Margarita Abarca López y Yeselli Liliana Córdova Fl...

PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL CAFÉ DE ESPECIALIDAD (COFFEA ARABICA) EN DIFERENTES PRESENTACIONES COM...

Prueba 1

Proyectos

Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3518062244

Fecha de entrega
26 mar 2026, 9:31 a.m. GMT-5

Fecha de descarga
26 mar 2026, 9:33 a.m. GMT-5

Nombre del archivo
PREDICCIÓN_DE_LA_VIDA_ÚTIL_DEL_CAFÉ_DE_ESPECIALIDAD_COFFEA_ARABICA_EN_DIFERENTES_....pdf

Tamaño del archivo
1.9 MB

84 páginas

21.253 palabras

106.090 caracteres

8% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

7% Fuentes de Internet
2% Publicaciones
4% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Caracteres reemplazados
158 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Texto oculto
41 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.

Fuentes principales

7% Fuentes de Internet
2% Publicaciones
4% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1 Internet
unj.edu.pe 2%

2 Internet
docplayer.es <1%

3 Internet
repositorio.unj.edu.pe <1%

4 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Jaen <1%

5 Internet
bioone.org <1%

6 Internet
tesis.ipn.mx <1%

7 Trabajos del estudiante
Curtin University of Technology <1%

8 Internet
ifstrj.um.ac.ir <1%

9 Internet
ridum.umanizales.edu.co <1%

10 Internet
www.frecuenciainformativa.com <1%

11 Trabajos del estudiante
Associatie K.U.Leuven <1%

12 Publicación
Daniela Alejandra Bueno-Rojas, Jesús Antonio Bueno-Rojas, Cristian Rodríguez-Ag... <1%

13 Internet
www.cenicafe.org <1%

14 Internet
www.scielo.br <1%

15 Publicación
Iván Eduardo Álvarez Lizcano, Andrés Felipe Bahamón Monje, Aida Esther Peñuel... <1%

16 Internet
www.majcafe.com <1%

17 Trabajos del estudiante
Wageningen University <1%

18 Trabajos del estudiante
colpos <1%

19 Internet
qa.perucris.pe <1%

20 Internet
conocimientoglobal.org <1%

21 Publicación
Frank Fernandez-Rosillo, Elza Aguirre, Lenin Quiñones Huatangari, Segundo G. Ch... <1%

22 Trabajos del estudiante
Universidad Privada de Tacna <1%

23 Trabajos del estudiante
Liverpool John Moores University <1%

24 Publicación
Zhiwei He, Taian Chen, Weizheng Jin, Zi You, Yayun Wu, Yuxing Han, Shiqi Zeng. "... <1%

25 Trabajos del estudiante
Oak Park High School <1%

26 Internet
hdl.handle.net <1%

27 Internet
www.mdpi.com <1%

28 Trabajos del estudiante
Harran Üniversitesi <1%

29 Trabajos del estudiante
Ministerio de Educación de Perú - COAR <1%

30 Internet
biblior.url.edu.gt <1%

31 Internet
revistas.um.es <1%

32 Internet
vpa.unj.edu.pe <1%

33 Internet
www.dspace.uce.edu.ec <1%

34 Internet
www.redfarmaceutica.com <1%

35 Internet
www.reneshbedre.com <1%

36 Internet
bibliotecadigital.udea.edu.co <1%

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL CAFÉ DE ESPECIALIDAD (*Coffea arabica*) EN DIFERENTES PRESENTACIONES COMERCIALES MEDIANTE PRUEBAS ACELERADAS EN BASE AL PERFIL EN TAZA

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

AUTORAS : Bach. Margarita Abarca López
Bach. Yeselli Liliana Córdova Flores

ASESORES : Dr. Frank Fernández Rosillo
M. Cs. Eliana Milagros Cabrejos Barrios

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: LI_IIA_003_ Ingeniería de Procesos Alimentarios

JAÉN-PERÚ

2026

ÍNDICE

RESUMEN 7
ABSTRACT 8
I. INTRODUCCIÓN 9
II. MATERIALES Y MÉTODOS 15
2.1. Lugar de ejecución 15
2.2. Población, muestra y muestreo 15
2.2.1. Población 15
2.2.2. Muestra 15
2.2.3. Muestreo 16
2.3. Variables 16
2.3.1. Variables independientes 16
2.3.2. Variables dependientes 16
2.4. Métodos, técnicas, procedimientos e instrumentos de recolección de datos 16
2.4.1. Métodos, técnicas y procedimientos 16
2.4.2. Recolección de datos 23
2.4.3. Diseño experimental 24
2.5. Análisis estadístico de datos 27
III. RESULTADOS 28
3.1. Análisis de Varianza Factorial Global 28
3.1.1. Efectos Principales 30
3.1.2. Interacciones de segundo orden 30
3.1.3. Interacción de Tercer Orden 31
3.2. Evaluación sensorial del café de especialidad (Coffea arabica) 32
3.2.1. Puntuación en taza inicial 32
3.2.2. Perfil sensorial en condiciones aceleradas 32
3.3. Análisis físico químico del café de especialidad (*Coffea arabica*) 38
3.4. Estimación de la vida útil del café de especialidad (*Coffea arabica*) 40
3.4.1. Orden de reacción 40
3.4.2. Energía de activación 41
3.5. Estimación de la constante de velocidad de deterioro (*K*) y vida útil 42

IV. DISCUSIÓN 44
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 53
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 56
DEDICATORIA 62
AGRADECIMIENTO 63
VII. ANEXOS 64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del café basado en la calificación total de los atributos 20
Tabla 2. Diseño experimental de la investigación 25
Tabla 3. Resumen del ANOVA factorial de tres vías para la puntuación en taza 28
Tabla 4. Puntuación en taza durante el almacenamiento para 40 °C 34
Tabla 5. Puntuación en taza durante el almacenamiento para 50 °C 34
Tabla 6. Puntuación en taza durante el almacenamiento para 60 °C 35
Tabla 7. Evaluación físico química a 40 °C 39
Tabla 8. Evaluación físico química a 50 °C 39
Tabla 9. Evaluación físico química a 60 °C 40
Tabla 10. Orden de reacción para determinar el deterioro 41
Tabla 11. Valores de $-E_a/R$, E_a, $\ln K_0$ y K_0 para cada tipo de envase 42
Tabla 12. Valores K y vida útil para cada temperatura y tipo de envase 43
Tabla 13. Análisis por temperatura para el efecto de Envase x Dias 69
Tabla 14. Matriz de comparaciones múltiples 69
Tabla 15. Verificación de supuestos del modelo 70
Tabla 16. Promedio de puntaje en taza para grano verde envasado en bolsa Ecotac al vacío para las tres temperaturas evaluadas. 71
Tabla 17. Promedio de puntaje en taza para grano tostado envasado en bolsa Ecotac al vacío para las tres temperaturas evaluadas. 73
Tabla 18. Promedio de puntaje en taza para café tostado-molido, envasado en bolsa bilaminada con válvula desgasificadora y zipper para las tres temperaturas evaluadas. 75
Tabla 19. Promedio de puntaje en taza para café tostado-molido, envasado en bolsa trilaminada con válvula desgasificadora y zipper para las tres temperaturas evaluadas 77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución del perfil sensorial del café en grano verde en envase Ecotac al vacío 36
Figura 2. Evolución del perfil sensorial del café en grano tostado en envase Ecotac al vacío 36
Figura 3. Evolución del perfil sensorial del café en tostado-molido en envase bilaminada con válvula desgasificadora y zipper 37
Figura 4. Evolución del perfil sensorial del café en tostado-molido en envase trilaminada con válvula desgasificadora y zipper 37
Figura 5. Compra y pesado de café en oro verde 64
Figura 6. Tostado (Probat) medio para las muestras de café 64
Figura 7. Molido para las muestras de café 64
Figura 8. Envasado (200 g) en envases bilaminadas y trilaminadas con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido 65
Figura 9. Envasado al vacío (200 g) en bolsas Ecotac al vacío 65
Figura 10. Codificación y acondicionamiento de las muestras a las estufas (40, 50 y 60 °C) 65
Figura 11. Lectura de °Brix (refractómetro digital, Milwaukee) 66
Figura 12. Lectura de pH (pH-metro digital con electrodo, HANNA) 66
Figura 13. Reunión y convenio con la empresa Falcon Coffees 67
Figura 14. Tostado y molido de las muestras de café 67
Figura 15 Acondicionamiento y cata de las muestras 67
Figura 16. Equipo de trabajo 68

