

IoT-based microcontroller system for monitoring the organoleptic aroma of post-harvest coffee

Ilber Adonayt Ruge R.¹; Fabian Rolando Jiménez L.²; María Fernanda Hernández S.³; Valeria Molano Q.⁴

^{1,4}Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia, ilber.ruge@uptc.edu.co, fabian.jimenez02@uptc.edu.co, maria.hernandez38@uptc.edu.co, valeria.molano@uptc.edu.co

Abstract– *This paper presents the development of a low-cost electronic system designed to indirectly monitor the organoleptic attributes of coffee during the post-harvest stage, with the purpose of differentiating states such as cherry coffee, honey coffee, and dry parchment coffee. The system integrates MQ3 and MQ135 gas sensors, used to detect compounds associated with fermentation processes and the release of volatile organic compounds, together with a DHT11 sensor for measuring ambient temperature and humidity. Data acquisition and processing are carried out through an ESP32 microcontroller programmed in the Arduino® IDE, enabling local storage on a microSD card, visualization through a graphical interface developed in MATLAB®, and wireless transmission to the IoT platform ThingSpeak™ for remote monitoring. Experimental tests conducted in different post-harvest states revealed differentiated patterns in relative alcohol concentration, levels of volatile compounds, and humidity, consistent with the evolution of fermentation and drying processes. Qualitative validation with a coffee expert confirmed the potential of the system as an accessible and useful tool for post-harvest analysis and monitoring, contributing technological innovation to quality control in the coffee sector.*

Keywords– *Internet of Things (IoT); ESP32 microcontroller; post-harvest coffee aroma; ThingSpeak.*

Sistema microcontrolado basado en IoT para monitoreo del aroma organoléptico del café poscosecha

Ilber Adonayt Ruge R.¹; Fabian Rolando Jiménez L.²; María Fernanda Hernández S.³; Valeria Molano Q.⁴

^{1,4}Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia, ilber.ruge@uptc.edu.co, fabian.jimenez02@uptc.edu.co, maria.hernandez38@uptc.edu.co, valeria.molano@uptc.edu.co

Resumen— El artículo presenta el desarrollo de un sistema electrónico de bajo costo diseñado para monitorear de manera indirecta los atributos organolépticos del café durante la etapa de poscosecha, con el propósito de diferenciar estados como café cereza, honey y pergamino seco; para ello se integran sensores de gas MQ3 y MQ135, capaces de detectar compuestos asociados a la fermentación y la liberación de compuestos orgánicos volátiles, junto con un sensor DHT11 que mide temperatura y humedad ambiental, mientras que la adquisición y procesamiento de datos se realiza mediante un microcontrolador ESP32 programado en Arduino® IDE, el cual permite almacenar la información en una tarjeta microSD, visualizarla en una interfaz gráfica desarrollada en MATLAB® y transmitirla de forma inalámbrica a la plataforma IoT ThingSpeak™ para su monitoreo remoto; las pruebas experimentales realizadas en distintos estados de poscosecha evidenciaron patrones diferenciados en la concentración relativa de alcohol, niveles de compuestos volátiles y humedad, coherentes con la evolución de los procesos de fermentación y secado, y la validación cualitativa con un experto en café confirmó el potencial del sistema como una herramienta accesible y útil para el análisis y seguimiento de la poscosecha, aportando innovación tecnológica al control de calidad en el sector cafetero.

Palabras clave—Internet de las Cosas (IoT); microcontrolador ESP32; aroma del café poscosecha; ThingSpeak.

I. INTRODUCCIÓN

La calidad del café colombiano depende en gran medida de los procesos desarrollados durante la etapa de poscosecha, en la cual influyen de manera directa las condiciones climáticas y ambientales, así como las transformaciones bioquímicas a las que se ve expuesto el grano. Dichos factores inciden de forma significativa en la conformación del perfil organoléptico del café, afectando atributos como aroma, sabor y estabilidad del producto final [1], [2].

A lo largo de las diferentes etapas de poscosecha —café cereza, café seco tipo honey y café en pergamino seco— se presentan variaciones en variables como la temperatura, la humedad y la presencia de compuestos volátiles, las cuales impactan tanto el tratamiento del grano como sus características sensoriales [3]. No obstante, el control y monitoreo de estas variables suelen basarse en apreciaciones empíricas o en instrumentación de alto costo, lo que limita su acceso para pequeños y medianos productores [4].

En este contexto, el desarrollo de sistemas de monitoreo basados en plataformas electrónicas de bajo costo se ha consolidado como una alternativa confiable y de alto valor

para la supervisión y la toma de decisiones durante el procesamiento del café. La incorporación de sensores específicos permite obtener información relevante sobre el comportamiento de las muestras en tiempo real, facilitando la identificación de tendencias asociadas a los procesos físicos y químicos del grano. Esta información, complementada con la experiencia del caficultor, contribuye a optimizar el manejo de las etapas de poscosecha y a mejorar la uniformidad en la calidad del producto [4].

