

UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA

EVALUACIÓN DEL PERFIL AROMÁTICO DEL CAFÉ HONDUREÑO
(Coffea arábica L.) MEDIANTE NARIZ ELECTRÓNICA

POR:

MARIA FERNANDA IZAGUIRRE CERRATO

TESIS



CATACAMAS

OLANCHO

DICIEMBRE, 2024

EVALUACIÓN DEL PERFIL AROMÁTICO DEL CAFÉ HONDUREÑO
(*Coffea arábica* L.) MEDIANTE NARIZ ELECTRÓNICA

POR

MARIA FERNANDA IZAGUIRRE CERRATO

JHUNIOR ABRAHAN MARCIA FUENTES

Asesor principal

TESIS

PRESENTADO A LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA COMO
REQUISITO PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERIA EN TECNOLOGIA ALIMENTARIA

CATACAMAS

OLANCHO

DICIEMBRE, 2024

ACTA DE SUSTENTACION

DEDICATORIA

A Dios, a quien agradezco cada día por la fortaleza y la dirección que me ha brindado a lo largo de este camino.

A mis queridos padres, Devis Josué Izaguirre y Heisy Carolina Cerrato, por su amor incondicional y su apoyo constante a lo largo de cada paso en mi carrera sus sacrificios su fe en mí y han sido la luz que me ha guiado.

A mis hermanos, Valeri y Axel Izaguirre, por ser mi mayor fuente de motivación, y por estar siempre a mi lado, compartiendo mis alegrías y desafíos.

A mi abuela, Rosa Margarita Figueroa, por su ternura y sabiduría, que han sido un pilar esencial en mi vida, y a mi tía Alba Rosa Cerrato, por su amor y su gran apoyo, que han sido fundamentales para alcanzar este logro.

A mis tíos, Juan y Ruth Izaguirre, por su cariño inquebrantable y por estar siempre dispuestos a brindarme su apoyo.

A mis primos, David Izaguirre, Josué Izaguirre, Anna Núñez, Christopher Núñez y Daniel Núñez por su aliento en este viaje.

Esta tesis es el reflejo de un esfuerzo colectivo, y cada uno de ustedes ha sido una parte indispensable. A todos ustedes, Les dedico este logro con el más profundo amor y agradecimiento.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han sido parte fundamental en la realización de esta tesis.

En primer lugar, agradezco profundamente a mis asesores de tesis, cuya orientación y apoyo han sido cruciales en cada etapa del proceso. Al PhD Jhunion Marcia, mi asesor principal, por su guía. A mis asesores auxiliares, M. Sc Arelys Betancourth y M. Sc Jaime Salgado, por sus aportaciones en mi investigación.

Mi gratitud también se extiende a la Universidad Nacional de Loja, Ecuador, por brindarme la oportunidad de llevar a cabo parte de la fase experimental en sus instalaciones. Agradezco especialmente al equipo de profesionales que me acompañó, M. Sc Beatriz Guerrero y a la PhD María José Valarezo, por su apoyo y su dedicación en cada fase del proceso experimental.

Agradezco también a los M.Sc Juan Maita por su apoyo en logística, facilitando todos los aspectos necesarios para el buen desarrollo de la investigación.

No puedo dejar de mencionar a mis amigos y compañeros de clase, especialmente a Gloria Almendarez, Ana Irías y Alondra Guerra, Eduardo Zuniga, Jorge Cáceres. Su amistad y compañerismo han sido una fuente constante de motivación y alegría a lo largo de toda la carrera. Su apoyo y compañía han sido invaluable en este viaje.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento

INDICE DE CONTENIDO

ACTA DE SUSTENTACION.....	I
DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE TABLAS	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE ANEXOS	VIII
RESUMEN	VII
I INTRODUCCIÓN	1
II OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
III REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1 Café (<i>Coffea arábica</i> L.).....	4
3.2 Industria del café en Honduras	5
3.2.1 Variedad Catuaí	7
3.2.2 Variedad Typica	8
3.2.3 Variedad Contreras	9
3.3 Calidad sensorial en la Industria del café.....	9
3.3.1 Atributos sensoriales del café.....	10
3.4 Evaluación sensorial del café	11
3.4.1 Métodos tradicionales de evaluación sensorial del café	12
3.4.2 Limitaciones y desafíos de la evaluación sensorial tradicional.....	12
3.5 Principio de funcionamiento de la nariz electrónica.....	13
3.5.1 Aplicaciones actuales de la nariz electrónica en la industria	14

IV MATERIALES Y MÉTODOS	15
4.1 Lugar de la investigación	15
4.2 Materiales y equipo.....	16
4.3 Método	17
4.3.1 Metodología.....	18
4.4 Análisis de los resultados	28
4.5 Diseño experimental	28
4.6 Variables de respuesta.....	28
V RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
5.1 Análisis bromatológico	30
5.2 Análisis fisicoquímicos	31
5.3 Análisis sensorial	32
5.4 Análisis nariz electrónica	34
VI CONCLUSIONES	37
VII RECOMENDACIONES.....	38
VIII BIBLIOGRAFÍA	39
ANEXOS	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación taxonómica del café.....	5
Tabla 2. Producción de café y productividad estratificada por Departamento cosecha 2022-2023.....	6
Tabla 3. Relaciones entre los componentes del grano y las características sensoriales de la bebida de café	10
Tabla 4. Materiales y equipo para la investigación.....	16
Tabla 5. Escala de clasificación para la catación del café de acuerdo al puntaje total, según SCAA	26
Tabla 6. Diseño experimental.....	28
Tabla 7. Composición bromatológica de las seis variedades de café <i>Coffea arábica</i> L. expresado en porcentaje	30
Tabla 8. Composición fisicoquímica de las seis variedades de café <i>Coffea arábica</i> L.	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Universidad Nacional de Loja, ubicada en Loja, Ecuador.	15
Figura 2. Análisis de humedad.	19
Figura 3. Análisis de ceniza.	20
Figura 4. Análisis de grasa cruda.....	21
Figura 5. Análisis de proteína.....	22
Figura 6. Análisis de fibra.	23
Figura 7. Medicion de pH a las infusiones.....	24
Figura 8. Medicion de grados brix.....	24
Figura 9. Medición de la viscosidad en las muestras de café.....	25
Figura 10. Puntuación en taza de las variedades evaluadas proceso de melado	32
Figura 11. Puntuación de atributos sensoriales del café variedad Catuaí.	33
Figura 12. Distribución química de compuestos volátiles en cada variedad	34

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Procedimiento del análisis de proteínas mediante titulación	44
Anexo 2. Montaje del equipo Soxhlet	44
Anexo 3. Proceso de digestión y filtración para fibra cruda	45
Anexo 4. Medición del pH en las muestras de café.....	45
Anexo 5. Medición de la viscosidad en las muestras de café	46
Anexo 6. Preparación de las muestras para el análisis de grados Brix.....	46
Anexo 7. Modelo de nariz electrónica utilizado.....	47

Izaguirre Cerrato, M.F. 2024. Evaluación del perfil aromático del café hondureño (*Coffea arabica* L.) mediante nariz electrónica. Tesis. Inga. en Tecnología Alimentaria, Catacamas, Olancho, Honduras, Universidad Nacional de Agricultura. Pág. 58.

RESUMEN

El café hondureño, valorado por su calidad y complejidad aromática, presenta perfiles que varían según la variedad y el método de procesamiento. Este trabajo tuvo como objetivo caracterizar el perfil aromático de las variedades Catuaí bajo los procesos (natural, lavado y melado), Contreras 90 y Contreras 2012, y Typica en el proceso (melado), cultivadas por COMSA en Marcala, La Paz, empleando nariz electrónica como herramienta principal. Se analizaron las infusiones de café a ± 20 °C, configurando tiempos de absorción y desorción para optimizar la captura de compuestos volátiles. Paralelamente, se realizaron análisis sensoriales, bromatológicos y fisicoquímicos para evaluar parámetros como pH, grados brix, viscosidad, proteínas, grasas y fibra, etc. Los resultados evidenciaron la capacidad de la nariz electrónica para diferenciar las variedades con precisión, destacando la mayor complejidad aromática en la variedad Contreras, asociada a compuestos volátiles como aromáticos y ésteres, que aportan notas florales y frutales. Typica sobresalió por su frescura, mientras que Catuaí destacó por su robustez aromática y mayor presencia de pirroles y aldehídos. Estos hallazgos confirman el potencial de la nariz electrónica para la caracterización objetiva de perfiles aromáticos, contribuyendo a la mejora de los procesos de control de calidad y clasificación en la industria cafetalera, así como al posicionamiento de las variedades hondureñas en mercados.

Palabras claves: sensores olfativos, calidad en taza, composición química, compuestos volátiles, técnicas instrumentales.

I INTRODUCCIÓN

El café hondureño variedad *arábica* es reconocido mundialmente por su excepcional calidad, siendo un elemento fundamental de la cultura y la economía del país. Sin embargo, en un contexto global de creciente demanda y competitividad en el mercado internacional la evaluación precisa de sus características sensoriales se vuelve imperativa para mantener y mejorar su posición en la industria cafetalera, posicionando al país como la séptima potencia a nivel global, tercera en Latinoamérica y número uno en la región Centroamericana en términos de producción (Instituto Hondureño del Café, 2024).

En Honduras existen seis variedades de *Coffea arábica* desarrolladas mediante mejoramiento genético, además, la industria cafetalera apuestan por el aumento en calidad en taza mediante el uso de métodos biotecnológicos, que alteran el manejo natural de este cultivo y que es difícil de detectar con catadores (i. e. enzimas pectolíticas que pueden mejorar entre tres puntos o más la calidad sensorial), en este sentido, la aplicación de tecnologías innovadoras como la nariz electrónica ha surgido como una herramienta para el análisis sensorial del café, en la detección de sus características aromáticas y su correlación con su composición química (Cascos *et al.*, 2024).

