

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
FACULTAD DE INGENIERÍA**



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS**

**EFFECTO DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDO EN ETAPA
PRE-FERMENTATIVA SOBRE LA CALIDAD EN TAZA DE CAFÉ
VARIEDAD CATIMOR**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

Autor:

Bach. Edilter Vilchez Farfán

Asesores:

Dr. Ralph Stein Rivera Botonares

Mg. Hans Himbler Minchán Velayarce

Línea de investigación: LI_IIA_03 - Ingeniería de Procesos Alimentarios

JAÉN, PERÚ

2026

Edilter Vilchez Farfan

EFECTO DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDO EN ETAPA PRE-FERMENTATIVA SOBRE LA CALIDAD EN TAZA DE CAFÉ VARI...

 Quick Submit

 Quick Submit

 Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3604295831

77 páginas

Fecha de entrega

30 jun 2026, 12:15 p.m. GMT-5

19.803 palabras

Fecha de descarga

30 jun 2026, 12:44 p.m. GMT-5

103.448 caracteres

Nombre del archivo

IFT_-_Edilter_Vilchez_UNJ_-_EDILTER_VILCHEZ_FARFN.pdf

Tamaño del archivo

2.8 MB

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dra. María Marleni Torres Cruz
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería



2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
67 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
460 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN


Dra. María Marieni Torres Cruz
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
Ley de Creación N° 29304

FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día 10 de julio del año 2026, siendo las 09:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Ernesto Hernández Martínez

Secretario: Dr. Juan Dario Rios Mera

Vocal: M. Sc. Andrea Fiorelli Velarde Santoyo, para evaluar la Sustentación de:

() Trabajo de Investigación

(X) Tesis

() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: "EFECTO DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDO EN LA ETAPA PRE-FERMENTATIVA SOBRE LA CALIDAD EN TAZA DE CAFÉ VARIEDAD CATIMOR", presentado por el tesista **Ediliter Vilchez Farfán**, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias.

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

(X) Aprobar () Desaprobar (X) Unanimidad () Mayoría

Con la siguiente mención:

- | | | |
|----------------|------------|--------|
| a) Excelente | 18, 19, 20 | () |
| b) Muy bueno | 16, 17 | (16) |
| c) Bueno | 14, 15 | () |
| d) Regular | 13 | () |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | () |

Siendo las 10:23 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.

Jaén, 10 de julio de 2026


Dr. Ernesto Hernández Martínez
Presidente


Dr. Juan Dario Rios Mera
Secretario


M. Sc. Andrea Fiorelli Velarde Santoyo
Vocal

“Nombre del Año”

ANEXO N°06:

**DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO
DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)**

Yo, Vilchez Farfán Edilter, egresado de la escuela Profesional de ingeniería de industrias alimentarias de la Facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén, identificado con DNI 75427217.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado:

“EFECTO DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDO EN ETAPA PRE-FERMENTATIVA SOBRE LA CALIDAD EN TAZA DE CAFÉ VARIEDAD CATIMOR”.

Asesorado por el Dr. Ralph Stein Rivera Botonares y Mg. Hans Himbler Minchán Velayarce.

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar; el Título Profesional/Grado Académico de Ingeniero en Industrias Alimentarias.

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 04, septiembre y 2026.



Bach Edilter Vilchez Farfán

ÍNDICE

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
I. INTRODUCCIÓN.....	13
II. MATERIAL Y MÉTODOS	16
2.1. Lugar de ejecución.....	16
2.2. Materiales.....	16
2.3. Procedimientos.....	17
2.3.1.Procedimiento fermentativo de café Catimor	17
2.3.2.Método de análisis	22
2.3.3.Diseño de la investigación	25
2.3.4.Análisis estadístico de datos	27
III. RESULTADOS	30
3.1. Efecto del pretratamiento ultrasónico sobre los parámetros fisicoquímicos y el puntaje de café variedad Catimor	30
3.2. Identificación de variables de respuesta optimizables y determinación de las condiciones óptimas de pretratamiento ultrasónico mediante Metodología de Superficie de Respuesta	31
3.3. Comparación multivariante del perfil fisicoquímico y sensorial del café variedad Catimor bajo pretratamiento ultrasónico y fermentación tradicional mediante Análisis de Componentes Principales	38
IV. DISCUSIÓN.....	42
4.1. Efecto del pretratamiento ultrasónico sobre los parámetros fisicoquímicos y el puntaje de taza del café variedad Catimor	42
4.2. Optimización del puntaje de taza del café variedad Catimor mediante Metodología de Superficie de Respuesta.....	45
4.3. Comparación multivariante del perfil fisicoquímico y sensorial del café variedad Catimor bajo pretratamiento ultrasónico y fermentación tradicional mediante Análisis de Componentes Principales	48
4.4. Limitaciones del estudio	52
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
DEDICATORIA.....	62
AGRADECIMIENTO	63
ANEXOS.....	64

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación geográfica del punto de recolección de cerezas de café Catimor en San Francisco, La Coipa, Cajamarca, Perú.	17
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso fermentativo del café Catimor	18
Figura 3. Esquema general del diseño experimental: desde el pretratamiento ultrasónico pre-fermentativo del café despulpado variedad Catimor hasta la optimización fisicoquímica y sensorial mediante Metodología de Superficie de Respuesta y protocolo SCA	29
Figura 4. Superficie de respuesta tridimensional para el Puntaje de Taza del café variedad Catimor en función del Tiempo de sonicación (A, min) y la Potencia de ultrasonido (B, W) en etapa pre-fermentativa.	33
Figura 5. Mapa de contorno del Puntaje de Taza del café variedad Catimor en función del Tiempo de sonicación (A, min) y la Potencia de ultrasonido (B, W).	34
Figura 6. Perfiles de predicción y función de deseabilidad para la optimización numérica del Puntaje de Taza del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa.	35
Figura 7. Gráfica de perturbación para el Puntaje de Taza en el punto óptimo (Tiempo = 0.059, Potencia = 0.421, unidades codificadas). La curva B (Potencia) muestra mayor sensibilidad que la curva A (Tiempo).	37
Figura 8. Mapa de contorno de deseabilidad para el Puntaje de Taza en función del Tiempo y Potencia de ultrasonido. La región óptima ($D \geq 0.60$) se concentra en el intervalo de Potencia codificada entre 0.1 y 0.9 (337–375 W).	37
Figura 9. Deseabilidad individual y combinada para la solución óptima del proceso ultrasónico. Los factores Tiempo y Potencia alcanzaron $d = 1.0$ (objetivo: Is in range). El Puntaje de Taza obtuvo $d = 0.671$, determinando la deseabilidad combinada $D = 0.671$	38
Figura 10. Biplot del Análisis de Componentes Principales para los 13 tratamientos del DCCR más el control, sobre las seis variables de respuesta fisicoquímicas y sensorial.	39

Índice de Tablas

Tabla 1. Diseño Compuesto Central Rotacional para la optimización del ultrasonido pre-fermentativo en café variedad Catimor	26
Tabla 2. Criterios integrados para la evaluación de modelos RSM y umbrales de referencia.....	27
Tabla 3. Resultados del diseño experimental DCCR para las variables fisicoquímicas y el puntaje de taza del café variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa	30
Tabla 4. Resumen estadístico de los modelos RSM para las variables de respuesta del café variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa	31
Tabla 5. Estadísticos del modelo cuadrático completo y reducido para el Puntaje de Taza del café Catimor (Design-Expert v13)	33
Tabla 6. Condiciones óptimas del proceso ultrasónico para maximizar el Puntaje de Taza del café variedad Catimor	36
Tabla 7. Cargas factoriales y contribución porcentual de las variables de respuesta a las componentes principales del ACP	40
Tabla 8. Correlaciones entre variables de respuesta y componentes principales ($r = \text{carga} \times \sqrt{\text{valor propio}}$)	40
Tabla 9. Relación entre distancia al punto óptimo RSM, Puntaje de Taza observado y posición en el biplot ACP para tratamientos seleccionados	41

Índice de Anexos

Anexo 1. Recolección de café previo al proceso fermentativo	64
Anexo 2. Proceso de lavado y envasado de muestras de café	65
Anexo 3. Medición de temperatura de las muestras de café	66
Anexo 4. Pesado de las muestras de café Catimor	67
Anexo 5. Medición de Humedad para los granos de café en la etapa fermentativa.....	68
Anexo 6. Medición de pH para los granos de café durante la etapa fermentativa	69
Anexo 7. Medición de acidez para los granos de café en la etapa fermentativa	70
Anexo 8. Procedimiento de preparación y uso del baño ultrasónico durante el análisis de muestras en laboratorio.	71
Anexo 9. Procedimiento de preparación, análisis y lectura de muestras mediante en laboratorio	72
Anexo 10. Certificados oficiales de los catadores acreditados como Catador Q Arábica	73
Anexo 11. Evaluación Sensorial de Café en el laboratorio de Control de Calidad Cooperativa Cafetalera Selva Norte.....	74
Anexo 12. Estimados de efectos, coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo Cuadrático de superficie de respuesta para la variable Acidez titulable (Ac, %) del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa	75
Anexo 13. Estimados de efectos, coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo Mean (modelo constante) de superficie de respuesta para la variable Humedad (H, %) del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa.....	76
Anexo 14. Estimados de efectos, coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo Cuadrático de superficie de respuesta para la variable pH del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa	77
Anexo 15. Estimados de efectos, coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo Cuadrático de superficie de respuesta para la variable Polifenoles Totales (mg GAE/100g), Modelo cuadrático completo del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa	78

Anexo 16. Estimados de efectos, coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo Reducido de superficie de respuesta para la variable Polifenoles Totales (mg GAE/100g), Modelo reducido ($A + B + A^2$) del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa.....	79
Anexo 17. Estimados de efectos, coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo Cuadrático de superficie de respuesta para la variable Capacidad Antioxidante ($\mu\text{mol TE/g}$), Modelo cuadrático del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa.....	80
Anexo 18. Estimados de efectos, coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo Reducido de superficie de respuesta para la variable Puntaje en Taza (puntos SCA), Modelo reducido ($B + A^2 + B^2$) del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa.....	81
Anexo 19. Datos crudos de la evaluación sensorial del café variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa, bajo protocolo SCA ($n = 5$ catadores por tratamiento).....	82

RESUMEN

La variedad Catimor presenta limitaciones en su perfil sensorial bajo métodos de fermentación tradicionales, restringiendo su acceso a mercados de cafés especiales. Esta investigación evaluó el efecto del ultrasonido a 40 kHz en la etapa pre-fermentativa sobre las características fisicoquímicas y sensoriales del café variedad Catimor. Se empleó un Diseño Compuesto Central Rotacional con 13 tratamientos, variando tiempo de sonicación (10–20 min) y potencia (266.65–399.00 W; 40–60% de 665 W) sobre café despulpado sometido a fermentación aeróbica de 48 horas. Las variables de respuesta se analizaron mediante Metodología de Superficie de Respuesta en Design-Expert v13. El ultrasonido incrementó los polifenoles totales (29.66–52.99 mg GAE/100g) y la capacidad antioxidante (5967–13118 μ mol Trolox/100g) respecto al control, mientras pH y humedad permanecieron estables. De las seis variables evaluadas, el Puntaje de Taza fue la única optimizable ($p = 0.025$; $R^2 = 0.716$; Adeq. Precision = 6.40). Las condiciones óptimas fueron 15.2 min y 352.5 W, con puntaje predicho de 83.63 puntos SCA y deseabilidad $D = 0.671$. Todos los tratamientos superaron el umbral de 80 puntos SCA. El ultrasonido pre-fermentativo constituye una estrategia eficaz para mejorar la calidad sensorial del café Catimor frente a la fermentación tradicional.

Palabras clave: cavitación acústica, polifenoles totales, calidad en taza, tecnología no térmica, postcosecha cafetalera.

ABSTRACT

The Catimor variety presents limitations in its sensory profile under traditional fermentation methods, restricting its access to specialty coffee markets. This study evaluated the effect of 40 kHz ultrasound applied during the pre-fermentative stage on the physicochemical and sensory characteristics of Catimor coffee. A Central Composite Rotational Design with 13 treatments was applied, varying sonication time (10–20 min) and power (266.65–399.00 W; 40–60% of 665 W) on pulped coffee subjected to 48-hour aerobic fermentation. Response variables were analyzed using Response Surface Methodology in Design-Expert v13. Ultrasound increased total polyphenols (29.66–52.99 mg GAE/100g) and antioxidant capacity (5967–13118 μmol Trolox/100g) relative to the control, while pH and moisture remained stable. Of the six variables evaluated, Cup Score was the only statistically optimizable response ($p = 0.025$; $R^2 = 0.716$; Adeq. Precision = 6.40). Optimal conditions were 15.2 min and 352.5 W, yielding a predicted score of 83.63 SCA points and desirability $D = 0.671$. All treatments exceeded the 80-point SCA specialty threshold. Pre-fermentative ultrasound represents an effective strategy for improving the sensory quality of Catimor coffee over traditional aerobic fermentation.

Keywords: acoustic cavitation, total polyphenols, cup quality, non-thermal technology, coffee postharvest.

I. INTRODUCCIÓN

El café (*Coffea arabica* L.) es cultivado a nivel mundial, siendo una fuente de ingresos para millones de pequeños productores en diversas regiones tropicales (Centeno y Martínez, 2023), en el distrito de La Coipa, provincia de San Ignacio, región Cajamarca, los productores utilizan métodos tradicionales de fermentación como el uso de tanques tina, sacos y bolsas de polipropileno. Estos procesos, realizados sin el debido control ni capacitación técnica, generan variabilidad en la calidad del café.

La variedad Catimor representa un pilar en la caficultura moderna debido a su resistencia a enfermedades; no obstante, su perfil sensorial suele ser objeto de estudio para mejorar su competitividad frente a variedades tradicionales (González et al. 2019; Huang et al. 2025; Zhang et al. 2019). Estudios realizados en México indicaron que los atributos de calidad en taza de los café Catimor están intrínsecamente ligados a características físicas, donde el tamaño del grano influye en el sabor, reportando puntajes que varían entre 69.95 y 75.53 bajo condiciones estándar (Luna et al. 2019). Por otro lado, Huang et al. (2025) indicó que las interacciones complejas entre compuestos como el ácido clorogénico (CGA), la cafeína y la trigonellina determinan los resultados sensoriales finales, observando que cosechas tardías con mayores contenidos de lípidos y proteínas tienden a alcanzar puntajes de taza más elevados.

La calidad del café es un factor multidimensional determinado por la genética, las condiciones agroclimáticas y, críticamente, los procesos de postcosecha (Agnoletti et al. 2022; Silva et al. 2024; Vega et al. 2025). En la actualidad, la industria de cafés especiales demanda procesos que garanticen perfiles sensoriales distintivos y consistentes; sin embargo, los métodos de fermentación tradicionales suelen presentar una alta variabilidad (Agnoletti et al. 2022; Martínez et al. 2023). Según Febrianto y Zhu, (2023) los métodos de procesamiento emergentes se enfocan en optimizar la fermentación de los granos para potenciar la formación de volátiles, precursores de aroma y ácidos orgánicos, mejorando atributos específicos como notas frutales, florales y ácidas. La aplicación de tecnologías verdes como el ultrasonido surge como una alternativa innovadora para intervenir en las etapas iniciales del procesamiento (Lee y Lee, 2025; Liu et al. 2024; Yuniati et al. 2025).

El ultrasonido ha demostrado una alta eficiencia en la modificación de la estructura del grano y la liberación de compuestos clave (Bhargava et al. 2021; Lee y Lee, 2025;

Liu et al. 2024). Zamanipoor et al. (2020) en su investigación reportó que el tratamiento ultrasónico mejora la extracción de componentes mayores como cafeína, triglicéridos y volátiles, logrando características sensoriales superiores con perfiles de sabor más intensos y mayor cuerpo en comparación con métodos convencionales. Asimismo, investigaciones recientes indican que la tecnología incrementa drásticamente la eficiencia operativa, donde Liu et al. (2024) determinó que el uso de ultrasonido de doble frecuencia (20/28 kHz) aumenta la eficiencia de extracción en un 83.33 %, logrando un rendimiento de extracción del 20.52 % y un contenido de sólidos disueltos totales (TDS) de 1.63 % bajo condiciones optimizadas.

Emplear ultrasonido en la etapa pre-fermentativa reside en su capacidad para acelerar transferencias de masa y modular perfiles químicos (Bhargava et al. 2021; Lee y Lee, 2025; Yuniati et al. 2025). En su investigación Lee y Lee (2025) cuantificó que el tratamiento ultrasónico puede incrementar el contenido de cafeína en un 54.7 % y el de ácido clorogénico en un 67.4 %, además de elevar significativamente el contenido de polifenoles totales y la actividad antioxidante.

Por su parte, Yuniati et al. (2025) aplicó la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) para optimizar la decafeinización mediante ultrasonido, identificando una condición óptima a 60 °C durante 10 minutos para una recuperación de cafeína del 66-68 %, demostrando que el tiempo de exposición es la variable más influyente con un modelo predictivo de alta precisión ($R^2 = 0.9968$). La integración del ultrasonido durante la etapa pre-fermentativa se justifica por su capacidad de inducir cambios estructurales y bioquímicas medibles (Bhargava et al. 2021; Lee y Lee, 2025; Liu et al. 2024).

En cuanto a la calidad sensorial bajo estándares internacionales, la fermentación controlada es decisiva (Costa et al. 2025; Martínez et al. 2023; Silva et al. 2024). La regulación de la temperatura durante la fermentación anaeróbica autoinducida impacta directamente en el perfil de metabolitos y la puntuación de taza (Costa et al. 2025). Por su parte, Agnoletti et al. (2022) mediante resonancia magnética nuclear identificó que una mayor concentración de lípidos y ácidos orgánicos específicos, influenciados por el tipo de fermentación, está asociada con puntajes sensoriales más altos.

Por lo tanto, existe un vacío de conocimiento sobre cómo el ultrasonido en la etapa pre-fermentativa afecta específicamente a la variedad Catimor (Lee y Lee, 2025; Liu

et al., 2024), la cual, según Huang et al. (2025) posee interacciones complejas entre sus propiedades fisicoquímicas y sensoriales que varían según el manejo postcosecha. Por su parte, Tieghi et al. (2024) indicó que la descomposición de la trigonelina durante el tueste aporta notas de nuez y tostado, permitiendo que cafés especiales brasileños alcancen puntuaciones superiores a los 85 puntos SCAA cuando sus perfiles de biomarcadores están optimizados (Agnoletti et al. 2022; Tieghi et al. 2024).

Los métodos emergentes y tradicionales indica una ventaja competitiva en términos de eficiencia y perfil químico. Esto se alinea con lo expuesto por Febrianto y Zhu, (2023) y quienes afirmaron que la optimización de la fermentación mediante métodos que favorecen la formación de precursores aromáticos permite remover notas defectuosas (verdosas o leñosas) e introducir descriptores cítricos y florales. Así mismo, se buscó validar cómo el ultrasonido en la fase pre-fermentativa de la variedad Catimor actúa como un catalizador para alcanzar estándares de cafés especiales.

