plataforma IoT en mención.

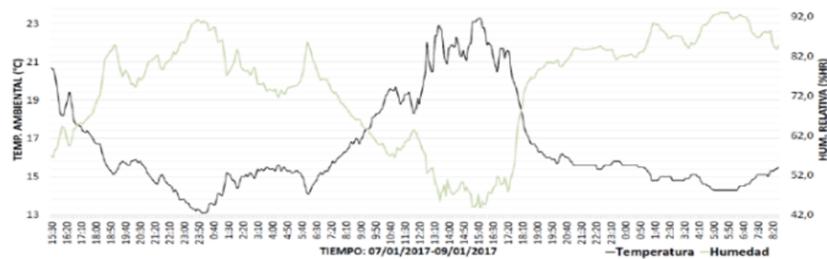


Figura 4. Monitoreo de datos en plataforma IoT (Fuente: [15])

Análisis de datos

Los datos recolectados por los sensores deben ser analizados con la finalidad de detectar patrones, tendencias y comportamientos que puedan ayudar a mejorar las características más importantes de un cultivo, entre ellos tenemos: la producción y calidad del café, épocas para abonar más idóneas, aplicación de funguicidas y agronutrientes entre otros; Para ello se hace uso de técnicas de inteligencia artificial como es el caso de aprendizaje automático. Desde el punto de vista de las herramientas disponibles para el análisis de datos se tienen: Apache Hadoop: Framework de procesamiento distribuido

de grandes conjuntos de datos; Apache Spark: plataforma para el procesamiento de datos en tiempo real; Tableau: herramienta gráfica para analizar grandes conjuntos de datos; Microsoft Power BI: facilita la visualización de datos para graficar y visualizar datos; KNIME: plataforma de código abierto que puede manejar el análisis de grandes conjuntos de datos; MATLAB: Aplicación para el análisis de datos con técnicas de aprendizaje automático, como también Rapid Miner y el lenguaje R de acuerdo con lo presentado por [16].

Para el análisis de datos se debe aplicar el proceso ETL (extracción, transformación y carga de datos), teniendo en cuenta que los datos arrojados por los sensores son del tipo no estructurados, es decir que de acuerdo con [17], estos datos no tienen un modelo predefinido que lo represente o que en caso de poseer uno sea fácilmente utilizable por un programa de computadora. Retomando lo anterior, el proceso ETL, de acuerdo con [18], se encarga de extraer datos de las fuentes de información, refuerza la calidad y consistencia de estos y finalmente entrega los datos a un repositorio adecuado (DataWarehouse), estos ya transformados en una presentación y formato adecuado pueden ser utilizados en el proceso de toma de decisiones. En el caso de nuestra propuesta la idea del proceso a realizar la podemos ver mejor plasmada en la figura 5.

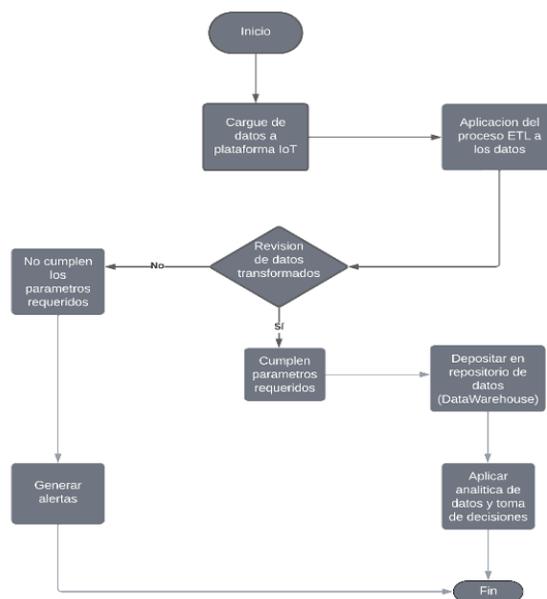


Figura 5. Proceso de cargue, transformación y posterior análisis de datos

Componentes de la solución planteada

De acuerdo con [19], las redes inalámbricas de sensores (WSN) se caracterizan porque los nodos están conformados por microcontroladores que tienen una baja capacidad de procesamiento, operan con baterías, a bajas velocidades de transmisión y son diseñadas para estar operativas por largos períodos de tiempo. Un sistema WSN incorpora un Gateway o puerta de enlace, que provee conectividad inalámbrica como complemento

de redes cableadas y nodos distribuidos. El protocolo inalámbrico que seleccione depende en los requerimientos de la aplicación. Algunos de los estándares disponibles incluyen radios de 2.4 GHz basados en los estándares IEEE 802.15.4 o IEEE 802.11 (Wifi) o radios propietarios, los cuales son regularmente de 900 MHz. La arquitectura que se ha propuesto para el desarrollo del sistema de la red de sensores inalámbricos (WSN), se encuentra compuesta por 2 nodos sensores y un Gateway con las siguientes características técnicas y se puede visualizar en la tabla Nro. 3:

