

Monitoreo de variables agroambientales en un cultivo de café aplicando tecnología IoT y técnicas de análisis descriptivas y diagnosticas para optimizar el proceso de toma de decisiones

Monitoring of agro-environmental variables in a coffee crop applying IoT technology and descriptive and diagnostic analysis techniques to optimize the decision-making process

Recibido: 15 mayo de 2024

Aprobado: 26 agosto de 2024

Cómo citar: W. Ruiz Martínez, C. A. . Osimani, and J. A. . Arévalo, "Monitoreo de variables agroambientales en un cultivo de café aplicando tecnología IoT y técnicas de análisis descriptivas y diagnosticas para optimizar el proceso de toma de decisiones", *Mundo Fesc*, vol. 14, no. 30, pp. 359–378, Sep. 2024, doi: 10.61799/2216-0388.1626.

Cesar Andrés Osimani^{1*}



PhD en ciencias de la ingeniería,
cosimani@ubp.edu.ar,
<https://orcid.org/0000-0003-0579-6231?lang=en> ,
Universidad Blas Pascal, Córdoba, Argentina.

William Ruiz Martinez²



Magister en tecnologías de la información y comunicación,
william.ruiz@docente.ibero.edu.co,
<https://orcid.org/0000-0001-9617-9348>,
Corporación Universitaria Iberoamericana, Armenia, Colombia

Jaime Andrés Arévalo³



Magister en alta gerencia,
jaime.arevalo@ibero.edu.co,
Corporación Universitaria Iberoamericana, Bogotá D.C.,
Colombia.

***Autor para correspondencia:**

cosimani@ubp.edu.ar



Monitoreo de variables agroambientales en un cultivo de café aplicando tecnología IoT y técnicas de análisis descriptivas y diagnósticas para optimizar el proceso de toma de decisiones

Palabras clave: Agricultura De Precisión, Análisis Descriptivo, Análisis Diagnóstico, Cultivos De Café, Internet De Las Cosas, Redes De Sensores Inalámbricos.

Resumen

Este estudio implementa tecnologías 4.0, específicamente el Internet de las Cosas (IoT), junto con técnicas de análisis descriptivo y diagnóstico para monitorear variables agroambientales que inciden en el cultivo de café en la finca Las Acacias, Salento, Quindío. El objetivo fue optimizar la gestión de los procesos productivos del grano mediante un sistema inteligente de recolección y análisis de datos. Se diseñó una red de sensores con topología en estrella, compuesta por dos nodos ubicados a una distancia máxima de 120 metros del Gateway. Los sensores seleccionados—DHT22 (temperatura y humedad), FC-28 (humedad del suelo) y EC-5 (conductividad eléctrica)—fueron evaluados bajo criterios de precisión, confiabilidad, facilidad de configuración y costo. Los datos fueron transmitidos mediante el protocolo LoRaWAN y gestionados a través de las plataformas IoT The Things Network (TTN) y TAGOIO, con intervalos de medición cada 10 minutos. Los resultados indicaron que temperaturas máximas elevadas (38,1 °C en septiembre) y una humedad relativa mínima (21,7 % en agosto) provocaron condiciones de estrés térmico e hídrico en el cafeto, afectando procesos fisiológicos claves. La disminución en el contenido de agua del suelo y la conductividad eléctrica evidenció déficit hídrico y posible lixiviación de nutrientes, información relevante para ajustar prácticas de aplicación de fertilizantes mediante sistemas de riego y manejo agronómico. Finalmente este trabajo evidencia que la integración de sensores IoT con técnicas de análisis de datos permite una toma de decisiones oportuna y fundamentada, favoreciendo la adopción de la agricultura de precisión, la sostenibilidad del cultivo y el incremento en la productividad del café.

Monitoring of agro- environmental variables in a coffee crop applying IoT technology and descriptive and diagnostic analysis techniques to optimize the decision-making process

Keywords: Coffee Crops, Descriptive Analysis, Diagnostic Analysis, Internet Of Things, Precision Agriculture, Wireless Sensor Networks.

Abstract

This study implements 4.0 technologies, specifically the Internet of Things (IoT), alongside descriptive and diagnostic analysis techniques to monitor agro-environmental variables affecting coffee cultivation at Las Acacias farm, Salento, Quindío. The objective was to optimize the management of grain production processes through an intelligent system for data collection and analysis. A star-topology sensor network was designed, consisting of two nodes located at a maximum distance of 120 meters from the Gateway. The selected sensors DHT22 (temperature and humidity), FC-28 (soil moisture), and EC-5 (electrical conductivity) were evaluated based on accuracy, reliability, ease of configuration, and cost. Data transmission was carried out using the LoRaWAN protocol and managed via the IoT platforms The Things Network (TTN) and TAGOIO, with measurement intervals set every 10 minutes. The results indicated that high maximum temperatures (38.1°C in September) and low relative humidity (21.7% in August) triggered thermal and water stress conditions in coffee plants, affecting key physiological processes. A decline in soil water content and electrical conductivity revealed a water deficit and potential nutrient leaching, highlighting the need to adjust fertilization practices through irrigation systems and agronomic management strategies. Finally, this study demonstrates that the integration of IoT sensors with data analysis techniques enables timely and well-founded decision-making, fostering the adoption of precision agriculture, crop sustainability, and improved coffee productivity.

Introducción

En el contexto actual de transformación digital e Industria 4.0, tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia de negocios y la analítica de datos emergen como herramientas estratégicas para optimizar la toma de decisiones en múltiples sectores productivos, según [1], la agricultura de precisión ha surgido como una solución clave para abordar los desafíos de producción en terrenos agrícolas. Al aprovechar la tecnología IoT mediante el empleo de sensores, los agricultores pueden mejorar el rendimiento de sus cultivos y gestionar los recursos de manera más eficiente, optimizando las prácticas agrícolas y promoviendo un uso sostenible del suelo. De acuerdo con [2] “El desarrollo agrícola se consolida como uno de los medios más importantes para terminar con la pobreza extrema, impulsar la prosperidad compartida y dar alimento a una población que se espera llegue a 9.700 millones de habitantes en 2050”. En otro estudio presentado por [3], la adopción de tecnologías inteligentes para sistemas agrícolas sostenibles presenta una clara ventaja competitiva para los agricultores, los servicios de extensión, las empresas agrícolas y los entes responsables de las políticas relacionadas con el agro.