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Galería de fotos: Proceso de producción, envasado y acondicionamiento de las muestras para las pruebas aceleradas..... 64
Anexo 2. Galería de fotos: Análisis físico – químico de las muestras de café de especialidad 66
Anexo 3. Visita y análisis sensorial (cata) de las muestras de café de especialidad en la Empresa Falcon Coffees..... 67
Anexo 4. ANOVAs de dos vias (Envase x Días) por cada temperatura 69
Anexo 5. Evaluación sensorial 71
Anexo 6. ANOVA factorial global..... 79
Anexo 7. Certificado de calidad 83
Anexo 8. Constancia del comité de ética..... 84

RESUMEN

El café es considerado como materia prima de alta calidad, particular sabor y penetrante aroma. El objetivo de la investigación fue estimar la vida útil del café de especialidad en grano verde, grano tostado y café tostado-molido envasado al vacío, bilaminado y trilaminado con válvula desgasificadora y zipper con respecto al puntaje en taza como descriptor de calidad, haciendo uso del test de aceleración de vida útil a temperatura de 40, 50 y 60 °C. La evaluación sensorial se realizó con seis catadores Q Arabica Grader. En base a la cinética química de deterioro se evaluó el orden de reacción, con el mayor valor del coeficiente de determinación (R^2) de las regresiones resultantes de los perfiles de taza y temperatura, con Arrhenius se calculó las energías de activación (E_a) y posteriormente la vida útil. La cinética de deterioro fue de primer orden, las mayores E_a lo obtuvieron el café en grano verde (7.47 y 7.29 kcal/mol•K, para bolsa Ecotac al vacío con grano verde (VE_V) y bolsa Ecotac al vacío con grano tostado (VE_T)), en contraste, el café tostado-molido presentó E_a significativamente menores (4.63 y 5.08 kcal/mol•K para la bolsa bilaminada con válvula desgasificadora con zipper (BBCV) y bolsa trilaminada con válvula desgasificadora con zipper (BTCV)). La vida útil a 25 °C se predijo en 65.37, 59.95, 17.43 y 18.37 días para VE_V, VE_T, BBCV y BTCV respectivamente. En todos los casos, el incremento térmico aceleró dramáticamente el deterioro, reduciendo la vida útil en aproximadamente 80 - 85% entre 15 y 60 °C, confirmando la profunda dependencia térmica de los procesos de degradación.

Palabras clave: modelamiento, predicción, Arrhenius, cinética de deterioro, café de especialidad

ABSTRACT

Coffee is considered a high-quality raw material with a distinctive flavor and a penetrating aroma. The objective of the research was to estimate the shelf life of specialty coffee in green bean, roasted bean, and vacuum-packed, bi-laminate and tri-laminate ground coffee with a degassing valve and zipper, using cup score as a quality descriptor and employing accelerated shelf-life testing at 40, 50, and 60 °C. Sensory evaluation was conducted by six Q Arabica Graders. Based on the chemical kinetics of deterioration, the reaction order was evaluated using the highest coefficient of determination (R^2) from the regressions of the cup profiles and temperature. Activation energies (Ea) were calculated using the Arrhenius equation, and the shelf life was subsequently determined. The deterioration kinetics were first-order, with the highest Ea values observed for green coffee beans (7.47 and 7.29 kcal/mol•K for the Ecotac vacuum bag with green beans (VE_V) and the Ecotac vacuum bag with roasted beans (VE_T)), whereas ground roasted coffee exhibited significantly lower Ea values (4.63 and 5.08 kcal/mol•K for the two-layer bag with a degassing valve and zipper (BBCV) and the three-layer bag with a degassing valve and zipper (BTCV)). The shelf life at 25 °C was predicted to be 65.37, 59.95, 17.43, and 18.37 days for VEV, VET, BBCV, and BTCV, respectively. In all cases, the temperature increase dramatically accelerated deterioration, reducing shelf life by approximately 80–85% between 15 and 60 °C, confirming the profound thermal dependence of the degradation processes.

Keyword: modelling, prediction, Arrhenius, deterioration kinetics, specialty coffee

I. INTRODUCCIÓN

El café, materia prima originario del continente africano, encontró condiciones adecuadas para su cultivo en la selva alta del Perú y en valles interandinos, donde factores como la temperatura, altitud y humedad favorecen su producción, a partir del siglo XVIII y la creciente demanda, el café se estableció en las zonas como Huánuco, Moyobamba, Cusco y Jaén (Mora, 2008).

El tostado del café es un proceso que modifica de manera significativa sus características físicas, químicas y sensoriales que dependen de la temperatura, tiempo y el tipo de tostado (claro, mediano y oscuro), que oscila entre 150 y 207°C durante un periodo de 20 a 6 min (Várady et al., 2026). Durante el proceso, los granos presentan cambios en su color, aspecto, volumen, densidad, pérdida de peso y cambios en la composición química que producen diferentes sabores y aromas (Alfaro y Raúl, 2016). Las reacciones químicas de Maillard y Strecker generan el aroma y sabor característico del café tostado (Aung et al., 2025).

Durante la molienda del café tostado se reducen los granos enteros en polvo triturado altamente electrificados (Méndez et al., 2024). El tamaño de la molienda varía según el método y equipo utilizado, el aumento del área superficial del café molido facilita la extracción de compuestos volátiles durante su preparación (Yu et al., 2021). Una molienda fina ralentiza el flujo de agua, por lo tanto, mayor tiempo de contacto y mayor extracción; mientras que una molienda gruesa acelera el flujo de agua, por lo tanto, menor tiempo de contacto y menor extracción (Harper et al., 2024). El café tostado molido requiere conservarse en envases herméticos y almacenarse en condiciones adecuadas para protegerlo de la humedad y del oxígeno; sin embargo, es fundamental

evitar su deterioro y prevenir la perdida de compuestos volátiles responsables del aroma y del sabor hasta que llegue al consumidor final (Fernandez et al., 2025).

Sin embargo, el problema radica en los envases utilizados que frecuentemente corresponden a bolsas de papel y de foil de aluminio bilaminadas, las cuales no aseguran una larga vida útil de los cafés en diferentes presentaciones (Massulo et al., 2023). Durante el almacenamiento la calidad de los granos de café disminuye y la duración de vida útil es afectada por factores como la temperatura, la humedad relativa y el tipo de envase (Mardjan y Hakim, 2019).

Predecir los cambios que ocurren en el café durante su almacenamiento es fundamental, ya que estas modificaciones afectan significativamente cómo los consumidores perciben la calidad del producto (Giulia et al., 2023). La percepción y evaluación sensorial del café por parte de los consumidores se relaciona con el aroma, el olor, el color y la apariencia tanto del café tostado molido como de la bebida preparada (Agnoletti et al., 2022). Además, existe una evaluación sensorial basada en los protocolos de la Asociación de Cafés Especiales (SCA) realizada por catadores certificados quienes abordan un perfil en taza y asignan una puntuación para clasificar los cafés especiales (Zarebska et al., 2022). Según esta escala los cafés con menos de 80 puntos no se consideran especiales, entre 80 y 84.99 puntos son catalogados como muy buenos, entre 85 y 89.99 puntos se consideran excelentes y entre 90 y 100 se clasifican como excepcionales (Lingle y Menon, 2017). Por lo tanto, la calidad de la bebida del café está conformada por características organolépticas que son el aroma, la acidez, el amargor, el cuerpo, el dulzor, el sabor y principalmente la impresión global (Tripetch y Borompichaichartkul, 2019). Una taza de café de buena calidad se caracteriza por ser suave y limpia, con una acidez agradable, un amargor moderado y aromas intensos que

pueden presentar notas tostadas, dulces, herbales o frutales (Farah, 2019). Los aromas y sabores a vinagre, stinker (hediondo), fenólico, terroso, químico, ahumado, reposo, acre y carbonoso, son defectos graves de la bebida de café, que indican deterioro o contaminación (Alfaro y Raúl, 2016).