Tabla III. Componentes de la red inalámbrica de sensores (WSN)

Dispositivo y cantidad	Características básicas	Imagen
2 [Sensores de temperatura y humedad ambiental LoRaWAN LSN50v2-S31]	<ul style="list-style-type: none"> - Rango de temperatura: -40 a + 80°C - Exactitud: ±0.2 @ 0-90°C - Rango de humedad: 0 ~ 99.9% RH - Exactitud: ± 2%RH (0 ~ 100%RH) - LoRaWAN v1.0.3 Class A - Banda: AU915 	
2 [Sensores de humedad del suelo y EC con LoRaWAN- LSE01-AU915]	<ul style="list-style-type: none"> - Bandas: CN470/EU433/KR920/US915 - LoRaWAN 1.0.3 Class A - Monitorea la humedad y temperatura del suelo - Monitorea la conductividad eléctrica del suelo - Cubierta a prueba de agua IP66 	
1 Gateway [LoRaWAN PicoLG308 N]	<ul style="list-style-type: none"> - 10M/100M RJ45 Ports x 2 - Wifi : 802.11 b/g/n - LoRaWAN Wireless - Frequency Band: 2.4 ~ 2.462GHz - Power Input: 12 V DC, 2 A 	

Arquitectura de la red inalámbrica de sensores

La arquitectura que se ha propuesto para el desarrollo del sistema de la red de sensores inalámbricos (WSN) [20], se encuentra compuesta por 2 nodos sensores compuestos cada uno de ellos por 1 sensor de temperatura y humedad ambiental LoRaWAN LSN50v2-S31 y un sensor de humedad y temperatura del suelo y EC con LoRaWAN- LSE01-AU915 , cada uno de estos sensores cuenta con su propio módulo de comunicación el cual enviara los datos recolectados al Gateway. En la figura 6. Se puede apreciar con más claridad la arquitectura propuesta.

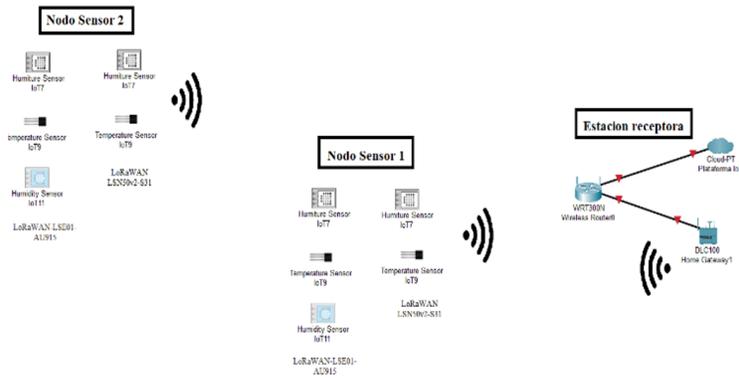


Figura 6. Arquitectura propuesta para la red WSN

El nodo 1 se encuentra a una distancia de 85 Metros con relación al Gateway y se encuentra sembrado con un cultivo de café con variedad Castilla, el segundo nodo se encuentra a una distancia de 250 metros y se encuentra sembrado igualmente con un lote de café de variedad Castilla, en la figura 7. Se puede apreciar con más claridad la ubicación tanto de los nodos sensores como del Gateway y router.

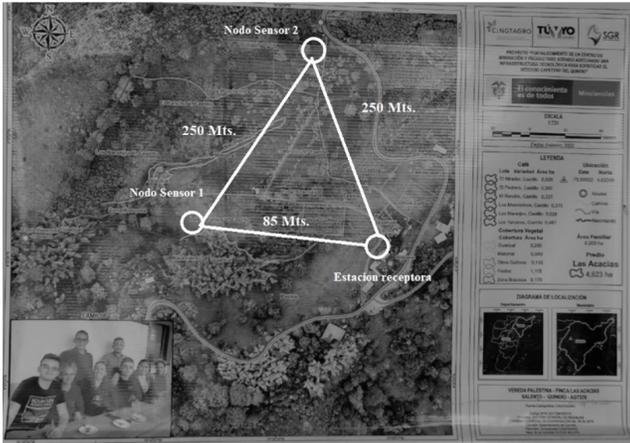


Figura 7. Ubicación de los nodos sensores en la red WSN propuesta

Características del cultivo a monitorear

A continuación, en la tabla IV, presentamos la ubicación y otros datos de interés sobre la finca cafetera donde se realizará el estudio.