El presente trabajo propone la implementación de un sistema embebido orientado a la valoración y estimación indirecta del perfil organoléptico del café en tres etapas específicas de la poscosecha: café cereza, café honey y café en pergamino seco. El sistema integra sensores de gas para la detección de parámetros asociados a los procesos bioquímicos del grano, específicamente el sensor MQ3, sensible a alcoholes y etanol, y el sensor MQ135, empleado para la detección de compuestos orgánicos volátiles relacionados con procesos aromáticos y de fermentación.

Adicionalmente, se incorporan mediciones de temperatura y humedad ambiental, permitiendo un análisis integral de las condiciones que influyen en el comportamiento del café. La adquisición y el procesamiento de los datos se realizan mediante una placa de desarrollo ESP32, con visualización tanto en una interfaz gráfica de usuario como en una plataforma IoT para su análisis y seguimiento remoto.

Cabe resaltar que el sistema propuesto no busca sustituir los métodos formales de catación, sino ofrecer una herramienta tecnológica de apoyo que facilite la visualización y el análisis de las variables propias del grano y de su entorno. De esta manera, se promueve un mayor entendimiento del comportamiento físico y químico del café durante la poscosecha, contribuyendo a la toma de decisiones informadas y al mantenimiento de una mayor consistencia en la calidad del café producido.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Diversos estudios han analizado el impacto de los procesos de poscosecha en la calidad del café, evidenciando que variables como el método de procesamiento, las condiciones ambientales y la dinámica de fermentación influyen directamente en las características fisicoquímicas y sensoriales del grano. Investigaciones como las de Cortes et al. [2] y Widodo et al. [5] demuestran que los tratamientos

poscosecha, tanto naturales como lavados, generan variaciones significativas en parámetros como pH, acidez, humedad y perfil sensorial, resaltando la importancia del control de estas etapas para garantizar la calidad final del producto.

De manera complementaria, estudios recientes han evaluado el efecto del origen geográfico y de las condiciones de procesamiento sobre la composición química y sensorial del café, confirmando la alta variabilidad asociada a la poscosecha [3], [6].

En relación con la fermentación del café, Carvalho et al. [1] presentan una revisión detallada del proceso, destacando el papel de los compuestos orgánicos volátiles y su relación con los atributos aromáticos. Resultados similares se reportan en trabajos experimentales que analizan la composición bioquímica y sensorial del café bajo diferentes métodos de poscosecha, evidenciando cambios progresivos en la liberación de compuestos volátiles a lo largo del procesamiento [7]–[9]. Asimismo, Worku et al. [8] y Buitrago et al. [10] enfatizan que las condiciones ambientales y los tratamientos aplicados después de la cosecha son determinantes para la calidad funcional y sensorial del grano.

Desde el punto de vista de variables físicas y ambientales, varios estudios han abordado el comportamiento de la humedad, la temperatura y las propiedades estructurales del grano. Al-Shemmeri et al. [11] analizan la evolución de la porosidad y las propiedades termofísicas del café, mientras que Jakkaew et al. [12] proponen un enfoque basado en datos para mejorar el secado del café mediante el monitoreo de temperatura y humedad. Estos trabajos refuerzan la relevancia de registrar variables ambientales durante la poscosecha, dado su impacto en la estabilidad y calidad del producto final.

Por otra parte, se han desarrollado enfoques tecnológicos orientados al monitoreo del café mediante visión computacional, aprendizaje automático y sistemas basados en datos. Investigaciones como las de Kasama et al. [13], Eron et al. [14] y Basame et al. [15] emplean técnicas de visión artificial para la detección de frutos, evaluación de madurez y monitoreo del cultivo, mientras que Diniz et al. [16] utilizan series temporales NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) para la clasificación escalable de cultivos de café. Aunque estos enfoques muestran un alto nivel de automatización y precisión, se centran principalmente en etapas previas a la poscosecha y requieren infraestructura computacional más compleja.

Adicionalmente, se reportan soluciones basadas en IoT y tecnologías emergentes para la trazabilidad y el monitoreo ambiental del café. Valencia et al. [17] proponen un sistema apoyado en IoT y blockchain para el transporte y almacenamiento del café, destacando la importancia de registrar variables ambientales para asegurar la calidad durante la cadena productiva. Sin embargo, estos sistemas no abordan de manera directa la caracterización organoléptica del grano durante la poscosecha.