El objetivo general de la investigación fue evaluar el efecto del pretratamiento ultrasónico en la etapa pre-fermentativa sobre las características fisicoquímicas y sensoriales del café variedad Catimor, mediante Metodología de Superficie de Respuesta, para optimizar las condiciones de proceso y determinar su perfil de calidad frente a la fermentación tradicional. Se establecieron objetivos específicos: a) Determinar el efecto del tiempo de sonicación y la potencia ultrasónica sobre los parámetros fisicoquímicos (pH, acidez titulable, humedad, polifenoles totales y capacidad antioxidante) y el puntaje de taza del café variedad Catimor, mediante un Diseño Compuesto Central Rotacional (DCCR), b) Identificar las variables de respuesta con modelos Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) válidos y optimizar las condiciones de pretratamiento ultrasónico (tiempo de sonicación y potencia) mediante función de deseabilidad global, para el café variedad Catimor, c) Comparar el perfil fisicoquímico y sensorial de los tratamientos del diseño central compuesto rotacional (DCCR) frente al método de fermentación tradicional sin ultrasonido, mediante Análisis de Componentes Principales.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Lugar de ejecución

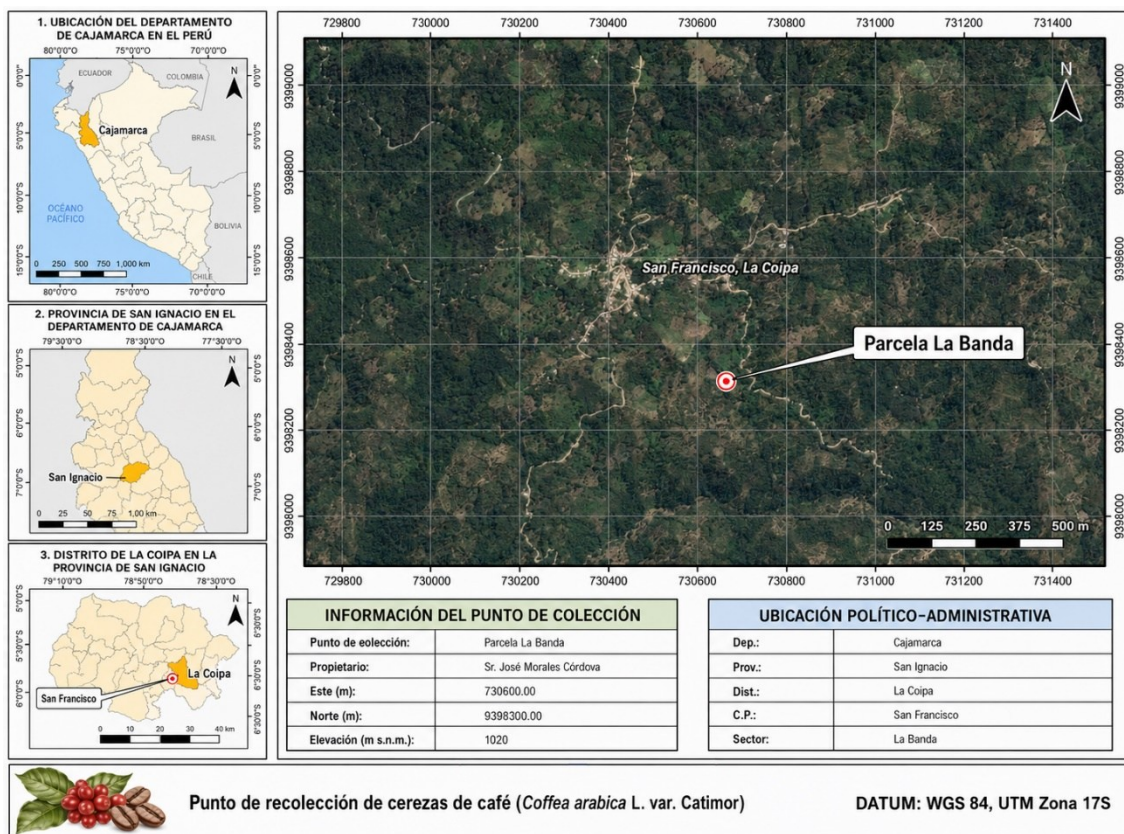
El proceso experimental respecto a la fermentación del café se realizó en la ciudad de Jaén – Cajamarca en junio del 2025. La fermentación del café y aplicación de ultrasonido se realizó en el laboratorio de Microbiología y Toxicología de Alimentos, para la cuantificación de los análisis físicoquímicos humedad, pH y acidez se realizaron en el laboratorio de Química, en la Universidad Nacional de Jaén. El análisis sensorial y el análisis físico se realizaron en los laboratorios de control de calidad de la Cooperativa Cafetalera Agraria Selva Norte en la provincia de Jaén. La evaluación de las características sensoriales y físicoquímicas se realizó en el laboratorio de Instituto de Investigación y Transferencia Agroindustrial de la Universidad Nacional del Santa en Nuevo Chimbote.

2.2. Materiales

Se adquirieron 40 kg de cerezas de café Catimor (*Coffea arabica* L.) en madurez fisiológica óptima, identificados visualmente por coloración rojo intenso uniforme de la cáscara, libres de frutos inmaduros, sobremaduros o con defectos visibles. Las cerezas se recolectaron en la Parcela La Banda, perteneciente al Sr. José Morales Córdova, centro poblado San Francisco, distrito La Coipa, provincia San Ignacio, departamento de Cajamarca (UTM WGS84, Zona 17S: 730,600 m E; 9,398,300 m N; 1440 m.s.n.m.) y fueron trasladadas en sacos al Laboratorio de Microbiología y Toxicología de Alimentos de la Universidad Nacional de Jaén para su procesamiento inmediato. El despulpado de los 40 kg de cereza rindió aproximadamente 17.2 kg de café despulpado con mucílago (rendimiento = 43%), cantidad suficiente para abastecer las 14 unidades experimentales del diseño (13 tratamientos DCCR + 1 control) a razón de 1000 g por unidad, con un excedente de 3.2 kg destinado a ajustes operativos y descartes de calidad.

Figura 1

Ubicación geográfica del punto de recolección de cerezas de café Catimor en San Francisco, La Coipa, Cajamarca, Perú.



Nota: Ubicación del punto de recolección de cerezas de café *Coffea arabica* L. var. Catimor en la Parcela La Banda, San Francisco, La Coipa, San Ignacio, Cajamarca, Perú. Coordenadas: WGS 84, UTM Zona 17S, 730600 m E y 9398300 m N; altitud: 1440 m.s.n.m. La imagen satelital se utilizó como referencia cartográfica del área de estudio.

2.3. Procedimientos

2.3.1. Procedimiento fermentativo de café Catimor

El proceso experimental comprendió las siguientes etapas secuenciales, cuyo flujo se resume en la Figura 2. Cada etapa fue ejecutada de forma controlada para garantizar la trazabilidad de las unidades experimentales individuales a lo largo de todo el proceso.

Figura 2

Esquema experimental del proceso fermentativo del café Catimor



UE: unidad experimental

Nota: El esquema fue elaborado con apoyo de inteligencia artificial generativa. La conceptualización del estudio, el diseño experimental, la metodología y los procedimientos experimentales fueron desarrollados exclusivamente por el autor.

Recepción de la materia prima

Se adquirieron 40 kg de cerezas de café (*Coffea arabica* L.) variedad Catimor en estado de madurez fisiológica óptima, identificado visualmente por la coloración rojo intenso uniforme de la cáscara del fruto, libres de frutos inmaduros, sobremaduros o con defectos visibles. Las muestras fueron recolectadas en la Parcela La Banda, centro poblado San Francisco, distrito La Coipa, provincia San Ignacio, departamento de Cajamarca (UTM WGS84, Zona 17S: 730,600 m E; 9,398,300 m N; 1440 m.s.n.m.) y trasladadas en sacos al Laboratorio de Microbiología y Toxicología de Alimentos de la Universidad Nacional de Jaén para su procesamiento inmediato (Anexo 1).

Lavado

Los granos fueron lavados en recipientes previamente desinfectados con solución de hipoclorito de sodio a 200 ppm durante 5 minutos y enjuagados con agua potable para eliminar residuos del desinfectante. El lavado se realizó con agua potable corriente hasta la remoción completa de impurezas superficiales. Los granos fueron recuperados mediante colador (Anexo 2).

Despulpado

El despulpado se realizó en una máquina despulpadora (Sin marca ni modelo, de fabricación nacional) regulada al diámetro promedio de los granos, previamente lavada y desinfectada con solución de hipoclorito de sodio a 200 ppm para evitar contaminación cruzada. La operación removió la cáscara y la fracción superficial del mucílago, obteniendo el grano despulpado con mucílago residual adherido, sustrato del pretratamiento ultrasónico y de la fermentación posterior.

Envasado inicial y pesado

Los granos despulpados fueron distribuidos en porciones de 1000 g, pesadas con balanza electrónica de precisión (Xing Yun XY1000-2C, China; resolución: 0.01 g) (Anexo 4). Cada porción constituyó una unidad experimental independiente y fue envasada individualmente en bolsa de polipropileno de primer uso con cierre hermético tipo Ziploc, previamente lavada y desinfectada. El cierre hermético de las bolsas en esta etapa cumplió una función de protección durante el traslado, impidiendo el ingreso de contaminantes externos hasta el momento del tratamiento ultrasónico.

Aplicación de ultrasonido

El pretratamiento ultrasónico se realizó en un baño de ultrasonido (Daihan Scientific, WUC-D10H, 40 kHz, 665 W nominales, Corea del Sur). Previamente a cada sesión de tratamiento, el tanque fue vaciado, limpiado con agua destilada y desinfectado con solución de hipoclorito de sodio a 200 ppm, seguido de enjuague exhaustivo con agua destilada para eliminar cualquier residuo químico que pudiera interferir con el tratamiento acústico.

Dado que el equipo opera por inmersión en agua medio de transmisión de las ondas ultrasónicas, cada unidad experimental fue introducida al tanque manteniendo el cierre hermético de la bolsa Ziploc. Este procedimiento fue crítico para prevenir el ingreso de agua al interior de la bolsa durante la sonicación, lo que habría diluido el mucílago residual del grano y alterado la composición del sustrato fermentativo. De este modo, la energía ultrasónica se transmitió a través de la pared de polipropileno hacia los granos despulpados con mucílago, induciendo los efectos de cavitación acústica sin contacto directo entre el agua del baño y la muestra.

Los parámetros de tiempo y potencia aplicados a cada unidad experimental correspondieron a los indicados en la Tabla 1, siguiendo el diseño DCCR establecido. Al concluir cada tratamiento, las bolsas fueron retiradas del baño, secadas externamente con papel absorbente y registradas con su identificación de tratamiento antes de proceder a la etapa siguiente (Anexo 8).

Fermentación aeróbica

Concluido el pretratamiento ultrasónico, cada unidad experimental fue transferida al sistema de fermentación. Para ello, las bolsas Ziploc fueron abiertas retirando el cierre hermético utilizado durante la sonicación para permitir el libre intercambio gaseoso entre los granos y el ambiente, condición indispensable para la fermentación aeróbica. Las bolsas abiertas fueron depositadas dentro de un cajón de madera de cedro blanco (*Cedrela odorata* L.; 40 × 40 × 20 cm), cubierto con tapa para prevenir la contaminación externa con polvo, insectos u otros agentes, pero sin sellado hermético, de modo que el intercambio gaseoso pasivo entre el interior del cajón y el ambiente se mantuvo libre a través de las uniones naturales de la madera. La fermentación se prolongó durante 48 horas a temperatura ambiente, garantizando una

aireación pasiva adecuada para el desarrollo de la microbiota aeróbica del mucílago (Anexo 3).

Lavado posterior a la fermentación

Cumplidas las 48 horas de fermentación, cada unidad experimental fue procesada de forma individual manteniendo la trazabilidad establecida desde el envasado inicial. Los granos de cada bolsa fueron retirados y lavados con agua potable en un recipiente previamente desinfectado con hipoclorito de sodio a 200 ppm, mediante frotamiento manual suave hasta la remoción completa del mucílago fermentado residual, verificado visualmente por la textura limpia y no pegajosa del grano. Las bolsas Ziploc utilizadas durante el proceso fueron desechadas de forma inmediata al retirar los granos, siguiendo los protocolos de gestión de residuos plásticos del laboratorio, con el fin de evitar cualquier riesgo de contaminación por lixiviación de componentes del polipropileno sobre los granos ya fermentados.

Secado

Los granos lavados de cada unidad experimental fueron colocados en bandejas individuales identificadas y llevados a estufa (DS Memmert, UN30, Alemania) a 65 °C durante 3 horas. Al término del período de secado, se verificó el contenido de humedad mediante el método gravimétrico (AOAC, 930.15), alcanzando un valor de 11.4 % en todos los tratamientos. Los granos fueron retirados de la estufa y enfriados a temperatura ambiente durante 30 minutos antes del envasado final.

Envasado final y almacenamiento

Los granos secos y fríos de cada unidad experimental fueron envasados individualmente en bolsas de polipropileno de primer uso con cierre hermético (Ziploc), correctamente identificadas con el número de tratamiento y la fecha de procesamiento. Las muestras fueron almacenadas en lugar fresco, seco y protegido de la luz solar directa, garantizando la estabilidad de sus propiedades fisicoquímicas y sensoriales hasta el momento de los análisis.

2.3.2. Método de análisis

Determinación del contenido de humedad

El contenido de humedad se determinó mediante el método gravimétrico por secado en estufa, tomando como referencia el método (Kerlab, ODHG-9053, China) (AOAC, 2023; Método 925.09). Se pesó las placas previamente secas y se procedió a colocar 10 g de muestras de granos de café con ayuda de una balanza analítica (FA2204E, Drawell, China). Se registró el peso inicial de cada una de las placas con las muestras, se llevó a la estufa por un tiempo de 2 horas a una temperatura de 105°C. Seguidamente, se retiró las muestras y se trasladó a desecador dejando enfriar por 10 minutos y se procedió a registrar el peso final (anexo 5). Se calculó el porcentaje de humedad a través de la Ecuación 1:

$$H (\%) = \frac{\text{peso placa vacía} - \text{peso de la muestra}}{\text{peso de la muestra}} \times 100 \quad (1)$$

Análisis de acidez

El análisis de acidez se realizó mediante el método de titulación (AOAC, 2023; Método 942.15). Se pesó una cantidad de 10 g de granos de café, se trituro en un mortero hasta que las partículas sean de tamaño uniforme. Se utilizó un vaso de precipitado y se enrazó hasta los 100 ml con agua destilada para luego homogenizar. Seguidamente con una pipeta se tomó 25 ml de la muestra y se dispuso en un matraz Erlenmeyer para hacer una titulación con NaOH al 0.1 N. Se añadió tres gotas del indicador fenolftaleína y se procedió con la titulación (Anexo 7). El porcentaje de acidez se determinó siguiendo la ecuación 2:

$$\text{acidez } (\%) = \frac{(PE_{\text{Ac.citrico}})(N_{\text{NaOH}})(V_{\text{NaOH}})}{10(V_{\text{muestra}})} \quad (2)$$

Donde:

PE (Ac. Cítrico): peso equivalente del ácido cítrico

N_(NaOH): normalidad de la solución de NaOH utilizada en la titulación.

V_(NaOH): volumen de NaOH gastado en la titulación (mL).

V_(muestra): volumen de la muestra analizada (mL).

10 : factor de conversión para expresar el resultado en %

Análisis de pH (AOAC, 981.12)

Para medir el pH se colocó 10 g de muestra café triturado en un vaso precipitado, añadió 50 mL de agua destilada, mezclando constantemente unos 2 a 3 minutos hasta obtener una muestra homogénea, se filtró la muestra separando el sólido y el líquido. Seguidamente, se ingresó el electrodo del pH-metro digital (HI2210, Hanna, Italia) previamente calibrado en buffer pH 4, 7 y 10, se esperó que la lectura se estabilice para anotar el valor obtenido (Anexo 6).

Determinación de polifenoles totales y capacidad antioxidante

Para la determinación de polifenoles totales, se siguió el protocolo basado en la metodología de Ainsworth y Gillespie (2007) citado por Pereira et al. (2017). Inicialmente, se prepararon las soluciones de extracción compuestas por metanol/agua (80/20 v/v) acidificada a pH 2 con HCl 2N y una solución de acetona/agua (70/30 v/v). El proceso de extracción consistió en la mezcla de la muestra homogénea con la solución de metanol, seguida de un tratamiento en baño ultrasónico a 40 KHz por 10 minutos y centrifugación refrigerada a 4000 rpm, a 20°C durante 20 minutos. Se repitió con el residuo utilizando la solución de acetona para asegurar la recuperación de los compuestos, los sobrenadantes obtenidos se combinaron para la cuantificación. La reacción colorimétrica se llevó a cabo mediante la adición de reactivo Folin Ciocalteu y carbonato de sodio Na_2CO_3 al 20 % dejando reposar la mezcla por 2 horas antes de realizar la lectura de absorbancia a 765 nm en un lector de microplacas. Para la cuantificación, se construyó una curva de calibración utilizando ácido gálico como estándar en concentraciones de 7.2 a 36 µg/mL.

Posteriormente, se evaluó la capacidad antioxidante mediante el método del radical libre DPPH. La preparación de reactivos incluyó la elaboración de una solución madre de Trolox (1 mM) y una solución de trabajo de DPPH, cuya absorbancia fue ajustada a 0.800 (± 0.02) a una longitud de onda de 515 nm. Para la extracción de las muestras, se utilizaron soluciones de metanol/agua (50/50 v/v) y acetona/agua (70/30 v/v). Durante este proceso, se protegió las muestras de la luz mediante el uso de papel aluminio para evitar la degradación de los compuestos fotosensibles. El procedimiento de extracción incluyó igualmente fases de baño ultrasónico y centrifugación a 4000 rpm, iguales que en los pasos de polifenoles totales.

Finalmente, se procedió a la lectura de la capacidad antioxidante en microplacas, donde se enfrentaron alícuotas de las muestras y de los estándares de la curva de calibración (Trolox en un rango de 0 a 500 $\mu\text{M/mL}$) contra la solución de DPPH. Tras un periodo de incubación en oscuridad, se midió la absorbancia a 515 nm. El análisis de datos se realizó calculando el porcentaje de inhibición del radical DPPH mediante la fórmula de reducción relativa respecto al blanco. Los resultados finales se expresaron en equivalentes de Trolox ($\mu\text{Mol Trolox/g}$ de muestra) mediante el empleo de la ecuación de regresión lineal $Y = ax + b$ obtenida de la curva patrón, considerando los factores de dilución correspondientes (Anexo 9).

Evaluación sensorial y determinación del puntaje de taza

Se procedió con el análisis sensorial de las muestras de café, la iluminación utilizada fue la adecuada y homogénea para evitar influencias en la percepción del color de las muestras. El proceso de evaluación se llevó a cabo mediante un proceso estandarizado, utilizando un panel de cinco catadores expertos en el Laboratorio de Control de Calidad de la Cooperativa Cafetalera Selva Norte. Se evaluó un total de 14 muestras de café, considerando diversos atributos sensoriales que son fundamentales para determinar el puntaje de taza. Los atributos evaluados fueron: fragancia/aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, uniformidad, balance, taza, dulzura y perfil general; aplicando un formato reconocido internacionalmente: Catación de la Specialty Coffee Association (SCA), que establece una escala de puntuación de 0 a 10 para cada uno de los atributos. Esta metodología proporciona una medición precisa y objetiva de las características sensoriales del café (Asociación de cafés especiales, 2026).

De acuerdo a los estándares de la Asociación de cafés especiales (2026) el puntaje total de cada muestra se obtuvo sumando las puntuaciones de los distintos atributos evaluados. El mejor café recibió la clasificación de “especial” si su puntuación final supera los 80 puntos. Este sistema de calificación permitió clasificar los cafés en función de su calidad sensorial, garantizando la consistencia y objetividad en el proceso de catación.