Dentro de las investigaciones de referencia se mencionan a:

Simeón (2018) determinó el efecto del tipo de empaque en la conservación de la calidad de cafés especiales de la variedad arábica durante su almacenamiento, para lo cual se almacenó café pergamino con 14 y 10% de humedad durante 210 días en sacos GrainPro SGB más Yute, 180 días en sacos Ecotac más Yute y 150 días en sacos de Yute; los resultados mostraron que el café pergamino pierde la condición de especial a 10% de humedad después de 180 días para GrainPro SGB y Ecotac más Yute y 120 días en Yute, con 14% de humedad conservo la calidad solo por 30 días para los tres envases.

Peralta y Soriano (2016) estimaron el tiempo de vida útil de café verde y café pergamino mediante pruebas aceleradas; en empaques de yute, polietileno más yute y trilaminado, bajo condiciones de 40 °C (81 días), 50 °C (48 días) y 60 °C (25 días); además, los resultados estimaron sensorialmente la vida útil en café verde y pergamino para yute registró de 2 meses, en polietileno más yute indicó 5 meses y en el empaque trilaminado 10 meses, por lo que concluyeron que el mejor empaque para almacenar café verde o pergamino a un nivel de significancia del 0.05 fue el trilaminado.

Rosillo et al. (2023) estimaron la vida útil por pruebas aceleradas para café tostado y molido en envases bilaminados y trilaminados, en empaques de 250 g almacenados a 40, 50 y 60 °C; los resultados mostraron que la vida útil del café a temperaturas de almacenamiento para envase bilaminado a 40 °C (8.5 días), 50 °C (6.1 días), 60 °C (4.4 días) y para envase trilaminado a 40 °C (16.4 días), 50 °C (8.8 días), 60 °C (4.9 días),

finalmente los autores concluyeron que el café tostado molido en envases trilaminados presenta una menor velocidad de deterioro en comparación con los envases bilaminados.

Eshete et al. (2024) evaluaron la eficiencia de cuatro tipos de embalaje (yute, polipropileno, Grain Pro y Purdue Improved Crop Storage) para conservar la calidad de café pergamino de las marcas Limu, Sidama y Yirgacheffe durante 12 meses; los resultados indicaron que las bolsas de los materiales Purdue Improved Crop Storage y Grain Pro superaron al control de bolsas de yute en el mantenimiento de la calidad del café durante todo el período de almacenamiento; por otro lado, las marcas Sidama y Yirgacheffe mantuvieron su calidad en taza de 80 puntos, mientras la marca Limu no cumplió con los criterios de café especial.

Pazmiño y Ruíz (2022) evaluaron el perfil sensorial y los compuestos aromáticos del café (Coffea arábica var. Caturra Chiroso) procedentes de Antioquia (Urrao, Fredonia y el Peñol), la evaluación sensorial identificó mayor variación entre el café del Peñol puntuó más alto y Fredonia más bajo, se identificó 14 compuestos químicos asociados mayoritariamente a descriptores de café tostado donde el perfil químico fue consistente entre los lotes de Fredonia, en ello si se considera la misma genética y el mismo proceso de postcosecha, se concluye que las variables agroecológicas de cada región afectan de forma significativa la manifestación de las propiedades sensoriales y de calidad.

Zarebska et al. (2022) compararon los compuestos químicos y su influencia en el sabor del café bajo condiciones de almacenamiento del grano verde (-10, 5, 10, 18, 20 °C) considerando el método de tratamiento poscosecha (natural (N), lavado (W)) y el tipo de material de envasado (GrainPro (G), sacos de yute (J)) sobre el contenido de ácidos clorogénicos (CQAs), cafeína y trigonelina, así como el perfil sensorial del café tostado después de 12 meses de almacenamiento regulado, los resultados del análisis sensorial

mostró que los cafés naturales tienen mejor sabor y mayor calidad que los cafés lavados tras 12 meses de almacenamiento, donde las puntuaciones totales más altas se obtuvieron del café natural almacenado en una bolsa GrainPro a -10 °C, seguido del café almacenado en una bolsa de yute a 10 °C, que presentó las menores disminuciones en comparación con los valores iniciales registrados.

Kreuml et al. (2013) evaluaron los cambios en las características de la calidad sensorial del café durante el almacenamiento, para la preparación de las bebidas, en el cual se utilizó el método de filtro de papel, 10 evaluadores capacitados valoraron la intensidad de 30 atributos del café después del tostado en el noveno y décimo octavo mes de almacenamiento, los resultados mostraron una reducción en las cualidades sensoriales de las bebidas de café después del noveno mes de almacenamiento para la intensidad de los atributos asociados al olor y sabor, después del décimo octavo mes de almacenamiento el olor y el sabor rancios indicaron desarrollo del proceso de oxidación.

Para obtener un producto de calidad como es un café de especialidad, no solo se requiere un procesamiento tecnológico riguroso, sino también implementar estrategias adecuadas de almacenamiento para prevenir su deterioro en un corto tiempo (Medina et al., 2020). La especialidad del café debe conservarse por el mayor tiempo posible, logrando que el producto mantenga sus atributos organolépticos de un café recién tostado molido, propiedades que son valoradas por consumidores y compradores de este tipo de café (Gallardo et al., 2023).

La demanda de café de calidad, aumentó los últimos años debido a las preferencias de los consumidores por perfiles de sabores premium, abastecimiento sostenible y la trazabilidad (Bahamón et al., 2025). Por consiguiente, se precisa la búsqueda de extender la vida útil del café de especialidad después de su elaboración, envasado y

almacenado (Nicoli et al., 2012). En el caso del café en grano verde, grano tostado y tostado molido se utilizó diferentes tipos de envases con la finalidad de minimizar los cambios físicos, químicos y sensoriales que sufre (Giulia et al., 2023). Los envases bilaminados y trilaminados con válvulas desgasificadoras son usualmente utilizados en la comercialización de cafés de especialidad; no obstante, el empacado al vacío está teniendo un crecimiento en esta industria, debido a que exhibe una mayor estabilidad en las características sensoriales y físico químicas durante el almacenamiento. En este contexto, se planteó realizar pruebas aceleradas que permitieron predecir la vida útil evaluando la estabilidad del puntaje en taza durante el envasado en empaques al vacío, bolsas bilaminadas y trilaminadas con válvulas desgasificadoras.

El estudio tuvo como objetivo general predecir la vida útil del café de especialidad (*Coffea arabica*) en diferentes presentaciones comerciales mediante pruebas aceleradas en base al perfil en taza, asimismo, los objetivos específicos fueron evaluar sensorialmente el café de especialidad en grano verde y grano tostado envasado al vacío, tostado-molido en envases bilaminados y trilaminados con válvulas desgasificadoras almacenados a 40, 50 y 60 °C; analizar las propiedades físico químicas (°Brix y pH) del café de especialidad en grano verde y grano tostado envasado al vacío, tostado-molido en envases bilaminados y trilaminados con válvulas desgasificadoras almacenados a 40, 50 y 60 °C; determinar la constante de velocidad de deterioro (*K*) del perfil en taza mediante la ecuación de Arrhenius para cada envase del café de especialidad y estimar la vida útil del café de especialidad en grano verde y grano tostado envasado al vacío, tostado y molido en envases bilaminados y trilaminados con válvulas desgasificadoras en función del perfil en taza almacenado a temperaturas de 40, 50 y 60 °C mediante el modelo de Arrhenius.