La nariz electrónica un sistema de olfato artificial que intenta imitar la estructura de la nariz humana basados en receptores no específicos células y sensores, seguidos por un procesamiento de señales, permite detectar y diferenciar una amplia gama de compuestos volátiles presentes en el café, brindando información detallada sobre su aroma, sabor y calidad (Quicazán *et al.*, 2011).

Por lo anterior el presente estudio, tendrá como novedad científica la caracterización fitoquímica y sensorial de las variedades de café desarrolladas en Honduras a partir de sensores olfativos. Además, tendrá por objetivo general la evaluación del perfil aromático del café hondureño mediante el uso de la nariz electrónica como técnica analítica.

En este sentido, a través de un enfoque multidisciplinario que combina la ciencia e ingeniería de los alimentos, la tecnología y la evaluación sensorial, se desarrollarán modelos predictivos para la detección de los perfiles aromáticos y gustativos de las variedades de café cultivadas en el país.

II OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar el perfil aromático del café hondureño de las variedades Catuaí, Contreras e Typica mediante el uso de nariz electrónica.

2.2 Objetivos Específicos

Evaluar las propiedades fisicoquímicas y bromatológicas de las infusiones de café con la finalidad de correlacionar estos parámetros con las características sensoriales y la calidad general de cada variedad.

Evaluar la calidad en taza de las variedades de café en estudio mediante jueces expertos especializados de (catadores con nombramiento internacional)

Desarrollar modelos predictivos de calidad en taza de las variedades de café en estudio a partir de nariz electrónica.

III REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Café (*Coffea arábica* L.)

El café es una de las bebidas de creciente importancia económica durante los últimos 150 años, la palabra “café” proviene de la palabra árabe “*Quaweh*”. Se ha popularizado por sus características estimulantes, principalmente atribuido a la cafeína. En el siglo XIII los árabes lo llevaron de Etiopía a Yemen donde establecieron las primeras plantaciones. La provincia de Kaffa en Etiopía es considerada como el hábitat natural del Género *Coffea arábica* L y el centro de África es reconocido como el lugar de origen del café robusta (Fuentes *et al.*, 2020; Rosas, 2021).

El género *Coffea* pertenece a la familia Rubiácea, con 500 géneros y más de 6,000 especies. La *Coffea arábica* y *Coffea canephora* son las dos especies cultivadas comercialmente, el *Coffea arábica* L pertenece al género *Coffea* y el café Robusta (*Coffea canephora*) está asociado con el género *Psilanthus* (Pierre *et al.*, 2020).

Es clasificada como una planta arbustiva, originaria de las regiones altas de África central, particularmente del Sureste de Etiopía y Norte de Kenia, Etiopía es considerada el lugar de origen del café. El café actual es una hibridación natural de dos formas ancestrales cercanas a las especies *Coffea eugenioides* y *Coffea canephora*, obteniendo como resultado el genoma actual de *Coffea arábica* (Pierre *et al.*, 2020).

Tabla 1. Clasificación taxonómica del café

Reino	Plantae
Subreino	Franqueahionta
Subdivisión	Espermatophyta
Clase	Magnololiatae
Orden	Gentianales
Familia	Rubiaaceae
Genero	<i>Coffea</i>
Especie	<i>Coffea arábica</i> L

Fuente: (Murillo, 2018).

3.2 Industria del café en Honduras

La actividad cafetalera de Honduras proviene de regiones montañosas de 210 de los 298 municipios y 15 de los 18 departamentos del país en manos de unos 120,000 productores y genera más de 1 millón de empleos que representa más del 8% de la generación de empleos del país, esto significa la generación del 22% de empleos en zonas rurales. Generando más de un millón de trabajos que producen cerca del 38% del PIB Agrícola. La población cafetalera está constituida principalmente por pequeños productores, los cuales componen alrededor del 95% de dicha población, solamente 5% son medianos y grandes productores (Instituto Hondureño del café, 2023).

Tabla 2. Producción de café y productividad estratificada por Departamento cosecha 2022-2023

Departamento	Cantidad productores	Área cultivada con café	Área cultivada producción	Área cultivada en planta	Producción QQ Oro	Productividad QQ/MZ	%
Comayagua	12, 146	68,958.57	66,121.98	2,836.59	1,146,571.6	17.34	16.01
Copán	6,915	54,041.43	51,131.25	2,910.18	1,086,955.2	21.26	15.18
Lempira	13,179	60,467.92	57,280.20	3,187.72	1,066,587.3	18.62	14.90
El Paraíso	15,085	71,557.77	63,933.95	7,623.82	879,658.33	13.76	12.29
Ocatepeque	7,102	38,943.57	38,385.81	557.76	737,015.56	19.20	10.29
Santa Bárbara	11,432	43,993.59	41,382.66	2,610.93	599,462.47	14.49	8.37
La Paz	9,511	34,586.83	32,486.56	2,100	506,881.11	15.60	7.08
Intibucá	6,290	26,094.21	23,680.10	2,414.11	435,425.00	18.39	6.08
Yoro	5,247	20,984.79	16,425.12	4,559.67	310,809.04	18.92	4.34
Francisco Morazán	3,421	12,798.41	11,023.73	1,774.68	155,078.47	14.07	2.17
Olancho	4,798	16,160.79	12,161.48	3,999.31	151,141.81	12.43	2.11
Cortés	1,291	4,867.68	4,225.47	642.21	71,113.94	16.83	0.99
Atlántida	165	411.34	368.09	43.25	5,259.28	14.29	0.07
Colón	115	358.88	292.13	66.75	3,932.87	13.46	0.05
Choluteca	101	570.25	442.75	127.50	3,912.60	8.84	0.05
Total Nacional	84,652	454,796.0	419,341.3	35,454.7	7,159,804.7	17.07	100

Fuente: (Instituto Hondureño del Café, 2024).

3.2.1 Variedad Catuaí

La variedad Catuaí es un cruce entre Mundo Novo de alta productividad y la compacta Caturra, realizada por el Instituto Agronómico de Sao Paulo en Campinas, Brasil (IAC); La planta es altamente productiva, en parte debido a su pequeño tamaño, que permite que las plantas estén muy separadas; se puede plantar a casi el doble de densidad. (Iparraguirre, 2020). Esta variedad produce frutos de color rojo y amarillo La maduración de los frutos es tardía y no se desprenden fácilmente de las bandolas Produce una excelente calidad de bebida (Velásquez, 2019).

En Honduras y en muchos países de la región se utilizan principalmente tres tipos de beneficiado actualmente, dos de ellos son realizados mediante la vía húmeda (melado/honey, lavado) y el restante es mediante vía seca (natural).

El método melado consiste en realizar el despulpado del café y posteriormente dejar fermentar el grano con su mucílago durante aproximadamente 48 horas y posteriormente realizar el secado correspondiente. El proceso de lavado, se realiza un desmucilaginado, el cual, consiste en separar el grano del mucílago que puede ser mecánicamente o mediante fermentación, para luego, lavarlo con el fin que el grano quede totalmente limpio para llevarlo al secado y el procedimiento mediante vía seca, consiste en cosechar el café y llevarlo a secar directamente sin despulparlo, fermentarlo o lavarlo, el cual tiene menos procesos comparado con los de vía húmeda (Portillo Guzman, 2021).

3.2.2 Variedad Typica

La variedad de café Típica compone uno de los grupos culturalmente y genéticamente más importantes del *C. arábica* en el mundo. Los historiadores creen que las semillas de café fueron tomadas de los bosques de café del sudoeste de Etiopía hasta Yemen, donde fueron cultivadas lo cual se confirma con recientes pruebas genéticas. Desde Yemen, los descendientes de Borbón y Típica se extendieron por todo el mundo, formando la base del moderno cultivo de café arábica (Rica & Salvador, 2018).

Desde Brasil, la variedad Típica se trasladó a Perú y Paraguay. A fines del siglo XVIII, el cultivo se extendió por el Caribe (Cuba, Puerto Rico, Santo Domingo), México y Colombia, y desde allí, a toda América Central (en El Salvador fue cultivada a partir de 1740). Hasta la década de 1940, la mayoría de las plantaciones en América Central se plantaron con Típica. Debido a que esta variedad es de bajo rendimiento y altamente susceptible a la mayoría de las enfermedades del café, gradualmente se fue reemplazando en gran parte de las Américas con variedades Borbón, aunque todavía se siembra ampliamente en Perú, República Dominicana y Jamaica (Rica & Salvador, 2018).

3.2.3 Variedad Contreras

La variedad de café Contreras, originaria de Honduras, específicamente de la región cafetalera de Márcala, en el departamento de La Paz, ha sido desarrollada por la reconocida empresa COMSA (Café Orgánico Márcala, S.A.). Perteneciente al género *Coffea arábica* L., esta variedad surge como resultado de un cuidadoso proceso de selección, que prioriza la adaptación a las particulares condiciones agroclimáticas de la zona.

En esta investigación se utilizan dos de esta variedad: Contreras 90 y Contreras 2012, ambas en proceso melado y cultivadas bajo el manejo del productor Dagoberto Pérez. Estas variedades han sido seleccionadas no solo por su excelente adaptación al entorno, sino también por sus características sobresalientes en términos de calidad sensorial y resistencia a plagas. Su cultivo se lleva a cabo mediante prácticas orgánicas y sostenibles, en línea con los principios agroecológicos que promueve COMSA, destacándose así en el mercado por su compromiso con la sostenibilidad y la calidad integral.

3.3 Calidad sensorial en la Industria del café

El café de buena calidad es sano, inocuo, tiene aromas y sabores agradables y una composición química natural. Mediante la aplicación de las Buenas Prácticas Agrícolas en la finca y de Manufactura en el almacenamiento, la tostación y la preparación se preservan las cualidades de la bebida de café (Quintero, 2013).