Para la evaluación sensorial del café, las muestras fueron sometidas previamente a un proceso de tostado y posterior molienda del grano antes de realizar la catación

(Agnoletti et al. 2022; Luna et al. 2019; Huang et al. 2025; Rocha et al. 2024; Silva et al. 2024). Luego se definió la relación entre la cantidad de café y el volumen de agua de acuerdo con los lineamientos establecidos por la Specialty Coffee Association of America, empleando una proporción de 8.25 g de café por cada 150 ml de agua, verificando la uniformidad de la muestra, el café se preparó entre tres a cinco tazas (Costa et al. 2025; Luna et al. 2019; Rocha et al. 2024; Tieghi et al. 2024). La infusión se realizó utilizando agua limpia calentada aproximadamente a 93 °C, la cual fue vertida directamente sobre el café molido, seguidamente, la valoración sensorial se llevó a cabo mediante la ficha de catación estandarizada propuesta por la SCA, en la cual los catadores califican diversos atributos sensoriales del café mediante una escala de 6.0 a 10.0 puntos por atributo, conforme al protocolo SCA (Agnoletti et al. 2022; Febrianto y Zhu, 2023; Luna et al. 2019; Rocha et al. 2024; Silva et al. 2024; Tieghi et al. 2024; Vega et al. 2025) (Anexo 11).

2.3.3. Diseño de la investigación

El estudio se realizó mediante un Diseño Compuesto Central Rotacional (DCCR) con dos factores independientes: Tiempo de sonicación (A; 10–20 min) y Potencia de ultrasonido (B; 40–60% de 665 W; equivalente a 266.65–399.00 W). Las variables de respuesta fueron: acidez titulable (Ac, %), humedad (H, %), pH, puntaje en taza (P. Taza, puntos SCA), polifenoles totales (TPC, mg GAE/100g) y capacidad antioxidante (CA, $\mu\text{mol TE/g}$).

El diseño comprendió 13 corridas experimentales: 4 puntos factoriales (niveles codificados ± 1), 4 puntos axiales (niveles codificados ± 1.414) y 5 puntos centrales (nivel codificado 0) para estimar el error experimental puro y verificar la repetibilidad. Adicionalmente, se incluyó un tratamiento control sin aplicación de ultrasonido para evaluar el efecto diferencial del pretratamiento sobre la calidad del café. La Tabla 1 presenta el esquema completo del diseño con los valores codificados y reales de cada factor.

Tabla 1.

Diseño Compuesto Central Rotacional para la optimización del ultrasonido pre-fermentativo en café variedad Catimor

Nº	Tipo de punto	Tiempo codificado	Potencia codificada	Tiempo de exposición (min)	Potencia de exposición
1	Factorial	-1	-1	11.5	43% (266.65 W)
2	Factorial	+1	-1	19.0	43% (266.65 W)
3	Factorial	-1	+1	11.5	57% (379.05 W)
4	Factorial	+1	+1	19.0	57% (379.05 W)
5	Axial	-1.414	0	10.0	50% (332.50 W)
6	Axial	+1.414	0	20.0	50% (332.50 W)
7	Axial	0	-1.414	15.0	40% (266.00 W)
8	Axial	0	+1.414	15.0	60% (399.00 W)
9	Central	0	0	15.0	50% (332.50 W)
10	Central	0	0	15.0	50% (332.50 W)
11	Central	0	0	15.0	50% (332.50 W)
12	Central	0	0	15.0	50% (332.50 W)
13	Central	0	0	15.0	50% (332.50 W)

Nota. Los niveles -1, 0 y +1 corresponden a los límites inferiores, centrales y superiores del rango experimental. El valor de $\alpha = 1.414$ corresponde al diseño rotatable con $k = 2$ factores. La potencia real (W) se calculó como: Potencia (W) = % $\times$ 665 W.

Variables independientes: (a) Tiempo de exposición al baño ultrasónico: 10 a 20 min (niveles codificados -1.414 a +1.414). (b) Potencia del ultrasonido: 40 a 60% de 665 W (266.65 a 399.00 W; niveles codificados -1.414 a +1.414).

Variables dependientes: Acidez titulable (%), Humedad (%), pH, Puntaje de taza (puntos SCA), Polifenoles totales (mg GAE/100g) y Capacidad Antioxidante ($\mu\text{mol TE/g}$).

Para la optimización, se utilizó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) para identificar las condiciones óptimas de Tiempo y Potencia que maximicen el Puntaje de Taza del café variedad Catimor, según los criterios estadísticos descritos en la Sección 2.3.4.

2.3.4. Análisis estadístico de datos

Los datos experimentales se organizaron en Microsoft Excel 365 y se procesaron en Design-Expert v13 (Stat-Ease Inc., Minneapolis, MN, EE.UU.). Como primer paso, se verificaron los supuestos del modelo lineal general. La normalidad de los residuos se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene, adoptando $p > 0.05$ como criterio de cumplimiento en ambos casos.

Para las seis variables de respuesta (pH, humedad, acidez, polifenoles totales, capacidad antioxidante y puntaje en taza), se ajustaron modelos de regresión polinomial de segundo orden mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), según la ecuación 3:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \quad (3)$$

donde Y es la variable de respuesta, X_1 el tiempo de sonicación (min) y X_2 la potencia de ultrasonido (% de 665 W), β_0 el intercepto, β_1 y β_2 los coeficientes lineales, β_{11} y β_{22} los coeficientes cuadráticos, β_{12} el coeficiente de interacción y ε el error experimental.

La selección y validación de los modelos ajustados se realizó mediante un conjunto integrado de ocho criterios estadísticos (Tabla 2), siguiendo los umbrales establecidos por Myers et al. (2016) y Anderson y Whitcomb (2017):

Tabla 2.

Criterios integrados para la evaluación de modelos RSM y umbrales de referencia

Criterio	Umbral mínimo	Umbral ideal	Interpretación
1. p-valor del modelo	< 0.05	< 0.01	Significancia estadística global del modelo
2. R^2	≥ 0.75	≥ 0.90	Variabilidad explicada por el modelo
3. R^2 ajustado	≥ 0.70	≥ 0.85	R^2 penalizado por términos innecesarios
4. R^2 predicho	≥ 0.60	≥ 0.80	Capacidad predictiva con datos nuevos
5. $ R^2_{adj} - R^2_{pred} $	< 0.20	< 0.10	Diferencia máxima aceptable (sobreajuste)
6. Lack of Fit (p)	> 0.05	> 0.10	No significativo: forma funcional adecuada
7. Adeq. Precision	≥ 4.0	≥ 10.0	Relación señal/ruido del modelo
8. CV%	$< 15\%$	$< 10\%$	Precisión relativa del método analítico

Nota. Adaptado de Myers et al. (2016) y Anderson y Whitcomb (2017). R^2_{pred} se calcula a partir del estadístico PRESS (Predicted Residual Error Sum of Squares): $R^2_{pred} = 1 - (PRESS / SS_{Total})$.

Una variable fue declarada optimizable únicamente cuando su modelo cumplió simultáneamente los criterios mínimos de: significancia global ($p < 0.05$), R^2_{pred} positivo y Adeq. Precision ≥ 4.0 , con Lack of Fit no significativo ($p > 0.05$). Variables con R^2_{pred} negativo o Lack of Fit significativo fueron descartadas para optimización y reportadas como variables de caracterización del producto.

Para variables que no cumplieron los criterios del modelo cuadrático completo, se evaluó la reducción del modelo eliminando términos no significativos ($p > 0.10$), respetando el principio de jerarquía polinomial, que exige conservar términos de orden inferior cuando términos de orden superior son retenidos en el modelo.

La optimización numérica se ejecutó en Design-Expert v13 mediante la función de maximización del Puntaje de Taza (Optimization, Numerical, Maximize P.Taza), configurando los factores Tiempo y Potencia con el objetivo «Is in range» dentro del dominio experimental codificado (± 1.414). La función de deseabilidad global D se calculó como el producto geométrico de las deseabilidades individuales según Derringer y Suich (1980), siguiendo la ecuación 4:

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_m)^{1/m} \quad (4)$$

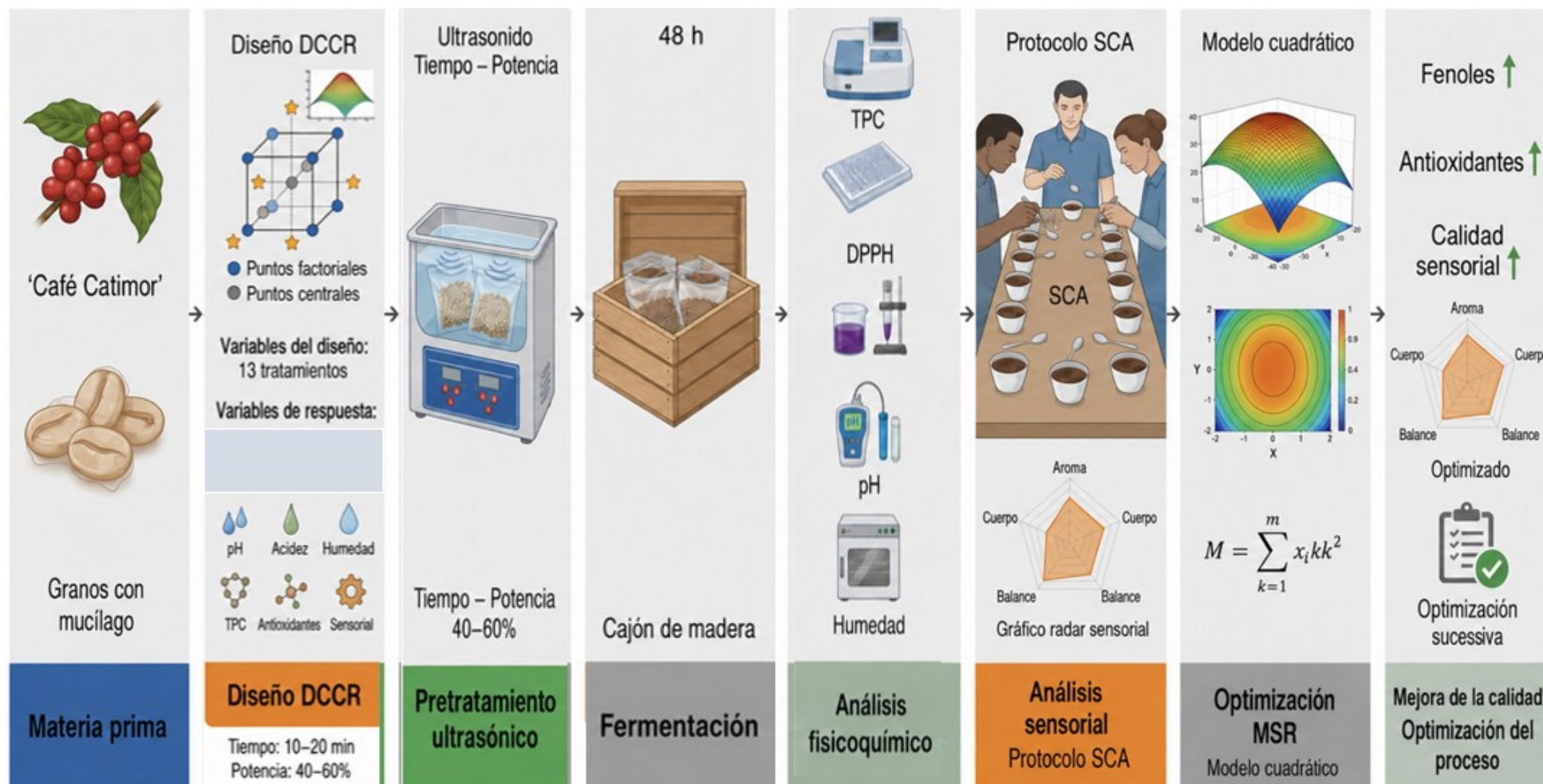
donde d_i es la deseabilidad individual de cada respuesta y m el número de respuestas optimizadas simultáneamente.

El puntaje de taza se obtuvo mediante el protocolo de catación de la Asociación de cafés especiales, (2026), aplicado por un panel de cinco catadores certificados como Q Arabica Grader (Anexo 10) en el Laboratorio de Control de Calidad de la Cooperativa Cafetalera Selva Norte, Jaén. El puntaje total de cada muestra se calculó sumando las puntuaciones de todos los atributos evaluados en la ficha SCA, clasificándose como café especial todo tratamiento con puntuación superior a 80 puntos. El puntaje en taza fue tratado como variable de respuesta cuantitativa continua en el modelo RSM.

La comparación multivariante de los tratamientos se realizó mediante Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre las seis variables de respuesta (acidez, humedad, pH, puntaje de taza, polifenoles totales y capacidad antioxidante) de los 13 tratamientos del DCCR más el control. Las variables fueron estandarizadas (media = 0, desviación estándar = 1) antes del análisis para eliminar el efecto de las diferencias de escala entre variables. El ACP fue ejecutado mediante la función *PCA* del paquete *scikit-learn* v1.3 en Python 3.11, con representación gráfica mediante *matplotlib*. Los resultados se presentan como biplot de puntuaciones y cargas factoriales, reportando la varianza explicada por cada componente principal.

Figura 3.

Esquema general del diseño experimental: desde el pretratamiento ultrasónico pre-fermentativo del café despulpado variedad Catimor hasta la optimización fisicoquímica y sensorial mediante Metodología de Superficie de Respuesta y protocolo SCA



Nota: La figura fue generada con asistencia de inteligencia artificial como apoyo visual; el diseño metodológico, la ejecución experimental y la interpretación de los resultados son de exclusiva responsabilidad del investigador.

III. RESULTADOS

3.1. Efecto del pretratamiento ultrasónico sobre los parámetros fisicoquímicos y el puntaje de taza del café variedad Catimor

Se determinaron los parámetros fisicoquímicos del café despulpado variedad Catimor sometido a los 13 tratamientos del DCCR más el control. Los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Resultados del diseño experimental DCCR para las variables fisicoquímicas, polifenoles totales, actividad antioxidante y el puntaje en taza del café variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa

Nº	Tiempo (min)	Potencia (W)	Ac (%)	H (%)	pH	TPC (mg GAE/100g)	CA (μmol TE/g)	P. Taza (pts)
1	11.5	266.65	2.29	11.5	6.23	34.00	9656.63	82.25
2	19.0	266.65	2.69	11.5	6.17	42.89	9172.53	82.25
3	11.5	379.05	2.59	11.5	6.15	31.54	5967.06	83.40
4	19.0	379.05	2.69	11.6	6.20	36.57	6964.54	83.00
5	10.0	332.50	2.45	11.5	6.23	33.27	7622.26	83.15
6	20.0	332.50	2.50	11.5	6.11	34.14	9111.94	83.55
7	15.0	266.00	2.03	11.6	6.02	52.99	13118.48	82.27
8	15.0	399.00	2.36	11.4	6.13	48.06	12483.12	83.21
9	15.0	332.50	2.03	11.5	6.09	40.41	6232.24	83.25
10	15.0	332.50	2.22	11.3	6.08	35.97	7622.26	83.20
11	15.0	332.50	2.36	11.5	6.18	29.66	6307.60	83.50
12	15.0	332.50	2.22	11.5	6.11	34.10	6346.70	84.30
13	15.0	332.50	2.07	11.4	6.05	33.32	6627.20	83.45
Control	—	—	2.26	11.4	6.10	35.62	4594.43	82.10

Nota. Los valores corresponden a la media de los resultados obtenidos en cada corrida experimental. N: número de tratamiento, tiempo de ultrasonido (min), potencia aplicada (W), acidez (%), humedad (%), pH, contenido de polifenoles totales (mg GAE/100 g), capacidad antioxidante (μmol TE/g) y puntaje en taza (pts). Los datos individuales por catador se presentan en el Anexo 19.

Los valores de pH oscilaron entre 6.02 y 6.23, sin una tendencia sistemática en función de los parámetros de sonicación. La humedad presentó un rango estrecho de 11.3–11.6%, con variación menor a 0.3 unidades porcentuales entre tratamientos. La acidez titulable varió entre 2.03% y 2.69%, registrándose los valores más altos en los tratamientos con mayor tiempo y potencia (T2 y T4: 2.69%). El puntaje en taza fluctuó entre 82.10

(control) y 84.30 puntos (T12), con todos los tratamientos superando el umbral de 80 puntos SCA que clasifica al café como especial.

Los polifenoles totales (TPC) presentaron el mayor rango de variación del estudio, con valores entre 29.66 mg GAE/100g (T11) y 52.99 mg GAE/100g (T7; 15 min, 266 W), superando al control (35.62 mg GAE/100g) en 13 de los 13 tratamientos. La capacidad antioxidante (CA) varió entre 5967.06 $\mu\text{mol TE/g}$ (T3) y 13118.48 $\mu\text{mol TE/g}$ (T7), con todos los tratamientos superando el control (4594.43 $\mu\text{mol TE/g}$).

3.2. Identificación de variables de respuesta optimizables y determinación de las condiciones óptimas de pretratamiento ultrasónico mediante Metodología de Superficie de Respuesta

Para determinar las condiciones óptimas del tratamiento ultrasónico, se evaluaron los modelos cuadráticos para las seis variables de respuesta mediante los criterios integrados de la MSR descritos en la Sección 2.3.4. La Tabla 4 presenta los estadísticos de ajuste obtenidos en Design-Expert v13.

Tabla 4.

Resumen estadístico de los modelos RSM para las variables de respuesta del café variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa

Variable	Modelo	P-valor	R ²	R ² adj	R ² pred	LoF (p)	Adeq. Prec.	CV%	Optimizable
Acidez (%)	Cuadrático	0.090	0.685	0.459	-0.637	0.197 ns	4.47	7.25	NO
Humedad (%)	Mean	—	0.000	0.000	-0.174	0.690 ns	NA	0.70	NO
pH	Cuadrático	0.335	0.497	0.138	-1.573	0.211 ns	3.49	1.00	NO
TPC (mg GAE/100g)	Reducido	0.060	0.730	0.537	-0.308	0.073	2.84	18.76	NO
CA ($\mu\text{mol TE/g}$)	Cuadrático	0.063	0.720	0.520	-0.881	0.009**	5.49	19.84	NO
P.Taza (puntos)	B+A ² +B ²	0.025*	0.716	0.574	0.264	0.734 ns	6.40	0.46	SÍ

Nota. Los valores de R²pred y Adeq. Precision fueron obtenidos de Design-Expert v13. ns = Lack of Fit no significativo (deseable). ** Lack of Fit significativo (invalida el modelo). * p < 0.05. NA = no calculable para modelo Mean. Para TPC, el modelo reducido (A+B+A²) empeoró todos los estadísticos respecto al cuadrático completo; ningún modelo alcanzó significancia estadística. Para CA, el Lack of Fit significativo (p = 0.009) invalida el modelo para predicción. Los datos completos de ANOVA se detallan en los Anexos 12–18.

El análisis reveló que cinco de las seis variables de respuesta no cumplieron los criterios mínimos de optimizabilidad. La Humedad presentó $R^2 = 0.000$, con Design-Expert v13 seleccionando el modelo Mean ($H = 11.48\%$), lo que indica insensibilidad total a los factores en el rango estudiado. El pH mostró el peor desempeño predictivo del estudio ($R^2_{\text{pred}} = -1.573$; Adeq. Precision = $3.49 < 4.0$), con advertencia explícita del software de no utilizar el modelo para navegar el espacio de diseño. La Acidez y los Polifenoles Totales presentaron R^2_{pred} negativos (-0.637 y -0.308 , respectivamente), indicando que la media de los datos predice mejor que los modelos ajustados. La Capacidad Antioxidante, aunque presentó $R^2 = 0.720$, fue invalidada por Lack of Fit significativo ($p = 0.009$); la comparación secuencial de modelos polinomiales confirmó que ningún orden evaluado superó este problema estructural.