Tabla IV. Ubicación y otros datos de interés de la finca objeto de estudio

Características	Descripción
Nombre de la finca:	Las Acacias
Ubicación:	Vereda Palestina- Salento (Quindío) Kmt 3.
Extensión total en Has	4.623
Tipos de café:	Variedad Castilla y variedad Cenicafe.
Temperatura:	Entre 14° y 23°

Altura	1.800 m.s.n.
Ubicación Este:	-75.58922
Ubicación Norte:	4.62335

El sistema productivo de la finca se enfoca en la producción de café, turismo, ganadería, especie menores (conejos y gallinas) y elaboración de compostaje. La finca cuenta con 20.000 árboles productivos, distribuidos en 4,5 hectáreas, con una distancia de siembra de 1,20 mts. entre árboles y 2,0 mts. entre calles. El 90% de la finca tiene una topografía montañosa. Las variedades sembradas son: Castilla y Cenicafé. Los árboles de café en la finca empiezan a producir a los tres años de sembrado, a diferencia del café sembrado a menos altura que empieza a producir a los dos años. El caficultor en esta finca no lleva un registro manual en relación con las condiciones climáticas, aunque conoce muy bien los efectos que presentan los cambios de temperatura, al pasar de temperaturas altas por el día a temperaturas muy bajas por las noches, generando quemaduras en las hojas, como se observa en la Fig. 8. Cuando el árbol sufre esta quemaduras y que retrasa el rebrote dos meses, afectando directamente la producción del cultivo.

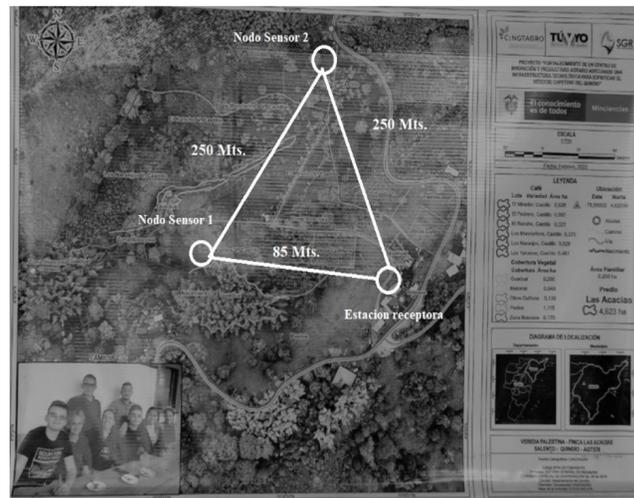


Figura 8. Quemaduras en las hojas de un árbol de café(Fuente: Finca las Acacias)

Las épocas de cosecha donde se presenta la mayor parte de la producción se presentan entre abril y junio. En esta finca hacen zoca (renovación del tronco del árbol del café) cada 8 años. El caficultor no lleva registro de su producción. Es muy importante para un caficultor conocer el rendimiento o fertilidad del suelo, y para ello es necesario realizar los estudios correspondientes para mantener niveles adecuados de nutrimentos para una óptima producción, incrementar la resistencia de las plantas y mejorar la calidad de las cosechas. En la Finca Las Acacias se realizan estudios del suelo, y se muestran en la Tabla V.

Tabla V. Estudio del suelo realizado en la Finca las Acacias

Determinación	Método	Resultado	Rango adecuado
pH	Potenciómetro en agua 1:1	5.2	Entre 5.0 y 5.5
Materia Orgánica	Walkley-Black -Colorimétrico	10.2%	Mayor de 8.0

Fósforo (P)	Bray II - Colorimétrico	11 mg/Kg	Mayor de 30
Potasio (K)	Acetato de amonio-Absorción Atómica	0.29 Cmolc/Kg	Mayor de 0.40
Magnesio (Mg)	Acetato de amonio-Absorción Atómica	0.3 Cmolc/Kg	Mayor de 0.9
Calcio (Ca)	Acetato de amonio-Absorción Atómica	2.1 Cmolc/Kg	Mayor de 3.0
Azufre (S)	Fosfato de calcio - Turbidimétrico	No solicitado	Mayor de 12
Aluminio (Al)	Yuan - Absorción Atómica	0.0 Cmolc/Kg	Mayor de 1.0
Textura	Al tacto	Franco-Arenoso	

Leyenda: Estos estudios del suelo tienen las variables químicas, las cuales se pueden medir cada uno o dos años, y la variables climáticas que se tienen que medir todos los días.

El café y sus variables agroambientales

Existen más de 50 factores que afectan el crecimiento del cultivo y el potencial de producción, algunos de ellos los podemos apreciar en la figura 9.