En el sector agrícola, este tipo de soluciones se han consolidado como una estrategia eficaz para recopilar datos sobre el comportamiento de las variables agroambientales en los cultivos, lo que permite identificar con mayor precisión las épocas más propicias para las labores agrícolas, por ejemplo: aplicación de fungicidas y abonos o fertilizantes, entre otros procesos vitales en los cultivos. Es importante aclarar que la extracción y el análisis precisos de datos que ofrecen las redes de sensores y los dispositivos de seguimiento basados en aprendizaje automático tienen una gran demanda en todo tipo de cultivos [4]. Complementando lo anterior las acciones y procesos realizados para el tratamiento de suelos y la producción de cultivos para alimentos tienen gran importancia en diferentes localidades a nivel mundial, beneficiando la economía local y regional entre otras. En el estudio presentado por [5], se propone un sistema que integra nodos de IoT para la recopilación de datos en tiempo real sobre determinadas condiciones ambientales, establezca los niveles de humedad del suelo y las necesidades de nutrientes de los cultivos. La toma de decisiones sobre fertirrigación y riego se modelan como un problema de decisión secuencial basado en datos; Este enfoque ofrece diversas ventajas, como un mayor control sobre el flujo de información, ahorro de energía y mayor flexibilidad en la gestión de recursos.

Además, la adecuada implementación del Internet de las cosas (IoT) permite disponer de información valiosa para la toma de decisiones, lo que implica el análisis de diversos aspectos y condiciones, entre ellos: la correcta topología de la red, los sensores adecuados, la conectividad óptima, el sistema de almacenamiento y las estrategias para interpretar de forma correcta la desviación de datos. La agricultura de precisión (AP) condensa un sistema agrícola avanzado y jerárquico, respaldado por un conjunto de tecnologías multidisciplinarias como sensores especializados, protocolos de comunicación,

algoritmos inteligentes y herramientas de gestión. Estas soluciones permiten mitigar las limitaciones de la agricultura convencional al optimizar la producción, reducir el desperdicio y mejorar la eficiencia en el manejo de los cultivos [6]. Asimismo, el concepto de agricultura de precisión permite a los agricultores obtener métricas y monitorear los lotes de cultivo casi en tiempo real, lo que les brinda la capacidad de tomar decisiones informadas basadas en estos datos, así como en estadísticas e informes generados mediante su procesamiento automatizado. La agricultura inteligente, entre sus principales características, ofrece una reducción en el consumo de recursos, incluidos materiales, recursos naturales, energía, almacenamiento, procesamiento y ancho de banda. En el estudio presentado por [7], se diseñó e implementó un sistema inteligente de monitoreo y gestión basado en Internet de las Cosas (IoT) para huertos de manzanos. Este sistema permite supervisar en tiempo real las condiciones ambientales del cultivo, predecir la aparición de enfermedades y plagas relevantes, y optimizar tanto el riego como la fertilización.

Actualmente, es común que los sistemas del Internet de las cosas (IoT) permitan el acceso a información en tiempo real desde cualquier ubicación geográfica, lo que significa que los datos deben almacenarse en la nube, este proceso requiere un ancho de banda adecuado para transmitir grandes volúmenes de datos a la nube. Por ejemplo en el estudio propuesto por [7], se presenta un innovador sistema de Internet de las Cosas (IoT) diseñado para revolucionar las prácticas agrícolas al proporcionar monitoreo en tiempo real de los parámetros del suelo, como temperatura, humedad, salinidad, CE, pH, nitrógeno, potasio y fósforo. Pruebas de campo realizadas con cultivos de arroz en Rahim Yar Khan, Pakistán, demostraron la notable capacidad del sistema para medir con precisión los ocho parámetros anteriormente mencionados. En otra propuesta presentada por [9], se desarrolló un sistema de riego inteligente en tiempo real utilizando tecnología IoT e integrada, con el propósito de lograr una gestión eficiente del recurso hídrico y fomentar una agricultura sostenible en África. Su objetivo principal es optimizar el riego mediante la monitorización continua de las condiciones climáticas y las necesidades específicas de los cultivos. Finalmente, en la investigación presentada por [10], se propone un modelo inteligente de predicción óptima para sensores, basado en agricultura de precisión e Internet de las Cosas (IoT). El estudio mejora el índice THAM (Temperatura, Humedad, Calidad del Aire y Agua) mediante el algoritmo Modified Wild Geese (MWG), lo que permite predecir con mayor precisión las condiciones ambientales. Además, se implementaron nodos IoT utilizando aprendizaje profundo cuántico por refuerzo (QDRL) para determinar la cantidad óptima de sensores necesarios, garantizando así una cobertura eficiente del campo agrícola y una mejora significativa en la comunicación de los datos.

En este contexto, el presente estudio plantea el diseño e implementación de un sistema de monitoreo de variables agroambientales en un cultivo de café, localizado en la finca Las Acacias (Salento, Quindío). La propuesta se basa en una red IoT y en el uso de técnicas analíticas descriptivas y diagnósticas, con el objetivo de proporcionar al caficultor herramientas que le permitan anticipar condiciones adversas y tomar

decisiones fundamentadas en este tipo de evidencias, lo que contribuirá a mejorar la productividad y sostenibilidad del cultivo, brindándole la posibilidad de alinearse con estándares nacionales e internacionales.

Materiales y Métodos

Esta sección presenta la metodología propuesta para cada una de las fases o etapas del estudio. La combinación de tecnología y conocimiento empírico tienen como objetivo mejorar la eficiencia y la calidad de los cultivos, permitiendo predecir un futuro prometedor para el sector cafetero. El proceso de implementación de un sistema de monitoreo y control basado en el Internet de las cosas (IoT) para un cultivo de café se establece mediante la siguiente metodología estándar, ya sea a nivel industrial o experimental, tal como se describe en la Figura 1. Esta se distribuye en las siguientes fases, de acuerdo a lo propuesto por [8]: 1. Identificar el problema, 2. determinar las variables agroambientales a monitorear y controlar, 3. seleccionar los sensores más adecuados, 4. seleccionar la plataforma IoT más idónea para la vinculación de los dispositivos y almacenamiento de los datos, 5. realizar la configuración e interconexión de sensores e infraestructura de red (IoT) y 6. realizar un análisis inicial de los datos recolectados en un periodo de tiempo específico. La investigación es aplicada y de tipo experimental, y presenta un enfoque mixto (cualitativo-cuantitativo). En cuanto a los sensores y su arquitectura, se implementa una topología física compuesta por dos nodos sensores, un Gateway o pasarela y un router. La conectividad entre los nodos sensores y el Gateway se establece mediante el protocolo LoRaWAN, mientras que la conexión entre el Gateway y el router se realiza a través de Ethernet, mediante cableado directo entre puertos WAN. En la Figura 1 se ilustra la arquitectura propuesta para el desarrollo de un sistema inteligente de monitoreo.