El Puntaje de Taza fue la única variable que cumplió las condiciones mínimas para optimización (Tabla 4). El modelo cuadrático completo fue no significativo ($F = 3.70$; $p = 0.059$); la eliminación del término de interacción AB ($p = 0.637$), conservando A por principio de jerarquía polinomial, produjo el modelo reducido ($B + A^2 + B^2$) con significancia estadística ($F = 5.04$; $p = 0.025$), Adeq. Precision = 6.40 y Lack of Fit no significativo ($p = 0.734$) (Tabla 5). Los términos significativos fueron B-Potencia ($p = 0.018$) y B^2 ($p = 0.011$), confirmando que la potencia del ultrasonido es el factor dominante sobre el puntaje sensorial. El coeficiente negativo de B^2 ($\beta_{22} = -0.480$) confirma la existencia de un máximo real dentro del espacio experimental en la dimensión de potencia, condición necesaria para la optimización cuadrática. La ecuación del modelo ajustado en factores codificados es:

$$P.Taza = 83.54 + 0.021A + 0.404B - 0.175A^2 - 0.480B^2 \quad (5)$$

donde A = Tiempo de sonicación (variable codificada) y B = Potencia de ultrasonido (variable codificada; 1 unidad codificada = 7.071% de 665 W).

Tabla 5.

Estadísticos del modelo cuadrático completo y reducido para el Puntaje de Taza del café Catimor (Design-Expert v13)

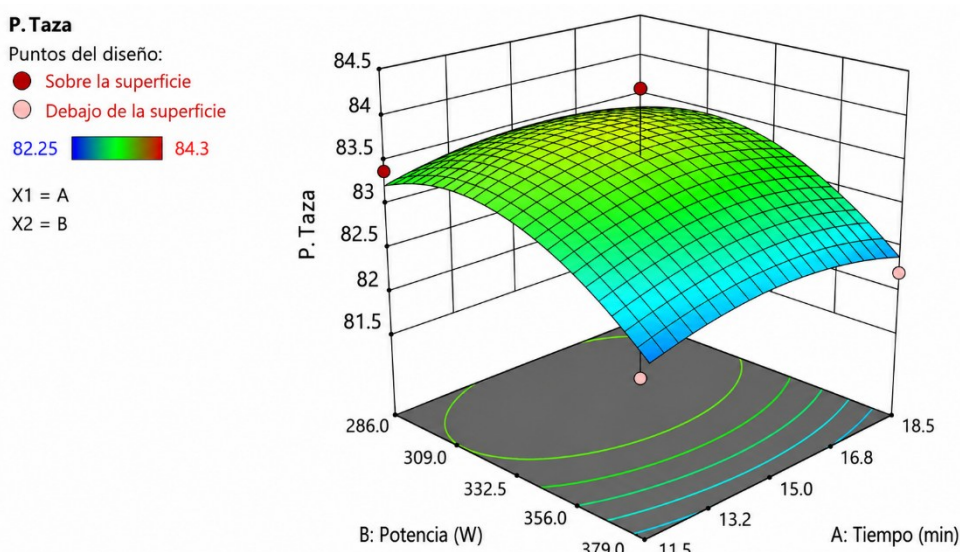
Parámetro	Modelo completo	Modelo reducido
Términos	A, B, AB, A ² , B ²	A [†] , B, A ² , B ²
F-valor	3.7	5.04
p-valor (modelo)	0.059 ns	0.025*
Lack of Fit (p)	0.641 ns	0.734 ns
Adeq. Precision	5.56	6.4
R ²	0.726	0.716
R ² predicho	0.092	0.264
β ₀ (intercepto)	—	83.54
β _A (Tiempo)	—	0.021
β _B (Potencia)	—	+0.404*
β _{AA}	—	-0.175
β _{BB}	—	-0.480*

Nota. * $p < 0.05$. ns = no significativo. † A retenido por jerarquía polinomial ($p = 0.883$). AB eliminado del modelo completo por $p = 0.637$. El coeficiente negativo de β_{BB} confirma la existencia de un máximo real en la dimensión de Potencia. Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados procesados en Design-Expert versión 13.

La superficie de respuesta y el mapa de contorno confirman visualmente la curvatura dominante sobre el eje B y la ubicación del óptimo dentro del dominio experimental (Figura 4 y Figura 5).

Figura 4.

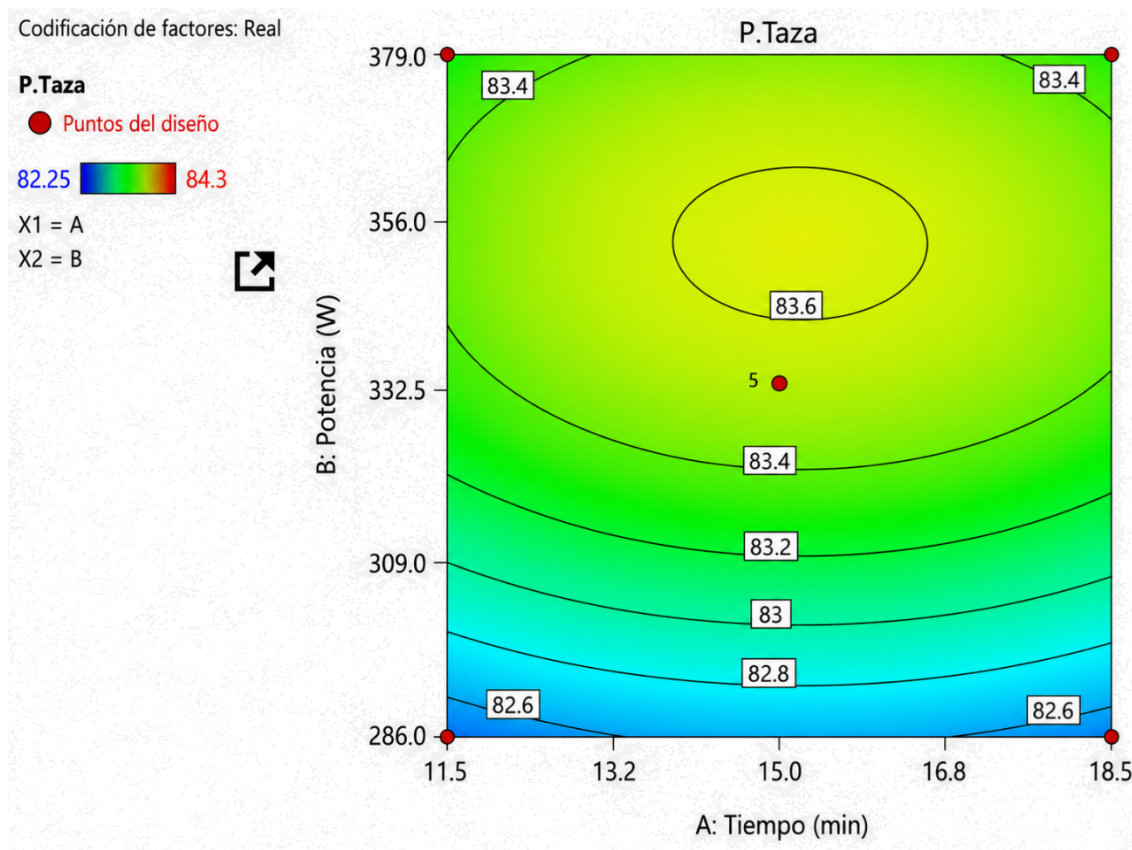
Superficie de respuesta tridimensional para el Puntaje de Taza del café variedad Catimor en función del Tiempo de sonicación (A, min) y la Potencia de ultrasonido (B, W) en etapa pre-fermentativa.



Nota: El rango de respuesta predicho se ubica entre 82.25 y 84.3 puntos SCA. La curvatura pronunciada sobre el eje B refleja el efecto cuadrático significativo de la Potencia ($\beta_{22} = -0.480$; $p = 0.011$), factor dominante del modelo reducido ($R^2 = 0.716$; Lack of Fit $p = 0.734$).

Figura 5.

Mapa de contorno del Puntaje de Taza del café variedad Catimor en función del Tiempo de sonicación (A, min) y la Potencia de ultrasonido (B, W).



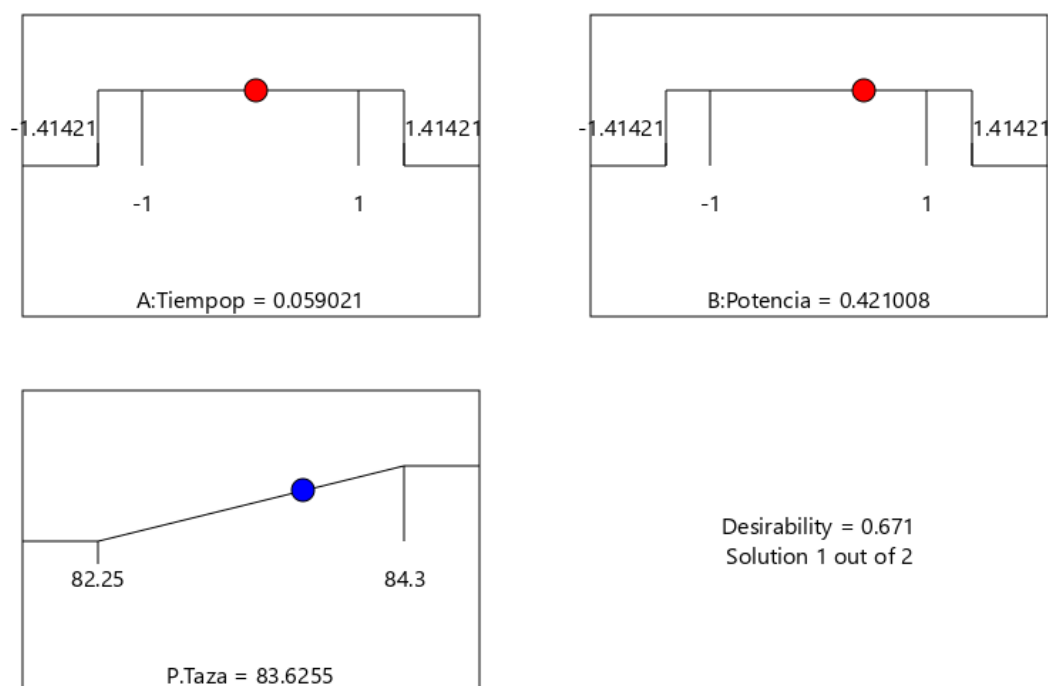
Nota: Las isolíneas delimitan la región de máxima respuesta (≥ 83.6 puntos SCA) centrada en valores codificados $A \approx 0$ y $B \approx 0.4$, equivalente a 15 min y 352.5 W. La elipse de contorno confirma que la Potencia es el factor de mayor influencia sobre el puntaje sensorial en el dominio experimental evaluado.

Optimización numérica y condiciones óptimas del proceso

La optimización numérica ejecutada en Design-Expert v13 (Optimization, Numerical, Maximize P.Taza) identificó dos soluciones equivalentes que convergieron al mismo punto óptimo. Los perfiles de predicción y función de deseabilidad se presentan en la Figura 6.

Figura 6.

Perfiles de predicción y función de deseabilidad para la optimización numérica del Puntaje de Taza del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa.



Nota: Los paneles superiores muestran los valores óptimos codificados de los factores A-Tiempo (0.059; equivalente a 15.2 min) y B-Potencia (0.421; equivalente a 352.5 W). El panel inferior muestra el Puntaje de Taza predicho (83.63 puntos SCA) dentro del rango observado (82.25–84.30 puntos). Deseabilidad global $D = 0.671$.

Con base en la optimización numérica, las condiciones óptimas del proceso ultrasónico para maximizar el Puntaje de Taza se presentan en la Tabla 6. El punto óptimo identificado corresponde a un tiempo de sonicación de 15.2 min y una potencia de 352.5 W (53.0% de 665 W), con un Puntaje de Taza predicho de 83.63 puntos SCA y una deseabilidad global $D = 0.671$.

Tabla 6.

Condiciones óptimas del proceso ultrasónico para maximizar el Puntaje de Taza del café variedad Catimor

Parámetro	Valor codificado	Valor real
A — Tiempo	0.059	15.2 min
B — Potencia	0.421	53.0% de 665 W (352.5 W)
P.Taza predicho	—	83.63 puntos SCA
Deseabilidad (D)	—	0.671

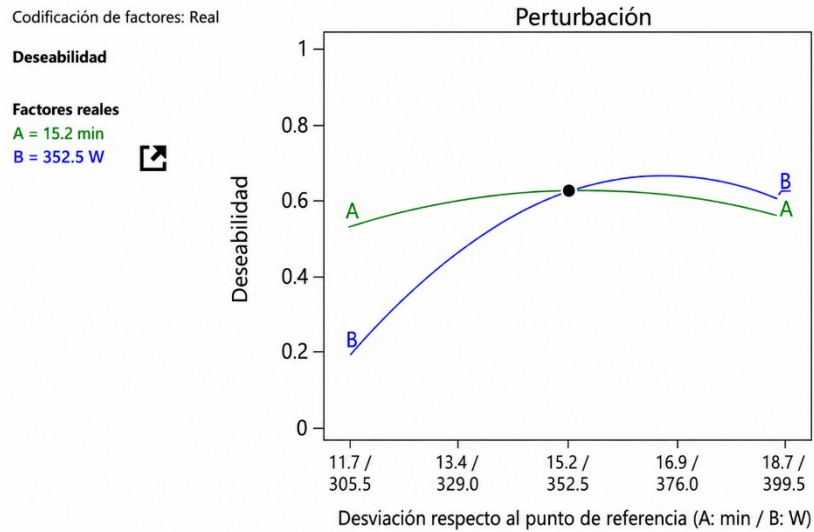
Nota. Valores reales calculados mediante decodificación: $\text{Tiempo_real} = 15 + (\text{valor codificado} \times 3.536)$; $\text{Potencia_real} = 50 + (\text{valor codificado} \times 7.071)$.

Las condiciones óptimas (Tiempo = 15.2 min; Potencia = 352.5 W) son próximas al punto central del DCCR (15 min; 332.5 W), lo que indica que las condiciones centrales del diseño ya representan un proceso cercano al óptimo sensorial para la variedad Catimor. La deseabilidad $D = 0.671$ es consistente con la capacidad predictiva moderada del modelo ($R^2_{\text{pred}} = 0.264$), resultado esperado dado que el puntaje en taza integra compuestos cuya formación depende de la fermentación aeróbica y el tueste, etapas posteriores al pretratamiento ultrasónico (Febrianto y Zhu, 2023).

El análisis de perturbación en el punto óptimo (Figura 7) confirmó que la Potencia (B) es el factor dominante: desviaciones desde el punto óptimo hacia valores bajos de potencia ($B < -0.5$ codificado; equivalente a $< 46.5\%$ de 665 W; < 309 W) generan caídas abruptas en la deseabilidad, mientras que el Tiempo (A) presentó una curva de perturbación comparativamente plana en todo el rango evaluado, indicando menor sensibilidad de la respuesta a este factor.

Figura 7.

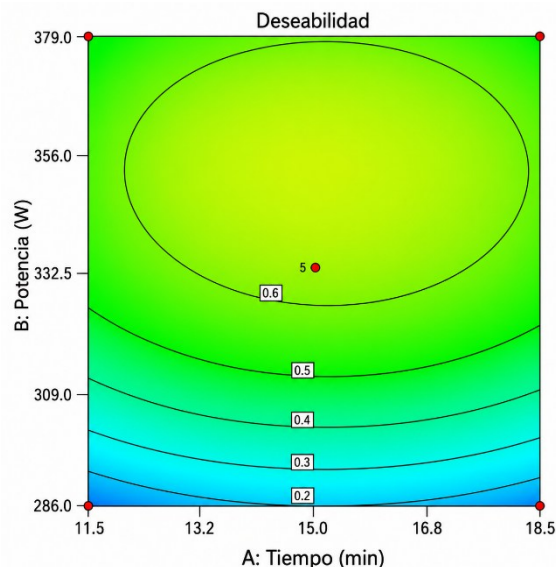
Gráfica de perturbación para el Puntaje de Taza en el punto óptimo (Tiempo = 0.059, Potencia = 0.421, unidades codificadas). La curva B (Potencia) muestra mayor sensibilidad que la curva A (Tiempo).



El mapa de contorno de deseabilidad (Figura 8) mostró la región óptima como una elipse centrada en $A \approx 0.06$ y $B \approx 0.42$ (unidades codificadas), con valores $D \geq 0.60$ en el intervalo $B = 0.1$ a 0.9 codificados (equivalente a Potencia: 50.7–56.4% de 665 W; 337–375 W). Esta región relativamente estrecha en la dimensión de potencia refuerza la importancia del control operacional de este parámetro para garantizar el puntaje sensorial óptimo.

Figura 8.

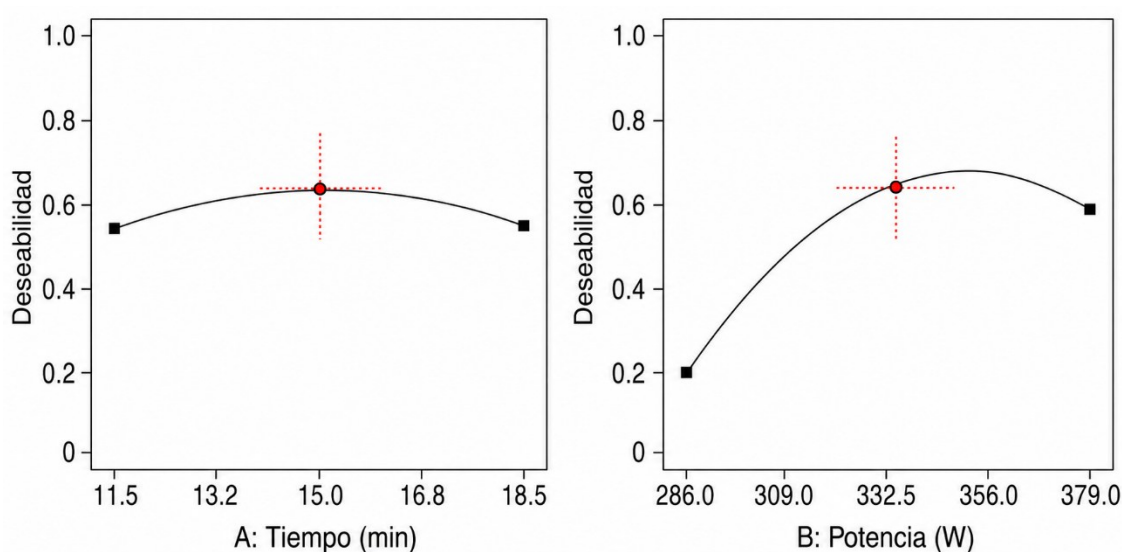
Mapa de contorno de deseabilidad para el Puntaje de Taza en función del Tiempo y Potencia de ultrasonido. La región óptima ($D \geq 0.60$) se concentra en el intervalo de Potencia codificada entre 0.1 y 0.9 (337–375 W).



La Figura 9 presenta la deseabilidad individual y combinada de la solución óptima. Los factores Tiempo y Potencia alcanzaron una deseabilidad individual $d = 1.0$ al ubicarse dentro del rango experimental establecido como criterio (Is in range), mientras que el Puntaje de Taza obtuvo $d = 0.671$, determinando la deseabilidad combinada del sistema $D = 0.671$.

Figura 9.

Deseabilidad individual y combinada para la solución óptima del proceso ultrasónico. Los factores Tiempo y Potencia alcanzaron $d = 1.0$ (objetivo: Is in range). El Puntaje de Taza obtuvo $d = 0.671$, determinando la deseabilidad combinada $D = 0.671$.