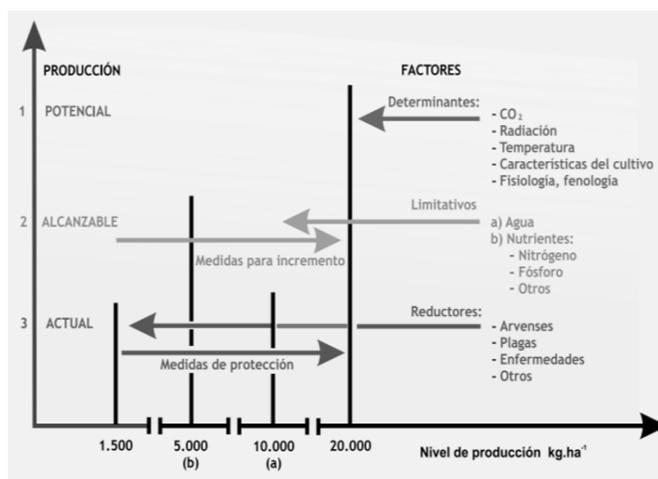


Figura 9. Factores que inciden en el crecimiento y producción del café (Fuente: [21])

De acuerdo con lo expuesto por [21], pretendemos dar a conocer las características de algunas variables de tipo agroambiental que de un modo u otro inciden en la siembra y cultivo del café y posteriormente en su futura producción, veamos cada una de ellas a continuación:

Variable	Condiciones óptimas
Temperatura ambiental	La zona óptima para el cultivo del café se encuentra entre 19° y 21.5° centígrados. En climas fríos donde la temperatura media es menor de 19° centígrados, las variedades de café se desarrollan menos, su producción es menor y la cosecha se distribuye a lo largo del año. En climas calientes, donde la temperatura media es mayor de 21.5° centígrados, la vida productiva del cafeto es más corta, la cosecha más temprana y concentrada. El ataque de la roya es más severo y se incrementan plagas como la broca y el minador.

Humedad relativa	Es un componente del clima que mide la relación entre un aire completamente saturado de agua y la cantidad de vapor de agua en un momento determinado; la humedad relativa se expresa en términos de porcentaje%. El café es una planta que crece bien en ambientes con humedad superior al 75% sin llegar a la saturación total; la cosecha en regiones brasileñas se da en los meses de más baja humedad relativa, lo cual facilita el manipulado del grano.
Humedad del suelo	La humedad del suelo está en función de la distribución de la lluvia dentro del cultivo, de la densidad de siembra y distribución de su área foliar, de la demanda evaporativa de la atmósfera, de la pendiente del terreno y de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo. Actualmente, se dispone de una variedad de técnicas que permiten medir la humedad del suelo directamente en el campo, sin necesidad de tomar muestras de suelo y alterar sus propiedades.
Brillo solar y nubosidad	Colombia se encuentra cerca de la línea ecuatorial y, por tanto, recibe abundante radiación solar durante todo el año. Los valores máximos que llegan al tope de la atmósfera se presentan en marzo y septiembre, y están próximos a 432 Wm ⁻² . Los mínimos se observan entre diciembre y enero, y están próximos a 384 Wm ⁻² . Por efectos del relieve hay regiones más expuestas a los rayos del sol que otras. En regiones de montaña, por restricción del horizonte, el número efectivo de horas de brillo solar diario puede disminuir en dos o más horas (por ejemplo, regiones cafeteras situadas en valles profundos).

Análisis de la situación

En esta sección se realiza la conjunción de lo expuesto anteriormente. Por un lado, la metodología para la implementación de una solución IoT con la finalidad de recolectar datos sobre un conjunto de variables agroambientales, y por otra parte establecer que la principal contribución de este artículo se encuentra relacionada con la adopción de tecnologías como el IdC (Internet de las cosas) para la recolección de los datos y la posterior creación de un modelo de Machine Learning que simule la inteligencia del caficultor humano. Con este modelo sería posible anticiparse a los sucesos y realizar las acciones de prevención y precaución para que ciertos eventos no deseados influyan negativamente sobre la producción del café, o por lo menos poder minimizar su impacto.