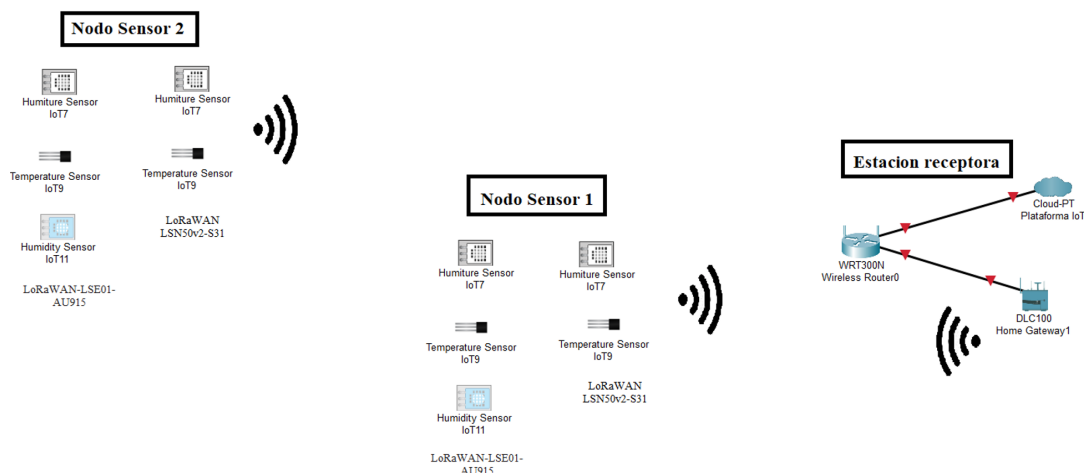


Figura 1. Arquitectura propuesta para un sistema inteligente de monitoreo de cultivos de café

En relación con la topología lógica se configura una red en estrella debido al reducido tamaño de los nodos que la componen y su localización relativamente cercana con el

Gateway y el Router, para la configuración, enlace y recepción de datos de los sensores se cuenta con 2 plataformas del Internet de las cosas (IoT), que debido al tamaño reducido de la red y el enfoque más académico que comercial nos ofrecen servicios de transmisión y almacenamiento de datos en planes gratuitos. Una vez realizada la configuración de Gateway, router, nodos sensores, transmisión y almacenamiento de datos, se aplicaran algunas técnicas de análisis de datos de tipo descriptivo y diagnóstico con la finalidad de evaluar las tomas de datos y compararlas con los parámetros o valores establecidos para el cultivo del café, de acuerdo a condiciones y momentos muy específicos, además de proporcionar la información necesaria para que el caficultor tome decisiones y pueda optimizar los procesos productivos relacionados con el cultivo. A continuación, se detallan las fases o etapas de la metodología propuesta.

Identificar el problema

Se realizó una visita al sitio objeto de estudio con la finalidad de identificar la ubicación del cultivo de café e identificar las variables agroambientales que van a ser monitoreadas de acuerdo con [4-11], la agricultura de precisión ayuda a aumentar la productividad al determinar con precisión los pasos que deben practicarse en la época o temporada correspondiente. En esta etapa se pueden utilizar instrumentos como observación directa, entrevistas a caficultores, formato de encuestas, técnicas bibliométricas e investigación documental para recolectar información sobre posibles soluciones al problema.

Determinar las variables agroambientales a monitorear

En una entrevista estructurada que se le había realizado con anterioridad al propietario de la finca objeto de estudio se pudieron determinar algunas de las variables agroambientales que tienen un impacto significativo en el cultivo. En el trabajo que nos presentan [9] se aporta información de campo que permite ilustrar a los productores sobre el impacto que tienen las decisiones técnicas en la productividad en el largo plazo y a los extensionistas para fortalecer la transferencia de tecnología. Por otra parte se pudieron establecer variables agroambientales de gran impacto en el cultivo del café como es el caso de: la temperatura y humedad ambiental, la humedad del suelo, la temperatura, la humedad relativa, la conductividad eléctrica, la luminosidad y la calidad del agua, entre otros según lo expuesto por [10].

Selección de los sensores

En esta fase se realizó una visita de campo a la finca objeto de estudio con la finalidad de seleccionar los sensores más adecuados para registrar los datos de las variables agroambientales. Entre los aspectos técnicos que se tuvieron en cuenta a la hora de dicha elección, se tuvieron en cuenta: Precisión, fiabilidad de los datos recolectados, intensidad de la señal, facilidad de configuración y costos. Por otra parte, y de acuerdo con [11], entre los aspectos del entorno a analizar, tenemos: 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. En la tabla I se presentan los criterios de evaluación tenidos en cuenta para la selección de los sensores.

Tabla I. Criterios de selección de los sensores

Criterios de evaluación	Libelium	Milesight	Marcas Habones	Dragino
Precisión	4	3	4	5
Fiabilidad	5	4	3	4
Costo	5	4	5	3
Facilidad de configuración	4	4	4	2
Peso significativo	18	15	16	14

Leyenda: A lo criterios de evaluación: Precisión, fiabilidad, costo y facilidad de configuración se le asignaron valores de 1 a 5 (Donde 1 es el valor mínimo y 5 el máximo) a continuación se realizó la sumatoria de dichos criterios y se seleccionó el que tenía el peso significativo más bajo pero que en general cumpliera con los criterios de evaluación solicitados.

Plataformas IoT

Una plataforma IoT constituye la infraestructura de Backend fundamental para la recolección y análisis de datos en tiempo real, en este caso se destacaron como ejemplos Azure IoT, AWS IoT y Google Cloud IoT, además de alternativas como servidores locales propietarios. Según [12], una plataforma IoT adecuada debe gestionar la información eficazmente, cumpliendo con los siguientes aspectos:

- Capturar datos enviados desde dispositivos.
- Almacenar y/o analizar datos.
- Representar la información para su acceso por el usuario final.