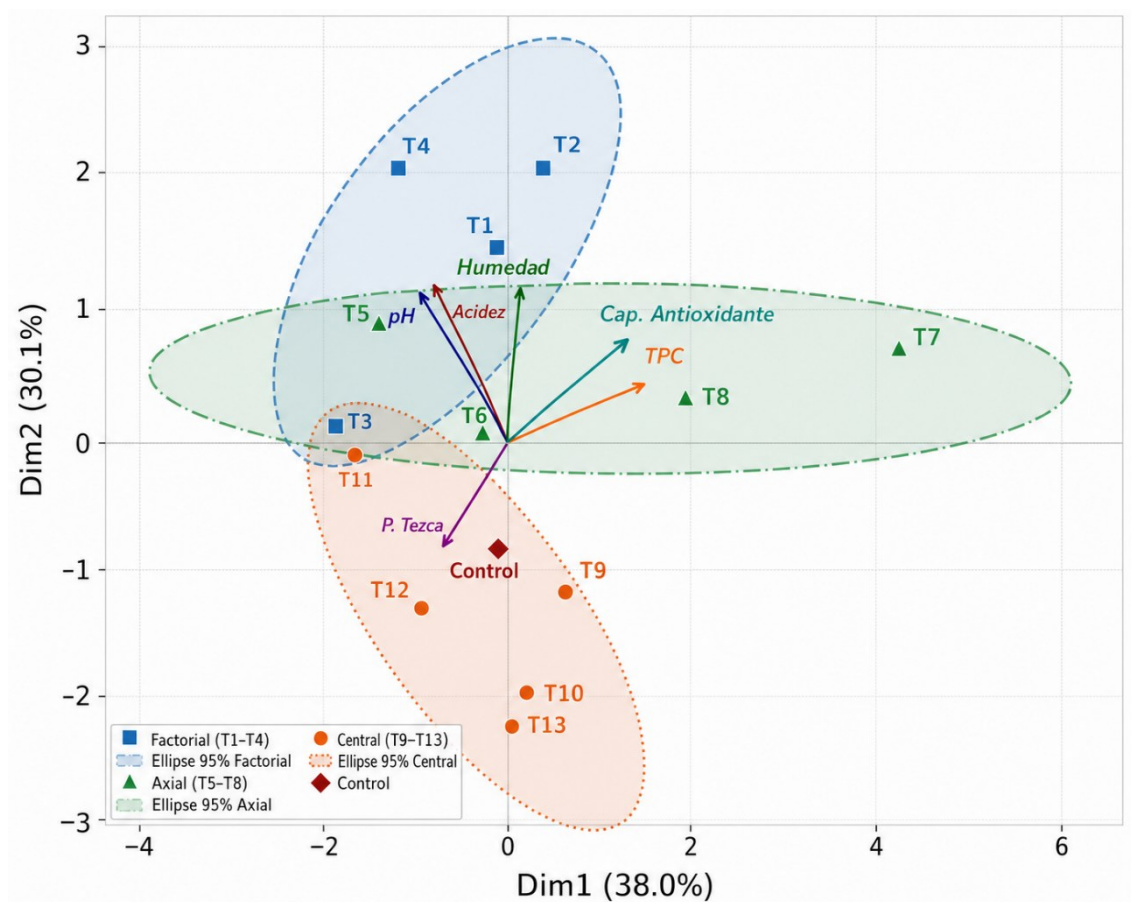


3.3. Comparación multivariante del perfil fisicoquímico y sensorial del café variedad Catimor bajo pretratamiento ultrasónico y fermentación tradicional mediante Análisis de Componentes Principales

Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre las seis variables de respuesta (acidez, humedad, pH, puntaje de taza, polifenoles totales y capacidad antioxidante) de los 13 tratamientos del DCCR más el control ($n = 14$ observaciones). Las variables fueron estandarizadas previamente al análisis. Las dos primeras componentes principales explicaron el 68.08% de la varianza total: Dim1 = 38.01% (valor propio = 2.456) y Dim2 = 30.07% (valor propio = 1.943). El biplot resultante se presenta en la Figura 10.

Figura 10.

Biplot del Análisis de Componentes Principales para los 13 tratamientos del DCCR más el control, sobre las seis variables de respuesta fisicoquímicas y sensorial.



Nota: Los cuadrados azules representan puntos factoriales (T1–T4), los triángulos verdes puntos axiales (T5–T8), los círculos naranjas puntos centrales (T9–T13) y el rombo rojo el control. Las flechas indican la dirección y magnitud de las cargas factoriales. Varianza explicada: Dim1 = 38.0%, Dim2 = 30.1%; total = 68.1%.

En la Figura 10 se observó que T7 (15 min, 266.65 W) se proyectó al extremo positivo de Dim1 (score = +4.272), mientras T8 (15 min, 399 W) ocupó la segunda posición en este eje (score = +1.870). Los puntos centrales (T9–T13) se distribuyeron en torno a Dim1 ≈ 0 (scores entre -1.644 y +0.609) y se concentraron en el sector de Dim2 negativo (scores entre -2.313 y -0.106). Los puntos factoriales T2 y T4 registraron los valores más altos de Dim2 (+2.057 y +2.049, respectivamente). El control se ubicó en Dim1 = -0.127 y Dim2 = -0.859.

Las cargas factoriales y la contribución porcentual de cada variable a Dim1 y Dim2 se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7.

Cargas factoriales y contribución porcentual de las variables de respuesta a las componentes principales del ACP

Variable	Carga Dim1	Carga Dim2	Contrib. Dim1 (%)	Contrib. Dim2 (%)	Eje dominante
Acidez	-0.338	+0.520	11.45	27.06	Dim2
Humedad	+0.037	+0.491	0.14	24.11	Dim2
pH	-0.408	+0.495	16.67	24.50	Dim1 y Dim2
P. Taza	-0.292	-0.354	8.51	12.53	Dim2 (negativo)
TPC	+0.612	+0.173	37.40	3.00	Dim1
Cap. Antioxidante	+0.508	+0.297	25.83	8.81	Dim1

Nota. Cargas calculadas sobre variables estandarizadas (media = 0, DE = 1).

Contribución = (carga² / Σ cargas²) $\times$ 100 por componente. Filas resaltadas: variables con mayor contribución a Dim1.

Las correlaciones entre las variables de respuesta y las componentes principales se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8.

Correlaciones entre variables de respuesta y componentes principales ($r = \text{carga} \times \sqrt{\text{valor propio}}$)

Variable	r con Dim1	r con Dim2	Descripción
Acidez	-0.530	+0.725	Moderada neg. Dim1; fuerte pos. Dim2
Humedad	+0.058	+0.685	Sin correlación Dim1; moderada pos. Dim2
pH	-0.640	+0.690	Fuerte neg. Dim1; fuerte pos. Dim2
P. Taza	-0.457	-0.493	Moderada neg. ambos ejes
TPC	+0.958	+0.241	Muy fuerte pos. Dim1; débil Dim2
Cap. Antioxidante	+0.797	+0.414	Fuerte pos. Dim1; moderada Dim2

Nota. $|r| > 0.70$ = correlación fuerte; 0.40–0.70 = moderada; < 0.40 = débil.

TPC presentó la correlación más fuerte con Dim1 ($r = +0.958$), seguida de Capacidad Antioxidante ($r = +0.797$). pH ($r = -0.640$) y Acidez ($r = -0.530$) mostraron correlaciones negativas con Dim1. Respecto a Dim2, Acidez ($r = +0.725$), pH ($r = +0.690$) y Humedad ($r = +0.685$) registraron las correlaciones más altas, mientras el Puntaje de Taza presentó correlación negativa con ambos ejes ($r = -0.457$ con Dim1; $r = -0.493$ con Dim2).

La Tabla 9 presenta la relación entre la distancia euclidiana al punto óptimo identificado por el modelo RSM, el Puntaje de Taza observado y la posición en el biplot para los tratamientos representativos.

Tabla 9.

Relación entre distancia al punto óptimo RSM, Puntaje de Taza observado y posición en el biplot ACP para tratamientos seleccionados

Tratamiento	Coords. codif.	Dist. al óptimo	P.Taza (puntos)	Posición en biplot
T9–T13	(0, 0)	0.425	83.54 ± 0.38	Dim1: -0.13 a $+0.61$; Dim2: -2.31 a -0.11
T8	(0, +1.414)	0.995	83.21	Dim1: $+1.870$; Dim2: $+0.300$
T4	(+1, +1)	1.105	83.00	Dim1: -1.200 ; Dim2: $+2.049$
T7	(0, -1.414)	1.836	82.27	Dim1: $+4.272$; Dim2: $+0.654$
Óptimo RSM	(0.059, 0.421)	—	83.63 (predicho)	Dim1 $\approx +0.32$; Dim2 ≈ -0.89 (estimado)

Nota. Distancia calculada como distancia euclidiana en espacio codificado entre cada tratamiento y el óptimo RSM (Tiempo = 0.059; Potencia = 0.421). Media P.Taza centrales calculada sobre T9–T13 ($n = 5$). Score del óptimo en biplot estimado por interpolación lineal ponderada entre el centroide de puntos centrales y T8. Fuente: Design-Expert v13 y análisis propio en Python 3.11.

Los puntos centrales (T9–T13) registraron la menor distancia euclidiana al punto óptimo RSM (0.425 unidades codificadas) y una media de Puntaje de Taza de 83.54 ± 0.38 puntos, valor próximo al predicho por el modelo bajo condiciones óptimas (83.63 puntos). T7, el tratamiento con mayor TPC y CA del estudio, presentó la mayor distancia al óptimo RSM (1.836 unidades codificadas) y el menor Puntaje de Taza de los tratamientos con ultrasonido (82.27 puntos).

IV. DISCUSIÓN

4.1. Efecto del pretratamiento ultrasónico sobre los parámetros fisicoquímicos y el puntaje de taza del café variedad Catimor

pH y humedad

El pH del café despulpado variedad Catimor se mantuvo estable entre 6.02 y 6.23 en todos los tratamientos, sin diferencias atribuibles a los parámetros de sonicación. Este comportamiento es consistente con el mecanismo de acción del ultrasonido de baja frecuencia, que opera principalmente mediante cavitación acústica y microstreaming sin inducir reacciones de disociación de protones en matrices sólidas con baja actividad de agua libre (Bhargava et al. 2021; Li et al. 2021). La capacidad tamponante de los ácidos orgánicos naturales del café cítrico, málico y quínico amortigua cualquier variación puntual de pH generada localmente por la cavitación, resultando en una respuesta neta estable en el rango evaluado (Tran et al. 2022). Resultados análogos reportaron Liu et al. (2024) en café sonificado a 20–40 kHz, donde el pH no mostró variación significativa respecto al control bajo ninguna combinación de tiempo y potencia evaluada.

La humedad osciló entre 11.3 % y 11.6 % en todos los tratamientos, incluido el control, con una variación menor a 0.3 unidades porcentuales. Este resultado era esperado dado que el proceso ultrasónico se realizó sin inmersión prolongada del grano en agua libre y la determinación posterior de humedad se ejecutó sobre granos previamente secados bajo condiciones estandarizadas, lo que homogeniza este parámetro independientemente del tratamiento previo. La baja variabilidad de ambas variables confirma que el ultrasonido, bajo las condiciones empleadas, no perturbó el equilibrio hídrico ni el balance ácido-base del grano, actuando selectivamente sobre la permeabilidad de la matriz celular (Bhargava et al. 2021; Liu et al. 2024).

Acidez titulable

La acidez titulable varió entre 2.03 % y 2.69 %, con los valores más altos registrados en los tratamientos de mayor tiempo y potencia (T2 y T4: 2.69 %) respecto al control (2.26 %). El mecanismo subyacente reside en la capacidad de la cavitación acústica para disrumpir la pared celular del grano despulpado, facilitando la liberación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular principalmente cítrico, málico, acético y láctico contenidos en las vacuolas del tejido del mucílago residual (Li et al. 2021; Tran et al. 2022). El fenómeno de microstreaming incrementa adicionalmente la transferencia de

masa desde el interior celular hacia el medio, acelerando la difusión de moléculas ácidas hacia la superficie del grano (Bhargava et al. 2021).

La ausencia de correlación directa entre acidez y pH es químicamente coherente: el incremento de ácidos débiles no se traduce en un descenso proporcional del pH cuando existe capacidad amortiguadora residual en la matriz (Tran et al. 2022). Este desacoplamiento entre la acidez titulable y el pH concuerda con lo demostrado por Tran et al. (2022), quienes observaron que la cavitación acústica optimiza la liberación y recuperación de compuestos fenólicos y ácidos de la matriz del café sin alterar el equilibrio ácido-base ni generar variaciones significativas en el pH.

Contenido de Polifenoles totales

El contenido de polifenoles totales (TPC) presentaron el mayor rango de variación del estudio: 29.66–52.99 mg GAE/100 g, con T7 (15 min, 266.65 W) registrando el valor máximo y superando al control (35.62 mg GAE/100g) en 12 de los 13 tratamientos. La liberación de compuestos fenólicos por ultrasonido responde a dos mecanismos concurrentes: la ruptura mecánica de las paredes celulares por microjets generados durante el colapso de burbujas de cavitación, y la disrupción de las interacciones no covalentes que mantienen los fenoles en formas ligadas a proteínas y polisacáridos de la pared celular (Bhargava et al. 2021; Jiménez et al. 2023).

El máximo de TPC en T7 (266.65 W, potencia mínima del dominio factorial) es coherente con el efecto bifásico documentado para el ultrasonido sobre compuestos fenólicos: a potencias moderadas predomina la extracción por cavitación estable, mientras que a potencias elevadas la cavitación transiente genera radicales hidroxilo (OH) que degradan los anillos fenólicos por oxidación, reduciendo el TPC neto (Tran et al. 2022; Yikmis et al. 2024). Este comportamiento explica los valores intermedios de TPC observados en T8 (15 min, 399 W; 48.06 mg GAE/100 g) respecto a T7, a pesar de operar en el extremo opuesto del eje de potencia. Resultados consistentes reportaron Tran et al. (2022), quienes identificaron 250 W como la potencia óptima para maximizar el TPC en pulpa de *Coffea canephora*, con reducción significativa del contenido fenólico a potencias superiores.

Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante (CA) varió entre 5967.06 $\mu\text{mol TE/g}$ (T3) y 13118.48 $\mu\text{mol TE/g}$ (T7), superando al control (4594.43 $\mu\text{mol TE/g}$) en todos los tratamientos. El

máximo en T7 coincide con el máximo de TPC, lo que refleja la correlación estructural entre el contenido fenólico y la capacidad de neutralizar el radical DPPH mediante transferencia de átomos de hidrógeno desde los grupos –OH de los polifenoles (Tran et al. 2022; Yikmis et al. 2024). La correlación positiva entre el contenido de polifenoles totales y la capacidad antioxidante ($r = +0.797$ con Dim1 en el ACP; Tabla 8) confirma este vínculo mecanístico a nivel multivariante.

T8 (15 min, 399 W) presentó CA de 12483.12 $\mu\text{mol TE/g}$ con TPC de 48.06 mg GAE/100g, lo que sugiere que, a mayor potencia, compuestos no fenólicos posiblemente ácido clorogénico libre y derivados de melanoidinas también contribuyeron a la actividad antioxidante total detectada por el método DPPH (Zamanipoor et al. 2020). El incremento general de la CA respecto al control en todos los tratamientos confirma que el ultrasonido activa la liberación de antioxidantes mediante ruptura mecánica de estructuras celulares, independientemente de la combinación tiempo-potencia empleada dentro del dominio experimental (Bhargava et al. 2021; Li et al. 2021).

PUNTAJE DE TAZA

La aplicación de ultrasonido durante la etapa pre-fermentativa mejoró la calidad sensorial del café variedad Catimor, obteniéndose puntajes entre 82.25 y 84.30 puntos SCA, superiores al tratamiento control (82.10 puntos), lo que confirma que todos los tratamientos se clasificaron como cafés de especialidad (>80 puntos SCA). El mayor puntaje alcanzado por el tratamiento T12 (84.30 puntos) sugiere que la combinación adecuada de tiempo y potencia favorece el desarrollo de atributos sensoriales sin generar efectos adversos sobre la calidad del grano.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Zamanipoor et al. (2020), quienes indicaron que el ultrasonido incrementa la extracción de compuestos volátiles, cafeína y otros metabolitos asociados con un mayor cuerpo e intensidad de sabor. Asimismo, Lee y Lee (2025) y Liu et al. (2024), señalaron que la cavitación acústica favorece la transferencia de masa y la liberación de compuestos bioactivos, promoviendo modificaciones estructurales que mejoran la disponibilidad de precursores aromáticos durante el procesamiento del café. En concordancia, (Febrianto y Zhu, 2023). sostienen que las tecnologías emergentes aplicadas durante la fermentación potencian la formación de compuestos volátiles y ácidos orgánicos responsables de notas frutales, florales y de una mayor complejidad sensorial, mientras que Agnoletti et al. (2022), demostraron que

la composición química generada durante la fermentación se relaciona estrechamente con puntajes superiores en la evaluación SCA.

Por otra parte, el incremento máximo de 2.20 puntos SCA respecto al control posee importancia práctica para la industria de cafés especiales, ya que diferencias de uno a dos puntos pueden representar una mayor valorización comercial y una mejor diferenciación del producto en mercados especializados, tal como señalan Agnoletti et al. (2022) y Silva et al. (2024). En consecuencia, los resultados evidencian que el ultrasonido pre-fermentativo constituye una alternativa tecnológica eficaz para incrementar el puntaje de taza del café Catimor, siempre que las condiciones de proceso sean adecuadamente optimizadas mediante la Metodología de Superficie de Respuesta.

Síntesis del perfil fisicoquímico

El pretratamiento ultrasónico pre-fermentativo modificó selectivamente el perfil fisicoquímico del café Catimor. TPC y CA respondieron de forma no lineal a la potencia, con máximos en el extremo inferior del dominio (266.65 W; T7). La acidez titulable mostró tendencia creciente con tiempo y potencia. pH y humedad se comportaron como variables de caracterización, insensibles al tratamiento en el rango evaluado. Ninguna de estas cinco variables alcanzó las condiciones mínimas de optimización mediante MSR. La interpretación integrada en relación con el análisis multivariante se desarrolla en la Sección 4.3.

4.2. Optimización del puntaje de taza del café variedad Catimor mediante Metodología de Superficie de Respuesta

Selección del modelo y capacidad de optimización

De las seis variables de respuesta evaluadas mediante la metodología de superficie de respuesta, el Puntaje de Taza fue la única estadísticamente optimizable (Tabla 4). Las cinco variables fisicoquímicas restantes presentaron modelos con R^2_{pred} negativos (acidez: -0.637 ; TPC: -0.308 ; pH: -1.573), Lack of Fit significativo (CA: $p = 0.009$) o insensibilidad total a los factores (humedad: $R^2 = 0.000$), condiciones que invalidan su uso para predicción y optimización según los criterios de Myers et al. (2016) y Anderson y Whitcomb (2017). Esta selectividad es coherente con el carácter compuesto del puntaje en taza, que integra simultáneamente la respuesta de múltiples compuestos bioactivos

ácidos clorogénicos, precursores de Maillard, compuestos volátiles cuya formación acumulada responde de forma más continua y predecible al pretratamiento ultrasónico que los compuestos individuales medidos de forma aislada (Febrianto y Zhu, 2023).

El modelo reducido ajustado para el Puntaje de Taza ($B + A^2 + B^2$) fue estadísticamente significativo ($F = 5.04$; $p = 0.025$), con Lack of Fit no significativo ($p = 0.734$) y Adeq. Precision = $6.40 > 4.0$, confirmando capacidad adecuada para navegar el espacio de diseño (Tabla 5). El $R^2_{\text{pred}} = 0.264$, aunque moderado, es estructuralmente coherente con el diseño CCD de $k = 2$ factores y $N = 13$ corridas, donde el leverage elevado de los puntos no-centrales ($h_{ii} = 0.625$) limita estructuralmente el estadístico PRESS independientemente de la calidad del ajuste local. Resultados análogos reportaron Jafarpour et al. (2022) en la optimización de parámetros fermentativos de café mediante RSM, donde modelos con R^2_{pred} entre 0.20 y 0.40 fueron considerados aceptables bajo diseños CCD con bajo número de corridas, condicionando su uso a la validación experimental en el punto óptimo.