Tabla 3. Relaciones entre los componentes del grano y las características sensoriales de la bebida de café

Compuesto químico	Efecto en las características sensoriales de la bebida del café
Polisacáridos	Retienen los aromas, contribuyen al cuerpo de la bebida y a la espuma del expreso
Sacarosa	Amargo, sabor, color, acidez, aroma
Azúcares reductores	Color, sabor, aroma
Lípidos	Contribuyen al transporte de los aromas y sabores y en el expreso dan sabor y cuerpo
Proteínas	Contribuyen al amargo y sabor y en el expreso, a la formación de la espuma, según el grado de tostación
Cafeína	Amargor
Trigonelina	Contribuye al amargo, los productos de su degradación al aroma
Ácidos clorogénicos	Dan cuerpo, sabor amargo y astringencia a la bebida
Ácidos alifáticos	Acidez, cuerpo, aroma

Fuente: (Quintero, 2013).

3.3.1 Atributos sensoriales del café

La calidad de taza de café (*Coffea arabica* L.) es el resultado de los atributos sensoriales que dependen de factores como genotipo, variedad, tipo de suelo, condiciones agroecológicas, prácticas agronómicas, de cosecha y poscosecha, torrefacción, características propias del cultivo, y procesamiento (Suárez *et al.*, 2015).

El café se caracteriza por su fragancia, que es el olor de los granos molidos secos, y su aroma, que es el olor cuando se mezcla con agua caliente. El sabor es una combinación de estos dos aspectos. El sabor residual es la duración de las cualidades positivas del sabor que se perciben en la parte posterior del paladar. La acidez es la sensación que hace salivar, descrita como “brillante” cuando es favorable y “agria” cuando no lo es. El cuerpo se refiere a la sensación de pesadez del líquido en la boca, y el equilibrio es el resultado del complemento o contraste de la acidez, el sabor residual y el cuerpo del café (Pabón & Osorio, 2019).

3.4 Evaluación sensorial del café

El café es uno de los pocos productos agroalimentarios que es valorado con base en descriptores cualitativos, donde a mejor calidad, mayor será el precio que se obtenga. Esta calidad, sin embargo, depende de varios factores que se relacionan en todas las etapas de la producción de café, desde la selección de la variedad hasta la elaboración de la bebida (Gutiérrez & Barrera, 2015).

Por lo cual la evaluación sensorial, ha sido el método para evaluar la calidad del café, las características de color, aspecto, olor y sabor de los alimentos, estimulan la visión, el olfato, el tacto y el gusto, produciendo estímulos que van al cerebro, donde ocurre la percepción o correlación de impresiones sensoriales, convirtiéndose en un juicio por medio del cual se determina si un producto es aceptado o rechazado (Pabón & Osorio, 2019).

3.4.1 Métodos tradicionales de evaluación sensorial del café

La nariz humana sigue siendo el instrumento principal que se utiliza para la evaluación de la calidad del café, se hace mediante la prueba de taza, con paneles de evaluadores entrenados que son los responsables de la prueba y en cada sesión pueden ser evaluadas más de 200 tazas por día en la cual atributos como el aroma, sabor, acidez y el cuerpo son las características sensoriales que describen la calidad del café, siendo un café de calidad superior con una intensidad equilibrada de acidez y aroma, buen sabor y cuerpo medio (Gutiérrez & Barrera, 2015).

Estos catadores desarrollan una capacidad única para reconocer los defectos y la calidad en las bebidas de café, debido a la experiencia adquirida durante varios años. Sin embargo, el problema es que las sensaciones olfatorias son efímeras y no son fáciles de describir, cada persona presenta diferente sensibilidad ante la intensidad de los olores (Díaz, 2022).

3.4.2 Limitaciones y desafíos de la evaluación sensorial tradicional

Si bien es cierto la nariz humana está limitada a la hora de la evaluación del olor, por ello surgió la necesidad de crear un instrumento capaz de imitar el sentido humano del olfato. Las narices electrónicas fueron desarrolladas en un comienzo para reemplazar a los paneles de expertos en la clasificación de aromas, debido a que sus valoraciones se pueden ver afectadas por factores externos. Algunas veces estos paneles de expertos se han apoyado en cromatógrafos de gases y espectrómetros de masas, no sólo clasificando olores sino también cuantificándolos, todo esto con un elevado costo en tiempo y en dinero (Gutiérrez, 2011).

3.5 Principio de funcionamiento de la nariz electrónica

En 1980, la nariz electrónica fue aceptada como un instrumento que comprende un conjunto de sensores electroquímicos de gas heterogéneos y un sistema de reconocimiento de patrones. Por lo tanto, una vez que se recogen los datos de los sensores, el sistema de reconocimiento de patrones realiza un procesamiento de los datos para analizarlos y clasificarlos (Serracín & Moreno, 2016).

Todos los sistemas de nariz electrónica que existen actualmente en el mercado constan de tres partes bien diferenciadas. La primera de ellas implica la toma de muestra, en este caso, se fundamentará en la técnica del espacio de cabeza (*headspace*). Los volátiles, concentrados por calentamiento en la fase vapor que son introducidos en el sistema de sensores que medirá las diferentes propiedades fisicoquímicas de los componentes del aroma, convirtiendo el olor en la señal mensurable que un ordenador se encargará de procesar mediante técnicas quimiométricas, proporcionando un gráfico que representará la huella digital de dicho olor (Busto, 2002).

Si se compara la nariz electrónica con otras técnicas analíticas para la evaluación del aroma de los alimentos esta presenta ventajas ya que los análisis son generalmente muy rápidos y pueden realizarse de manera continua; operación del equipo simple, resultados de los análisis en tiempo real; es una tecnología versátil, limpia ; las narices electrónicas pueden detectar concentraciones de aromas del orden de partes por millón, y pueden acoplarse a otros equipos de análisis, como espectrómetros de masas; las muestras a analizar pueden ser sólidos, líquidos o gases, y con un adecuado y suficiente entrenamiento (Gutiérrez, 2011).

3.5.1 Aplicaciones actuales de la nariz electrónica en la industria

Los sistemas de nariz electrónica se diseñaron para ser usados con numerosos productos y aplicaciones, como alimentos, empaques, control de calidad de materias primas y productos elaborados; monitoreo de procesos, frescura y madurez, investigaciones de estimación del tiempo de vida útil, valoraciones de autenticidad de productos, detección de microorganismos patógenos. Los análisis de rutina en control de calidad de alimentos constituyen una de las aplicaciones más promisorias de la nariz electrónica (Quicazán *et al.*, 2011).

La aplicación de la nariz electrónica en la industria alimentaria ha demostrado ser una herramienta valiosa, especialmente en la detección y evaluación de compuestos específicos en productos alimenticios, según (Casco *et al.*, 2023). La utilización de sensores digitales permite predecir defectos de quemado y niveles de fenoles en aceitunas negras de estilo californiano, este estudio resalta como la nariz electrónica puede identificar defectos de calidad lo que facilita un control de calidad más preciso y eficiente y asegura que los productos cumplan con los estándares deseados.

En la actualidad las narices electrónicas no son solamente usadas para clasificaciones de aroma, sino también para la detección de olores. De ahí que su importancia y utilización se haya extendido a aplicaciones en la agroindustria (Díaz, 2022).

IV MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Lugar de la investigación

La investigación se realizó en el laboratorio de análisis químico y laboratorio de bromatología de la Universidad Nacional de Loja, esta es una institución pública de educación superior ubicada en la ciudad de Loja, al sur del Ecuador.

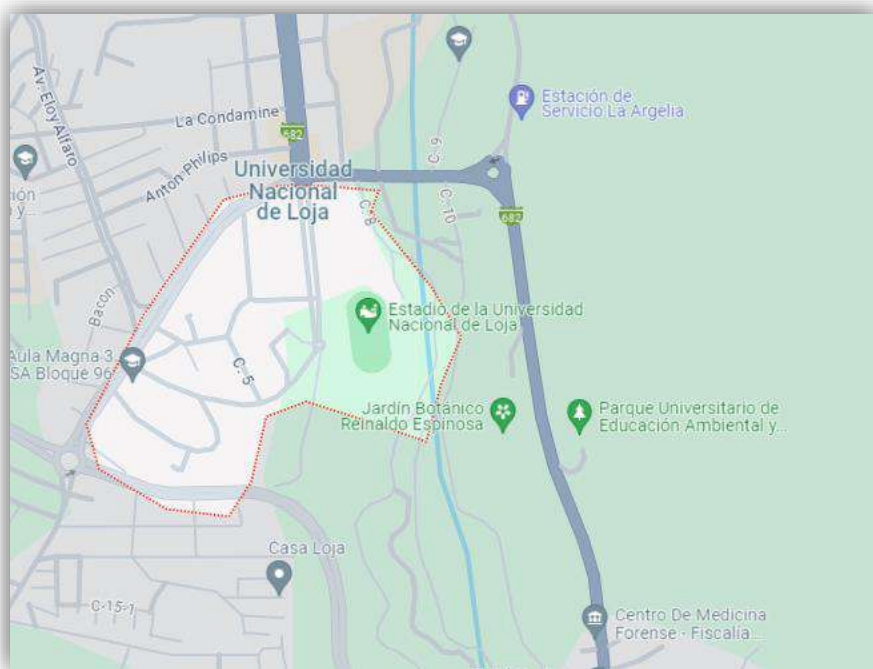


Figura 1. Universidad Nacional de Loja, ubicada en Loja, Ecuador.

Fuente. Google map (2024).

4.2 Materiales y equipo

Para el desarrollo de la investigación se emplearán los materiales y equipos descritos en la tabla 4.