Modelo de aprendizaje propuesto

De acuerdo con lo presentado por [22], "la inteligencia artificial ha sido empleada para la solución de problemas matemáticos bastante complejos". Pero en realidad el verdadero reto para esta ciencia consiste en manejar tareas sencillas, labores que los humanos efectúan de forma automática, pero que en contexto resultan difíciles de explicar en detalle; como las acciones generadas por intuición, el reconocimiento de rostros, la interpretación de cierto tipo de gestos o las costumbres que presenta un grupo poblacional, entre otros ejemplos. Las redes neuronales artificiales son en realidad un modelo computacional que incorpora modelos de aprendizaje profundo para cumplir tareas como clasificación y localización de objetos en imágenes. Las redes neuronales artificiales se asemejan al funcionamiento del cerebro, ya que son unidades de memoria básicas en las cuales se almacena un tipo de información y están interconectadas con otras neuronas para poder hacer un procesamiento por medio del flujo de señales entre ellas. Estas señales funcionan como un sistema de conexiones, las cuales llevan información externa a las neuronas y también entre las neuronas que están en las diferentes capas. Los modelos neuronales pueden ser de una sola neurona o la unión de varias neuronas en varias capas [23].

En base a lo anteriormente expuesto concluimos que mediante la creación de un modelo

de red neuronal, podríamos replicar parte de las decisiones que toma un caficultor humano en su propia finca. Basados en una serie de entrevistas con el caficultor dueño de la finca, colaboradores y trabajadores del lugar, pudimos obtener la información en la cual basan sus decisiones, cuáles son sus métodos de medición, de qué manera toma acciones para la corrección de anomalías, cómo realizan sus estimaciones, y finalmente de qué manera seleccionan y clasifican los granos de café. Dicho de otra manera, en base a las entrevistas y visitas a las fincas, se obtuvo información de gran valor que nos permitirá sintetizar la experiencia del caficultor para llevar adelante el proceso de producción del café. Asumimos que un caficultor experto tiene la información más valiosa y nadie mejor que él puede llevar adelante los procesos productivos en relación con los cafetales en la finca.

Las decisiones que él puede tomar son las más adecuadas y oportunas, con la limitación de que no dispone de grandes volúmenes de datos y no los puede tomar de forma continua. Es decir, hablamos de un caficultor que no posee sensores de medición automáticos y concentradores de datos, y que a pesar de ello realiza un muy buen análisis de la información para tomar las acciones durante el cultivo. Por lo tanto, la inteligencia humana de ese caficultor es sumamente valiosa.

En esta propuesta, queremos replicar esa inteligencia en un modelo que pueda estimar las acciones, pero basado en grandes volúmenes de datos. A la hora de construir un modelo es necesario disponer de un Dataset(Conjunto de datos), el cual está compuesto por determinadas variables de entrada y los resultados obtenidos. Todo esto pensando en una red neuronal artificial. La salida en nuestra propuesta es la calidad del café.

Este dato es obtenido luego de las entrevistas y centrado en una finca y en la clasificación particular que realiza el caficultor entrevistado. De nuestras entrevistas, se requirió guiar al caficultor para que nos pueda clasificar el café obtenido en su finca y que esta dato sirva para confeccionar el Dataset (conjunto de datos) propuesto. Dicha clasificación es: Café descartado, Café suave económico, Café suave premium, Café negro económico, Café negro medio, Café negro premium. De las distintas épocas de cultivo, dependiendo el clima que se da en todo el proceso, el caficultor puede predecir con 3 meses de anticipación que el café que logrará en la próxima cosecha no será Café negro premium, sino que sólo podrá alcanzar Café negro económico con seguridad y si toma las decisiones adecuadas podrá también cosechar Café negro medio. Nuestra propuesta intenta llevar a la inteligencia artificial basado en las redes neuronales artificiales. Por otro lado, para la confección del Dataset necesitamos las variables de entrada, aquellas variables que el propio caficultor utiliza para tomar las decisiones. Estas variables son: pH medido una vez por semana, precipitaciones mensuales, promedio de temperatura diaria. Basado en esta información extraída de las entrevistas, se decidirá colocar los sensores para medir estas variables, con la diferencia que se realizará una medición de manera continua. El caficultor también nos indica sus predicciones durante todo el proceso de cultivo. Poder obtener esta información requirió de una comunicación permanente con el caficultor. Con este modelo se desean realizar las predicciones sobre

la calidad del café en base a los datos obtenidos por una red IoT. Esto permitirá tomar las medidas adecuadas para corregir las desviaciones que no sean deseadas. Haciendo un paralelismo con la realidad del caficultor, su experiencia le permite en ciertos momentos corregir las desviaciones utilizando fertilizantes y nutrientes en la cantidad que el propio caficultor determina. Justamente estas son las decisiones que toma el caficultor durante la producción del café. Siempre sabiendo que la información que el caficultor dispone es limitada, quizás por falta de sensorización en la finca, es decir, el caficultor hace lo que puede con la información que tiene. Sin embargo, basados en las entrevistas, y la comunicación permanente con el caficultor, también pudimos recabar la información de los fertilizantes y nutrientes que se utilizaron, en qué cantidades y en qué momentos. Esta información también es muy valiosa a la hora de confeccionar la arquitectura de la red neuronal artificial para realizar las predicciones.