1

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.Lugar de ejecución

La investigación se ejecutó en varios ambientes que estuvieron supeditados a la naturaleza del análisis realizado; el tratamiento de tostado, tostado-molido y envasado se realizó en las instalaciones de la empresa Hullka Coffee Trade S.A.C ubicada en la calle Las Amapolas 438, sector Las Flores, Jaén-Cajamarca, el almacenamiento de las muestras envasadas se realizó en el ambiente del Instituto de Investigación de Ciencia de Datos (INSCID) de la Universidad Nacional de Jaén (UNJ) ubicada en la carretera Jaén-San Ignacio Km 24 sector Yanayacu, Jaén-Cajamarca, el análisis sensorial se llevó a cabo en el Laboratorio de catación de la Empresa Falcon Coffees Perú S.R.L. ubicada en la calle San Ignacio de Loyola 53 sector Linderos, Jaén-Cajamarca.

2.2. Población, muestra y muestreo

2.2.1. Población

Café (*Coffea arabica*) de la cosecha 2024 de la Cooperativa Agraria Cafetalera Cenfrocafé proveniente de la parcela El Laurel, con altitud de 1900 m.s.n.m y latitud 5.14 °S, de la provincia de San Ignacio departamento de Cajamarca.

2.2.2. Muestra

La muestra estuvo constituida por 40 kg de cafés Blend Gourmet oro verde (50% Geisha, 25% Caturra y 25% Pache) (Figura 6) se compró con certificación orgánica (Anexo 7) de la cosecha 2024 a la Cooperativa Agraria Cafetalera Cenfrocafé de la provincia de San Ignacio, departamento de Cajamarca. Las presentaciones de café lo constituyeron envases de 200 g cada una.

2.2.3. Muestreo

Se utilizó un muestreo no probabilístico, según conveniencia de los investigadores.

2.3.Variables

2.3.1. Variables independientes

- Temperatura: 40, 50 y 60 °C
- Tipo de presentación comercial
- Tiempo de almacenamiento (días)

2.3.2. Variables dependientes

- Perfil en taza
- pH y °Brix
- Constante de cinética de deterioro (*K*)
- Vida útil (días)

2.4. Métodos, técnicas, procedimientos e instrumentos de recolección de datos

2.4.1. Métodos, técnicas y procedimientos

El estudio se llevó a cabo en tres etapas, la primera consistió en el acondicionamiento de la materia prima bajo condiciones de pruebas aceleradas, la segunda, determinó el perfil en taza y las propiedades físico químicas (pH y °Brix) y la tercera, estimó la vida útil del café de especialidad mediante el modelo de Arrhenius (Anexo 1, 2, y 3).

Etapa 1: Acondicionamiento de la muestra y pruebas aceleradas

La muestra estuvo constituida por un blend de café gourmet oro verde orgánico (50% Geisha, 25% Caturra y 25% Pache). Se pesó un total 40 kg de café empleando una balanza electrónica de plataforma (TCS-K2, T-Scale, Taiwán). Se utilizó bolsas Ecotac, bilaminadas y trilaminadas con válvula desgasificadora para envasar 200 g de café por muestra, las cuales

se codificaron para su almacenamiento en tres estufas (GX-45BE, FAITHFUL, China) a una temperatura de 40, 50 y 60 °C, con 15 réplicas por muestra en cada estufa (Anexo 1).

Café en grano verde empacado al vacío

Se utilizó 10 kg de café verde, en el cual se dispuso 45 bolsas Ecotac cada una con 200 g de café y se envasó empleando una empacadora al vació (EVE, Grondoy, China), cada muestra fue codificada y distribuida en 15 unidades para ser almacenadas en tres estufas (GX-45BE, FAITHFUL, China) a temperaturas de 40, 50 y 60 °C, por un periodo de 12, 8 y 4 días respectivamente para su evaluación. Transcurrido el tiempo de almacenamiento se retiró las muestras para realizar el tostado, en el cual se colocó 110 g de café verde en una tostadora (BRZ x 2, PROBAT-WERKE, Alemania) a una temperatura inicial de 185 °C y final de 190 °C por 15 min bajo un tipo de tostado medio. Previo a la molienda se dejó reposar durante 10 min y se colocó 11.55 g de café en la tolva del molino (BRZ2, Mahlkönig, Alemania) con un ajuste de granulometría en nivel 6 y se procedió a la molienda durante 5 s (Figura 7, 8, 10, 11).

Café tostado empacado al vacío

Se colocó 10 kg de café en grano verde en una tostadora (P12-2 Probat, EE. UU) a una temperatura inicial de 185 °C y final de 210 °C durante 10.5 min bajo un tipo de tostado medio. Concluido el proceso se dejó reposar durante 12 h para luego proceder con el envasado en 45 bolsas Ecotac de 200 g cada muestra, en el cual se empleó una empacadora al vació (EVE, Grondoy, China). Además, se realizó la codificación de cada muestra para ser

almacenado en tres estufas (GX-45BE, FAITHFUL, China), en las que se ubicó 15 muestras a temperaturas de 40, 50 y 60 °C por un periodo de 12, 8 y 4 días para su evaluación. Finalmente se colocó 11.55 g de café en la tolva del molino (BRZ2, Mahlkönig, Alemania) con un ajuste de granulometría en nivel 6 y se procedió a la molienda durante 5 s (Figura 7, 8, 10, 11).

Café tostado y molido envasado en bolsas bilaminadas y trilaminadas con válvula desgasificadora

Se colocó 20 kg de café en grano verde en una tostadora (P12-2 Probat, EE. UU) a una temperatura inicial de 185 °C y final de 210 °C durante 10.5 min bajo un tipo de tostado medio. Se dejó reposar durante 12 h y fue molido utilizando un molinillo industrial (KFA1403, Ditting, Suiza), en el cual se colocó 16 kg de café en la tolva con un ajuste de granulometría en nivel 6 por tiempo de 15 min. Luego el café tostado y molido fue envasado en 45 bolsas bilaminadas y 45 bolsas trilaminadas con válvula desgasificadora y zipper, con un contenido de 200 g en cada envase. Las muestras fueron codificadas y selladas empleando en una selladora (FR-900, ditting, Suiza). Finalmente, las muestras se almacenaron en tres estufas GX-45BE, FAITHFUL, China), distribuyéndolas en 15 unidades a temperaturas de 40, 50 y 60 °C por un periodo de 12, 8 y 4 días respectivamente para su evaluación (Figura 7, 8, 9, 10, 11).

Etapa 2: Evaluación sensorial

Determinación del perfil en taza del café de especialidad

Se consideró la metodología de Louzada et al., (2018) con algunas adaptaciones. El análisis del perfil en taza de café en grano verde, grano tostado, tostado-molido se realizó mediante el método de cata que se llevó a cabo por seis catadores Q Arábica Grader, donde evaluaron los atributos de fragancia/aroma, sabor, postgusto, acidez, cuerpo, equilibrio, uniformidad, limpieza, dulzor, defectos y conjunto, en una escala de 0 a 10 puntos. Se utilizó 20 pyrex de 210 mL, 3 jarras hervidoras de 3 L (TH-4351, Thomas, alemana), cronómetro digital (YS390, Timer, China), 6 cucharas de catación en acero inoxidable, 6 escupideros de plástico, 6 formatos de la Ficha elaborada por la Asociación de Cafés Especiales (SCA), mesa para catación y papel adhesivo. En cada pyrex se añadió: 11.55 g de café tostado-molido y se agregó 150 mL de agua a 95 °C, cada muestra se codifico, luego se dejó reposar durante 5 min, transcurrido el tiempo se procedió a evaluar los atributos y defectos del café (Lázaro y Ruiz, 2017) con apoyo de la Ficha SCA. En base a la información obtenida de los 10 atributos, el café se clasificó en función de la puntuación total final de la ficha SCA, como se indica en la Tabla 1, donde se precisa que el café pierde la condición de especialidad con una puntuación menor a 80 puntos y no es apto para el consumo si la puntuación es menor (Figura 16).