De igual forma una plataforma IoT debe incluir los siguientes módulos esenciales:

- Conectividad y Normalización: Proporcionar conexión mediante protocolos estándar, asegurando la transmisión precisa de datos y permitiendo interacción confiable con dispositivos heterogéneos.
- Almacenamiento de Datos: Almacenar los datos para su análisis, visualización o integración con herramientas de terceros.
- Procesamiento y Gestión de la Acción: Procesar los datos bajo un conjunto de reglas o disparadores, ejecutando acciones específicas según los valores obtenidos.
- Analítica y Visualización: Permitir el análisis y transformación de los datos, con opciones de visualización gráfica o exposición de los datos mediante APIs para aplicaciones externas.

La Figura 2 ilustra la arquitectura de una plataforma IoT, describiendo visualmente la

organización y los flujos de información en este tipo de infraestructura.

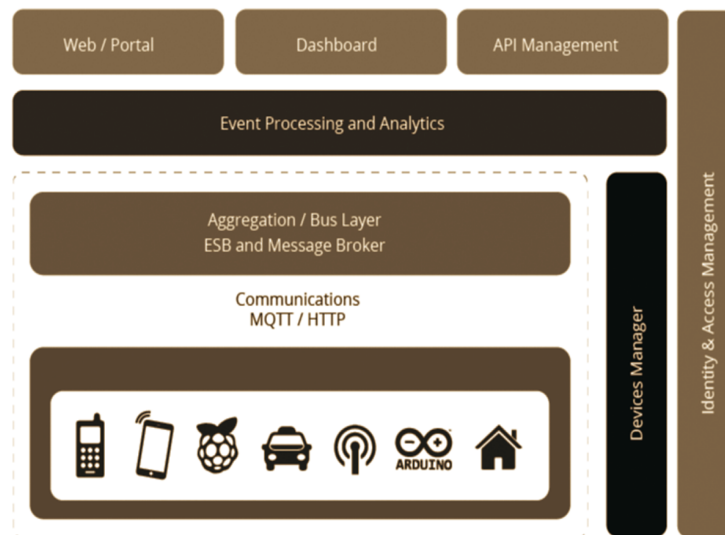


Figura 2. Arquitectura de una plataforma IoT (Fuente:[13])

Configuración e interconexión de sensores e infraestructura de red (IoT)

Uno de los primeros pasos que se realizaron fue la configuración del Gateway y los sensores, antes de ser llevados a su posterior instalación en el sitio objeto de estudio. En la figura 3 presentamos la verificación y/o asignación de credenciales del dispositivo para conexión al servidor de The Things Network (TTN).

Figura 3. Verificación y asignación de credenciales para conexión al servidor de TTN

Se realizó la configuración del sensor de temperatura y humedad marca Dragino, el cual presentó algunas complicaciones a la hora de ser inscrito en el servidor de The Things Network (TTN) debido a una duplicidad previa presentada con el Device EUI

del dispositivo, para realizar el cambio de dichas credenciales fue necesario conectar vía serial el dispositivo a un software que permitiera dicha comunicación y envío de comandos AT, esto mediante un conversor TTL USB. En la figura 4. Se pueden apreciar con más claridad los comandos ejecutados para la configuración adecuada del sensor.

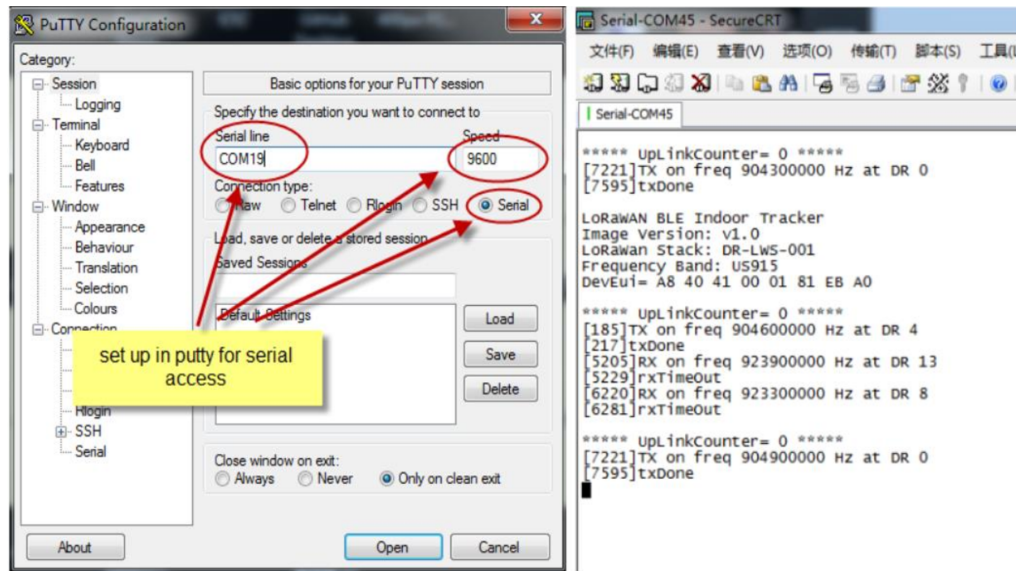


Figura 4. Configuración del nodo sensor de temperatura y humedad ambiental

Se realizó la configuración del sensor de temperatura, agua y conductividad eléctrica del suelo. A diferencia del caso anterior, este dispositivo no presenta inconvenientes para la conexión con The Things Network (TTN). Se debe tener en cuenta que los dos dispositivos vienen de fábrica programados para enviar datos cada 40 minutos desde esta plataforma se enviaron los comandos para cambiar este intervalo a 10 minutos. En la figura 5. Podemos apreciar el sensor referenciado.



Figura 5. Sensor de temperatura, agua y conductividad eléctrica del suelo

En relación con la instalación de los sensores en la finca Las Acacias, en Salento, Quindío, estos fueron colocados en postes de 6 metros de altura aproximadamente y a una distancia de 120 metros en relación con la casa de habitación de la finca donde se encontraban el Gateway y el router. Los sensores recolectaron datos de variables agroambientales como temperatura, humedad ambiental, temperatura del suelo, humedad y conductividad eléctrica, esenciales para la "agricultura de precisión". En la figura 6. Podemos apreciar los sensores referenciados en el sitio objeto de estudio.



Figura 6. Sensores ubicados en el lote de café en el sitio objeto de estudio

A continuación, los datos que se reciben de los nodos sensores fueron enviados hacia una pasarela o Gateway.

En el tercer paso, estos datos se enviaron del Gateway al router y, posteriormente, a dos plataformas IoT en la nube, en relación con este aspecto los datos de los sensores son enviados a la plataforma The Things Network (TTN) donde se mantienen los datos por espacio de 1 hora, a continuación, los datos son enrutados a la plataforma TIGOIO donde son almacenados. Los componentes esenciales de esta infraestructura incluyeron dispositivos del Internet de las cosas (IoT), el Gateway, redes inalámbricas y protocolos de comunicación [13].