La literatura reporta múltiples estudios sobre análisis sensorial, fisicoquímico y monitoreo del café; sin embargo, son limitadas las propuestas que integran sensores de bajo

costo, medición de compuestos orgánicos volátiles y plataformas IoT para evaluación organoléptica en poscosecha. El sistema propuesto destaca por su accesibilidad y portabilidad, apoyando la identificación de estados del café mediante variables aromáticas y ambientales.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La caracterización aromática del café durante la etapa de poscosecha depende de la dinámica de los compuestos volátiles liberados en cada fase del proceso. Dichos compuestos pueden ser monitoreados mediante tecnologías sensoriales, permitiendo registrar variaciones asociadas al comportamiento físico y químico del grano, las cuales influyen directamente en la calidad final del producto. Con este propósito, se desarrolló un prototipo electrónico orientado al análisis cualitativo de los perfiles aromáticos del café en tres estados de poscosecha: café cereza, café *honey* y café en pergamino seco, como se muestra en la Fig. 1.



Fig. 1. Estados del café en poscosecha: cereza, *honey* y pergamino seco.

El sistema propuesto consiste en una plataforma de monitoreo organoléptico basada en la detección de compuestos gaseosos y variables ambientales relacionadas con el comportamiento aromático del café. La arquitectura general del sistema se presenta en la Fig. 2, donde se ilustran los principales módulos de adquisición, procesamiento, visualización y almacenamiento de la información.

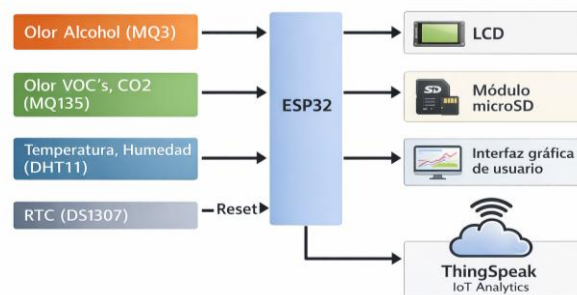


Fig. 2. Diagrama de bloques del sistema de monitoreo para café en diferentes estados de poscosecha.

Los sensores empleados presentan alta sensibilidad a variaciones en la concentración de gases; sin embargo, su precisión absoluta es inferior a la de equipos industriales especializados, por lo que su uso se orienta a la detección de patrones relativos más que a la cuantificación exacta de compuestos.

En el sistema propuesto, el sensor MQ3 se selecciona por su alta sensibilidad a vapores alcohólicos y etanol, compuestos asociados a los procesos de fermentación del café, lo que permite identificar variaciones relevantes en el estado fermentativo del grano, conforme a las especificaciones del fabricante [18]. De manera complementaria, el sensor MQ135 se emplea para la detección de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y dióxido de carbono, variables vinculadas con procesos aromáticos y de degradación orgánica durante la poscosecha, ampliando la caracterización del entorno gaseoso del café en sus distintos estados [19].

Adicionalmente, el sensor DHT11 permite medir temperatura y humedad relativa, factores que influyen directamente en la liberación de compuestos volátiles y en la estabilidad físico-química del grano. El registro de estas variables es fundamental para interpretar adecuadamente las señales de los sensores de gas, considerando sus rangos de operación y precisión [20].

El sistema se basa en el microcontrolador ESP32, encargado de la adquisición, preprocesamiento y comunicación de los datos, seleccionado por su capacidad de procesamiento, conectividad inalámbrica y bajo consumo, adecuados para aplicaciones IoT en tiempo real [21]. Un módulo RTC (Real Time Clock) DS1307 permite asociar marcas temporales precisas a cada medición. La información se visualiza en una pantalla de cristal líquido (LCD), se almacena en una tarjeta microSD y se transmite a la plataforma ThingSpeak™ para monitoreo remoto. Adicionalmente, una interfaz en MATLAB® facilita el análisis comparativo de los datos de poscosecha.

Para la comunicación IoT, el ESP32 establece una conexión Wi-Fi y transmite los datos hacia la plataforma ThingSpeak™ mediante el protocolo HTTP utilizando una API REST. Los datos se envían en formato de cadena codificada que incluye la marca temporal, temperatura, humedad, valores del sensor MQ3 y MQ135. Cada variable es asignada a un campo específico dentro del canal de ThingSpeak, permitiendo su almacenamiento estructurado y visualización en tiempo real. El intervalo de transmisión se configuró en aproximadamente 15 segundos, logrando un balance entre resolución temporal y consumo de red. La latencia promedio de envío es inferior a 2 segundos en condiciones normales de conectividad.

La Fig. 3 muestra el prototipo para identificación organoléptica indirecta del café en poscosecha. Fabricado por impresión 3D FDM (Modelado por Deposición Fundida, por sus siglas en inglés), ofrece ligereza y portabilidad. El encapsulado optimiza la circulación de aire hacia los sensores de gas, garantizando exposición homogénea y la adquisición

sincronizada de variables aromáticas y ambientales del sistema electrónico.