Resultados esperados

Se pudo determinar que los módulos de medición de temperatura y humedad ambiental LoRaWAN LSN50v2-S31 y de temperatura, humedad y conductividad del suelo LoRaWAN-LSE01-AU915 no necesitan de suministro de energía eléctrica ya que cuenta internamente con una batería de Li-SOCI2 8500mAh la cual garantiza una medición de datos en largos periodos de tiempo.

Se desarrollaron pruebas de distancia para determinar el alcance máximo de los módulos inalámbricos LoRaWAN LSN50v2-S31 y LoRaWAN-LSE01-AU915 en relación con los datos enviados al Gateway LoRaWAN PicoLG308N, de modo tal que se garantizara la transmisión confiable de datos sin pérdida y atenuación de la señal desde los nodos sensores hacia la estación receptora encontrando que el alcance máximo está dentro del límite establecido que es de 2 kilómetros en campo abierto. En la figura 10. podemos apreciar el cálculo de evaluación de interferencias por difracción entre el nodo sensor 1 el cual se encuentra a 85 metros de la estación receptora (Gateway) en una banda de operación de 915 MHz.

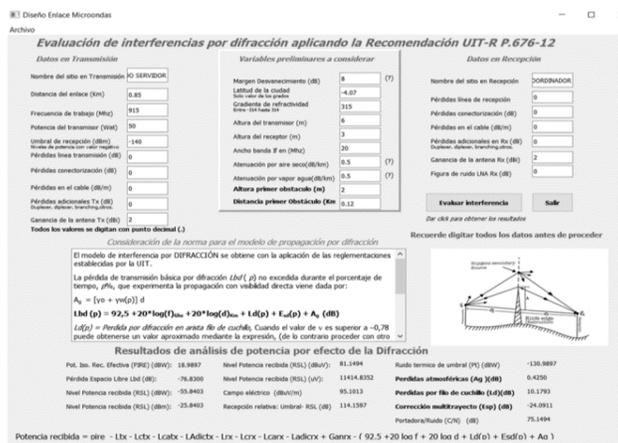


Figura 10. Calculo nodo servidor1 a 85 metros del Gateway con frecuencia de 915 MHz

Con relación al nodo sensor 2, este se encuentra a 250 metros de la estación receptora(Gateway) en la misma frecuencia de operación de 915 MHZ, podemos apreciar el cálculo de evaluación de interferencias por difracción en la figura 11.

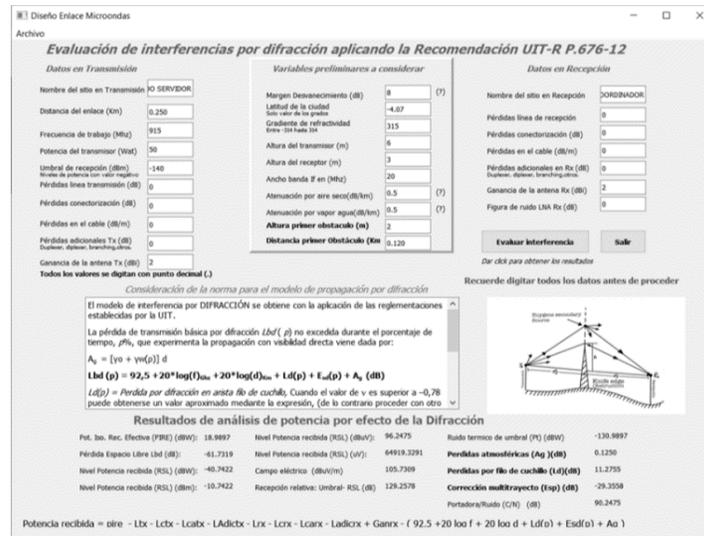


Figura 11. Calculo nodo servidor 2 a 250 metros del Gateway con frecuencia de 915 MHz

Cabe acotar que uno de los grandes limitantes del entrenamiento de la red ha sido el no poder disponer de un Dataset con la cantidad de datos suficientes, por lo que ha tocado trabajar con información climatología proveniente de sitios Web como Weather Spark, en la figura 12. Podemos apreciar una grafica del clima en el municipio de Salento(Quindío) en el mes de Julio de 2023.