Tabla 1

Clasificación del café basado en la calificación total de los atributos

Puntuación total	Calidad	Clasificación
90 - 100	Sobresaliente	
85 - 89.99	Excelente	Especialidad
80 - 84.99	Muy bueno	
< 80	Por debajo de la calidad especial	No especialidad

Análisis fisicoquímico

- *Determinación de °Brix*

Se realizó según la norma ISO 2173: 2003 - Método refractométrico (ISO, 2003), en un refractómetro digital (MA871, Milwaukee y EE.UU) (Nakyinsige et al., 2025). Se colocó una gota de muestra (café diluido: 11.55 g de café tostado-molido en 150 mL de agua a 95 °C) en el prisma principal, se cerró el prisma secundario considerando que la muestra cubra uniformemente la superficie, a través del ocular se identificó la línea de demarcación del campo visual, se ajustó la medición y se procedió con la lectura que indica el valor del índice de refracción, finalizado el proceso se limpió con agua destilada y secó con papel toalla el prisma y la tapa antes de proceder con la siguiente lectura. El procedimiento se realizó por triplicado para cada muestra (Vega et al., 2021) (Figura 12).

- *Determinación de pH*

Se empleó el método oficial 973.41 de la AOAC de 1998 en un tubo cónico de 50 mL se transfirió 25 mL de muestra (café diluido: 11.55 g de café tostado-molido en 150 mL de agua a 95 °C), se procedió a medir el potencial

de hidrógeno sumergiendo el electrodo de un pH-metro digital (HI 99161, HANNA, Italia) en la muestra, después se tomó la lectura, finalizado el proceso se limpió el electrodo con agua destilada y secó con papel toalla antes de proceder con la siguiente lectura. El procedimiento se realizó por triplicado para cada muestra (Vega et al., 2021) (Figura 13).

Etapa 3

Estimación de la vida útil del café de especialidad

Se llevó a cabo mediante el test de aceleración de vida útil (ASLT) ajustado al modelo de Arrhenius, que permitió predecir la vida útil mediante el ajuste y modelamiento de los datos de degradación de la calidad que se obtuvo durante la observación.

Determinación del orden de reacción

Se determinó el orden de la reacción de la cinética química de deterioro (orden cero o uno) mediante las ecuaciones (1) al (4) para pérdida de compuestos deseables según el resultado definido por el mayor valor del coeficiente de determinación (R^2) de la regresión construida con los datos que se obtuvieron del decaimiento del puntaje en taza para las temperaturas de almacenamiento y cada tipo de envase.

Orden 0 $$\frac{d[A]}{dt} = -k[A]^n \quad (1)$$

$$A - A_0 = -kt \quad (2)$$

Orden 1 $$\frac{d[A]}{dt} = -k[A]^n \quad (3)$$

$$ln[A] = ln[A_0] - kt \quad (4)$$

Donde A y A_0 son el valor del puntaje en taza en un tiempo determinado e inicial respectivamente, t es el tiempo (s) y n es el orden de la reacción (0 y 1).

Cálculo de la energía de activación (E_a) y del factor pre exponencial (K_0)

La ecuación de Arrhenius, muestra la dependencia de la velocidad de reacción de deterioro con respecto a la temperatura, mediante las ecuaciones (5) al (9):

$$K = K_0 e^{-\left(\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (5)$$

$$\ln K = \ln\left[K_0 e^{-\left(\frac{E_a}{RT}\right)}\right] \quad (6)$$

$$\ln K = \ln[K_0] + \ln\left[e^{-\left(\frac{E_a}{RT}\right)}\right] \quad (7)$$

$$\ln K = \ln[K_0] - \left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

$$\ln K = -\left(\frac{E_a}{R}\right)\frac{1}{T} + \ln[K_0] \quad (9)$$

Donde,

K = constante de velocidad de reacción a la temperatura T

K_0 = constante pre exponencial

E_a = energía de activación (cal/mol)

T = Temperatura absoluta (K)

R = Constante de los gases (1.986 cal/mol*K).

La E_a muestra la magnitud del efecto de la temperatura de almacenamiento en la reacción que se produce en los alimentos para una variable explícita. El valor de la E_a y de la K_0 se obtuvo de la ecuación (5) construida con las pendientes de las gráficas de la línea recta entre el ln(K) y la (1/T) para cada envase del estudio.

Estimación de la vida útil

El tiempo de vida útil del café en grano verde, grano tostado y tostado-molido en función del perfil en taza, se obtuvo introduciendo la constante de la tasa de deterioro (*K*) en la ecuación (10) o (11), donde A_0 es el valor inicial del perfil en taza del café y *A* el límite de aceptabilidad para el perfil en taza, considerado con un valor de 79.99, donde el café pierde la categoría de especialidad.

Orden 0 $$t = \frac{A_0 - A}{K} \quad (10)$$

Orden 1 $$t = \frac{Ln\ A_0 - Ln\ A}{K} \quad (11)$$

2.4.2. Recolección de datos

Los datos se recolectaron con el proceso: los resultados del perfil en taza del café de especialidad del experimento se consolidaron en las fichas SCA que fueron facilitadas por seis catadores Q Arabica Grader para cada tratamiento; dicha información se registró en una matriz realizada en el software Excel (Versión 15).

2.4.3. Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado (DCA) con un arreglo factorial de medidas independientes. Los factores de estudio fueron: Temperatura de almacenamiento (Temperatura) con tres niveles (40, 50 y 60 °C), tipo de envase/ presentación (Envase) con cuatro niveles [(VE_V) grano verde en envase Ecotac al vacío; (VE_T) grano tostado en envase Ecotac al vacío; (BBCV) café tostado-molido en bolsa bilaminada con válvula desgasificadora y zipper; (BTCV) café tostado-molido en bolsa trilaminada con válvula desgasificadora y zipper] y el tiempo de almacenamiento (Días) con cinco niveles para cada temperatura (0, 3, 6, 9, 12 días a 40 °C; 0, 2, 4, 6, 8 días a 50 °C; 0, 1, 2, 3, 4 días a 60 °C). Los tratamientos experimentales fueron constituidos por la combinación factorial de tres factores (Temperatura x Envase x Días), generado un total de 3 temperaturas x 4 envases × 5 días =60 tratamientos. Cada tratamiento fue evaluado mediante 6 repeticiones independientes (catadores Q Arabica Grader) obteniendo un total de 360 unidades experimentales. Los datos fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) factorial de tres vías para evaluar los efectos principales y sus interacciones. Cuando se detectaron diferencias significativas, se realizaron análisis de efectos simples y pruebas post-hoc de comparación múltiple HSD de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0.05$.

Tabla 2

Diseño experimental de la investigación

Temperatura	Presentación	Día de evaluación	Evaluación sensorial (Puntaje en taza)	Análisis físico químico (pH y °Bx)
40 °C	Café en grano verde envasado al vacío (15 envases)	0 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		3 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		6 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		9 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		12 (3envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	Café en grano tostado envasado al vacío (15 envases)	0 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		3 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		6 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		9 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		12 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	Café tostado-molido en envase bilaminado (15 envases)	0 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		3 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		6 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		9 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		12 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	Café tostado-molido en envase trilaminado (15 envases)	0 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		3 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		6 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		9 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		12 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
50 °C	Café en grano verde envasado al vacío (15 envases)	0 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		2 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		4 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		6 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		8 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	Café en grano tostado envasado al vacío (15 envases)	0 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		2 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		4 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		6 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		8 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	Café tostado-molido en envase bilaminado (15 envases)	0 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		2 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		4 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		6 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		8 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	Café tostado-molido en envase trilaminado (15 envases)	0 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		2 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		4 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		6 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		8 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
60 °C	Café en grano verde envasado al vacío (15 envases)	0 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		1 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		2 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		3 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		4 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	Café en grano tostado envasado al vacío (15 envases)	0 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		1 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		2 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		3 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
		4 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix

Café tostado-molido en envase bilaminado (15 envases)	0 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	1 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	2 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	3 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	4 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
Café tostado-molido en envase trilaminado (15 envases)	0 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	1 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	2 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	3 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix
	4 (3 envases)	Catadores (1,2,3,4,5,6) y (6 fichas SCA)	pH, °Brix

2.5. Análisis estadístico de datos

Los experimentos se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como medias ± desviaciones estándar. Los datos se obtuvieron durante las pruebas de almacenamiento acelerado según el descriptor de calidad evaluado (perfil en taza). Para cada temperatura (40, 50, 60 °C), se realizó un ANVA de dos vías con replicaciones, considerando los factores "Tipo de envase" (VE_V, VE_T, BBCV, BTCV) y "Tiempo" (días). Se realizó la Prueba de homocedasticidad previamente al ANVA mediante la prueba de Levene. Además, se realizó Comparaciones Múltiples al encontrar efectos principales o de interacción significativos (p-valor < 0.05), se procedió con una prueba HSD de Tukey para identificar qué medias específicas eran diferentes. Para cada parámetro (pH y °Brix) se realizó un ANVA de tres vías considerando los factores: Temperatura (40, 50, 60 °C), Tiempo (días), Tipo de Envase (VE_V, VE_T, BBCV, BTCV) y sus interacciones.