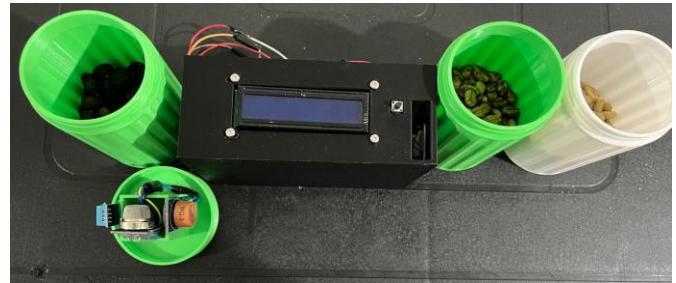


Fig. 3. Prototipo para la identificación organoléptica de aromas del café en diferentes estados de poscosecha.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Fig. 4 muestra el prototipo desarrollado y utilizado para la adquisición de datos durante las pruebas de identificación organoléptica de aromas en diferentes estados del café en poscosecha. En el dispositivo se integran los sensores MQ3 y MQ135, empleados para la detección de alcoholes y VOC, respectivamente, así como el sensor DHT11 para el registro de la temperatura y la humedad relativa del ambiente.

La disposición de estos elementos permite la captura simultánea de variables aromáticas y ambientales, facilitando el análisis conjunto de su comportamiento durante las diferentes etapas evaluadas. Asimismo, el sistema incorpora un módulo de almacenamiento en tarjeta microSD, un módulo RTC para la generación de marcas temporales, un botón de reinicio y una pantalla LCD para la visualización en tiempo real de las mediciones, garantizando la correcta operación y seguimiento del proceso experimental.

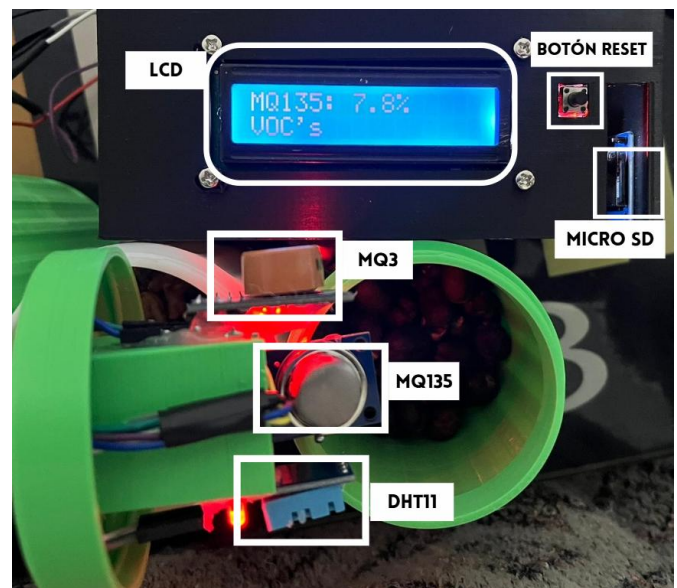


Fig. 4. Prototipo para la identificación organoléptica de aromas del café.

Los datos adquiridos por el sistema se almacenan de manera local en la memoria microSD en formato de texto estructurado tipo CSV (Comma-Separated Values, por sus siglas en inglés), lo que permite su importación directa a herramientas de análisis como Microsoft Excel. Como se observa en la Fig. 5, cada registro incluye la marca temporal generada por el módulo RTC, compuesta por año, mes, día y hora, seguida de los valores medidos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), concentración relativa de alcohol detectada por el sensor MQ3 y el nivel de compuestos orgánicos volátiles reportado por el sensor MQ135.

Esta estructura de datos facilita el procesamiento, la comparación entre estados de poscosecha y el análisis temporal de las variables registradas. Además, se desarrolló una interfaz gráfica en MATLAB® para el análisis y la visualización de los datos obtenidos por el sistema de monitoreo. La Fig. 5 muestra el entorno implementado, en el cual se presentan de manera clara y organizada las mediciones de temperatura, humedad relativa, concentración relativa de alcohol y niveles de VOC mediante gráficas dinámicas.

La interfaz permite representar cada variable en función del tiempo, utilizando la información de fecha y hora proporcionada por el módulo RTC, lo que facilita el análisis temporal de las mediciones. Esta representación posibilita la identificación de patrones, variaciones y comportamientos característicos de los compuestos aromáticos del café durante la etapa de poscosecha, así como la comparación visual entre los diferentes estados evaluados. De esta manera, la herramienta desarrollada contribuye a una interpretación más precisa de la evolución de las variables medidas y apoya el análisis cualitativo del comportamiento organoléptico del café.