Análisis de los datos recolectados

Para la fecha de presentación de este artículo se cuenta con un total de 42.00 registros relacionados con datos de variables agroambientales como: temperatura y humedad ambiental y temperatura, agua y conductividad eléctrica del suelo, recolectados entre los meses de Junio y Octubre de 2024. En la figura 7. Podemos apreciar un Dataset en la plataforma TAGOIO.

ID	Variable	Value	Group	Minutos	Time
40f1a	firm_payload	0a1700005a60703001910 (string)	175029156085	0 hours	back 7 minutos
40f19	uri	152 (number)	175029156085	0 hours	back 7 minutos
40f18	rssi	-42 (number)	175029156085	0 hours	back 7 minutos
40f17	gateway_id	A8A041FF9FACBA8 (string)	175029156085	0 hours	back 7 minutos
40f14	application_id	fincalascacas (string)	175029156085	0 hours	back 7 minutos
40f13	port	2 (number)	175029156085	0 hours	back 7 minutos
40f16	freq	5438 (number)	175029156085	0 hours	back 7 minutos
40f1f	freq_coding_rate	4/5 (string)	175029156085	0 hours	back 7 minutos
40f1a	frequency	91700000 (string)	175029156085	0 hours	back 7 minutos
40f11	timestamp	2867725298 (number)	175029156085	0 hours	back 7 minutos
40f12	time	2025-06-19T00:06:36.517952 (string)	175029156085	0 hours	back 7 minutos
40f1a	device_id	ea1a4841d1a1180386 (string)	175029156085	0 hours	back 7 minutos
40f19	tempc_d1820	0.00 (string)	175029156085	0 hours	back 7 minutos
40f1a	conduct_soil	25 (number)	175029156085	0 hours	back 7 minutos

Figura 7. Dataset visualizado en la plataforma TTN

En relación con técnicas de analítica de datos se emplearon algunas medidas de tendencia central, como valor máximo, mínimo y media buscando establecer el comportamiento de las variables objeto de estudio en un lapso determinado. En la tabla II. Podemos apreciar la visualización de la media de las variables entre los meses de Junio a Octubre de 2024.

Tabla II. Media de las variables entre Junio y Octubre de 2024

Variable		Temperatura ambiental [TempC_SHT- °C]	Humedad Ambiental [Hum_SHT-%]	Temperatura del suelo [Temp_SOIL-°C]	Agua en el suelo [Water_SOIL]	Conductividad Eléctrica del suelo- dS/m [Conduct_SOIL]
Mes	Junio	18.32	92.80	20.05	41.06	0.6105
	Julio	19.77	81.46	19.67	37.77	0.4660
	Agosto	20.05	77.52	20.18	23.31	0.1995
	Septiembre	21.09	73.84	21.55	17.15	0.0916
	Octubre	19.34	87.23	20.56	32.55	0.2853

Para analizar la relación entre las variables climáticas y el cultivo de café, se realizó un estudio que integró análisis descriptivo, correlacional y multivariado. Primero, se calcularon estadísticas básicas, como media y desviación estándar, para comprender la variabilidad de las variables climáticas y del suelo en los meses estudiados. Luego, se identificaron tendencias temporales mediante gráficos que mostraron cómo variaron las variables a lo largo del tiempo. Posteriormente, se calcularon coeficientes de correlación para evaluar relaciones entre temperatura, humedad, agua en el suelo y conductividad eléctrica, identificando patrones significativos.

Luego, se aplicaron modelos de regresión para examinar cómo estas variables explicaron conjuntamente aspectos críticos del cultivo de café, como el rendimiento. Finalmente, los resultados se presentaron mediante gráficos de dispersión, lo que facilitó la interpretación y el desarrollo de estrategias para optimizar el manejo del cultivo en diferentes escenarios climáticos.

Resultados y Discusión

El presente estudio aborda de manera integral las condiciones climáticas y edáficas en la finca las Acacias en Salento - Quindío, evaluando su impacto en el cultivo de café. Las variables analizadas incluyen temperatura ambiental, humedad relativa, temperatura del suelo, contenido de agua en el suelo y conductividad eléctrica. Estas variables determinan el rendimiento y la calidad del café, afectando tanto el crecimiento vegetativo como los procesos críticos de floración y fructificación [14]. A continuación en la tabla 2 podemos observar los datos recolectados de las variables agroambientales entre Junio-octubre de 2024.

Tabla III. Registro de datos climático en el cultivo de café de las fincas las Acacias

Meses	Temperatura ambiental °C (máxima)	Temperatura ambiental °C (mínima)	Temperatura ambiental °C (media)
Junio	31,30	12,20	18,32
Julio	33,60	12,30	19,77
Agosto	35,20	11,80	20,05
Septiembre	38,10	12,10	21,09
Octubre	35,90	12,10	19,34
Meses	Humedad Ambiental % (media)	Humedad Ambiental % (máxima)	Humedad Ambiental % (mínima)
Junio	92,80	100,00	44,70
Julio	81,46	100,00	35,80
Agosto	77,52	100,00	21,70
Septiembre	73,84	100,00	24,20
Octubre	87,23	100,00	30,10
Meses	Temperatura del suelo °C (media)	Temperatura del suelo °C (máxima)	Temperatura del suelo °C (mínima)
Junio	20,05	25,00	19,00
Julio	19,67	20,62	18,56
Agosto	20,18	20,90	19,28
Septiembre	21,55	22,89	19,18
Octubre	20,56	21,50	19,57
Meses	Agua en el suelo %VWC (medio)	Agua en el suelo %VWC (máximo)	Agua en el suelo %VWC (mínimo)
Junio	41,06	61,00	0,00
Julio	37,77	59,18	27,48
Agosto	23,31	26,89	19,07
Septiembre	17,15	45,17	15,25
Octubre	32,55	64,11	27,06
Meses	Conductividad Eléctrica del suelo- dS/m (medio)	Conductividad Eléctrica del suelo- dS/m (máximo)	Conductividad Eléctrica del suelo- dS/m (mínimo)
Junio	0,6105	1,3500	0,0000
Julio	0,4660	0,7100	0,3500
Agosto	0,1995	0,3400	0,1100
Septiembre	0,0916	0,5000	0,0600
Octubre	0,2853	0,6500	0,2000

A partir de los datos registrados durante 5 meses continuos, se realizó el siguiente análisis de relación:

Impacto de la Temperatura y la Humedad Ambiental

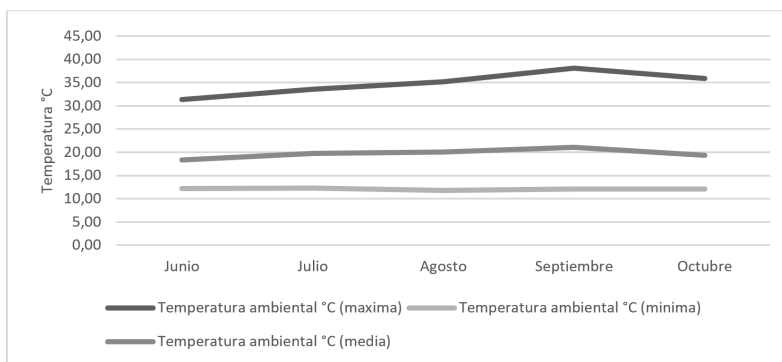


Figura 8: Variación de temperatura ambiental en la finca las acacias

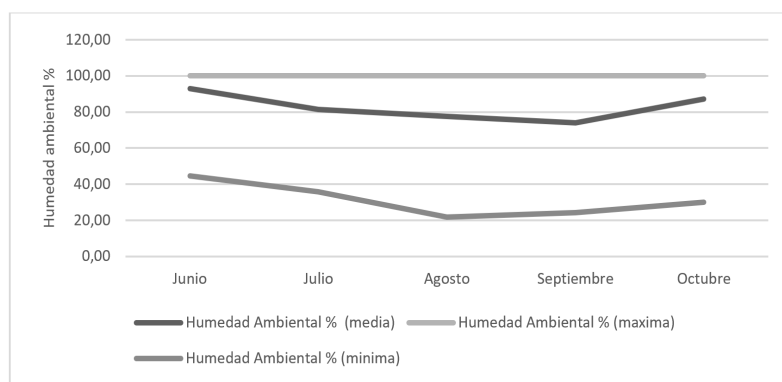


Figura 9. Variación de Humedad ambiental en la finca las acacias

Según los datos de las figuras 8 y 9, la temperatura ambiental revela que el pico más alto se da en septiembre con 38,1°C, mientras que las temperaturas mínimas permanecen constantes entre 11,8°C y 12,3°C. Este incremento de la temperatura máxima, especialmente durante el final del verano, puede generar condiciones de estrés térmico en las plantas de café. Este fenómeno afecta procesos clave como la fotosíntesis y el metabolismo del cafeto, reduciendo la capacidad de la planta para fijar carbono y producir azúcares esenciales para el desarrollo de los frutos [18]. Además, el rango térmico amplio entre las temperaturas máximas y mínimas puede agravar el impacto del estrés térmico al intensificar las fluctuaciones diarias de las condiciones ambientales, añadiendo presión fisiológica sobre el cultivo.

Por otro lado, la humedad relativa mínima cae abruptamente en agosto, alcanzando apenas el 21,7%. Esta reducción drástica indica un periodo seco desfavorable para la floración, ya que el déficit hídrico puede causar caída de flores y afectar el cuajado del fruto, lo que a su vez reduce la productividad [19]. La alta humedad relativa máxima (100% durante todos los meses) sugiere un ambiente húmedo que, si bien puede ser beneficioso para reducir el estrés hídrico, incrementa significativamente el riesgo de enfermedades fúngicas como la roya del café

(*Hemileia vastatrix*). La combinación de temperaturas altas y alta humedad, particularmente en septiembre, puede acelerar el ciclo de vida del hongo, afectando severamente tanto la producción como la calidad del grano. Además, las condiciones de baja humedad relativa mínima en agosto coinciden con un periodo crítico de déficit hídrico, intensificando los desafíos para la sostenibilidad de la producción de café en la finca Las Acacias.

Relación entre la Temperatura del Suelo y el Desarrollo Radicular

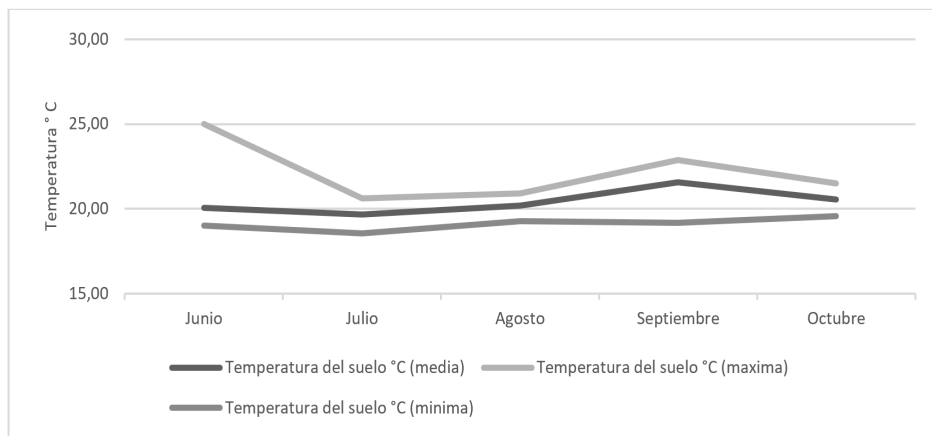


Figura 10. Variación de la temperatura del suelo en la finca las acacias

Según la figura 10, la temperatura del suelo es un factor determinante para el desarrollo de las raíces y la absorción de nutrientes. Durante el período de estudio, se observa un aumento de la temperatura media del suelo, con valores que oscilan entre 19,67°C en julio y 21,55°C en septiembre. Este incremento, que coincide con los picos de temperatura ambiental, puede tener un impacto dual en el cultivo. Por un lado, el aumento de la temperatura del suelo favorece la actividad microbiana y la mineralización de la materia orgánica, lo que incrementa la disponibilidad de nutrientes esenciales para el cafeto [20]. Además, estas condiciones pueden estimular la liberación de nitrógeno y otros elementos necesarios para el desarrollo vegetativo y reproductivo del cultivo.

Sin embargo, temperaturas del suelo superiores a 25°C, aunque no predominan en este estudio, podrían generar estrés radicular, especialmente en suelos con baja capacidad de retención de humedad. Este estrés afecta la absorción eficiente de agua y nutrientes, impactando negativamente el metabolismo de la planta. Adicionalmente, el aumento sostenido de la temperatura puede desestabilizar la estructura del suelo, reducir el contenido de materia orgánica a largo plazo y exacerbar los efectos de sequías estacionales, como la observada en agosto. Estas observaciones resaltan la importancia de implementar prácticas como el uso de coberturas vegetales, manejo adecuado de la materia orgánica y riego suplementario para mitigar los impactos negativos del incremento térmico en el suelo.