Tabla 4. Materiales y equipo para la investigación

Categoría	Elemento	Variedad/Proceso	Uso
Materia prima	Café.	<i>Coffea Arabica</i> L.	Objeto de estudio
	Variedades	Catuaí, Contreras-2012, Contreras-90, Typica	Muestras analizadas
	Procesos	Natural, lavado, melado	Métodos de procesamiento
Categoría	Equipo/Reactivo	Marca/Modelo	Uso
Equipos para análisis bromatológicos	Balanza analítica	LA204E	Determinación de masa
	Horno de secado con circulación forzada de aire	BINDER FD 240	Determinación de humedad
	Mufla	Thermolyne modelo 1300	Determinación de cenizas
	Soxhlet	-	Determinación de grasa
	Destilador Kjeldahl	UDK 149	Determinación de proteína
	Analizador de fibra	Ankom 200	Determinación de fibra
	pHmetro	Hanna Instruments HI9811-5	Determinación de pH
Equipos para análisis sensorial	Nariz electrónica	-	Determinación de perfil aromático

Equipos para análisis fisicoquímicos	Viscosímetro	NDJ-Tokio Japón	Medición de viscosidad
	Refractómetro	ESCALA 0-25 BRIX	Medición de los sólidos solubles
Material de laboratorio	Papel filtro	F1001	Filtración
	Tamis	ASTM	Tamizado de muestras
	Crisoles de porcelana	-	Secado/Calcinación de muestras
	Matraz Erlenmeyer	-	Preparación de soluciones
	Balón de destilación	-	Destilación
	Desecador	-	Enfriamiento de muestras
	Botellas de vidrio ámbar	1 Litro	Maceración/Almacenamiento de muestras
	Tubos Capilares	-	Toma de muestras
Reactivos	Agua destilada	-	Diluyente, limpieza
	Ácido sulfúrico	0.255 N	Digestión de muestras (Kjeldahl)
	Hidróxido de sodio	0.313 N, 30%	Titulación (Kjeldahl), ajuste de pH
	Ácido bórico	4%	Recepción de amoníaco (Kjeldahl)
	Naranja de metilo	-	Indicador de pH
	Etanol	99.9%	Solvente, limpieza

Fuente: propia.

4.3 Método

Se empleará el método descriptivo-cuantitativo (mixto) de orden transversal a escala de laboratorio, durante un lapso de cinco meses durante los meses mayo a septiembre del 2024.

4.3.1 Metodología

Para garantizar el cumplimiento de los objetivos propuestos en este estudio, se ha diseñado un enfoque metodológico que consta de cinco fases experimentales. A continuación, se proporcionará una descripción detallada de cada una de las fases para una comprensión clara del proceso experimental que se llevó a cabo.

4.3.1.1 Fase I. Selección y preparación de las muestras

En el contexto de este estudio, se realizó una evaluación exhaustiva de seis variedades de café Arábica originarias de Honduras; las muestras para este estudio han sido proporcionadas por Café Orgánico Márcala S.A. (COMSA), una empresa situada en la región de Márcala, en el Departamento de la Paz, Honduras.

La selección del café hondureño para este estudio se fundamenta en su reconocida calidad superior, que rivaliza eficazmente con otras variedades de café, así como en sus distintivas características organolépticas. Los análisis se llevaron a cabo en café molido siguiendo la metodología propuesta por (Casco *et al.*, 2024).

4.3.1.2 Fase II. Análisis bromatológico

Toma de muestras. Para cada variedad seleccionada, se realizó una molienda del café hasta obtener una granulometría de 1mm para posteriormente colocarlos en recipientes de polietileno de 100 g, debidamente identificados, y se llevaron al laboratorio de bromatología de la Universidad Nacional de Loja para su análisis respectivo.

Análisis de laboratorio. Para su análisis bromatológico se realizó contenido de materia seca (MS), humedad (H), cenizas (Cz), grasa cruda (GC), proteína cruda (PC), fibra cruda (FC) se determinó según metodología estándar de la AOAC 2005 (Aguirre Mendoza *et al.*, 2018).

Contenido de humedad higroscópica o total

Con el objetivo de cuantificar el contenido de humedad en las distintas variedades de *Coffea arábica* L. objeto de este estudio, se optó por el método gravimétrico de pérdida por desecación. Para ello, se esterilizaron 18 crisoles de porcelana, asignando tres a cada variedad para asegurar la confiabilidad de los resultados. Tras pesar los crisoles vacíos, se adicionaron 2 gramos de muestra a cada uno. A continuación, los crisoles conteniendo las muestras fueron sometidos a un proceso de secado en estufa a una temperatura controlada de 103 ± 2 °C durante un período de 24 horas.

Posteriormente, los crisoles fueron transferidos a un desecador para su enfriamiento a temperatura ambiente. Finalmente, se procedió a pesar nuevamente los crisoles con las muestras secas, y mediante la diferencia de peso se calculó el porcentaje de humedad presente en cada variedad de café. El contenido de humedad de las muestras se determinó siguiendo el método AOAC 925.09, el cual se basa en la pérdida de peso por desecación. Se eligió este método debido a su amplia aceptación en el análisis de alimentos y su relativa simplicidad.



Figura 2. Análisis de humedad.

Contenido de ceniza

Posteriormente al análisis de humedad de las variedades de *Coffea arábica* L. estudiadas, se procedió a determinar el contenido de cenizas se cuantificaron gravimétricamente para ello utilizando los mismos crisoles que contenían los residuos secos obtenidos en el análisis de humedad, estos residuos se sometieron a un proceso de incineración en una mufla marca Thermolyne, modelo 1300, a una temperatura de 600°C durante 5 horas. Esta temperatura resulta adecuada para la oxidación completa de la materia orgánica sin volatilizar los componentes inorgánicos. Posteriormente, los crisoles fueron transferidos a un desecador para su enfriamiento a temperatura ambiente.

El contenido de cenizas se determinó siguiendo el método AOAC 942.05 una vez alcanzada la temperatura ambiente, se pesaron los crisoles con las cenizas resultantes. La diferencia entre el peso del crisol con cenizas y el peso del crisol vacío permitió calcular el porcentaje de cenizas en cada muestra. (Pillco Cochán, Guzmán Loayza, & Cuéllar Bautista, 2021).



Figura 3. Análisis de ceniza.

Contenido de grasa cruda

Para cuantificar el contenido de grasa en las muestras, se empleó la técnica de extracción Soxhlet. Previamente, se pesaron 5 g de cada variedad de café en papel filtro y se introdujeron en cartuchos de extracción. Estos cartuchos se colocaron en un equipo Soxhlet en el que un solvente orgánico (éter de petróleo) se calienta, vaporiza y condensa sobre la muestra sólida (café) contenida en un cartucho proceso de extracción continua con éter de petróleo durante 6 horas. Posteriormente, se evaporó el solvente y se pesaron los balones de destilación con la grasa extraída. La diferencia entre el peso final y el peso inicial del balón permitió calcular el porcentaje de grasa en cada muestra.



Figura 4. Análisis de grasa cruda.

Contenido de proteínas mediante método Kjeldahl

Se pesaron aproximadamente 0.7 gramos de cada muestra de café en papel de filtro azul, un tipo de papel diseñado específicamente para resistir altas temperaturas y ácidos fuertes. Los papeles con la muestra se introdujeron en tubos de digestión previamente codificados. Los tubos se colocaron en un digestor y se calentaron a 400°C durante 2-3 horas. Durante esta etapa, el nitrógeno orgánico presente en la muestra se convirtió en amoníaco (NH_3) mediante la digestión con ácido sulfúrico concentrado y un catalizador, como el sulfato de cobre. Una vez finalizada la digestión, el contenido de cada tubo se transfirió a un equipo de destilación Kjeldahl. Se añadió hidróxido de sodio concentrado (NaOH al 30%) para liberar el amoníaco

en forma de gas. El amoníaco liberado fue destilado y absorbido en una solución de ácido bórico al 4%. El ácido bórico reacciona con el amoníaco formando un ion amonio, lo cual permite su posterior titulación, la solución de ácido bórico que contiene el amonio capturado se tituló con una solución estándar de ácido sulfúrico (H_2SO_4).

La titulación se realizó utilizando un indicador de pH para determinar el punto final de la reacción, que se alcanza cuando todo el amonio ha reaccionado con el ácido sulfúrico. Se realizaron análisis en blanco para corregir los posibles errores sistemáticos del método, como la presencia de nitrógeno en los reactivos o en el material de vidrio.



Figura 5. Análisis de proteína.

Contenido de fibra cruda

El contenido de fibra se determinó siguiendo el método enzimático-gravimétrico descrito en AOAC 2005, utilizando un analizador de fibra Ankom 200. Se prepararon soluciones de ácido sulfúrico 0.255 N e hidróxido de sodio según el protocolo del fabricante. Se pesaron 0.5 g de muestra en bolsas de fibra previamente taradas y se sometieron a una digestión ácida a 100°C durante 45 minutos, seguida de tres lavados con agua destilada a 70°C. Posteriormente, se realizó una digestión alcalina a 100°C y se repitieron los lavados. Las bolsas se secaron en estufa a una temperatura de 105°C y se pesaron el contenido de fibra se expresó como porcentaje del peso seco de la muestra.



Figura 6. Análisis de fibra.

4.3.1.3 Fase III Análisis fisicoquímicos

Para la preparación de las infusiones de café, se siguió el protocolo establecido por la *Specialty Coffee Association* (SCA). Se empleó una relación 8,25 gramos de café para 150 ml de agua en cada una de las tres repeticiones. El agua se calentó a una temperatura de 93 °C, se vertió sobre el café molido y se dejó infusionar durante 4 minutos. Posteriormente, las infusiones se filtraron para eliminar los sólidos en suspensión (Bernardes, 2020). Para cada uno de los parámetros fisicoquímicos (pH, grados Brix y viscosidad) se realizaron tres repeticiones con el fin de garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados.

pH

Para medir el pH de las infusiones de café, se utilizó un pHmetro previamente calibrado con soluciones buffer de pH 4 y 7. El electrodo del pHmetro se sumergió directamente en una muestra de 150 mL de la infusión a temperatura ambiente, y se registró el valor pH.



Figura 7. Medicion de pH a las infusiones.

Grados Brix

La determinación de los grados Brix se realizó utilizando un refractómetro calibrado con agua destilada. Para cada muestra, se colocó una gota de la infusión de café sobre el prisma del refractómetro, y se leyó directamente el valor de grados Brix en la escala de 0 a 25.



Figura 8. Medicion de grados brix.

Viscosidad

Para medir la viscosidad de las infusiones de café, se utilizó un viscosímetro NDJ de Tokio, Japón, configurado con el rotor 1 a una velocidad de 30 revoluciones por minuto (rpm) durante un período de 30 segundos. Se cargaron 150 mL de la infusión de café a temperatura ambiente en el viscosímetro y se registró el tiempo de flujo a través del capilar.