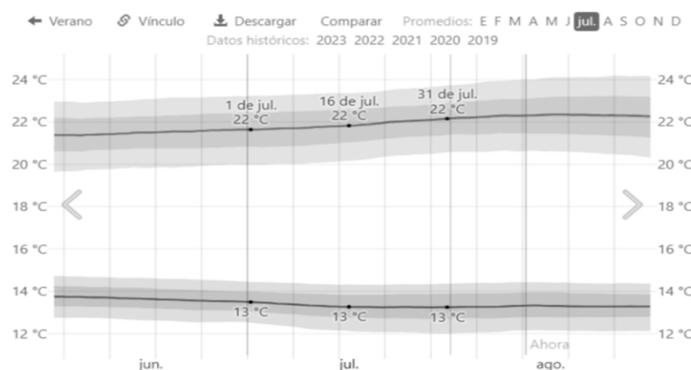


Figura 12. Temperatura promedio en el municipio de Salento(Quindío) en el mes de Julio de 2023(Fuente: [24])

Para el entrenamiento de la red neuronal se procedió a ajustar cada uno de los pesos de las entradas de todas las neuronas que forman parte de la red neuronal, para que las respuestas de la capa de salida se ajusten lo más posible a los datos que conocemos. De igual forma se aclara que los datos obtenidos provienen de sitios Web de información climatológica, al no contar con un Dataset(Conjunto de datos propio) para la recolección de dichos datos. En la figura 13. Podemos apreciar el entrenamiento de un modelo perceptrón multicapa similar al propuesto para este proyecto.



Figura 13. Datos de entrenamiento de un modelo perceptrón multicapa(Fuente: [25])

Una cuestión importante de resolver en el método de entrenamiento es el de establecer de que forma se genera la población inicial. La forma más habitual de hacerlo en los algoritmos genéticos es generar la población inicial aleatoriamente, con valores obtenidos a través de una distribución uniforme definida dentro de un rango determinado. Los resultados obtenidos para esta serie de experimentos permiten afirmar que el método propuesto es menos dependiente de los valores iniciales que el algoritmo.

Mediante la adición de valores preseleccionados en la población inicial se logra que el porcentaje de entrenamiento aumente en gran medida, para altos valores de inicialización.

Discusión y Conclusiones

Se evidencia que es necesario que la tecnología llegue lo más rápido posible al agro colombiano, ya que en muchas fincas y terrenos no se cuenta con información cuantitativa de datos de producción, costos vs, beneficios y en general estadísticas que permitan tener una mejor información sobre los terrenos y cultivos en determinada época del año. Se hace necesario promover y difundir el uso de tecnologías como el IdC (Internet de las cosas) y la agricultura de precisión con los caficultores. Se propone la realización de conferencias o charlas informativas al respecto articulando los espacios con organismos como la Federación Nacional de Cafeteros, Cenicafe y otros relacionados con las actividades propias del proceso productivo del café.

Se pudo establecer que dentro de los factores fundamentales de los cultivos de café, se encuentra la calidad del suelo donde se siembra el cultivo, ya que depende de la rapidez de crecimiento y desarrollo de los árboles, el inicio de la producción, la cantidad y la calidad de este, la resistencia al ataque de plagas y enfermedades y la duración de su vida productiva.

En fincas como la del objeto de estudio por ser café de montaña, se da una sola cosecha al año la cual se lleva a cabo entre los meses de Mayo y Junio.

Referencias

- [1] M. Espinoza-Garcia, G. Alvarez-Martinez y D. Chora-Garcia, «La perfecta combinación de la internet de las cosas y la agricultura de precisión,» *Killkana Tecnica*, vol. 3, n° 2, pp. 31-38, 2019.
- [2] A. I. Montoya-Muñoz y O. M. Caicedo-Rendon, «An approach based on fog computing for providing reliability in iot data collection: A case study in a colombian coffee smart farm,» *Applied Sciences*, vol. 10, n° 24, 2020.
- [3] S. K. Swami-Durai y M. D. Shamili, «Smart farming using machine learning and deep learning techniques,» *Decision Analytics Journal*, vol. 3, n° 100041, 2022.
- [4] J. Herrera y V. Ortiz, «Implementación de un sistema de monitoreo y control con tecnología IoT para determinar el comportamiento de las variables ambientales en la avicultura,» *Investigación e innovación En Ingenierías*, vol. 10, n° 1, pp. 30-41, 2022.
- [5] I. D. D. López, J. F. Grass, A. Figueroa y J. C. Corrales, «A proposal for a multi-domain data fusion strategy in a climate-smart agriculture context,» *International Transactions in Operational Research*, vol. 30, n° 4, pp. 2049-2070, 2023.
- [6] A. F. Jiménez, P. F. Cárdenas, F. Jiménez, A. Ruiz-Canales y A. López, «A cyber-physical intelligent agent for irrigation scheduling in horticultural crops,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 178, n° 105777, 2020.
- [7] M. Gutierrez- Hinestroza y S. . A. Iturralde-Kure, «Universidad Estatal Península de Santa Elena,» [En línea]. Available: <https://incyt.upse.edu.ec/libros/index.php/upse/catalog/view/2/6/124-1>. [Último acceso: 24 07 2023].
- [8] E. C. Mantovani y C. Magdalena, «Procisur,» 24 03 2014. [En línea]. Available: <http://www.gisandbeers.com/RRSS/Publicaciones/Manual-Agricultura-Precision.pdf>. [Último acceso: 27 07 2023].
- [9] H. Salazar y H. Duque, «Variables agronómicas determinantes de la productividad del cultivo de café en fincas del departamento de caldas,» *Revista Cenicafe*, vol. 70, pp. 81-92, 2019.
- [10] J. E. Gutiérrez-Lopera, J. A. Toloza-Rangel, Á. J. Soto-Vergel, O. A. López-Bustamante y D. Guevara-Ibarra, «Sistema integrado de monitoreo inalámbrico de variables agroambientales en un cultivo de tomate para la generación de mapas de intensidad,» *Revista UIS Ingenierías*, vol. 20, n° 2, pp. 163-180, 2021.
- [11] R. Martínez Jacobson, *Comparativa y estudio de plataformas IoT*, Cataluña: Escola Universitaria Politècnica de Mataro, 2017.