Efecto de los factores sobre el Puntaje de Taza

Los términos significativos del modelo reducido fueron B-Potencia ($p = 0.018$) y B^2 ($p = 0.011$), mientras el Tiempo no resultó significativo en el rango evaluado (A : $p = 0.883$; A^2 : $p = 0.266$) (Tabla 5). El coeficiente positivo de B ($\beta_1 = +0.404$) indica que incrementos de potencia desde el límite inferior del dominio mejoran el puntaje sensorial, mientras el coeficiente negativo de B^2 ($\beta_{22} = -0.480$) confirma la existencia de un máximo real dentro del espacio experimental en la dimensión de potencia. El mecanismo subyacente reside en el efecto de la cavitación acústica sobre la permeabilidad celular del grano despulpado: a potencias moderadas (337–375 W), la cavitación estable incrementa la disponibilidad de sustratos fermentativos azúcares, aminoácidos y precursores fenólicos del mucílago que favorecen la síntesis de ésteres y aldehídos durante la fermentación aeróbica y la posterior formación de furanos y pirazinas en el tueste, compuestos directamente asociados a los atributos de dulzor, aroma y balance en la evaluación SCA (Febrianto y Zhu, 2023; Vega et al. 2025). A potencias superiores a 375 W, la cavitación transiente genera radicales hidroxilo que degradan estos precursores antes de la fermentación, explicando el descenso del puntaje sensorial observado en el extremo superior del dominio (Bhargava et al. 2021).

La independencia estadística del Tiempo en el rango evaluado (10–20 min) es consistente con estudios de ultrasonido en matrices sólidas con actividad de agua reducida, donde la saturación de los efectos de cavitación sobre la permeabilidad celular ocurre dentro de los primeros 10–12 min de exposición, haciendo que exposiciones adicionales no generen cambios cuantificables en la calidad sensorial (Liu et al. 2024; Yuniati et al. 2025).

Superficie de respuesta y geometría del espacio óptimo

La superficie de respuesta tridimensional (Figura 4) y el mapa de contorno (Figura 5) muestran una geometría de máximo pronunciado y asimétrico sobre el eje B, con una región de respuesta alta ($P.Taza \geq 83.6$ puntos) concentrada en la banda $B = 0.1–0.9$ unidades codificadas (337–375 W) a lo largo de todo el rango de Tiempo evaluado. Esta geometría confirma que el control operacional de la Potencia es el parámetro crítico del proceso: desviaciones de ± 50 W desde el óptimo pueden reducir el puntaje predicho entre 0.3 y 0.8 puntos SCA, diferencia perceptible en evaluaciones de panel certificado. El mapa de contorno de deseabilidad (Figura 8) mostró la región óptima como una elipse centrada en $A \approx 0.06$ y $B \approx 0.42$ (unidades codificadas), con $D \geq 0.60$ en el intervalo de Potencia 337–375 W, lo que define una ventana operacional práctica y alcanzable con equipos ultrasónicos de laboratorio y planta piloto.

Condiciones óptimas y deseabilidad

La optimización numérica identificó como condiciones óptimas un Tiempo de sonicación de 15.2 min y una Potencia de 352.5 W (53.0% de 665 W), con un Puntaje de Taza predicho de 83.63 puntos SCA y deseabilidad global $D = 0.671$ (Tabla 6; Figura 6). La proximidad de estas condiciones al punto central del DCCR (15 min; 332.5 W) indica que la región experimental fue bien centrada durante el diseño, y que las condiciones centrales del estudio ya representan un proceso cercano al óptimo sensorial para la variedad Catimor bajo fermentación aeróbica de 48 horas. La deseabilidad $D = 0.671$ es consistente con la capacidad predictiva moderada del modelo ($R^2_{pred} = 0.264$), resultado esperado dado que el puntaje en taza integra compuestos cuya formación depende también de etapas posteriores al pretratamiento fermentación, secado y tueste no controladas en el modelo RSM (Febrianto y Zhu, 2023).

La gráfica de perturbación en el punto óptimo (Figura 7) confirmó que la Potencia (B) es el factor dominante: desviaciones hacia valores bajos de potencia ($B < -0.5$ codificado; < 309 W) generan caídas abruptas en la respuesta, mientras la curva de Tiempo (A) se

mantiene comparativamente plana en todo el dominio, reafirmando la menor sensibilidad del proceso a este factor. Este comportamiento es congruente con lo reportado por Yuniati et al. (2025) en la optimización por ultrasonido de compuestos bioactivos en café, donde la potencia determinó la eficiencia del proceso mientras el tiempo actuó como variable de ajuste secundaria.

Aunque existen pocos estudios de optimización DCCR para el uso de ultrasonido pre-fermentativo, el aumento de 1.53 puntos SCA obtenido en este estudio (de 82.10 a 83.63 a 352.5 W) demuestra el impacto positivo de la cavitación acústica en la calidad en taza. Zamanipoor et al. (2020) respaldan este efecto, evidenciando que el ultrasonido mejora la extracción de volátiles y aceites, lo que se traduce en un cuerpo más fuerte y un sabor superior. Adicionalmente, Lee y Lee (2025) comprobaron que este tratamiento modifica las estructuras del grano, facilitando la liberación de compuestos clave que elevan las propiedades sensoriales globales. La ganancia de 1.53 puntos resulta competitiva frente a otras optimizaciones postcosecha; por ejemplo, la fermentación con temperatura controlada evaluada por Costa et al. (2025) reportó incrementos comparables de entre 1.37 y 2.32 puntos SCA. Por lo tanto, la sonicación pre-fermentativa optimizada se consolida como un método efectivo para potenciar precursores de sabor y asegurar la clasificación de café de especialidad.

4.3. Comparación multivariante del perfil fisicoquímico y sensorial del café variedad Catimor bajo pretratamiento ultrasónico y fermentación tradicional mediante Análisis de Componentes Principales

Estructura del espacio multivariante: Dim1 como eje de actividad bioactiva

El análisis de componentes principales sobre las seis variables de respuesta de los 13 tratamientos del DCCR más el control explicó el 68.1% de la varianza total (Dim1 = 38.0%; Dim2 = 30.1%) (Figura 10; Tablas 7 y 8). Dim1 constituye el eje de diferenciación por compuestos bioactivos: TPC presentó la correlación más fuerte con este eje ($r = +0.958$), seguido de la Capacidad Antioxidante ($r = +0.797$). La covariación entre ambas variables refleja la relación estructural entre el contenido fenólico total y la capacidad de neutralizar el radical DPPH mediante transferencia de hidrógeno desde los grupos $-OH$ de los polifenoles (Tran et al. 2022; Yikmis et al. 2024).

T7 (15 min, 266.65 W) se proyectó al extremo positivo de Dim1 (score = +4.272), resultado coherente con su máximo de TPC (52.99 mg GAE/100g) y CA (13118.48 μ mol

TE/g) del conjunto experimental. A esta potencia, la cavitación estable genera microjets que permeabilizan selectivamente la pared celular del grano despulpado sin inducir degradación oxidativa de los polifenoles liberados (Bhargava et al., 2021; Liu et al., 2024). T8 (15 min, 399 W; score = +1.870) ocupó la segunda posición en Dim1, con valores inferiores de TPC (48.06 mg GAE/100g) y CA (12483.12 μ mol TE/g): la mayor potencia activa cavitación transiente que genera radicales hidroxilo degradantes de los grupos fenólicos expuestos, explicando la gradación entre ambos tratamientos (Jiménez et al. 2023; Zamanipoor et al. 2020).

Dim2 como eje de diferenciación ácido-sensorial

Dim2 (30.1% de varianza) diferenció los tratamientos según su perfil físico-ácido y sensorial. Las variables con mayor correlación en este eje fueron Acidez ($r = +0.725$), pH ($r = +0.690$) y Humedad ($r = +0.685$) en el sector positivo, y Puntaje de Taza ($r = -0.493$) en el sector negativo (Tabla 8). Los tratamientos factoriales T2 y T4 (+1, -1 y +1, +1) registraron los valores más altos de Dim2 (+2.057 y +2.049, respectivamente), coincidiendo con su mayor acidez titulable (2.69% ambos). Esta asociación es coherente con el mecanismo de liberación de ácidos orgánicos inducida por la mayor exposición acumulada tiempo-potencia en los puntos factoriales superiores (Li et al. 2021; Tran et al. 2022).

La correlación negativa del Puntaje de Taza con Dim2 ($r = -0.493$) indica que los tratamientos con mayor acidez libre y mayor pH relativo tendieron a puntajes sensoriales menores, mientras los de mayor puntaje SCA se concentraron en el sector de Dim2 negativo. Los puntos centrales T9–T13 (15 min, 332.5 W) y T3 (11.5 min, 379.05 W) se ubicaron en esta región, con puntajes entre 83.15 y 84.30 puntos. Este patrón es consistente con lo reportado por Costa et al. (2025); Febrianto y Zhu, (2023): condiciones de pretratamiento que moderan la acidez libre y estabilizan el pH favorecen la acumulación de precursores de sabor durante la fermentación aeróbica, generando puntajes SCA superiores tras el tueste.

Posición del control y ventaja diferencial del ultrasonido

El control se ubicó en Dim1 = -0.127 y Dim2 = -0.859, con baja calidad de representación en el plano bidimensional ($\cos^2$ total = 0.125), indicando que su variabilidad se distribuye en componentes de mayor orden y que no se asocia de forma marcada con ninguna de las seis variables evaluadas en las dos dimensiones principales.

Su CA (4594.43 $\mu\text{mol TE/g}$) fue la única variable con separación cuantitativa clara respecto al rango de todos los tratamientos con ultrasonido (mínimo: 5967.06 $\mu\text{mol TE/g}$ en T3; diferencia: +1372.63 $\mu\text{mol TE/g}$). Este resultado confirma que el pretratamiento ultrasónico incrementó consistentemente la actividad antioxidante del café despulpado, independientemente de la combinación tiempo-potencia empleada dentro del dominio experimental (Bhargava et al. 2021; Li et al. 2021).

El puntaje sensorial del control (82.10 puntos SCA) supera el umbral de 80 puntos que define la categoría de café especial, resultado favorable para el contexto de la caficultura del distrito La Coipa. Sin embargo, la brecha de 2.20 puntos entre el control y T12 (84.30 puntos) representa un diferencial significativo en el mercado de cafés especiales, donde incrementos de 1–2 puntos SCA determinan categorías de precio diferenciadas (Agnoletti et al. 2022; Silva et al. 2024). Todos los tratamientos con ultrasonido superaron al control en puntaje sensorial, con la menor diferencia registrada en T1 y T2 (82.25 puntos; +0.15 puntos sobre el control).

Elipses de confianza al 95% y separación entre grupos del diseño

Las elipses de confianza al 95% incorporadas en el biplot (Figura 8) permiten evaluar la separación estadística entre los grupos de puntos del DCCR en el espacio multivariante. La elipse correspondiente a los puntos centrales (T9–T13; naranja) es la más compacta del biplot, con el menor volumen en el plano bidimensional, lo que confirma la alta reproducibilidad experimental bajo las condiciones del punto central (15 min, 332.5 W): los cinco tratamientos idénticos produjeron perfiles fisicoquímico-sensoriales estadísticamente homogéneos. Este resultado valida la calidad del proceso experimental y la estabilidad del sistema ultrasónico bajo condiciones repetidas, criterio fundamental para la confiabilidad del modelo RSM (Myers et al., 2016).

La elipse de los puntos factoriales (T1–T4; azul) se extiende predominantemente hacia Dim2 positivo, reflejando la mayor dispersión en el eje físico-ácido de este grupo. Esta dispersión es coherente con la naturaleza de los puntos factoriales en el DCCR: al explorar simultáneamente los niveles extremos de ambos factores (± 1 codificado), generan combinaciones que producen perfiles de acidez y pH más heterogéneos entre sí que los puntos centrales. La elipse de los puntos axiales (T5–T8; verde) es la más extensa del biplot, abarcando desde la región de máxima actividad bioactiva (T7; Dim1 extremo positivo) hasta la región de mayor puntaje sensorial (T6; Dim2 negativo), lo que refleja

que los puntos axiales, al explorar los extremos individuales de cada factor, generan los perfiles más contrastantes del diseño (Anderson y Whitcomb, 2017).

El solapamiento parcial entre las tres elipses indica que los grupos del DCCR no son completamente distintos en el espacio multivariante, resultado estadísticamente esperado: los puntos del DCCR comparten al menos un factor en su nivel central, lo que genera correlaciones naturales entre grupos. Sin embargo, el dato más relevante para los objetivos del estudio es que el control se ubica fuera de las tres elipses de confianza, específicamente en la región de baja CA y bajo puntaje sensorial, sin intersección con ninguno de los grupos de tratamientos con ultrasonido. Esta separación visual confirma con evidencia multivariante que la fermentación aeróbica tradicional sin pretratamiento produce un perfil fisicoquímico-sensorial estadísticamente diferenciado e inferior en los indicadores de calidad evaluados respecto a cualquier combinación de Tiempo y Potencia ultrasónica dentro del dominio experimental estudiado (Agnoletti et al. 2022; Silva et al. 2024).

La forma y orientación de las elipses también es informativamente complementaria al análisis de coherencia RSM-PCA desarrollado en la subsección anterior: el centroide de la elipse de puntos centrales (el grupo más cercano al óptimo RSM) se proyecta en la región de Dim2 negativo zona de alta calidad sensorial con una posición estimada de $\text{Dim2} \approx -0.99$, coherente con el score estimado del óptimo RSM ($\text{Dim2} \approx -0.89$). Esta convergencia entre el centroide del grupo más reproducible del diseño y el punto óptimo predicho por el modelo constituye la evidencia más sólida de la validez interna del análisis, al ser confirmada simultáneamente por tres metodologías independientes: el modelo RSM, el biplot del ACP y las elipses de confianza multivariante.

Coherencia entre la optimización RSM y el biplot del ACP

El punto óptimo RSM (Tiempo = 0.059; Potencia = 0.421, unidades codificadas; P.Taza predicho = 83.63 puntos SCA) converge espacialmente con la región de alta calidad sensorial del biplot. Los puntos centrales T9–T13, vecinos más próximos al óptimo en el espacio experimental (distancia euclidiana = 0.425 unidades codificadas; Tabla 9), registraron una media de Puntaje de Taza de 83.54 ± 0.38 puntos, prácticamente idéntica al valor predicho por el modelo (diferencia = 0.09 puntos; 0.1%). Esta concordancia confirma que el modelo polinomial de segundo orden captura la estructura de respuesta en la vecindad del óptimo con precisión adecuada, a pesar de su R^2 pred moderado

(0.264), en línea con el criterio de Jafarpour et al. (2022) que señala la concordancia en la región de vecindad como indicador más robusto de capacidad predictiva local que el R^2_{pred} global en modelos con N reducido.

El contraste con T7 refuerza la coherencia entre ambos análisis. T7 domina Dim1 con los mayores TPC y CA del estudio, pero registra el menor puntaje sensorial de los tratamientos con ultrasonido (82.27 puntos) y la mayor distancia al óptimo RSM (1.836 unidades codificadas; Tabla 9). Este resultado establece con evidencia cuantitativa que la maximización de compuestos bioactivos y la maximización del puntaje sensorial responden a condiciones de proceso distintas dentro del dominio experimental evaluado. La optimización independiente del Puntaje de Taza como variable objetivo, en lugar de TPC o CA, es la decisión metodológicamente correcta para el objetivo de mejorar la calidad comercial del café Catimor, en línea con el enfoque propuesto por Vega et al. (2025) para la predicción multivariante de calidad en cafés especiales.

Síntesis comparativa

El pretratamiento ultrasónico pre-fermentativo mejoró el perfil fisicoquímico y sensorial del café Catimor de forma consistente y diferenciada respecto a la fermentación aeróbica tradicional. Dim1 diferenció los tratamientos según su actividad bioactiva, liderada por T7 (266.65 W; TPC y CA máximos). Dim2 los diferenció según su perfil ácido-sensorial, con los tratamientos de mayor potencia acumulada en el sector positivo y los de mayor puntaje SCA en el sector negativo. El óptimo RSM converge con la región de alta calidad sensorial del biplot, y el control se separa de todos los tratamientos con ultrasonido principalmente en CA. La tecnología ultrasónica pre-fermentativa constituye una estrategia diferenciada, escalable y cuantitativamente superior a la fermentación aeróbica tradicional para la variedad Catimor en el contexto de la caficultura del distrito La Coipa.

4.4. Limitaciones del estudio

Diseño experimental. El CCD rotatable con $k = 2$ y $N = 13$ genera un leverage estructuralmente alto en los puntos no-centrales ($h^{ii} = 0.625$), lo que reduce el R^2_{pred} independientemente de la calidad del ajuste local. El $R^2_{\text{pred}} = 0.264$ para el Puntaje de Taza es inherente al diseño con N reducido, no un defecto del modelo (Myers et al., 2016). La validación experimental en el punto óptimo con ≥ 5 réplicas es el paso necesario para confirmar la capacidad predictiva local.

Variabilidad de la matriz biológica. El café despulpado presenta variabilidad natural en el contenido fenólico inicial entre lotes, reflejada en el $CV = 11.8\%$ de TPC entre los puntos centrales (T9–T13) bajo condiciones idénticas de proceso. La caracterización del TPC inicial como covariable en estudios futuros reduciría esta fuente de error experimental.

Cobertura del dominio experimental. El máximo de TPC se ubicó en el extremo inferior del dominio (T7; 266.65 W), indicando que el óptimo real de TPC se encuentra fuera del espacio estudiado. El Lack of Fit significativo en CA ($p = 0.009$) y el R^2_{pred} negativo en TPC (-0.308) son consistentes con efectos de umbral en la cavitación acústica, transición de cavitación estable a inercial, que los modelos polinomiales continuos no capturan (Bhargava et al. 2021; Liu et al. 2024).

Variabilidad biológica de la fermentación. La fermentación aeróbica se realizó sin control del microbiota inicial ni de la temperatura ambiente. Zhang et al. (2019) documentaron que el microbiota ambiental en fermentaciones artesanales de café Catimor introduce variabilidad significativa en el perfil de ácidos orgánicos y el puntaje en taza entre lotes bajo condiciones aparentemente idénticas, contribuyendo a la varianza residual del modelo RSM.

Ausencia de caracterización cromatográfica. El puntaje en taza integra la percepción de múltiples compuestos sin identificar cuáles son responsables de la mejora sensorial inducida por el ultrasonido. La ausencia de análisis HPLC de ácidos orgánicos individuales y GC-MS de compuestos volátiles limita la comprensión mecanística del efecto del pretratamiento (Febrianto y Zhu, 2023; Huang et al. 2025).

Escala de trabajo. Los parámetros óptimos se determinaron a escala de laboratorio (unidades de 2.5 kg). La transferencia a escala productiva requiere evaluar la uniformidad del campo acústico en equipos de mayor capacidad, donde la distribución de intensidad ultrasónica es heterogénea (Bhargava et al. 2021).

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La aplicación de ultrasonido a 40 kHz a diferentes tiempos de sonicación y potencias ultrasónicas en la etapa pre-fermentativa modificó selectivamente el perfil fisicoquímico y sensorial del café despulpado variedad Catimor: La acidez titulable presentó una variación entre 2.03 y 2.69 %, evidenciando la formación de ácidos orgánicos durante la fermentación del café, incrementó la capacidad antioxidante, mientras el pH y la humedad permanecieron estables. Los polifenoles totales presentaron variación, favoreciendo en determinados tratamientos una mayor retención o liberación de compuestos fenólicos bioactivos, y la capacidad antioxidante incrementaron sus valores en todos los tratamientos. El puntaje de taza varió entre 82.25 y 84.30 puntos SCA en el dominio experimental, superando en todos los tratamientos al control de 82.10 puntos.