Figura 9. Medición de la viscosidad en las muestras de café.

4.3.1.4 Fase IV Análisis de sensorial

Para la evaluación sensorial de las variedades de café colectadas, se utilizó la metodología tradicional de prueba de taza, junto con la nariz electrónica para un análisis más preciso y objetivo. La evaluación sensorial fue realizada por tres jueces especializados, quienes establecieron un promedio entre los datos obtenidos, asegurando la consistencia de los resultados. En cuanto a las características de las muestras, la humedad del grano se encontró entre el 10% y el 12%, y los rendimientos de café pergamino seco a café dorado estuvieron entre los rangos de 1.14 a 1.09.

La temperatura inicial de tueste se mantuvo entre 150°C y 180°C, correspondiente a un tostado medio, realizado en un tiempo de entre 6 y 12 minutos. La molienda del café fue ajustada entre 65% y 70%, y la proporción de café a evaluar fue de 8.25 gramos por 150 ml de agua, la cual se añadió a una temperatura de 93°C. El café fue servido en tazas de porcelana y la evaluación se realizó en tres etapas: café caliente, tibio y frío, con el objetivo de distinguir mejor los sabores y aromas en diferentes temperaturas.

Primero se evaluó el aroma, diferenciando el olor de los granos antes de la extracción y comparándolo con la fragancia adquirida durante la misma. Posteriormente, se evaluaron el sabor y el sabor residual, donde el catador tomó un sorbo del café y, utilizando sus papilas gustativas, logró distinguir diferentes sabores. Los demás atributos evaluados incluyeron acidez, cuerpo, equilibrio, uniformidad, taza limpia y dulzor. El catador asignó un puntaje a cada atributo según su criterio, y los valores fueron registrados en una hoja de catación. Esto permitió realizar una sumatoria final para determinar la categoría de calidad en taza del café evaluado, con los rangos y categorías correspondientes, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Escala de clasificación para la catación del café de acuerdo al puntaje total, según SCAA

Rango	Descripción	Clasificación
95–100	Ejemplar o único	Súper premio especialidad
90-94	Extraordinario	Premio de especialidad
85-89	Excelente	Especialidad
80-84	Muy bien	Premio
75 – 79	Bien	Lo bueno de siempre calidad
70-74	Pasable	Calidad media

(Peñuela-Martínez, Pabón-Usaquén, Rodríguez-Valencia, & Oliveros-Tascón, 2010).

4.3.1.5 Fase V. Medidas de la nariz electrónica

La evaluación del perfil aromático de las variedades de café hondureño (*Coffea arabica* L.) se llevó a cabo utilizando un sistema de nariz electrónica conectado a un dispositivo móvil.

Para ello, se siguió un procedimiento metódico que inició con la preparación del equipo, encendiendo tanto la nariz electrónica como el dispositivo móvil encargado de recopilar los datos. La conexión entre ambos dispositivos se realizó mediante tecnología Bluetooth, utilizando la aplicación *eNose* desarrollada por la Universidad de Extremadura.

En la aplicación móvil, se programaron los tiempos de medición correspondientes a las fases críticas del análisis: el tiempo de desorción (T_d), fijado en 30 segundos, durante el cual los sensores regresan a su estado inicial eliminando residuos del aroma anterior; y el tiempo de absorción (T_a), configurado en 1 minuto, en el cual los sensores capturan los compuestos volátiles emitidos por la muestra. Estos ajustes garantizan la estabilidad y precisión del sistema durante las mediciones.

Posteriormente, se obtuvieron 10 réplicas independientes por cada variedad de café, asegurando la repetitividad y la confiabilidad de los datos obtenidos. Cada réplica fue llevada a cabo bajo condiciones ambientales controladas para minimizar cualquier posible interferencia externa en las mediciones. Los datos generados por los sensores, en términos de intensidad de señal de los compuestos volátiles detectados, fueron almacenados automáticamente en la memoria del dispositivo móvil. Una vez finalizadas las mediciones, los datos recopilados se guardaron y se procedió a su análisis utilizando métodos estadísticos apropiados para identificar patrones aromáticos y caracterizar las diferencias entre las variedades de café estudiadas. Este procedimiento permitió evaluar de forma objetiva y reproducible el perfil aromático de las muestras, destacando la nariz electrónica como una herramienta innovadora en el análisis sensorial no subjetivo.

4.4 Análisis de los resultados

Para la optimización de los resultados se empleó el programa IBM SPSS versión 27, a partir de pruebas descriptivas y estadígrafos, además se utilizará las pruebas de comparaciones múltiples de Tukey con $p\text{-valor} \leq 0.05$, y una confianza de 95% (Casco *et al.*, 2023).

4.5 Diseño experimental

Para evaluar el perfil aromático de diferentes variedades de café, se implementó un diseño completamente aleatorizado. Los factores considerados fueron las variedades de café Catuaí Natural, Catuaí Lavado, Catuaí melado, Contreras-12, Contreras-90, Typica. Cada combinación de variedad y tratamiento se replicó tres veces. Las muestras de café se sometieron a un análisis sensorial utilizando una nariz electrónica para obtener un perfil aromático detallado.

Tabla 6. Diseño experimental

FACTORES	NIVELES					
	Variedad Catuaí Natural	Variedad Catuaí Lavado	Variedad Catuaí melado	Variedad Contreras 12	Variedad Contreras 90	Variedad Typica
Café molido	T1	T2	T3	T4	T5	T6

Fuente: propia.

4.6 Variables de respuesta

En esta investigación, se priorizaron dos variables de respuesta fundamentales, perfil aromático y calidad fitoquímica, esto permitió no solo entender la calidad sensorial del café hondureño sino también su valor nutricional.

V RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis bromatológico

Tabla 7. Composición bromatológica de las seis variedades de café *Coffea arábica* L. expresado en porcentaje

Nutrientes (%)	Variedades de café					
	Catuaí proceso natural	Catuaí proceso lavado	Catuaí proceso melado	Contreras 2012	Contreras 90	Typica
Humedad	3.84	3.48	4.27	3.76	3.59	3.59
Cenizas	4.18	4.34	4.06	4.47	3.82	4.59
Grasa cruda	13.71	14.09	12.06	10.20	9.52	11.42
Proteínas	14.62	13.22	12.51	15.88	15.85	16.18
Fibra cruda	25.70	25.99	27.87	26.10	25.80	26.13

Fuente: propia.

En este contexto, el contenido de humedad en las variedades de estudio oscila entre 3.48% y 4.27%, siendo el valor más alto en Catuaí proceso melado y el más bajo en Catuaí proceso lavado. El contenido de humedad es un factor importante, ya que influye en la estabilidad microbiológica y en su conservación. Según estudios de (Olika Fufa *et al.*, 2019), Un nivel de humedad interior del 5% es adecuado para evitar el crecimiento de hongos y mohos lo que concuerda con los resultados obtenidos en estas variedades En cuanto a los niveles de ceniza, que reflejan el contenido de minerales estos varían entre 4.06% y 4.59% siendo la variedad Typica la que presenta el mayor contenido. Asimismo, estudios de (Janda *et al.*, 2020) han encontrado que el contenido de cenizas del café puede oscilar entre el 4% y 5%. Esto resulta coherente con los valores observados en esta investigación, lo cual sugiere una adecuada disponibilidad de minerales en las variedades estudiadas.

Por otro lado, la grasa cruda, que impacta el perfil sensorial y el cuerpo del café, mostró una variación de 11.39% a 12.55% con Contreras 2012 como variedad con mayor contenido graso. Investigaciones previas, como la de (Franca, Oliveira, Mendonça, & Silva, 2005), reportan que el contenido de grasa en café varía generalmente entre 10% y 13%, lo que evidencia una correspondencia con los valores obtenidos en este análisis.

Además las proteínas en estas variedades están en el rango de 12.22% a 16.18%, con Typica y Contreras 90 en el extremo superior. Este contenido proteico contribuye a la formación de compuestos aromáticos durante el proceso de tostado. Según estudios de (Grzelczyk, Fiurasek, Kakkar, & Budryn, 2022) un mayor contenido de proteínas está relacionado a un perfil aromático más complejo, lo cual podría tener un impacto positivo en el análisis aromático realizado en esta tesis.

Finalmente, la fibra cruda presentó valores entre 25.50% y 27.87%, siendo Catuai proceso honey la variedad con mayor contenido. La fibra es esencial para la textura y estructura del grano (Murthy & Naidu, 2012), señalan que la fibra en el café del género *coffea arabica* contribuye a la percepción del cuerpo y la textura en la bebida fina; por lo tanto podría influir en el perfil sensorial.

5.2 Análisis Fisicoquímicos

Tabla 8. Composición fisicoquímica de las seis variedades de café *Coffea arábica* L.

Variedades	Análisis Fisicoquímicos		
	pH	° Brix	Viscosidad (cP)
Catuaí Proceso Natural	4.23±0.01 ^a	1.1±0.1 ^a	2.05±0.021 ^{ab}
Catuaí Proceso Lavado	4.77±0.01 ^b	1.3±0.1 ^d	1.90±0.02 ^a
Catuaí Proceso Honey	4.02±0.01 ^{bc}	1.9±0.1 ^a	1.89±0.017 ^a
Contreras 90	4.10±0.01 ^{cd}	1.4±0.1 ^b	2.11±0.117 ^b
Contreras 2012	4.15±0.01 ^d	1.7±0.1 ^c	2.31±0.054 ^{ab}
Typical	4.19±0.01 ^e	1.9±0.1 ^d	1.74±0.03 ^a

Fuente: propia.

Las medias con distinta letra son estadísticamente diferentes. Los valores indican la media ± desviación estándar (n= 3).

Los valores de pH se encontraron dentro del rango típico para el café, aunque se observaron diferencias estadísticamente significativas entre algunas variedades. El café procesado naturalmente presentó el pH más bajo, mientras que el café procesado por el método honey mostró un pH ligeramente más elevado.