Efecto del Contenido de Agua en el Suelo sobre la Productividad

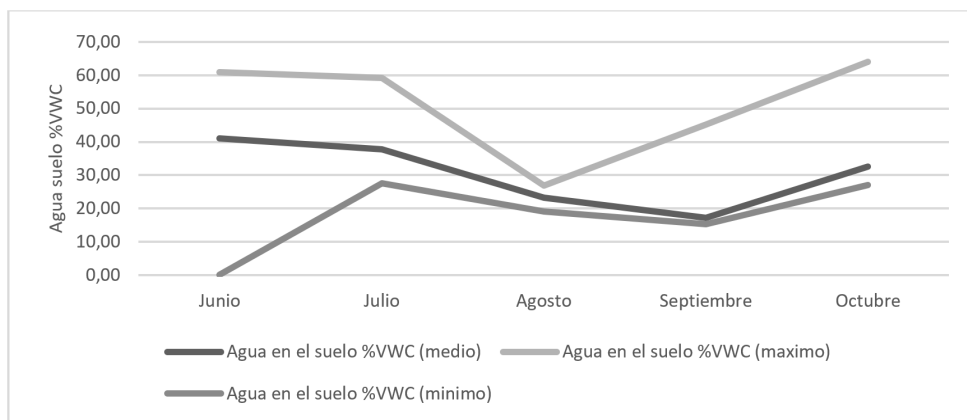


Figura 11. Variación del contenido del suelo en la finca las acacias

El contenido de agua en el suelo (%VWC) disminuye significativamente durante los meses de agosto y septiembre, con valores medios de 23,31% y 17,15% respectivamente según la figura 11. Esta reducción indica un déficit hídrico crítico que puede afectar el proceso de llenado del grano. Durante esta fase, el café requiere un suministro adecuado de agua para asegurar el transporte de azúcares y nutrientes hacia los frutos. La falta de agua durante esta etapa crítica puede resultar en granos pequeños y malformados, afectando tanto el rendimiento como la calidad de la cosecha [20].

La implementación de sistemas de riego suplementario y el uso de prácticas de manejo de sombra pueden ser estrategias efectivas para mitigar el impacto del déficit hídrico. La sombra reduce la evaporación del agua del suelo y disminuye la temperatura del aire, creando un microclima más favorable para el café.

Influencia de la Conductividad Eléctrica del Suelo en la Nutrición del Cafeto

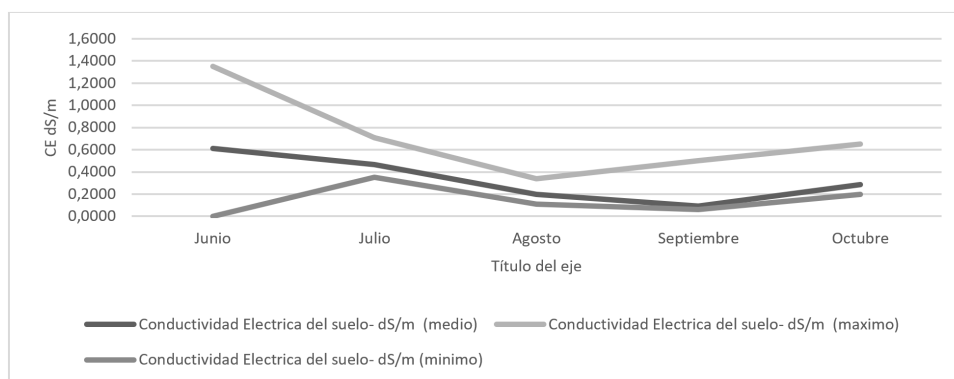


Figura 12. Variación de la conductividad eléctrica del suelo en la finca las acacias

La conductividad eléctrica (CE) del suelo es un indicador de la salinidad y la disponibilidad de nutrientes. Los datos muestran una tendencia decreciente de la CE, desde 0,6105

dS/m en junio hasta 0,0916 dS/m en septiembre según la figura 12. Este patrón puede estar asociado con la lixiviación de sales, posiblemente debido a lluvias intensas o prácticas de riego excesivo. Aunque la lixiviación puede reducir la salinidad del suelo, también puede llevar a la pérdida de nutrientes esenciales como el potasio, calcio y nitrógeno, lo que afecta negativamente la salud y el desarrollo de las plantas [21]. El repunte observado en la CE en octubre sugiere un posible proceso de acumulación de sales, que podría estar relacionado con la disminución de las lluvias o ajustes en las prácticas de manejo del riego, como una menor frecuencia de aplicación.

El bajo nivel de salinidad registrado en el suelo durante el periodo de estudio es generalmente favorable para el cultivo de café, ya que evita problemas de toxicidad por sales que pueden interferir con la absorción de agua y nutrientes. Sin embargo, la reducción drástica de la CE observada en septiembre podría haber reducido la disponibilidad de ciertos nutrientes esenciales, lo que, en combinación con otros factores como la baja humedad del suelo, podría limitar el crecimiento y la productividad del cultivo. Por lo tanto, es crucial monitorear continuamente la CE del suelo para prevenir la pérdida excesiva de nutrientes y garantizar que los niveles de salinidad sean óptimos para el desarrollo del cafeto. Además, se recomienda implementar prácticas como la aplicación de fertilizantes de liberación controlada y enmiendas orgánicas que puedan reponer los nutrientes lixiviados y mejorar la capacidad de retención de nutrientes en el suelo [22].

Conclusiones

El presente estudio respondió al objetivo de diseñar e implementar una red IoT para el monitoreo de variables agroambientales en un cultivo de café, integrando sensores, plataformas de transmisión de datos y técnicas de análisis descriptivo y diagnóstico. A través de la captura y procesamiento continuo de variables clave como temperatura, humedad, contenido de agua y conductividad eléctrica del suelo, se logró generar información precisa y en tiempo real que permitió identificar condiciones críticas para el cultivo, como el estrés hídrico y térmico durante los meses de agosto y septiembre.

Este sistema proporcionó al caficultor una herramienta efectiva para la toma de decisiones informadas, permitiéndole ajustar prácticas como el riego, la fertilización y el manejo de sombra de acuerdo con las condiciones observadas. De este modo, se contribuyó a mejorar la eficiencia productiva y a mitigar riesgos asociados al cambio climático y a la variabilidad ambiental.