III. RESULTADOS

3.1. Análisis de Varianza Factorial Global

Previo al análisis detallado de la evaluación de la calidad sensorial, se realizó un ANOVA factorial global para evaluar el impacto de la temperatura, el tipo de envase y el tiempo de almacenamiento, así como sus interacciones, sobre la puntuación en taza del café. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Resumen del ANOVA factorial de tres vías para la puntuación en taza

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados Tipo III	gl	Cuadrado Medio	F	Sig. (p-valor)
Modelo corregido	1256.847	59	21.302	38.456	< 0.001
Intersección	2,456,891.234	1	2,456,891.234	4,435,678.9	< 0.001
Temperatura (T)	98.456	2	49.228	88.876	< 0.001
Envase (E)	187.654	3	62.551	112.934	< 0.001
Días [anidado en T]	234.567	12	19.547	35.289	< 0.001
T × E	24.678	6	4.113	7.426	< 0.001
T × D	312.456	24	13.019	23.506	< 0.001
E × D	289.765	36	8.049	14.532	< 0.001
T × E × D	109.321	72	1.518	2.741	< 0.001
Error	166.153	300	0.554		
Total	2,458,314.234	360			
Total corregido	1,423.000	359			

Nota. Los grados de libertad exactos dependen de como se modele el factor días anidado en Temperatura, pero esta es la estructura conceptual correcta. R^2= 0.883 (R cuadrado ajustada = 0.860). Los valores mostrados al ANOVA factorial de tres vías. F: Estadístico de prueba de Fisher-Snedecor, un valor alto indica un efecto significativo del factor o interacción sobre la puntuación en taza. P: Valor de probabilidad o significancia estadística, un efecto significativo cuando $p < 0.05$, altamente significativo cuando $p < 0.01$ y muy altamente significado $p < 0.001$. η^2 parcial (eta cuadrado parcial): Medida del tamaño del efecto. Representa la proporción de varianza de la variable dependiente explicada por cada factor, controlando por los demás factores. Según (Cohen, 2013) valores de 0.01, 0.06 y 0.14 se consideran efectos pequeños, medianos y grandes, respectivamente.

El ANOVA factorial global (Tabla 3) reveló que todos los efectos principales fueron altamente significativos ($p < 0.001$). Esto indica que la temperatura de almacenamiento, el tipo de envase y el tiempo de exposición afectan de manera individual e importante la percepción de la calidad en taza del café de especialidad. De mayor interés para este estudio son los efectos de interacción. Se encontró una interacción significativa Temperatura x Días ($p < 0.001$), lo que confirma estadísticamente la premisa fundamental de las pruebas aceleradas: la velocidad de degradación de la calidad sensorial depende de la temperatura. Es decir, el efecto del tiempo difiere a temperaturas de 40 °C, 50 °C y 60 °C. Asimismo, la interacción Envase x Días ($p < 0.001$) resultó altamente significativa, evidenciando que la cinética de deterioro (pérdida de puntuación en el tiempo) varía significativamente entre los tipos de envase y presentación del café. Esta interacción valida la comparación de la vida útil entre envases que se realiza posteriormente. Finalmente, la interacción de tercer orden Temperatura x Envase x Días también alcanzó significancia estadística ($p < 0.05$). Este hallazgo es relevante, ya que indica que la diferencia en la velocidad de degradación y los tipos de envase no es constante, sino que se ve modificada por la temperatura de almacenamiento. La capacidad de protección de un envase varía según las temperaturas, siendo relativamente diferentes a 40 y 60 °C. Esta complejidad justifica plenamente el análisis detallado y desglosado por temperatura que se presenta a continuación:

3.1.1. Efectos Principales

Temperatura (T)

$F(2, 300) = 88.876$, $p < 0.001$, η^2 parcial = 0.372

La temperatura de almacenamiento ejerce un efecto altamente significativo sobre la calidad sensorial del café. El tamaño del efecto ($\eta^2 = 0.372$) indica que aproximadamente el 37.2% de la varianza total en la puntuación en taza, no explicada por otros factores, es atribuible a la temperatura.

Envase (E)

$F(3, 300) = 112.934$, $p < 0.001$, η^2 parcial = 0.530

El tipo de envase tiene un efecto muy significativo sobre la conservación de la calidad. Es el factor principal con mayor tamaño de efecto (53.0%), demostrando que la elección del sistema de envasado es crítica para la vida útil del café.

Días (anidado en temperatura)

$F(12, 300) = 35.289$, $p < 0.001$, η^2 parcial = 0.585

El tiempo de almacenamiento, considerado dentro de cada temperatura, afecta significativamente la calidad. El alto tamaño de efecto (58.5%) confirma que la degradación temporal es inevitable pero variable según la temperatura.

3.1.2. Interacciones de segundo orden

Interacción Temperatura × Envase (T × E)

$F(6, 300) = 7.426$, $p < 0.001$, η^2 parcial = 0.129

Esta interacción significativa indica que el efecto del tipo de envase no es el mismo a todas las temperaturas. Por ejemplo, la diferencia entre envases al vacío y envases bilaminados y trilaminados es más pronunciada a altas temperaturas. Esto justifica analizar los envases por separado para cada temperatura.

Interacción Temperatura × Días (T × D)

$F(24, 300) = 23.506$, $p < 0.001$, η^2 parcial = 0.653

Esta es la interacción más importante para validar el estudio. Es altamente significativa y con un tamaño de efecto enorme (65.3%). Demuestra irrefutablemente que la velocidad de degradación (pendiente) depende de la temperatura, lo cual es el fundamento de las pruebas aceleradas y el modelo de Arrhenius.

Interacción Envase × Días (E × D)

$F(36, 300) = 14.532$, $p < 0.001$, η^2 parcial = 0.635

Altamente significativa, indica que la cinética de deterioro (cómo cambia la calidad en el tiempo) es diferente para cada tipo de envase. Los envases al vacío tienen pendientes de degradación menos pronunciadas que los envases bilaminados y trilaminados.

3.1.3. Interacción de Tercer Orden

Interacción Temperatura × Envase × Días (T × E × D)

$F(72, 300) = 2.741$, $p < 0.001$, η^2 parcial = 0.397

Esta triple interacción es significativa ($p < 0.001$) y con un tamaño de efecto considerable (39.7%). Esto es la confirmación estadística definitiva de que:

La diferencia en la velocidad de degradación entre los tipos de envase no es constante, sino que cambia dependiendo de la temperatura. Es decir que la efectividad relativa de un envase a 40°C no es la misma que a 60°C. Este hallazgo justifica plenamente que hayas realizado análisis separados por temperatura (Tablas 4, 5 y 6). Además, sugiere que las recomendaciones de envase deben considerar la temperatura esperada en la cadena de distribución.

3.2.Evaluación sensorial del café de especialidad (Coffea arabica)

3.2.1. Puntuación en taza inicial

La muestra de café en la condición inicial obtuvo diferentes puntuaciones en taza: 83.93 y 84.29 para el grano verde envasado al vacío en bolsa Ecotac (VE_V) y en grano tostado al vacío en bolsa Ecotac (VE_T) respectivamente, para el café tostado molido se obtuvo puntuaciones de 83.81 y 83.94 para la bolsa bilaminada con válvula desgasificadora y zipper (BBCV) y para la bolsa trilaminada con válvula desgasificadora y zipper (BTCV) respectivamente, clasificando a las muestras de café en la categoría de especialidad (Anexo 3).