El contenido de sólidos solubles totales, expresado como °Brix, varió considerablemente entre las diferentes muestras. La café variedad Catuai procesado por el método honey presentó los valores más altos de °Brix, lo que sugiere un mayor contenido de azúcares.

La viscosidad también mostró diferencias significativas entre las variedades. El café Contreras 2012 presentó la mayor viscosidad, lo que podría indicar una mayor concentración de compuestos que contribuyen a la viscosidad, como las proteínas y los polisacáridos.

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian la influencia del método de procesamiento en las propiedades fisicoquímicas del café. El método de procesamiento afecta directamente la composición química del grano, lo cual se refleja en las diferencias observadas en los parámetros analizados.

5.3 Análisis sensorial

Los resultados del puntaje de taza para las variedades evaluadas se muestran en la Figura 10 y Figura 11, lo que refleja que las variedades Contreras 2012, Typica, Catuaí no presentaron diferencias estadísticamente significativas. En cuanto a Contreras 90, hubo diferencias estadísticas entre la variedad Contreras 2012. La Figura 10 resume el puntaje de taza según los tipos de beneficiarios, donde no se presentaron diferencias estadísticamente significativas. El puntaje del catador estuvo entre 7 y 8 para las variedades con los diferentes beneficiarios.

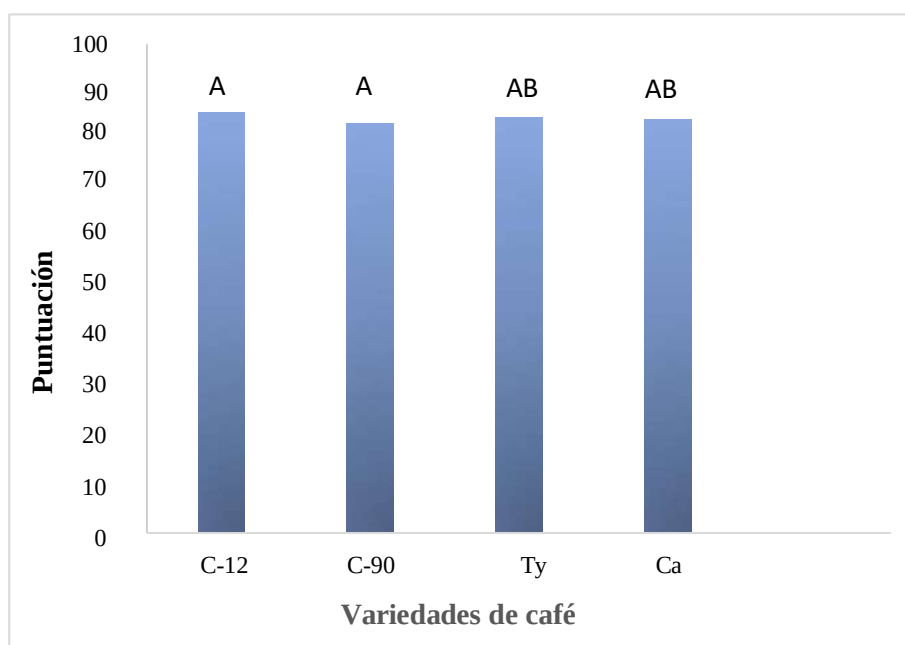


Figura 10. Puntuación en taza de las variedades evaluadas proceso de melado. Medias con letra común no son significativamente diferentes de las pruebas de Tukey ($p > 0,05$). Contreras 2012 (C-12), Contreras 90 (C-90), Typica (Ty), Catuaí (Ca).

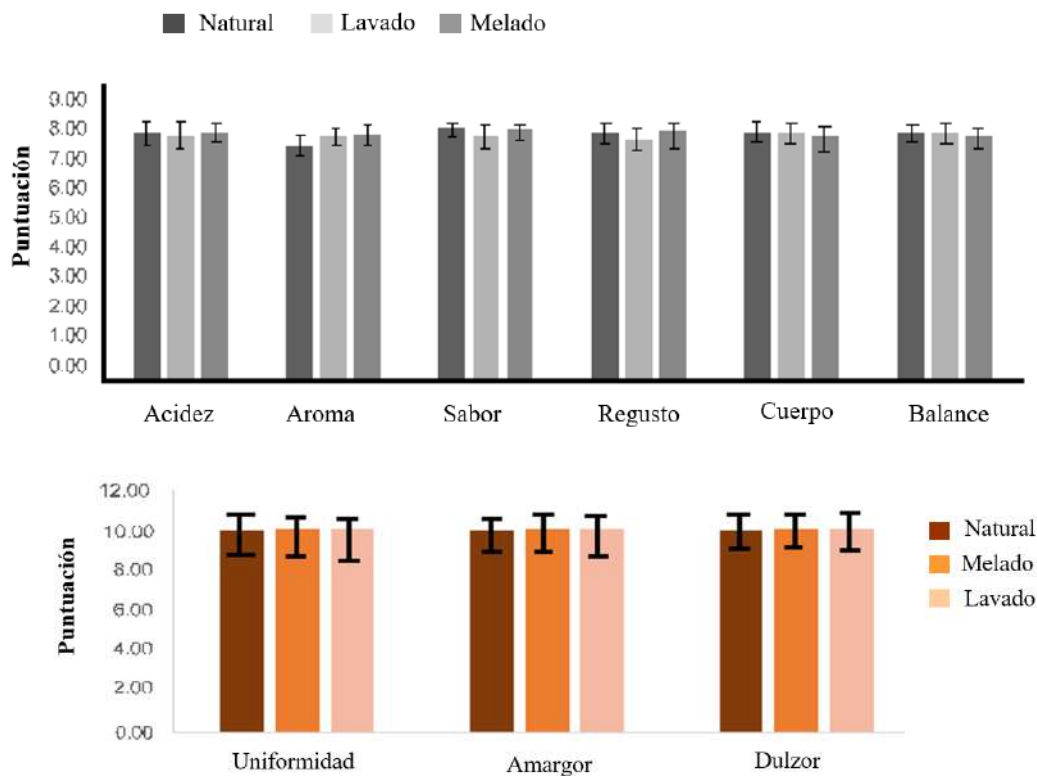


Figura 11. Puntuación de atributos sensoriales del café variedad Catuaí.

En la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos del puntaje de taza respecto a las variedades y tipos de beneficiados, en donde no se mostraron diferencias estadísticas entre los tratamientos, fueron estadísticamente iguales. En la Figura 10 se muestra el puntaje de los 85-90 atributos evaluados, los cuales fueron agrupados de acuerdo a su comportamiento, enfatizando que los datos recolectados ya fueron promediados, por lo que solo se tomó como referencia el promedio. En la Figura 11 se resume que los atributos de balance, cuerpo y acidez mantuvieron un comportamiento estable.

En cuanto a aroma, sabor y retrogusto se observó que se comportaron de manera diferente dependiendo del beneficiario. Destacaron que la mayoría de los atributos mencionados se ubicaron entre 7 y 8 puntos. En la Figura 11 se muestran los resultados de los demás atributos evaluados, donde uniformidad, limpieza y dulzor obtuvieron la máxima calificación con los tres tipos de procesamiento

5.4 Análisis nariz electrónica

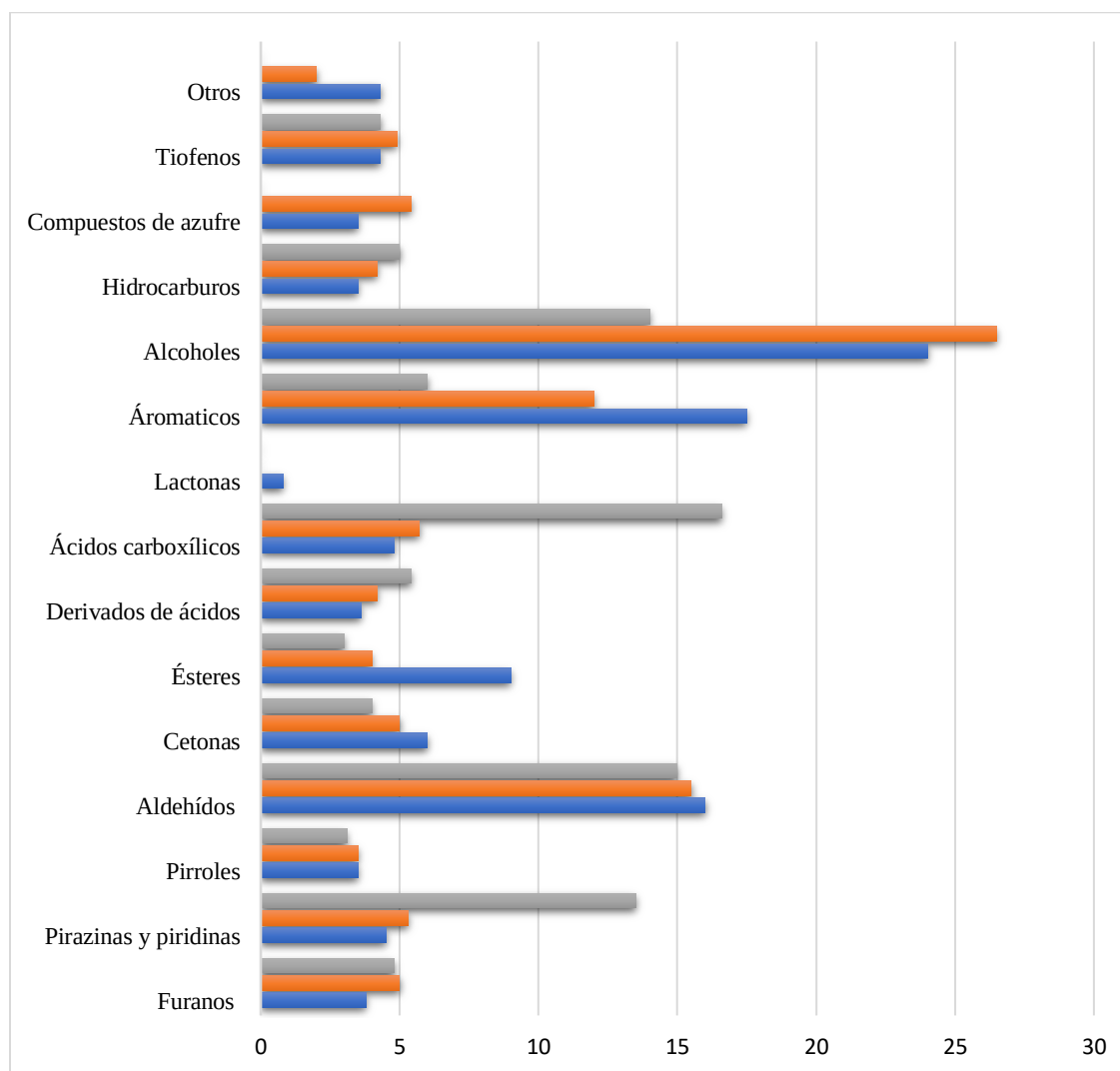
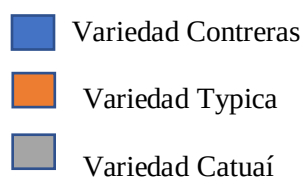