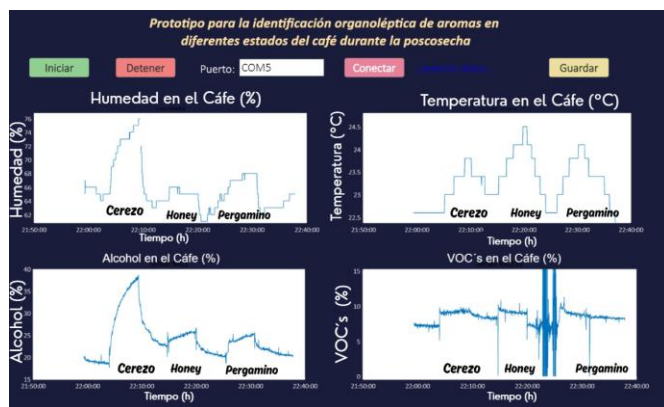


Fig. 5. Interfaz gráfica desarrollada en MATLAB® para la visualización de las variables medidas.

De manera complementaria, el sistema se integra con la plataforma en la nube ThingSpeak™ para el monitoreo remoto de las variables medidas. La Fig. 6 muestra la interfaz configurada, en la cual los datos captados por los sensores se envían automáticamente mediante conexión Wi-Fi con un intervalo aproximado de 15 s. En esta plataforma se definen canales independientes para cada variable, lo que permite la

generación automática de gráficas en línea y su acceso desde cualquier dispositivo con conexión a Internet.

La incorporación de ThingSpeak™ facilita el seguimiento remoto de la evolución de la temperatura, la humedad relativa, la concentración de alcohol y los niveles de VOC, además de proporcionar almacenamiento histórico de las mediciones en la nube, fortaleciendo el análisis continuo del proceso. Al comparar las visualizaciones obtenidas en la interfaz gráfica desarrollada en MATLAB® con las gráficas generadas en ThingSpeak™, se observa que MATLAB® presenta una mayor sensibilidad y resolución temporal, dado que opera con el registro directo enviado por el microcontrolador. En contraste, ThingSpeak™ emplea un muestreo más espaciado, lo que tiende a suavizar o atenuar variaciones rápidas en las señales. No obstante, en ambas plataformas se aprecia la dinámica general de las variables sensadas durante la etapa de poscosecha del café.

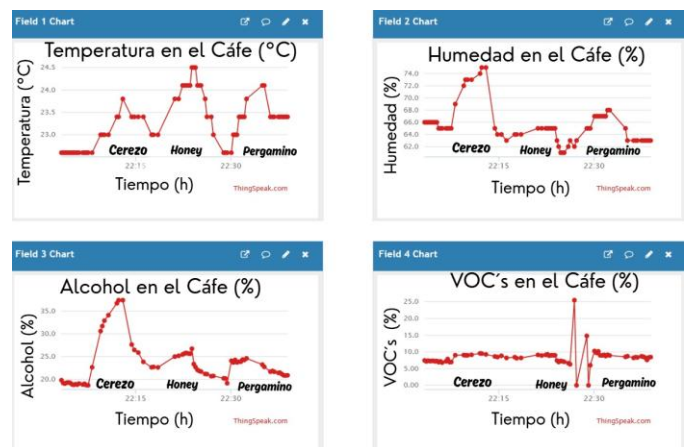


Fig. 6. Visualización de los datos del prototipo en la plataforma ThingSpeak™.

Con el fin de fortalecer el análisis comparativo, se calcularon descriptores estadísticos básicos para cada estado de poscosecha. El café en estado cereza presenta los valores promedio más altos en el sensor MQ3, indicando una mayor concentración relativa de alcohol, mientras que los estados honey y pergamino seco muestran una disminución progresiva. De manera similar, la humedad relativa presenta una tendencia decreciente a medida que avanza el proceso de secado. El análisis de la variabilidad muestra comportamientos consistentes dentro de cada estado, lo que sugiere una adecuada repetibilidad de las mediciones. Estos resultados permiten establecer una diferenciación clara entre los estados evaluados a partir de las señales obtenidas por los sensores.

En cuanto a los compuestos orgánicos volátiles, la interfaz gráfica desarrollada en MATLAB® permite identificar variaciones leves pero detectables, mientras que en la plataforma ThingSpeak™ dichas fluctuaciones no se evidencian con la misma claridad, debido al intervalo de muestreo empleado por la plataforma. Respecto a la temperatura, no se observan diferencias significativas entre los

estados evaluados, dado que el rango registrado presenta una variación aproximada de cuatro grados entre los valores mínimo y máximo a lo largo del experimento.

A partir de los datos registrados se identifican relaciones consistentes entre las variables medidas y los estados de poscosecha, como se resume en la Tabla I. En particular, se observa una correlación directa entre la concentración relativa de alcohol y la humedad en el estado cereza, asociada a una mayor actividad fermentativa. Asimismo, el proceso de transición hacia el estado *honey* evidencia una disminución del alcohol y un comportamiento más variable de los compuestos orgánicos volátiles. Finalmente, en el estado de pergamino seco se presentan valores bajos y estables de alcohol y VOC, indicando una mayor estabilidad físico-química del grano.