- [12] V. Nundloll, B. Porter, B. Gordon S. , B. Emmett, J. Cosby, J. Davey L. , D. Chadwick, B. Winterbourn, P. Beattie, . D. Graham, R. Shaw, W. Shelley, M. Brown y I. Ullah, «The design and deployment of an end-to-end IoT infrastructure for the natural environment,» *Future Internet*, vol. 11, n° 6, pp. 1-27, 2019.
- [13] P. Sanjeevi, S. Prasanna, B. Siva Kumar, G. Gunasekaran, I. Alagiri y R. Vijay Anand, «Precision agriculture and farming using internet of things based on wireless sensor network,» *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 12, p. 31, 2020.
- [14] J. Jin, M. Yajie , Z. Yingcong y H. Qihui, «Design and implementation of an agricultural IoT based on LORA,» de *MATEC Web Conf*, Malasya, 2018.
- [15] M. Quiñones-Cuenca, V. González-Jaramillo, R. Torres y . M. Jumbo, «Sistema De Monitoreo de Variables Medioambientales Usando Una Red de Sensores Inalámbricos y Plataformas De Internet De Las Cosas,» *ENFOQUE UTE*, vol. 8, n° 1, pp. 329-343, 2017.
- [16] H. Syed Zaeem, «aeris,» [En línea]. Available: <https://www.aeris.com/resources/aeris-intelligent-iot-network/>. [Último acceso: 01 08 2023].
- [17] J. Fernandez, N. Miranda, R. Guerrero y F. Piccoli, «Datos no Estructurados No Textuales: Desarrollo de nuevas tecnologías,» de *XII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, San Luís , 2010.
- [18] J. Villanueva Chávez, Marco de trabajo basado en ontologías para el proceso ETL (Tesis de maestría), Mexico D.F.: Centro de Investigación y de Estudios avanzados del IPN, 2011.
- [19] C. Egas, D. Viracocha y J. Rivera, «Implementación de una red inalámbrica de sensores para la gestión de luminarias utilizando IPv6,» *Enfoque UTE*, vol. 10, n° 4, pp. 45-56, 2019.
- [20] . P. Fremantle, «WSO2,» [En línea]. Available: <https://resources.wso2.com/whitepapers/a-reference-architecture-for-the-internet-of-things>. [Último acceso: 21 07 2023].
- [21] J. Arcila Pulgarin, «Factores que determinan la productividad del cafetal,» [En línea]. Available: <https://www.cenicafe.org/es/documents/LibroSistemasProduccionCapitulo3.pdf>. [Último acceso: 02 08 2023].
- [22] M. Nielsen, «Neural Networks and Deep Learning,» [En línea]. Available: <http://neuralnetworksanddeeplearning.com/about.html>. [Último acceso: 06 08 2023].

- [23] L. Bertona, Entrenamiento de Redes Neuronales Basado en Algoritmos (Tesis de grado), Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2005.
- [24] «Weather Spark,» [En línea]. Available: <https://es.weatherspark.com/m/22426/7/Tiempo-promedio-en-julio-en-Salento-Colombia>. [Último acceso: 06 08 2023].
- [25] J. Egas Daza y A. F. Bravo Portilla, Calculando la disponibilidad de nitrógeno en suelos establecidos con cultivos de café utilizando técnicas de aprendizaje automático (Tesis de grado), Popayán : Universidad del Cauca, 2022.