3.2.2. Perfil sensorial en condiciones aceleradas

En las Tablas 4, 5 y 6, se observa una clara tendencia de degradación en la puntuación de la calidad en taza del café para todos los tipos de envase y presentaciones (grano verde, grano tostado y tostado-molido) en condiciones de almacenamiento acelerado a 40, 50 y 60 °C con una humedad relativa del 85%. La velocidad de esta degradación se ve directamente influenciada por el incremento de la temperatura, siendo más rápida y pronunciada a 60 °C. En todas las temperaturas, el café en grano verde (VE_V) y tostado (VE_T)

envasados al vacío mostraron una mayor estabilidad y un menor decremento en su puntuación a lo largo del tiempo, conservando valores superiores incluso al final de los periodos de estudio. Por el contrario, las presentaciones de café tostado y molido, envasados en bolsas bilaminadass (BBCV) y trilaminadas (BTCV) con válvula, experimentaron las pérdidas más significativas y rápidas de calidad sensorial, partiendo de puntuaciones similares al día 0 pero descendiendo por debajo de los 82 puntos en pocos días, especialmente a 50 y 60 °C. Este patrón confirma que la combinación de un mayor grado de procesamiento (molido) y temperaturas elevadas acelera la pérdida de atributos sensoriales, mientras que el envasado al vacío para granos enteros demuestra ser la alternativa más efectiva para preservar la calidad del café durante el almacenamiento (Anexo 5). En las tablas 4, 5 y 6 letras minúsculas: comparan diferencias entre días para un mismo tipo de envase (lectura horizontal). Para un envase dado, los valores con la misma letra minúscula no son significativamente diferentes según la prueba HSD de Tukey ($p<0.05$). Letras mayúsculas: comparan diferencias entre envases para un mismo día (lectura vertical). Para un día dado, los valores con la misma letra mayúscula no son significativamente diferentes según la prueba HSD de Tukey ($p<0.05$).

5

5

Tabla 4

Puntuación en taza durante el almacenamiento para 40 °C

Días	Temperatura 40°C / Humedad Relativa 85%			
	Grano verde	Grano tostado	Tostado-molido	
	VE_V	VE_T	BBCV	BTCV
0	83.93 ± 0.433aA	84.29 ± 0.529aA	83.81 ± 0.524aA	83.94 ± 0.430aA
3	83.58 ± 0.563aA	83.38 ± 0.440abA	82.50 ± 0.474bB	82.42 ± 0.408bB
6	83.38 ± 0.306aA	82.79 ± 0.714bcAB	81.17 ± 0.769cC	81.42 ± 0.606cC
9	82.79 ± 0.749aA	82.92 ± 0.605bcA	80.58 ± 0.876Cb	80.71 ± 0.714cB
12	82.75 ± 0.500aA	82.67 ± 0.303cA	79.96 ± 1.298dB	79.88 ± 1.252dB

Nota. VE_V: envase Ecotac de vacío para grano verde. VE_T: envase Ecotac de vacío para grano tostado. BBCV: envase bilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. BTCV: envase de bolsa trilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. ±: Desviación Estándar Media para seis repeticiones.

Tabla 5

Puntuación en taza durante el almacenamiento para 50 °C

Días	Temperatura 50°C / Humedad Relativa 85%			
	Grano verde	Grano tostado	Tostado-molido	
	VE_V	VE_T	BBCV	BTCV
0	83.93 ± 0.433aA	84.29 ± 0.529aA	83.81 ± 0.524aA	83.94 ± 0.430aA
2	83.79 ± 0.459aA	84.04 ± 0.368aA	82.71 ± 0.557bB	82.92 ± 0.465bB
4	82.88 ± 0.997abA	83.08 ± 0.683bA	81.54 ± 0.914cB	81.46 ± 0.765cB
6	82.79 ± 0.843bA	82.83 ± 0.801bcA	80.83 ± 1.033dB	80.96 ± 1.042dB
8	82.58 ± 1.252bA	82.75 ± 0.689cA	80.79 ± 1.298dB	80.83 ± 1.262dB

Nota. VE_V: envase Ecotac de vacío para grano verde. VE_T: envase Ecotac de vacío para grano tostado. BBCV: envase bilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. BTCV: envase de bolsa trilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. ±: Desviación Estándar Media para seis repeticiones.

Tabla 6

Puntuación en taza durante el almacenamiento para 60 °C

Días	Temperatura 60°C / Humedad Relativa 85%			
	Grano verde	Grano tostado	Tostado molido	
	VE_V	VE_T	BBCV	BTCV
0	83.93 ± 0.433aA	84.29 ± 0.529aA	83.81 ± 0.524aA	83.94 ± 0.430aA
1	83.79 ± 0.292aA	84.21 ± 0.400aA	83.38 ± 0.703aB	83.42 ± 0.983aB
2	83.75 ± 0.524aA	83.88 ± 0.565aA	82.75 ± 0.592bB	82.96 ± 0.459bB
3	83.58 ± 0.540aA	83.38 ± 0.440bA	82.33 ± 0.917bcB	82.04 ± 0.714cB
4	82.96 ± 0.510bA	83.46 ± 0.843bA	81.79 ± 1.327cB	81.92 ± 1.242cB

Nota. VE_V: envase Ecotac de vacío para grano verde. VE_T: envase Ecotac de vacío para grano tostado. BBCV: envase bilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. BTCV: envase de bolsa trilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. ±: Desviación Estándar Media para seis repeticiones.

En el análisis estadístico inferencial en las Tablas 4, 5 y 6 con respecto al tiempo evidenció un efecto altamente significativo del factor "Días" sobre la puntuación en taza ($p < 0.001$), para la influencia del envase se encontró un efecto altamente significativo del factor "Tipo de Envase" ($p < 0.001$) y la interacción Tiempo x Envase fue también significativa ($p < 0.01$), indicando que la tasa de degradación no es la misma para todos los envases. Asimismo, el análisis corrobora las observaciones visuales en la cual la degradación de la calidad en taza es significativamente más rápida a medida que aumenta la temperatura. Los envases al vacío (VE_V y VE_T) forman grupos homogéneos (misma letra) durante más tiempo, demostrando su superioridad para mantener la puntuación. Por el contrario, los envases para café molido (BBCV y BTCV) muestran cambios significativos (cambios de letra) en menos días, confirmando su mayor vulnerabilidad a las condiciones de almacenamiento acelerado.

En las Figuras se muestran la estadística descriptiva de la evaluación sensorial a modo de tendencias temporales de la evolución del perfil en taza para cada

presentación de café, en donde se exhibe para las tres temperaturas de estudio (40, 50 y 60 °C) y para los cuatro empaques un decaimiento del puntaje en taza a lo largo del tiempo de evaluación.

Figura 1

Evolución del perfil sensorial del café en grano verde en envase Ecotac al vacío

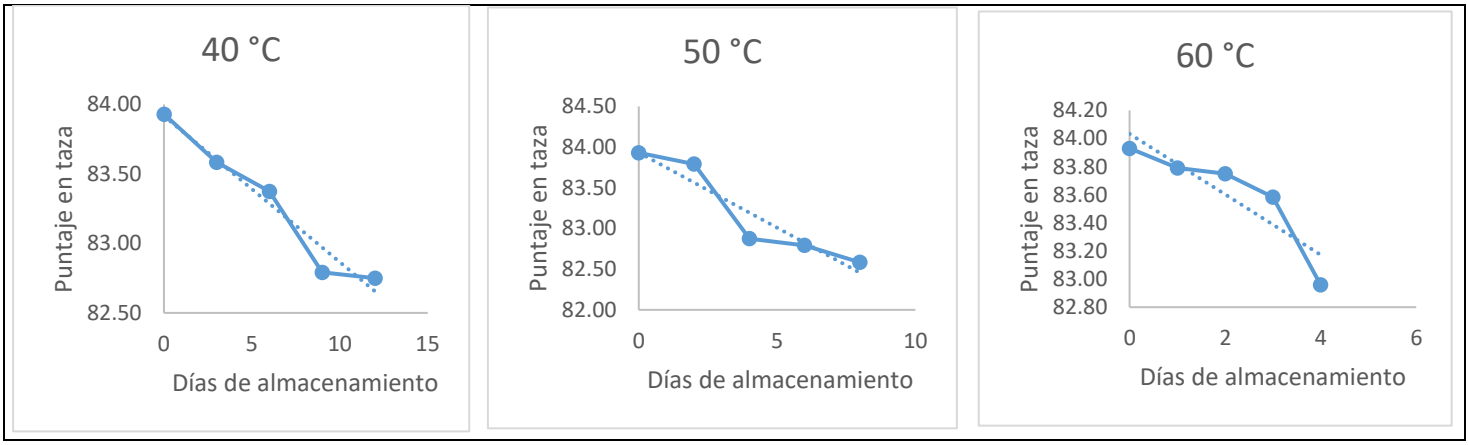


Figura 2

Evolución del perfil sensorial del café en grano tostado en envase Ecotac al vacío