En comparación con estudios similares en agricultura inteligente, el presente trabajo aporta un enfoque aplicado y contextualizado a las condiciones agroclimáticas del Eje Cafetero colombiano, con el uso de plataformas de bajo costo y arquitectura escalable, lo que lo hace replicable para pequeños y medianos productores. A diferencia de investigaciones centradas exclusivamente en el desarrollo tecnológico o en análisis de datos aislados, esta investigación integra de manera efectiva infraestructura IoT,

recolección sistemática de datos y análisis técnico orientado a la acción agronómica.

Por tanto, se concluye que la implementación de soluciones tecnológicas basadas en IoT, acompañadas de análisis de datos agroambientales, representa una estrategia viable, accesible y altamente efectiva para fortalecer la agricultura de precisión en contextos rurales, mejorando tanto la sostenibilidad como la productividad del cultivo de café.

Referencias

- [1] A. L. Zambrano, «Agricultura digital en el cultivo de Pitahaya», *Latin-American Journal of Computing*, vol. 7, n° 2, pp. 22-33, 2020. <https://lajc.epn.edu.ec/index.php/LAJC/article/view/209>
- [2] «Agricultura 4.0 en Colombia: oportunidades y desafíos», Impacto TIC. Accedido: 17 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://impactotic.co/tecnologia/agricultura-4-0-en-colombia-oportunidades-y-desafios/>
- [3] J. P. Rodríguez, A. I. Montoya-Munoz, C. Rodríguez-Pabon, J. Hoyos, y J. C. Corrales, «IoT-Agro: A smart farming system to Colombian coffee farms», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 190, p. 106442, nov. 2021, doi: 10.1016/j.compag.2021.106442.
- [4] A. Sharma, D. Srivastava, R. Krishnamoorthy, S. Kumar Sinha, P. Jhansirani, y A. barve, «IoT-based optical sensor network for precision agriculture», *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 46, p. 101112, jun. 2025, doi: 10.1016/j.suscom.2025.101112.
- [5] T. Adamo, D. Caivano, L. Colizzi, G. Dimauro, y E. Guerriero, «Optimization of irrigation and fertigation in smart agriculture: An IoT-based micro-services framework», *Smart Agricultural Technology*, vol. 11, p. 100885, ago. 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.100885.
- [6] A. K. Saini, A. K. Yadav, y Dhiraj, «A Comprehensive review on technological breakthroughs in precision agriculture: IoT and emerging data analytics», *European Journal of Agronomy*, vol. 163, p. 127440, feb. 2025, doi: 10.1016/j.eja.2024.127440.
- [7] B. Jamshidi et al., «Internet of things-based smart system for apple orchards monitoring and management», *Smart Agricultural Technology*, vol. 10, p. 100715, mar. 2025, doi: 10.1016/j.atech.2024.100715.
- [8] H. Shahab, M. Naeem, M. Iqbal, M. Aqeel, y S. S. Ullah, «IoT-driven smart agricultural technology for real-time soil and crop optimization», *Smart Agricultural Technology*, vol. 10, p. 100847, mar. 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.100847.
- [9] A. Morchid et al., «IoT-enabled smart agriculture for improving water management:

- A smart irrigation control using embedded systems and Server-Sent Events», *Scientific African*, vol. 27, p. e02527, mar. 2025, doi: 10.1016/j.sciaf.2024.e02527.
- [10] P. Sankarasubramanian, «Enhancing precision in agriculture: A smart predictive model for optimal sensor selection through IoT integration», *Smart Agricultural Technology*, vol. 10, p. 100749, mar. 2025, doi: 10.1016/j.atech.2024.100749
- [11] J. E. H. Rubio y V. J. O. E, «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.º 1, Art. n.º 1, feb. 2022, doi: 10.17081/invinno.10.1.5016.
- [12] H. Araque Salazar y H. Duque, «Variables agronómicas determinantes de la productividad del cultivo de café en fincas del departamento de Caldas», *Rev. Cenicafé*, vol. 70, n.º 1, pp. 81-92, 2019, doi: 10.38141/10778/70106
- [13] W. A. Cardona et al., «Diversification, age, and organic amendments affect microbial and enzymatic activities in soils of Arabica coffee plantations in the tropical lowlands of Colombia», *Geoderma Regional*, vol. 41, p. e00966, jun. 2025, doi: 10.1016/j.geodrs.2025.e00966
- [14] CENICAFE, «Manejo del cultivo de café en condiciones de cambio climático», *REVISTA CENICAFE*, 2020.
- [15] F. Islam, I. Ahmed, y L. Mihet-Popa, «Development and testing of an IoT platform with smart algorithms for building energy management systems», *Energy and Buildings*, vol. 344, p. 115970, oct. 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2025.115970.
- [16] A. Liopa-Tsakalidi, V. Thomopoulos, P. Barouchas, A. D. Boursianis, y S. K. Goudos, «A LoRaWAN-based IoT platform for smart irrigation in olive groves», *Smart Agricultural Technology*, vol. 9, p. 100673, dic. 2024, doi: 10.1016/j.atech.2024.100673.
- [17] L. D. Valderrama Hurtado, «Red inalámbrica de sensores para monitoreo de cultivo de café», dic. 2022, Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/1992/64067>
- [18] J. A. G. L. F. & R. M. Giraldo, «Efecto de las temperaturas extremas en la floración del café», *Revista Colombiana de Ciencias Agrícolas*, vol. 2, nº 10, pp. 134-143, 2018.
- [19] C. H. de Freitas, R. D. Coelho, J. de Oliveira Costa, y P. C. Sentelhas, «A bitter cup of coffee? Assessing the impact of climate change on Arabica coffee production in Brazil», *Science of The Total Environment*, vol. 957, p. 177546, dic. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.177546.

- [20] JH. & P. J. Ramírez, «Impacto de la temperatura en el desarrollo del cafeto,» Impacto de la temperatura en el desarrollo del cafeto, vol. 3, n° 15, pp. 44-52, 2019
- [21] P. R.-V. J. & N.-R. C. Laderach, «Adaptation strategies to climate change for coffee production in Colombia,» Climatic Change, vol. 3, n° 109, pp. 641-662, 2011.
- [22] Centro Nacional de Investigaciones de Café, Ed., Aplicación de ciencia tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila. Cenicafé, 2019. doi: 10.38141/cenbook-0005.