TABLA I.
COMPARACIÓN DE VARIABLES EN ESTADOS DE POSCOSECHA DEL CAFÉ.

Estado del café	Alcohol (%)	VOC (%)	Humedad (%)	Temperatura (°C)
Cereza	1.6 – 1.8	5.2 – 5.3	7.0 – 8.0	25 – 27
Honey	1.1 – 1.3	5.2 – 5.8	4.8 – 5.2	26 – 28
Pergamino seco	0.9 – 1.0	5.2 – 5.3	6.5 – 7.2	26 – 28

La diferencia entre el estado cereza y pergamino seco en la variable de alcohol supera el 60%, evidenciando una clara separabilidad entre etapas de poscosecha. En este sentido, los comportamientos registrados por los sensores, particularmente en las variables asociadas a la concentración de alcohol, la humedad y los compuestos orgánicos volátiles, muestran coherencia con las características aromáticas esperadas para cada estado del café, de acuerdo con la evaluación sensorial del especialista. Esta correspondencia sugiere que el sistema desarrollado es capaz de capturar variaciones relevantes asociadas a los procesos de fermentación y secado, aun cuando no pretende reemplazar una evaluación sensorial formal.

Al comparar conceptualmente el sistema propuesto con soluciones comerciales existentes, se identifican instrumentos como las narices electrónicas profesionales y los sistemas de análisis de olores basados en cromatografía de gases, los cuales ofrecen una caracterización más precisa y detallada de los compuestos orgánicos volátiles. Entre estos se encuentran plataformas comerciales de nariz electrónica utilizadas en investigación y control de calidad alimentaria, capaces de generar huellas aromáticas complejas mediante arreglos de sensores avanzados y algoritmos de reconocimiento de patrones [22], así como sistemas de cromatografía de gases acoplados a olfatometría, ampliamente empleados en laboratorios especializados para el análisis exhaustivo de aromas y compuestos volátiles [23]. Asimismo, proveedores especializados en medición de olor y VOC ofrecen soluciones integrales orientadas a aplicaciones industriales y científicas, las cuales requieren infraestructura de laboratorio, personal altamente capacitado y elevados costos de adquisición y operación [24]. Desde una perspectiva económica, el prototipo desarrollado para la identificación indirecta de atributos aromáticos del café en poscosecha presenta una reducción

significativa de costos frente a soluciones comerciales especializadas, como narices electrónicas industriales y sistemas de cromatografía de gases, cuyos costos alcanzan varios cientos o miles de dólares.

El sistema propuesto emplea sensores de bajo costo, de fácil adquisición e integración, lo que permite caracterizar la dinámica de los compuestos orgánicos volátiles sin requerir infraestructura compleja ni equipamiento especializado. La Tabla II presenta el costo de los principales componentes del prototipo, el cual integra sensores de alcohol, compuestos orgánicos volátiles, temperatura y humedad, junto con un microcontrolador con capacidades de procesamiento e IoT, módulos de visualización, almacenamiento y una estructura impresa en 3D. El costo base total estimado es de 47.9 USD, lo que evidencia la accesibilidad del sistema y su potencial de replicabilidad en entornos de pequeña y mediana escala.

Con el fin de obtener una estimación más representativa del valor total del desarrollo, se incorpora el Factor de Valor Agregado (FVA), definido como un coeficiente multiplicador del costo base que integra el esfuerzo técnico asociado al diseño e implementación del sistema. Este enfoque se fundamenta en modelos de costeo basados en actividades [25]. En este trabajo, el FVA se estima considerando tres dimensiones de carácter laboral: desarrollo de firmware y software (peso 0.40), integración y ensamblaje del sistema (peso 0.30), y calibración y validación experimental (peso 0.30), evaluadas mediante criterios como la complejidad técnica, el tiempo de desarrollo, el nivel de especialización requerido y el grado de experimentación. A partir de esta valoración se obtiene un FVA aproximado de 1.86, con lo cual el costo técnico final asciende a 89.1 USD, reflejando tanto el costo de los componentes como el conocimiento aplicado y el trabajo especializado involucrado en la implementación del sistema, tal como se muestra en la ecuación (1).

$$FVA = 1 + \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot S_i \quad (1)$$

donde S_i representa la puntuación normalizada de cada dimensión considerada (en un rango de 0 a 1) y w_i corresponde al peso asignado a cada una. El FVA se estima considerando tres dimensiones de carácter laboral: desarrollo de firmware y software (peso 0.40), integración y ensamblaje del sistema (peso 0.30), y calibración y validación experimental (peso 0.30). Cada dimensión es evaluada mediante una puntuación normalizada y ponderada según su relevancia, conforme a la ecuación (1). De esta manera, el costo técnico final se obtiene como el producto entre el costo base y el FVA, permitiendo reflejar no solo el valor de los componentes, sino también el conocimiento aplicado y el trabajo especializado involucrado en la implementación del sistema.