De las seis variables de respuesta evaluadas mediante Metodología de Superficie de Respuesta, el Puntaje de Taza fue la única estadísticamente optimizable ($p = 0.025$; $R^2 = 0.716$). Las condiciones óptimas identificadas fueron 15.2 min y 352.5 W (53.0% de 665 W), con un puntaje predicho de 83.63 puntos SCA y deseabilidad $D = 0.671$, siendo la Potencia el factor dominante del proceso. Las cinco variables fisicoquímicas restantes se reportan como variables de caracterización del producto. El puntaje predicho es coherente con la media observada de los tratamientos vecinos en el dominio experimental (83.54 ± 0.38 puntos), confirmando la validez empírica del modelo.

El Análisis de Componentes Principales, aplicado sobre los 13 tratamientos del DCCR y el control, confirmó la superioridad del pretratamiento ultrasónico frente a la fermentación aeróbica tradicional: el control se ubicó fuera de las elipses de confianza al 95% de todos los grupos con ultrasonido, con una ventaja diferencial de hasta 2.20 puntos SCA, posicionando al café tratado con ultrasonido en una categoría de mayor valor comercial.

5.2. Recomendaciones

Validar experimentalmente las condiciones óptimas identificadas (15.2 min, 352.5 W) con un mínimo de cinco réplicas independientes, calculando el error relativo de predicción respecto al valor predicho (83.63 puntos SCA); un error inferior al 5% confirmará la aplicabilidad del modelo en condiciones de campo.

Ampliar el rango de potencia hacia valores inferiores (20–50% de 665 W) e incorporar la frecuencia ultrasónica (20–40 kHz) como tercer factor en un diseño Box-Behnken, con el fin de capturar el óptimo real de polifenoles totales y capacidad antioxidante fuera del dominio experimental actual.

Realizar análisis cromatográfico de ácidos orgánicos individuales (HPLC) y compuestos volátiles (GC-MS) bajo las condiciones óptimas identificadas, para establecer los biomarcadores específicos responsables de la mejora sensorial inducida por el pretratamiento ultrasónico.

Replicar el estudio con fermentación anaeróbica controlada (24–72 horas) para evaluar si la combinación con el pretratamiento ultrasónico amplifica el efecto sobre el puntaje SCA respecto a la fermentación aeróbica.

Realizar un análisis costo-beneficio de la implementación del ultrasonido a 40 kHz en asociaciones cafetaleras del distrito La Coipa, considerando el diferencial de precio entre cafés con puntaje ≥ 83 y ≥ 82 puntos SCA para evaluar la viabilidad financiera a escala productiva.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agnoletti, B., dos Santos Gomes, W., Falquetto de Oliveira, G., Henrique da Cunha, P., Helena Cassago Nascimento, M., Cunha Neto, Á., Louzada Pereira, L., Vinicius Ribeiro de Castro, E., Catarina da Silva Oliveira, E., y Roberto Filgueiras, P. (2022). Effect of fermentation on the quality of conilon coffee (*Coffea canephora*): Chemical and sensory aspects. *Microchemical Journal*, 182, 107966. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107966>
- Anderson, M. J., y Whitcomb, P. J. (2017). *RSM simplified: Optimizing processes using response surface methods for design of experiments* (Second edition). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781315150117>
- AOAC (Ed.). (2023). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL* (22a ed.). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/9780197610145.001.0001>
- Asociación de cafes especiales. (2026). *The SCA Officially Adopts CVA Descriptive and Affective Assessments as New Cupping Standards*. Specialty Coffee Association. <https://sca.coffee/sca-news/sca-new-cva-cupping-standards>
- Bhargava, N., Mor, R. S., Kumar, K., y Sharanagat, V. S. (2021). Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105293. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105293>
- Centeno, J. C. M., y Martínez, E. (2023). Caracterización de sistemas productivos de café (*Coffea arabica* L.) en la Reserva Natural Tepec-Xomolth, Madriz, Nicaragua. *Siembra*, 10(1). <https://www.redalyc.org/journal/6538/653873378014/html/>
- Costa, G. X. R., Bertarini, P. L. L., Silva, L. C. F., Amaral, L. R. do, Gomes, M. de S., de Oliveira, L. M., y Santos, L. D. (2025). The impact of ambient temperature regulation on arabica coffee fermentation. *Applied Food Research*, 5(1), 101028. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101028>

- Febrianto, N. A., y Zhu, F. (2023). Coffee bean processing: Emerging methods and their effects on chemical, biological and sensory properties. *Food Chemistry*, 412, 135489. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135489>
- Gonzalez, A., Lopez, A., Gaytan, O. R., y Ramos, V. (2019). Cup quality attributes of Catimors as affected by size and shape of coffee bean (*Coffea arabica* L.). *International Journal of Food Properties*, 22(1), 758–767. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1603997>
- Huang, G., Liu, S., Chen, G.-L., Zhao, Y., Huang, Q., Cen, Q., y Ren, E.-F. (2025). Effects of Harvesting Periods and Cultivar on the Physicochemical and Sensory Properties of Two Coffee Bean Varieties. *Foods*, 14(17), 3135. <https://doi.org/10.3390/foods14173135>
- Jafarpour, D., Hashemi, S. M. B., Abedi, E., Mousavifard, M., y Sayadi, M. (2022). Comparison between response surface methodology and genetic algorithm analysis to optimize lactic acid production by *Lactobacillus rhamnosus* and *Lactobacillus acidophilus* under ultrasonic pretreatment. *Fems Microbiology Letters*, 368(21–24), fnac005. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnac005>
- Jiménez, J. A., Valenzuela, L. S., Villarreal, A., Roldan, C., Martín, M. A., Siles, J. A., y Chica, A. F. (2023). Advanced extraction of caffeine and polyphenols from coffee pulp: Comparison of conventional and ultrasound-assisted methods. *LWT*, 177, 114571. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114571>
- Lee, Y., y Lee, K.-G. (2025). Effects of ultrasound treatment on physicochemical, sensory, and structural properties of cold brew coffee. *Ultrasonics Sonochemistry*, 119, 107401. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107401>
- Li, W., Ma, H., He, R., Ren, X., y Zhou, C. (2021). Prospects and application of ultrasound and magnetic fields in the fermentation of rare edible fungi.

<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105613>

Liu, H., Liu, D., Wang, W., Zhang, X., Tuly, J., Li, H., y Ma, H. (2024). Dual-frequency countercurrent ultrasonic-assisted extraction of the cold brew coffee and *in situ* real-time monitoring of extraction process. *Ultrasonics Sonochemistry*, 111, 107118. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107118>

Martínez, A. E., Duque, J. F., y Uribe, J. R. (2023). Characterization of Fermentations with Controlled Temperature with Three Varieties of Coffee (*Coffea arabica* L.). *Fermentation*, 9(11), 976. <https://doi.org/10.3390/fermentation9110976>

Myers, R. H., Montgomery, D. C., y Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments* (Fourth edition). Wiley.

Pereira, G., Arruda, H., y Pastore, G. (2017). Modification and validation of Folin-Ciocalteu assay for faster and safer analysis of total phenolic content in food samples. *Brazilian Journal of Food Research*, 9, 125. <https://doi.org/10.3895/rebrapa.v9n1.6062>

Rocha, R. A. R., Cruz, M. A. D. da, Silva, L. C. F., Costa, G. X. R., Amaral, L. R., Bertarini, P. L. L., Gomes, M. S., y Santos, L. D. (2024). Evaluation of Arabica Coffee Fermentation Using Machine Learning. *Foods*, 13(3), 454. <https://doi.org/10.3390/foods13030454>

Silva, L. C. F., Pereira, P. V. R., Cruz, M. A. D. da, Costa, G. X. R., Rocha, R. A. R., Bertarini, P. L. L., Amaral, L. R. do, Gomes, M. S., y Santos, L. D. (2024). Enhancing Sensory Quality of Coffee: The Impact of Fermentation Techniques on *Coffea arabica* cv. Catiguá MG2. *Foods*, 13(5), 653. <https://doi.org/10.3390/foods13050653>

- Tieghi, H., Pereira, L. de A., Viana, G. S., Katchborian-Neto, A., Santana, D. B., Mincato, R. L., Dias, D. F., Chagas-Paula, D. A., Soares, M. G., de Araújo, W. G., y Bueno, P. C. P. (2024). Effects of geographical origin and post-harvesting processing on the bioactive compounds and sensory quality of Brazilian specialty coffee beans. *Food Research International*, 186, 114346. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114346>
- Tran, T. M. K., Akanbi, T. O., Kirkman, T., Nguyen, M. H., y Vuong, Q. V. (2022). Recovery of Phenolic Compounds and Antioxidants from Coffee Pulp (*Coffea canephora*) Waste Using Ultrasound and Microwave-Assisted Extraction. *Processes*, 10(5), 1011. <https://doi.org/10.3390/pr10051011>
- Vega, A., Reyes, S. M., y Troestch, J. (2025). Physicochemical Parameters and Multivariate Analysis to Predict the Sensory Quality in Specialty Coffee from Panama. *Acs Omega*, 10(13), 13251–13259. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10914>
- Yikmis, S., Bozgeyik, E., Demirok, N. T., Ilaslan, K., y Aadil, R. M. (2024). Bioactive, Pro-Apoptotic-Angiotensin Converting Enzyme Inhibitor Effects and Properties of Ultrasound-Treated Traditional Poppy Vinegar Using the Response Surface Methodology Model. *Acs Omega*, 9(32), 34848–34858. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c04342>
- Yuniati, Y., Jimmy, J., Pramono, Y. B., y Mahfud, M. (2025). Ultrasound-assisted green technology for decaffeination of Gayo Arabica coffee: Process parameter optimization and kinetic modelling. *Ultrasonics Sonochemistry*, 122, 107627. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107627>
- Zamanipoor, M. H., Yakufu, B., Tse, E., Rezaeimotlagh, A., Hook, J. M., Bucknall, M. P., Thomas, D. S., y Trujillo, F. J. (2020). Brewing coffee? – Ultra-sonication has

clear beneficial effects on the extraction of key volatile aroma components and triglycerides. *Ultrasonics Sonochemistry*, *60*, 104796.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104796>

Zhang, S. J., De Bruyn, F., Pothakos, V., Contreras, G. F., Cai, Z., Moccand, C., Weckx, S., y De Vuyst, L. (2019). Influence of Various Processing Parameters on the Microbial Community Dynamics, Metabolomic Profiles, and Cup Quality During Wet Coffee Processing. *Frontiers in Microbiology*, *10*, 2621.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02621>

DEDICATORIA

A Dios, por brindarme fortaleza, conocimiento, sabiduría y sobre todo salud para culminar esta etapa tan importante tanto profesional como personal.

Con profundo amor, respeto y gratitud, dedico este trabajo a mis padres, Pedro Pablo Vilchez Chanta y Felicia Farfán Huamán, quienes han sido el pilar fundamental de mi vida y la razón de cada uno de mis logros. Gracias por su esfuerzo incansable, por los sacrificios silenciosos y por enseñarme, con su ejemplo, el valor del trabajo, la responsabilidad y la perseverancia. Su amor incondicional y su confianza en mí han sido la fuerza que me ha impulsado a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Este logro es, sin duda, reflejo de todo lo que ustedes han sembrado en mí.

A mis queridos hermanos, Stefano y Euler Vilchez Farfan, por su compañía, apoyo constante y por brindarme ánimo en cada etapa de este camino. Gracias por estar siempre presentes, por las palabras de aliento, por los momentos compartidos y por recordarme, incluso en medio de las dificultades, la importancia de seguir adelante con una sonrisa.

A ustedes, mi familia, amigos que estuvieron presentes, les debo no solo este logro, sino también la persona en la que me he convertido. Este trabajo es el resultado del amor, la unión y los valores que me han inculcado. Con todo mi corazón.

Edilter Vilchez Farfan

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a la Universidad Nacional de Jaén, mi alma mater, por haberme acogido en sus aulas y brindado los conocimientos, herramientas y oportunidades necesarias para mi desarrollo académico. Me llevo no solo aprendizajes, sino también experiencias que han marcado mi vida durante estos 5 años.

A mis asesores de tesis Dr. Ralph Stein Rivera Botonares y Mg. Hans Himbler Minchán Velayarce, por su valiosa orientación, paciencia y dedicación durante el desarrollo de este trabajo. Sus conocimientos, sugerencias y acompañamiento han sido fundamentales para la culminación exitosa de esta investigación.

Mi más sentido agradecimiento a la Universidad Nacional del Santa por abrir las puertas de su casa de estudio y permitirme realizar el proceso de ejecución del proyecto de tesis en sus instalaciones de laboratorio con la finalidad de mejorar y obtener resultados exitosos.

Agradezco profundamente a la empresa Selva Norte por facilitar el acceso a las instalaciones de su laboratorio, lo cual hizo posible llevar a cabo el proceso de catación de las muestras de café en condiciones adecuadas y profesionales. Su apoyo ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo.

A todas aquellas personas que, de alguna manera, contribuyeron en este proceso, brindándome su apoyo, confianza y motivación constante. Este logro no es solo mío, sino también de todos quienes formaron parte de este camino.

ANEXOS

ANEXO 1: RECOLECCIÓN, LAVADO, ACONDICIONAMIENTO Y ENVASADO INICIAL DE LAS MUESTRAS DE CAFÉ CATIMOR DESPULPADO

Anexo 1.

Recolección de café previo al proceso fermentativo



A



B

Nota: A: Recolección manual de cerezas de café Catimor en estado de madurez fisiológica óptima (color rojo intenso). B: Selección visual en campo para garantizar uniformidad de materia prima. Ambas actividades corresponden a la etapa de recolección previa al proceso experimental.

Anexo 2.

Proceso de lavado y envasado de muestras de café



A



B



C

Nota: A: Lavado de café despulpado en agua corriente para eliminación de impurezas superficiales. B: Envasado individual de las unidades experimentales en bolsas herméticas debidamente etiquetadas por tratamiento. C: Almacenamiento ordenado de las muestras envasadas previo al pretratamiento ultrasónico y proceso fermentativo.

Anexo 3.

Medición de temperatura de las muestras de café



Nota: A: Medición de temperatura de las muestras durante el proceso, utilizada para controlar condiciones térmicas que influyen en la actividad microbiológica y fermentativa.

ANEXO 4: PESADO Y REGISTRO DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES DE CAFÉ DESPULPADO PARA LOS TRATAMIENTOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL DCCR

Anexo 4.

Pesado de las muestras de café Catimor



A



B

Nota: A: Pesado del lote total de café Catimor despulpado en balanza de precisión para determinación de la masa inicial disponible. B: Pesado y registro individual de cada unidad experimental (2.5 kg) para garantizar la uniformidad de masa entre tratamientos del DCCR.

ANEXO 5: DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LAS MUESTRAS DE CAFÉ CATIMOR

Anexo 5.

Medición de Humedad para los granos de café en la etapa fermentativa



Nota: Determinación del contenido de humedad de los granos de café en etapa fermentativa mediante método de estufa, asegurando parámetros adecuados de secado.

ANEXO 6: PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y MEDICIÓN DEL PH DEL CAFÉ

Anexo 6.

Medición de pH para los granos de café durante la etapa fermentativa



Nota: Medición del pH de las muestras de café durante la fermentación, indicador clave del comportamiento ácido-base del proceso.

ANEXO 7: DETERMINACIÓN DE LA ACIDEZ TITULABLE DEL CAFÉ CATIMOR MEDIANTE TITULACIÓN CON HIDRÓXIDO DE SODIO

Anexo 7.

Medición de acidez para los granos de café en la etapa fermentativa



Nota: Determinación de la acidez titulable mediante titulación con NaOH, evaluando la concentración de ácidos orgánicos presentes.

ANEXO 8: PREPARACIÓN, CONFIGURACIÓN Y APLICACIÓN DEL BAÑO ULTRASÓNICO EN EL PRETRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS DE CAFÉ

Anexo 8.

Procedimiento de preparación y uso del baño ultrasónico durante el análisis de muestras en laboratorio.

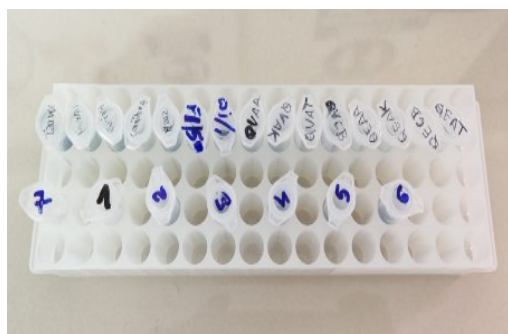


Nota: Procedimiento de uso del baño ultrasónico aplicado a las muestras, evidenciando la configuración de tiempo y potencia durante el tratamiento pre-fermentativo.

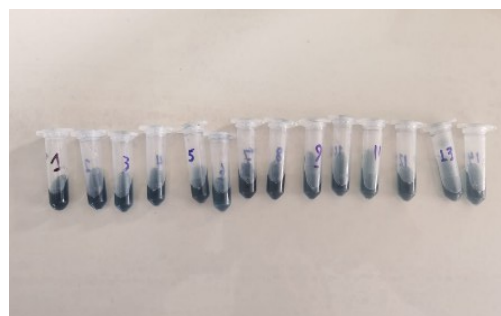
ANEXO 9: PROCEDIMIENTO DE EXTRACCIÓN, REACCIÓN COLORIMÉTRICA Y LECTURA ESPECTROFOTOMÉTRICA PARA LA DETERMINACIÓN DE POLIFENOLES TOTALES

Anexo 9.

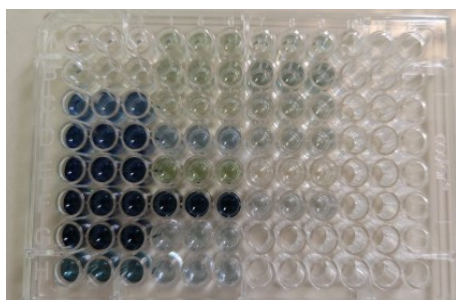
Procedimiento de preparación, análisis y lectura de muestras para la determinación de polifenoles totales



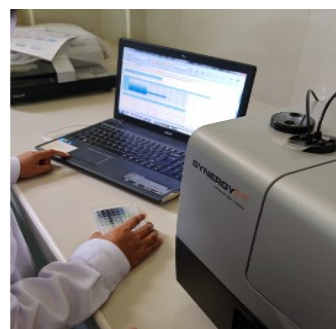
A



B



C



D

Nota: A: Identificación y ordenamiento de los tubos de ensayo con extractos de café por tratamiento, previo a la reacción colorimétrica. B: Extractos de café tras la adición del reactivo Folin-Ciocalteu, mostrando la coloración azul característica de la reacción con polifenoles. C: Placa de 96 pocillos con las muestras y estándares de ácido gálico distribuidos para lectura de absorbancia. D: Lectura de absorbancia a 765 nm en lector de microplacas Synergy HT (BioTek), para cuantificación de polifenoles totales expresados en mg GAE/100 g.

ANEXO 10: CERTIFICADOS DE ACREDITACIÓN DE LOS CATADORES Q ARÁBICA PARTICIPANTES EN LA EVALUACIÓN SENSORIAL DEL CAFÉ

Anexo 10.

Certificados oficiales de los catadores acreditados como Catador Q Arábica



Nota: Documentación de certificación de catadores Q Arábica que participaron en la evaluación sensorial, garantizando validez técnica.

Anexo 11.

Evaluación Sensorial de Café en el laboratorio de Control de Calidad Cooperativa Cafetalera Selva Norte



Nota: Desarrollo de la evaluación sensorial del café bajo protocolo SCA, evidenciando la metodología de catación aplicada.

ANEXO 12: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VARIANZA Y COEFICIENTES DE REGRESIÓN DEL MODELO CUADRÁTICO PARA LA ACIDEZ TITULABLE

Anexo 12.