Figura 12. Distribución química de compuestos volátiles en cada variedad



El análisis de compuestos volátiles obtenido mediante nariz electrónica revela diferencias importantes en el perfil aromático de las variedades de café Contreras, Typica y Catuaí. Los alcohóles se identificaron como el grupo predominante en las variedades Typica y Catuaí, con proporciones superiores al 25%, lo que les confiere notas aromáticas suaves y dulces. En

contraste, la variedad Contreras mostró una menor proporción de estos compuestos, lo cual podría influir en un perfil aromático menos fresco y menos dulce.

En este análisis, los alcoholes se identificaron como el grupo predominante en las variedades Typica y Catuaí, lo cual es consistente con investigaciones que destacan su contribución a notas frescas y dulces en cafés de alta calidad (Gloess *et al.*, 2013). La menor proporción de alcoholes en la variedad Contreras podría estar asociada a características de cultivo y procesos de poscosecha específicos, que afectan la síntesis de compuestos volátiles (Sarzynski *et al.*, 2023).

Los compuestos aromáticos fueron significativamente mayores en la variedad Contreras lo cual indica su potencial para producir perfiles aromáticos más complejos. Según (Diaz *et al.*, 2019), la abundancia de estos compuestos está relacionada con notas florales y frutales, características buscadas en cafés gourmet. Por su parte, Typica y Catuaí, con concentraciones más bajas, podrían reflejar perfiles más sencillos o menos intensos.

En cuanto a los aldehídos, la proporción similar en todas las variedades sugiere un aporte balanceado a notas frescas y herbales. Esto se alinea con estudios de (Wang *et al.*, 2021) que asocian estos compuestos con aromas verdes en cafés menos procesados. Por otro lado, los pirroles y piridinas fueron más abundantes en Catuaí, lo que podría estar relacionado con un aroma tostado más pronunciado, ya que estos compuestos se forman durante el tostado debido a reacciones de Maillard. La menor abundancia en Contreras y Typica podría reflejar perfiles más suaves y menos robustos en términos de tueste.

Los derivados de ácidos mostraron su mayor proporción en Catuaí, indicando una mayor acidez y complejidad aromática. Esto concuerda con las observaciones de (Sarzynski *et al.*, 2023), quienes mencionan que las características del procesamiento y la genética influyen significativamente en este tipo de compuestos. Asimismo, los ésteres, más abundantes en Contreras, aportan notas afrutadas y dulces que podrían diferenciarlo en mercados especializados.

Por último, los furanos estuvieron poco representados, lo que sugiere un perfil aromático moderado, posiblemente influenciado por un tostado ligero. Esto es consistente con trabajos previos que señalan que los furanos son más prominentes en cafés sometidos a tostados más intensos (Azevedo, Toci, & Farah , 2020).

En resumen, las diferencias observadas en los perfiles volátiles destacan la influencia de la variedad genética y el procesamiento en el aroma del café. Typica se caracteriza por su frescura y dulzura, Contreras por su complejidad sensorial, y Catuaí por su robustez aromática, lo que sugiere aplicaciones específicas para cada variedad según las preferencias del mercado.

VI CONCLUSIONES

Los análisis bromatológicos y fisicoquímicos confirmaron que las propiedades químicas del café, como el alto contenido de proteínas en Typica y Contreras 90 (15.85%-16.18%) y la elevada viscosidad en Contreras 2012 (2.31 cP), están influenciadas por el método de procesamiento y contribuyen al cuerpo y perfil sensorial del café.

La evaluación sensorial reflejó una calidad consistente entre las variedades, con puntuaciones de 7 a 8 puntos en atributos clave como acidez, balance y cuerpo, y máximas calificaciones en uniformidad, limpieza y dulzor, destacando el potencial del café hondureño para cumplir estándares internacionales.

El desarrollo de modelos predictivos de calidad en taza a partir de nariz electrónica permitió caracterizar y diferenciar eficazmente las variedades de café estudiadas. Estos modelos resaltaron la complejidad de Contreras, ideal para mercados de cafés especiales, y las características distintivas de Typica y Catuaí, adaptadas a diversas demandas. Los resultados demuestran el potencial de la nariz electrónica como herramienta clave para optimizar la evaluación sensorial y la comercialización en la industria cafetalera.

VII RECOMENDACIONES

Incorporar análisis bromatológicos y fisicoquímicos detallados en programas de mejora genética y manejo poscosecha, para optimizar el contenido de proteínas y otros compuestos clave que influyen en el perfil sensorial y la calidad del café.

Promover el uso de herramientas tecnológicas como la nariz electrónica en la industria cafetalera, integrándolas en los sistemas de control de calidad para garantizar estándares consistentes y objetivos.

Ampliar el uso de la nariz electrónica para evaluar más variedades de café y diferentes métodos de procesamiento, con el fin de crear una base de datos más robusta que permita identificar patrones sensoriales relacionados con características químicas específicas.

VIII BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, C. (2013). Optimización de una nariz electrónica a través de un método de selección de variables. *El Hombre y la Máquina*.
- Aguirre Mendoza, L. A., Rodriguez, Z., Saca, V., & Apolo, V. (2018). Caracterización bromatológica de la pulpa de café (*Coffea arabica* L.) con fines de uso en la alimentación animal. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 52(2), 165-172
- Azevedo, D., Toci, A., & Farah , A. (2020). Effect of roasting speed on the volatile composition of coffees with different cup quality. *Food Research International*, 137, 109546.
- Bernardes, J. (2020, Marzo 17). *Protocolo SCA cata de café*. Obtenido de <https://idcoffeelab.com/escuela-del-cafe-madrid-2/>
- Busto, O. (2002). La nariz electrónica: una nueva herramienta para analizar el aroma. *acenologia*, pp 60-62.
- Cascos, G., Barea-Ramos, J., Montero-Fernández, I., Ruiz-Canales, A., Lozano, J., & Martín-Vertedor, D. (2023). Burn Defect and Phenol Prediction for Flavoured Californian-Style Black Olives Using Digital Sensors. *foods*, 12, 1377.
- Cascos, G., Lozano, J., Montero-Fernández, I., Marcía-Fuentes, J., Aleman, R., Ruiz-Canales, A., & Martín-Vertedor, D. (2024a). Electronic Nose and Gas Chromatograph Devices for the Evaluation of the Sensory Quality of Green Coffee Beans. *foods*, 13; 87.
- Cascos, G., Montero-Fernández, I., Marcía-Fuentes, J., Alemán, R., Ruiz-Canales, A., & Martín-Vertedor, D. (2024b). Electronic Prediction of Chemical Contaminants in Aroma of Brewed Roasted Coffee and Quantification of Acrylamide Levels. *foods*.
- Diaz, M. (2022). Evaluación del perfil aromático de café colombiano de distintas zonas y épocas de cosecha, usando de nariz electrónica y análisis estadístico multivariado. *Universidad Nacional de Colombia*.

- Díaz-de-Cerio, E., Guerra-Hernández, E., García-Estépa, R., García-Villanova, B., & Vito, V. (2019). Analytical approaches in coffee quality control in Caffeinated and Cocoa Based Beverages. *Woodhead Publishing*, (pp. 285-336).
- Franca, A., Oliveira, L., Mendonça, J., & Silva, X. (2005, Abril). Atributos físicos y químicos de granos de café crudo y tostado defectuosos. *Food Chemistry*, volumen 90. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.03.028>
- Fuentes, J., Alemán, R., Chavarría, L., Murillo, I., Alvarado, N., & Fernández, I. (2020). Development of a Drink Type Infusion From Coffee Pulp (*Coffea arabica*) Lempira Variety of Honduras. *Journal of Agricultural Science* , (12); 1 .
- Gloess, A., Schönbächler, B., Kloppe, B., D'Ambrosio, L., Chatelain, K., Bongartz, A., Yeretzyan, C. (2013). Comparison of nine common coffee extraction methods: instrumental and sensory analysis. *European Food Research and Technology*, 236, 607-627.
- Grzelczyk, J., Fiurasek, P., Kakkar, A., & Budryn, G. (2022). Evaluation of the thermal stability of bioactive compounds in coffee beans and their fractions modified in the roasting process. *Food Chemistry*, 387. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132888>
- Guerrero, H. A., Zornosa, J. R., Botero, M. d., Pinilla, J. C., & Vinasco, D. M. (2013). Variedades de café: Desarrollo de variedades. *Cenbook*, 193.
- Gutiérrez, L. (2011). Evaluación de la calidad de productos lácteos por medio de la nariz electrónica. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 61(2), 189-199.
- Gutiérrez, N., & Barrera, O. M. (2015). Selección y entrenamiento de un panel en análisis sensorial de café (*Coffea arabica* L). *Revista de Ciencias Agrícolas*, 32(2):77 - 87.
- Instituto Hondureño del café, IHCAFE. (2023). Memoria IHCAFE al servicio de la caficultura hondureña. Obtenido de https://drive.google.com/file/u/1/d/1aReYGQc9URRG-Iuvt1UjoTsDfjJy34oY/view?pli=1&usp=embed_facebook.
- Instituto Hondureño del Café, IHCAFE. (2024). Estadísticas de la producción del cultivo de café en Honduras. Obtenido de <https://i0.wp.com/www.ihcafe.hn/wp-content/uploads/2024/01/Cafe-de-Honduras-en-Numeros-1-1024x791.jpg>