Aunque el ESP32 es ampliamente utilizado en prototipos, sus capacidades de conectividad y procesamiento permiten su integración en arquitecturas de IoT industrial. El sistema

propuesto puede escalarse mediante el uso de brokers MQTT, nodos de cómputo en el borde o pasarelas de comunicación, facilitando la conexión de múltiples unidades de monitoreo distribuidas en centros de beneficio de café. Esto posibilita el seguimiento en tiempo real de las condiciones de poscosecha y la generación de información para la toma de decisiones, alineándose con los principios de la Industria 4.0. Adicionalmente, su compatibilidad con protocolos estándar permite su integración con plataformas de análisis de datos y sistemas de supervisión.

TABLA II.
 COMPARATIVA DE COSTOS.

Componente	Variable	Costo (USD)
Sensor MQ3	Detección de alcohol (etanol)	6.5
Sensor MQ135	Compuestos orgánicos volátiles (VOC, CO ₂)	8.2
Sensor DHT11	Temperatura y humedad relativa	3.1
ESP32	Procesamiento, adquisición y conectividad IoT	9.5
LCD 2×16 + módulo I2C	Visualización local de datos	6.8
Módulo microSD	Almacenamiento local de datos	2.0
Módulo RTC DS1307	Marca temporal de registros	2.3
Fuente de alimentación	Energía del sistema	2.0
Estructura impresa en 3D y cableado	Integración física y encapsulado	7.5
Subtotal (costo base)		47.9
Factor de Valor Agregado (FVA)	Basado en desarrollo e integración	1.86
Costo técnico estimado	Costo base × FVA	89.1

Si bien los sistemas comerciales ofrecen mayores niveles de precisión, certificación y estandarización, la propuesta desarrollada cumple adecuadamente con los requerimientos funcionales de adquisición, visualización, almacenamiento y transmisión de datos, validando su pertinencia como un sistema electrónico de apoyo a la identificación y diferenciación de clases de café en etapas de poscosecha.

V. CONCLUSIONES

El análisis de las señales obtenidas a partir de los sensores de gas MQ3 y MQ135 evidencia una diferenciación clara y coherente entre los distintos estados de poscosecha del café, asociada a la actividad volátil del grano. En particular, el café en estado cereza presenta un incremento pronunciado en la concentración relativa de alcohol, indicativo de una fermentación activa, mientras que en el estado honey se observa una disminución progresiva del alcohol acompañada de variaciones en los compuestos orgánicos volátiles, coherentes con el inicio del secado y la liberación de ácidos orgánicos.

Por su parte, el café en pergamino seco muestra una reducción significativa en ambas señales, lo que sugiere una mayor estabilidad química del grano. Estos comportamientos, junto con las variaciones observadas en humedad y temperatura, presentan alta correspondencia con lo esperado para cada etapa de poscosecha y con la apreciación sensorial

de un experto, validando el sistema como una herramienta de apoyo para la identificación y diferenciación de clases de café, sin pretender sustituir métodos formales de catación o análisis instrumental especializado.

El diseño y la implementación del prototipo consolidan una solución electrónica funcional, portátil y de bajo costo para el monitoreo organoléptico indirecto del café en poscosecha. La arquitectura modular del sistema, la integración de sensores de gas y variables ambientales, junto con mecanismos de visualización local, almacenamiento y transmisión en la nube, permiten una caracterización consistente de los compuestos volátiles asociados a cada estado del grano.

Desde una perspectiva tecnológica y económica, el sistema desarrollado se presenta como una alternativa accesible frente a soluciones comerciales especializadas, con potencial de aplicación en entornos educativos, productivos de pequeña y mediana escala, y contextos rurales. Su diseño modular facilita su adopción y futura mejora mediante calibración avanzada, integración de aprendizaje automático y control automático. Asimismo, el sistema ofrece potencial de escalabilidad hacia entornos industriales mediante su integración con arquitecturas IoT distribuidas y plataformas de análisis de datos.