Estimados de efectos, coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo Cuadrático de superficie de respuesta para la variable Acidez titulable (Ac, %) del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa

Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.4394	5	0.0879	3.04	0.0899
A – Tiempo	0.0407	1	0.0407	1.41	0.2742
B – Potencia	0.0735	1	0.0735	2.54	0.1550
AB	0.0225	1	0.0225	0.78	0.4071
A ²	0.2923	1	0.2923	10.11	0.0155
B ²	0.0294	1	0.0294	1.02	0.3470
Residual	0.2025	7	0.0289	—	—
Lack of Fit	0.1323	3	0.0441	2.51	0.1973
Pure Error	0.0702	4	0.0176	—	—
Total	0.6419	12	—	—	—

Estadísticos de ajuste del modelo

Estadístico	Valor	Estadístico	Valor
Desv. Estándar	0.1701	R²	0.6845
Media	2.35	R² ajustado	0.4592
CV%	7.25	R² predicho	−0.6366
		Adeq. Precision	4.469

Ecuación del modelo en factores codificados

$$Ac = +2.18 + 0.0713A + 0.0958B - 0.0750AB + 0.2050A^2 + 0.0650B^2$$

Nota. A: Tiempo de sonicación (variable codificada); B: Potencia de ultrasonido (variable codificada). * $p < 0.05$ (término significativo). ns = Lack of Fit no significativo. R²pred negativo indica que la media es mejor predictor que el modelo. Fuente: Design-Expert v13 (Stat-Ease Inc., 2023).

ANEXO 13: RESULTADOS ESTADÍSTICOS DEL MODELO DE MEDIA PARA EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LAS MUESTRAS DE CAFÉ

Anexo 13.

Estimados de efectos, coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo Mean (modelo constante) de superficie de respuesta para la variable Humedad (H, %) del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa

Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.0000	0	—	—	—
Residual	0.0769	12	0.0064	—	—
Lack of Fit	0.0449	8	0.0056	0.70	0.6901
Pure Error	0.0320	4	0.0080	—	—
Total	0.0769	12	—	—	—

Estadísticos de ajuste del modelo

Estadístico	Valor	Estadístico	Valor
Desv. Estándar	0.0801	R²	0.0000
Media	11.48	R² ajustado	0.0000
CV%	0.70	R² predicho	-0.1736
		Adeq. Precision	NA

Ecuación del modelo en factores codificados

$$H = +11.48$$

Nota. A: Design-Expert v13 seleccionó el modelo Mean al no detectar efecto significativo de los factores sobre la Humedad. B: R²pred negativo y Adeq. Precision no calculable (leverage = 1.0 para todos los puntos). C: La variable es insensible a Tiempo y Potencia en el rango evaluado. Fuente: Design-Expert v13 (Stat-Ease Inc., 2023).

ANEXO 14: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VARIANZA Y COEFICIENTES DE REGRESIÓN DEL MODELO CUADRÁTICO PARA EL PH

Anexo 14.

Estimados de efectos, coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo Cuadrático de superficie de respuesta para la variable pH del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa

Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.0261	5	0.0052	1.39	0.3347
A – Tiempo	0.0040	1	0.0040	1.07	0.3353
B – Potencia	0.0014	1	0.0014	0.37	0.5626
AB	0.0030	1	0.0030	0.80	0.4002
A ²	0.0176	1	0.0176	4.66	0.0678
B ²	0.0001	1	0.0001	0.01	0.9093
Residual	0.0264	7	0.0038	—	—
Lack of Fit	0.0169	3	0.0056	2.38	0.2105
Pure Error	0.0095	4	0.0024	—	—
Total	0.0525	12	—	—	—

Estadísticos de ajuste del modelo

Estadístico	Valor	Estadístico	Valor
Desv. Estándar	0.0614	R²	0.4974
Media	6.13	R² ajustado	0.1383
CV%	1.00	R² predicho	−1.5729
		Adeq. Precision	3.485

Ecuación del modelo en factores codificados

$$\text{pH} = +6.10 - 0.0225A + 0.0132B + 0.0275AB + 0.0503A^2 + 0.0028B^2$$

Nota. A: Adeq. Precision = 3.49 < 4.0: señal inadecuada; el modelo no debe usarse para navegar el espacio de diseño (Design-Expert v13). **B:** R²pred = −1.573: el modelo predice peor que la media de los datos. **C:** Variable no optimizable. Fuente: Design-Expert v13 (Stat-Ease Inc., 2023).

ANEXO 15: RESULTADOS DEL MODELO CUADRÁTICO COMPLETO PARA EL CONTENIDO DE POLIFENOLES TOTALES DEL CAFÉ TRATADO CON ULTRASONIDO

Anexo 15.

Estimados de efectos, coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo Cuadrático de superficie de respuesta para la variable Polifenoles Totales (mg GAE/100g), Modelo cuadrático completo del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa

Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	408.39	5	81.68	3.78	0.0559
A – Tiempo	28.69	1	28.69	1.33	0.2870
B – Potencia	31.02	1	31.02	1.44	0.2698
AB	3.72	1	3.72	0.17	0.6904
A ²	26.72	1	26.72	1.24	0.3028
B ²	289.43	1	289.43	13.40	0.0081
Residual	151.22	7	21.60	—	—
Lack of Fit	89.33	3	29.78	1.92	0.2672
Pure Error	61.88	4	15.47	—	—
Total	559.61	12	—	—	—

Estadísticos de ajuste del modelo

Estadístico	Valor	Estadístico	Valor
Desv. Estándar	4.65	R²	0.7298
Media	37.46	R² ajustado	0.5368
CV%	12.41	R² predicho	−0.3080
		Adeq. Precision	7.057

Ecuación del modelo en factores codificados

$$\text{TPC} = +34.69 + 1.89A - 1.97B - 0.965AB - 1.96A^2 + 6.45B^2$$

Nota. A: Modelo global no significativo ($p = 0.060$). Único término significativo: B² ($p = 0.008$). B: R²pred negativo (−0.308): modelo no optimizable. Ver Anexo 16 para el modelo reducido. Fuente: Design-Expert v13 (Stat-Ease Inc., 2023).

ANEXO 16: RESULTADOS DEL MODELO REDUCIDO PARA EL CONTENIDO DE POLIFENOLES TOTALES EN FUNCIÓN DEL TIEMPO Y LA POTENCIA ULTRASÓNICA

Anexo 16.

Estimados de efectos, coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo Reducido de superficie de respuesta para la variable Polifenoles Totales (mg GAE/100g), Modelo reducido ($A + B + A^2$) del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa

Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	115.23	3	38.41	0.78	0.5353
A – Tiempo	28.69	1	28.69	0.58	0.4654
B – Potencia	31.02	1	31.02	0.63	0.4484
A ²	55.53	1	55.53	1.12	0.3166
Residual	444.37	9	49.37	—	—
Lack of Fit	382.49	5	76.50	4.94	0.0733
Pure Error	61.88	4	15.47	—	—
Total	559.61	12	—	—	—

Estadísticos de ajuste del modelo

Estadístico	Valor	Estadístico	Valor
Desv. Estándar	7.03	R²	0.2059
Media	37.46	R² ajustado	−0.0588
CV%	18.76	R² predicho	−0.3083
		Adeq. Precision	2.839

Ecuación del modelo en factores codificados

$$\text{TPC} = +39.18 + 1.89A - 1.97B - 2.80A^2$$

Nota. A: Modelo reducido no significativo ($p = 0.535$). Adeq. Precision = $2.84 < 4.0$: señal inadecuada. B: $R^2_{\text{pred}} = -0.308$. La reducción del modelo empeoró todos los estadísticos respecto al cuadrático completo (Anexo 15). TPC no es optimizable mediante MSR en el dominio experimental evaluado. Fuente: Design-Expert v13 (Stat-Ease Inc., 2023).

ANEXO 17: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VARIANZA Y COEFICIENTES DE REGRESIÓN DEL MODELO CUADRÁTICO PARA LA CAPACIDAD ANTIOXIDANTE

Anexo 17.

Estimados de efectos, coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo Cuadrático de superficie de respuesta para la variable Capacidad Antioxidante (μmol TE/g), Modelo cuadrático del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa

Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4.820E+07	5	9.640E+06	3.60	0.0625
A – Tiempo	8.581E+05	1	8.581E+05	0.32	0.5890
B – Potencia	5.773E+06	1	5.773E+06	2.16	0.1855
AB	5.488E+05	1	5.488E+05	0.20	0.6645
A ²	3.039E+05	1	3.039E+05	0.11	0.7461
B ²	4.094E+07	1	4.094E+07	15.29	0.0058
Residual	1.875E+07	7	2.678E+06	—	—
Lack of Fit	1.742E+07	3	5.807E+06	17.50	0.0092
Pure Error	1.327E+06	4	3.317E+05	—	—
Total	6.695E+07	12	—	—	—

Estadísticos de ajuste del modelo

Estadístico	Valor	Estadístico	Valor
Desv. Estándar	1636.50	R²	0.7200
Media	8248.66	R² ajustado	0.5199
CV%	19.84	R² predicho	−0.8813
		Adeq. Precision	5.485

Ecuación del modelo en factores codificados

$$CA = +6627.20 + 327.51A - 849.51B + 370.40AB + 209.01A^2 + 2425.86B^2$$

Nota. A: Lack of Fit significativo (p = 0.009): el modelo cuadrático no captura adecuadamente la estructura real de los datos. B: R²pred = −0.881. CA no es optimizable mediante MSR. El único término significativo es B² (p = 0.006). Fuente: Design-Expert v13 (Stat-Ease Inc., 2023).

ANEXO 18: RESULTADOS DEL MODELO REDUCIDO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA EL PUNTAJE EN TAZA DEL CAFÉ VARIEDAD CATIMOR

Anexo 18.

Estimados de efectos, coeficientes de regresión y análisis de varianza del modelo Reducido de superficie de respuesta para la variable Puntaje en Taza (puntos SCA), Modelo reducido ($B + A^2 + B^2$) del café despulpado variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa.

Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3.00	4	0.7498	5.04	0.0251
A – Tiempo (jerarquía)	0.0034	1	0.0034	0.02	0.8830
B – Potencia	1.30	1	1.30	8.77	0.0181
A ²	0.2130	1	0.2130	1.43	0.2655
B ²	1.60	1	1.60	10.78	0.0111
Residual	1.19	8	0.1486	—	—
Lack of Fit	0.4021	4	0.1005	0.51	0.7343
Pure Error	0.7870	4	0.1968	—	—
Total	4.19	12	—	—	—

Estadísticos de ajuste del modelo

Estadístico	Valor	Estadístico	Valor
Desv. Estándar	0.3855	R²	0.7161
Media	83.14	R² ajustado	0.5741
CV%	0.46	R² predicho	0.2639
		Adeq. Precision	6.403

Ecuación del modelo en factores codificados

$$P.Taza = +83.54 + 0.0207A + 0.4037B - 0.1750A^2 - 0.4800B^2$$

Nota. Única variable optimizable del estudio. Modelo significativo ($F = 5.04$; $p = 0.025$). Términos significativos: B ($p = 0.018$) y B² ($p = 0.011$). Lack of Fit no significativo ($p = 0.734$). Adeq. Precision = $6.40 > 4.0$. A fue retenido por principio de jerarquía polinomial. Condiciones óptimas: Tiempo = 15.2 min; Potencia = 352.5 W; P.Taza predicho = 83.63 puntos SCA; D = 0.671. Fuente: Design-Expert v13 (Stat-Ease Inc., 2023).

DATOS INDIVIDUALES DE LA EVALUACIÓN SENSORIAL REALIZADA POR LOS CINCO CATADORES PARA CADA TRATAMIENTO EXPERIMENTAL

Anexo 19.

Datos crudos de la evaluación sensorial del café variedad Catimor tratado con ultrasonido en etapa pre-fermentativa, bajo protocolo SCA (n = 5 catadores por tratamiento)

T	Cat.	F/A	Sab	SabR	Acid	Cuer	Uni	Bal	TazL	Dul	P.Cat	P.Final
1	JCG	7.5	7.5	7.25	7.75	7.5	10	7.5	10	10	7.25	82.25
1	JAR	7.5	7.25	7.5	7.25	7.5	10	7.5	10	10	7.5	82
1	GAVC	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	10	7.5	10	10	7.5	82.5
1	VAE	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	10	7.5	10	10	7.5	82.5
1	YBH	7.25	7.5	7.5	7.5	7.5	10	7.5	10	10	7.25	82
2	JCG	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	10	7.25	10	10	7.25	82
2	JAR	7.5	7.5	7.5	7.25	7.25	10	7.5	10	10	7.5	82
2	GAVC	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	10	7.5	10	10	7.5	82.5
2	VAE	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	10	7.5	10	10	7.5	82.5
2	YBH	7.5	7.5	7.25	7.5	7.5	10	7.5	10	10	7.5	82.25
3	JCG	7.25	7.5	7.5	7.75	7.75	10	7.5	10	10	7.75	83
3	JAR	7.75	7.75	7.75	7.5	7.5	10	7.5	10	10	7.75	83.5
3	GAVC	7.75	7.75	7.5	7.5	7.5	10	7.75	10	10	7.75	83.5
3	VAE	7.75	7.5	7.5	7.75	7.75	10	7.5	10	10	7.75	83.5
3	YBH	7.5	7.75	7.75	7.75	7.5	10	7.75	10	10	7.5	83.5
4	JCG	7.5	7.5	7.5	7.75	8	10	8	10	10	7.25	83.5
4	JAR	7.75	7.5	7.5	7.5	7.5	10	7.5	10	10	7.75	83
4	GAVC	7.5	7.5	7.5	7.75	7.75	10	7.5	10	10	7.5	83
4	VAE	7.25	7.5	7.5	7.25	8.5	10	7.5	10	10	7.5	83
4	YBH	7.5	7.5	7.25	7.75	7.75	10	7.5	10	10	7.25	82.5
5	JCG	7.25	8	7.75	7.5	7.75	10	7.5	10	10	7.5	83.25
5	JAR	7.5	7.25	7.25	7.5	8.5	10	7.5	10	10	7.5	83
5	GAVC	7.5	7.5	7.5	7.5	8.5	10	7.5	10	10	7.5	83.5
5	VAE	7.5	7.75	7.5	7.5	7.75	10	7.5	10	10	7.5	83
5	YBH	7.75	7.5	7.75	7.5	7.5	10	7.5	10	10	7.5	83
6	JCG	7.5	7.25	7.25	8	7.75	10	7.75	10	10	7.5	83
6	JAR	7.5	8	7.5	7.75	8	10	7.5	10	10	7.75	84
6	GAVC	7.5	7.75	7.5	7.75	7.75	10	7.75	10	10	7.75	83.75
6	VAE	7.75	7.75	7.5	7.5	7.75	10	7.5	10	10	7.75	83.5
6	YBH	7.5	7.75	7.75	7.75	7.75	10	7.5	10	10	7.5	83.5
7	JCG	7.5	7.5	7.5	7.5	8	10	7.5	10	10	7.5	83
7	JAR	7.5	7.5	7.5	7.5	7.75	10	7.5	10	10	7.5	82.75
7	GAVC	7.5	7.5	7.5	7.75	7.75	10	7.5	10	10	7.5	83

T	Cat.	F/A	Sab	SabR	Acid	Cuer	Uni	Bal	TazL	Dul	P.Cat	P.Final
7	VAE	7.25	7.5	7.5	7.25	7.75	10	7.5	10	10	7.5	82.25
7	YBH	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	10	7.5	10	10	7.5	82.5
8	JCG	7.25	7.5	7.75	7.75	8	10	7.5	10	10	7.5	83.25
8	JAR	7.5	8	7.25	7.5	7.75	10	7.5	10	10	7.5	83
8	GAVC	7.25	7.5	7.5	7.5	8.5	10	7.5	10	10	7.5	83.25
8	VAE	7.5	7.5	7.5	7.75	7.5	10	7.5	10	10	7.75	83
8	YBH	7.5	7.75	7.5	7.75	7.5	10	7.5	10	10	7.5	83
9	JCG	7.5	7.25	7.25	7.5	8.75	10	7.5	10	10	7.5	83.25
9	JAR	7.25	8.25	7.5	7.25	8.25	10	7.5	10	10	7.5	83.5
9	GAVC	7.5	8	7.25	7.5	7.75	10	7.5	10	10	7.5	83
9	VAE	7.5	7.75	7.25	7.25	8.5	10	7.5	10	10	7.5	83.25
9	YBH	7.5	7.5	7.5	7.5	8.25	10	7.5	10	10	7.5	83.25
10	JCG	7.5	7.5	7.5	7.75	8	10	7.5	10	10	7.5	83.25
10	JAR	7.75	7.75	7.5	7.75	7.75	10	7.5	10	10	7.5	83.5
10	GAVC	7.5	7.5	7.5	7.75	7.75	10	7.5	10	10	7.5	83
10	VAE	7.5	7.5	7.5	7.75	7.75	10	7.5	10	10	7.5	83
10	YBH	7.5	7.5	7.5	7.5	8.5	10	7.5	10	10	7.25	83.25
11	JCG	7.5	7.75	7.75	7.75	8	10	7.5	10	10	7.25	83.5
11	JAR	7.5	7.75	7.5	7.75	8	10	7.5	10	10	7.5	83.5
11	GAVC	7.5	7.5	7.5	7.5	8.25	10	7.5	10	10	7.5	83.25
11	VAE	7.5	7.5	7.5	7.5	8.75	10	7.5	10	10	7.5	83.75
11	YBH	7.5	7.5	7.5	7.5	8.5	10	7.5	10	10	7.5	83.5
12	JCG	7.5	7.75	7.75	8	8	10	7.5	10	10	7.5	84
12	JAR	7.75	8.5	7.5	7.5	7.75	10	7.5	10	10	7.5	84
12	GAVC	7.5	8.25	7.5	7.5	8.75	10	7.5	10	10	7.5	84.5
12	VAE	7.5	8.25	7.75	7.25	8.75	10	7.5	10	10	7.5	84.5
12	YBH	7.5	8.5	7.5	7.5	8.5	10	7.5	10	10	7.5	84.5
13	JCG	7.5	7.5	7.25	8	8	10	7.5	10	10	7.5	83.25
13	JAR	7.5	7.5	7.5	7.75	8.25	10	7.5	10	10	7.5	83.5
13	GAVC	7.5	7.75	7.5	7.75	7.75	10	7.75	10	10	7.5	83.5
13	VAE	7.5	7.5	7.5	7.75	7.75	10	7.75	10	10	7.75	83.5
13	YBH	7.75	7.75	7.5	7.75	7.5	10	7.75	10	10	7.5	83.5
C	JCG	7.5	7.5	7.5	7.25	7.5	10	7.25	10	10	7.5	82
C	JAR	7.5	7.5	7.5	7.25	7.5	10	7.5	10	10	7.5	82.25
C	GAVC	7.5	7.25	7.5	7.5	7.5	10	7.5	10	10	7.5	82.25
C	VAE	7.75	7.25	7.25	7.25	7.5	10	7.5	10	10	7.5	82
C	YBH	7.5	7.25	7.5	7.25	7.5	10	7.5	10	10	7.5	82

Nota. T = Tratamiento; C = Control; Cat. = Catador (código); F/A = Fragancia/Aroma; Sab = Sabor; SabR = Sabor residual; Acid = Acidez; Cuer = Cuerpo; Uni = Uniformidad; Bal = Balance; TazL = Taza limpia; Dul = Dulzor; P.Cat = Puntaje catador; P.Final = Puntaje final. Uni, TazL y Dul obtuvieron puntuación máxima (10) en todos los tratamientos. Códigos de catadores: JCG = Jenny

Carrión García; JAR = José Ansel Ramírez; GAVC = Gloria Anghely Valle Castro; VAE = Verliza Alberca Enríquez; YBH = Yony Barturen Heredia. Todos los catadores están certificados como Q Arabica Grader. Escala de evaluación: 6.0–10.0 puntos por atributo (protocolo SCA, 2026). Sombreado azul = tratamientos DCCR; sombreado amarillo = control. Fuente: elaboración propia.