- Instituto Hondureño del café, IHCAFE. (2023). Producción estratificada por departamento cosecha 2022-2023. Obtenido de <https://www.ihcafe.hn/produccion-nacional/>
- Iparraguirre, A. D. (2020). Evaluación de la calidad organoléptica del café (*Coffea arabica* L.), en las variedades Catimor, Catuai y Caturra. Universidad Señor de Sipán, 20.
- Janda , K., Jakubczyk , K., Baranowska-Bosiacka , I., Kapczuk , P., Kochman , J., Rmibacz-Marón , E., & Gutowska, I. (2020). Mineral composition and antioxidant potential of coffee drinks according to the preparation method. *foods*, 15. doi:doi:10.3390/alimentos9020121
- Murillo, M. D. (2018). Efecto de la sustitución parcial de harina de trigo por harina de café (*Coffea arabica* L) tostado y verde en las características sensoriales y fisicoquímicas de galletas dulces.
- Marcia Fuentes, J. A., Alemán, R. A., Chavarría, L. A., Varela Murillo, I. M., Alvarado, N. P., & Montero Fernández, I. (2020). Desarrollo de una bebida tipo infusión a partir de pulpa de café (*Coffea arabica*) variedad Lempira de Honduras. *Journal of agricultural Science*.
- Murthy, P., & Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45-58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>
- Olika Fufa, B., Bekele Etana, M., & Chewaka Aga , M. (2019). Review on Post-harvest and Green Bean Coffee Processing in Ethiopia. *Journal of Natural Sciences Research*, Vol.9(No.9), 6. doi:: 10.7176/JNSR
- Pabón, J., & Osorio, V. (2019). Factores e indicadores de la calidad física, sensorial y química del café. En Centro Nacional de Investigaciones de Café, Aplicación de ciencia tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila (págs. 162–187). Cenicafé. Obtenido de https://doi.org/10.38141/10791/0005_7
- Peñuela-Martínez, A. E., Pabón-Usaquén, J., Rodríguez-Valencia, N., & Oliveros-Tascón, C. E. (2010). Evaluación de una enzima pectinolítica para el desmucilaginado del café.

- Pierre , J., Rodrigo , F., & Vásquez, E. (2020). Importancia, genética y evolución del café en Honduras y el mundo. *Innovare revista de ciencia y tecnología*, 2.
- Pillco Cochán, C., Guzmán Loayza, D., & Cuéllar Bautista, J. (2021). Composición físico química y análisis proximal del fruto de sofaique *Geoffroea decorticans* (Hook. et Arn.) procedente de la región Ica-Perú. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 87(1), 14-25.
- Portillo Guzman, D. E. (2021). *Revisión de literatura sobre avances en beneficiado y secado de café*. Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana.
- Quicazán S., Díaz M., Zuluaga D. (2011). La nariz electrónica, una novedosa herramienta para el control de procesos. *Vitae*, pp. 209-217.
- Quintero, G. (2013). *Digital repository of the National Coffee Research Centre - CENICAFE*. Obtenido de Composición química de una taza de café: <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/340>
- Rica, C., & Salvador, E. (2018). *Las Variedades del Café Árábica*. Obtenido de <https://worldcoffeeresearch.org/work/coffee-varieties-mesoamerica-and-caribbean>.
- Rosas, G. A. (2021). Efecto de la pulpa de café en las propiedades reológicas de masa para pan y batidos para muffins y su relación con sus parámetros de panificación.
- Sarzynski, T., Bertrand, B., Rigal, C., Marraccini, P., Vaast, P., Georget, F., . . . Abdallah, C. (2023). Efecto de las interacciones genético-ambientales y de las variables climáticas sobre las características físicas y la composición química del grano de *Coffea arabica*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(9), 4692-4703.
- Serracín, J., & Moreno, I. (2016). Matriz de sensores: fundamento de la nariz electrónica. *Memorias de congresos UTP*, 1 (1), 37-39.
- Suárez Salazar, J. C., Rodríguez Burgos , E., & Durán Bautista , E. H. (2015). Efecto de las condiciones de cultivo, las características químicas del suelo y el manejo de grano en los atributos sensoriales de café (*Coffea arabica* L.) en taza.
- Velásquez, R. A. (2019). Asociación Nacional del Café, Anacafé. Obtenido de Guía de Variedades de Café: <https://www.anacafe.org/uploads/file/9a4f9434577a433aad6c123d321e25f9/Gu%C3%ADa-de-variedades-Anacaf%C3%A9>

- Wang, X., Wang, Y., Hu, G., Hong, D., Li, Z., & Qiu, M. (2021). Review on factors affecting coffee volatiles: from seed to cup. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(4), 1341-1352. doi:<https://doi.org/10.1002/jsfa.11647>
- Zhu, J., Zhou, L., Zhao, M., & We, F. (2023). Revealing the dynamic changes of lipids in coffee beans during roasting based on UHPLC-QE-HR-AM/MS/MS. *Food Research International*.

ANEXOS

ANÁLISIS BROMATOLÓGICOS

Anexo 1. Procedimiento del análisis de proteínas mediante titulación

Imagen que detalla los pasos seguidos para la determinación de proteínas en las muestras de café, incluyendo los reactivos y equipos utilizados durante el proceso experimental.



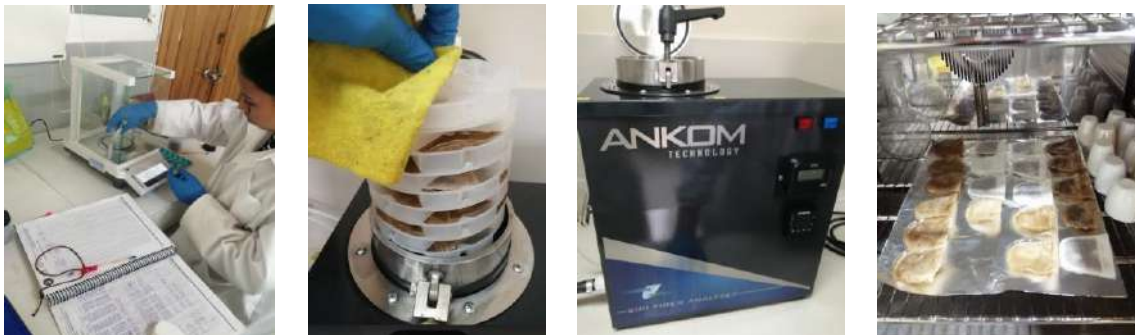
Anexo 2. Montaje del equipo Soxhlet

Fotografía del equipo Soxhlet montado, ilustra el proceso en curso, mostrando el ciclo de evaporación-condensación del solvente en el extractor Soxhlet.



Anexo 3. Proceso de digestión y filtración para fibra cruda

Serie de imágenes o un esquema ilustrativo del procedimiento paso a paso, incluyendo la digestión ácida, básica y el posterior filtrado.



ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS

Anexo 4. Medición del pH en las muestras de café

Fotografía del proceso de medición, donde el electrodo se introduce en la solución de muestra, asegurando la estabilidad de los valores registrados.



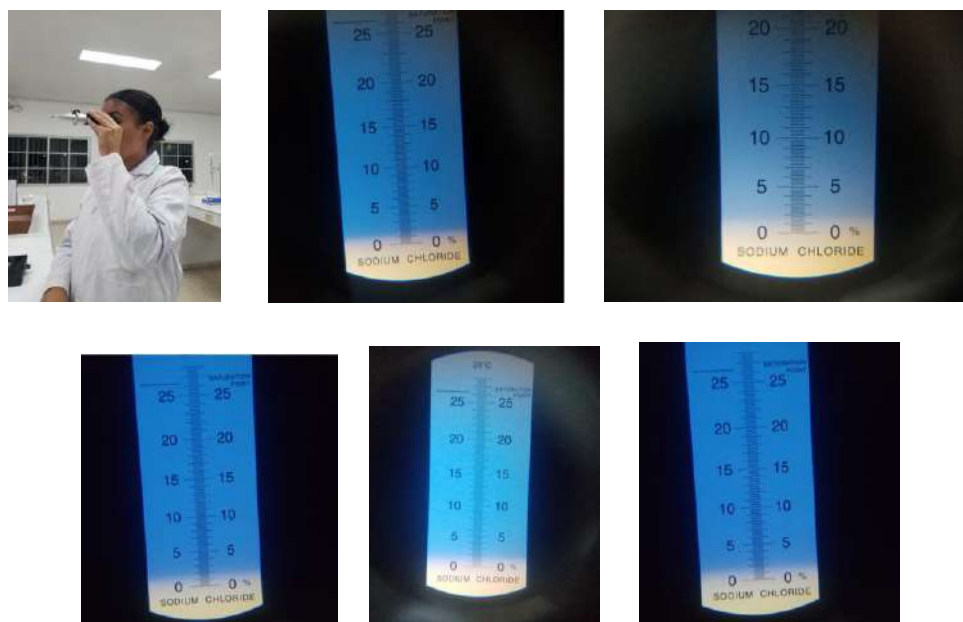
Anexo 5. Medición de la viscosidad en las muestras de café

Fotografía que ilustra el análisis, con el viscosímetro en operación y el rotor sumergido en la muestra para registrar las mediciones.



Anexo 6. Preparación de las muestras para el análisis de grados Brix

Fotografía del proceso de extracción del líquido o solución de café para medir su contenido soluble mediante refractómetro



ANÁLISIS NARIZ ELECTRÓNICA

Anexo 7. Modelo de nariz electrónica utilizado

Este anexo presenta imágenes del modelo de nariz electrónica empleado en el estudio, incluyendo vistas detalladas de los sensores que conforman el equipo.