REFERENCIAS

- [1] L. Carvalho, M. Gomes, L. Oliveira, and L. Santos, "Coffee fermentation process: A review," *Food Research International*, vol. 169, pp. 112793, 2023.
- [2] E. Cortes, C. Fuentes, P. Gentile, J. Giron and A. Fuentes, "Impact of post-harvest treatments on physicochemical and sensory characteristics of coffee beans in Huila, Colombia," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 187, pp. 111852, 2022.
- [3] F. Borém, J. Shuler, F. DaMatta and J. Ranallo, "Environmental and post-harvest processing factors that impact coffee quality," *Advances in Botanical Research*, vol. 114, pp. 525–558, 2025.
- [4] A. Rendón-Mera, D. Corrales and G. Peñuela, "A systematic mapping study of coffee quality throughout the production-to-consumer chain," *Journal of Food Quality*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/8019251>.
- [5] P. Widodo, M. Yulianto, H. Ariyanto and V. Paramita, "Efficacy of natural and full washed post-harvest processing variations on arabica coffee characteristics," *Materials Today: Proceedings*, vol. 87, pp. 79-85, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.376>.
- [6] H. Tieghi, L. Pereira, G. Silva and P. Pires, "Effects of geographical origin and post-harvesting processing on the bioactive compounds and sensory quality of Brazilian specialty coffee beans," *Food Research International*, vol. 186, pp. 114336, 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114346>.
- [7] L. Acquaticci, S. Angeloni, N. Cela and N. Condelli, "Impact of coffee species, post-harvesting treatments and roasting conditions on coffee quality and safety related compounds," *Food Control*, vol. 149, pp. 109714, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109714>.
- [8] M. Woruk, T. Astatkie and P. Boeckx, "Effect of growing conditions and postharvest processing on arabica coffee bean physical quality features and defects," *Heliyon*, vol. 8, 2022, doi: [10.1016/j.heliyon.2022.e09201](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09201).
- [9] Y. Rodriguez, N. Guzman and J. Hernández, "Effect of the postharvest processing method on the biochemical composition and sensory analysis of arabica coffee," *Engenharia Agricola*, vol. 40, no. 2, 2020, doi: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n2p177-183/2020>.
- [10] J. Buitrago, H. Tinoco, L. Perdomo and J. Lopez, "Physical-mechanical characterization of coffee fruits *Coffea arabica* L. var. Castillo classified

- by a colorimetry approach,” *Materialia*, vol. 21, pp. 101330, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101330>.
- [11] M. Al-Shemmeri, P. Fryer, R. Farr And E. López, “Development of coffee bean porosity and thermophysical properties during roasting,” *Journal of Food Engineering*, vol. 378, pp. 112096, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112096>.
- [12] P. Jakkaew, Y. Yingchutrakul and N. Aunsri, “A data-driven approach to improve coffee drying: Combining environmental sensors and chemical analysis,” *PLoSOne*, vol. 19, no. 2, 2024, doi: [10.1371/journal.pone.0296526](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296526).
- [13] E. Kasama, D. Tedesco, V. Carreira and R. Pereira, “Monitoring coffee fruit maturity using an enhanced convolutional neural network under different image acquisition settings,” *Scientia Horticulturae*, vol. 328, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112957>.
- [14] F. Eron, M. Noman, R. Ricon and A. Chalfun, “Computer Vision-Aided Intelligent Monitoring of Coffee: Towards Sustainable Coffee Production,” *Scientia Horticulturae*, vol. 327, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112847>.
- [15] H. Basame, J. Molin, D. Althoff and M. Martello, “Detection, classification, and mapping of coffee fruits during harvest with computer vision,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 183, pp. 106066, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106066>.
- [16] E. Diniz and E. Gomede, “Scalable coffee crop classification using NDVI time series from SATVeg and machine learning models,” *Smart Agricultural Technology*, vol. 12, pp. 101360, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101360>.
- [17] C. Valencia, J. Grass and G. Ramirez, “A Smart Contract for Coffee Transport and Storage With Data Validation,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 37857–37869, 2022, doi: [10.1109/ACCESS.2022.3165087](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3165087).
- [18] Hanwei Electronics, “MQ-3 alcohol gas sensor datasheet.” [Online]. Available: <https://cdn.sparkfun.com/assets/6/a/1/7/b/MQ-3.pdf>.
- [19] Olimex Electronics, “MQ-135 gas sensor datasheet.” [Online]. Available: <https://www.olimex.com/Products/Components/Sensors/Gas/SNS-MQ135/resources/SNS-MQ135.pdf>.
- [20] Aosong Electronics, “DHT11 temperature and humidity sensor datasheet.” [Online]. Available: <https://www.haoyuelectronics.com/Attachment/DHT11/DHT11.pdf>.
- [21] Espressif Systems, “ESP32 series datasheet.” [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datash_eet_en.pdf.
- [22] Analizador de olores Vigi e-nose. [En línea]. Disponible: <https://rptechlab.com/productos/analizador-de-olores/>.
- [23] Odosense – cromatógrafo de olores. [En línea]. Disponible: <https://inteccon.com/es/categoria-producto/monitoreo-de-la-calidad-del-aire/cromatografos-de-olores/>.
- [24] Olfasense – Equipos de medición de olor. [En línea]. Disponible: <https://www.olfasense.com/es/equipos-de-medicion-de-olor/>.
- [25] A. M. M. Saeed et al., “Activity-Based Costing (ABC) in the Manufacturing Industry: A Literature Review,” *Journal of Developing Economies*, vol. 8, no. 2, pp. 261–270, 2023, doi: <https://doi.org/10.20473/jde.v8i2.40426>.