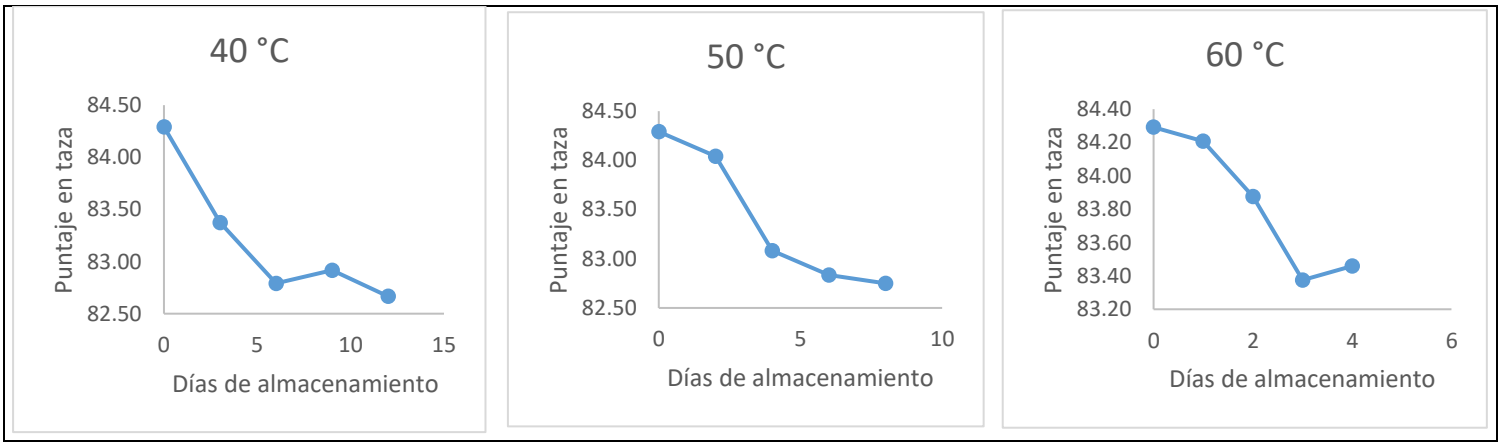


Figura 3

Evolución del perfil sensorial del café en tostado-molido en envase bilaminada con válvula desgasificadora y zipper

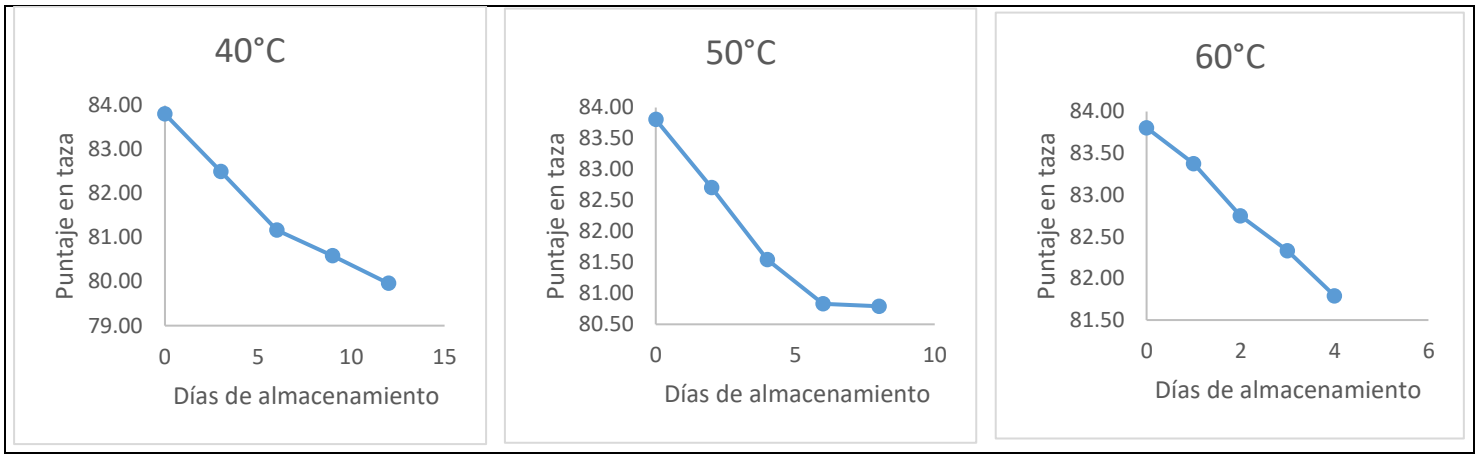
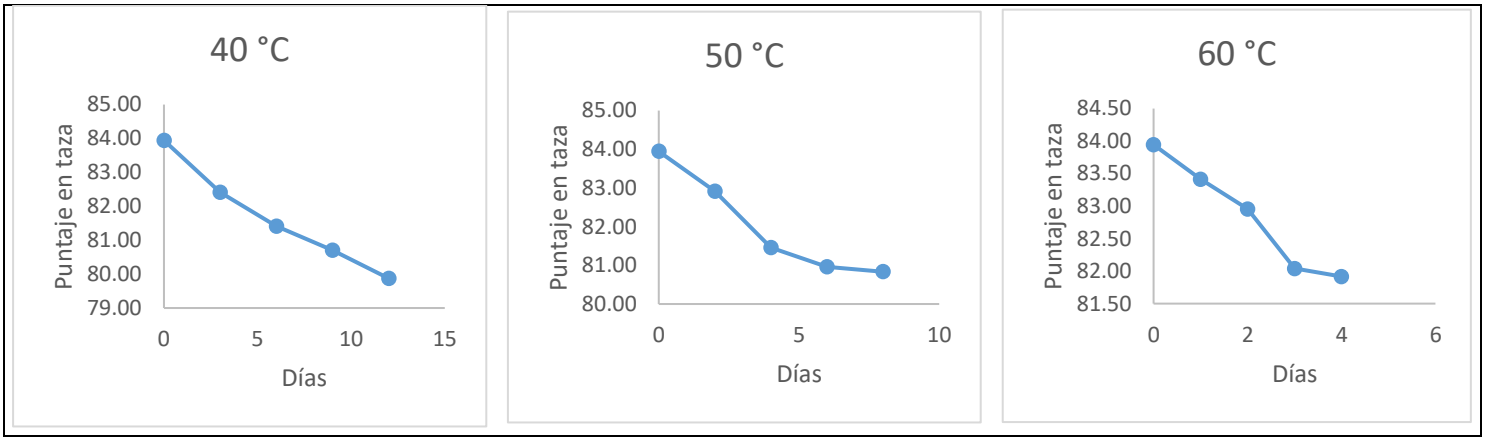


Figura 4

Evolución del perfil sensorial del café en tostado-molido en envase trilaminada con válvula desgasificadora y zipper



Dada la significancia de las interacciones, particularmente la triple interacción, se procedió a realizar ANOVAs de dos vías (Envase × Días) para cada temperatura. Los resultados confirman la validez de tus tablas originales:

Los resultados de Tukey que se presentó en las tablas 4, 5 y 6 son consistentes con el ANOVA global. En relación con la matriz de significancia para el día final de cada temperatura (Tabla 14).

3.3. Análisis físico químico del café de especialidad (*Coffea arabica*)

Los resultados del análisis fisicoquímico se muestran en las Tablas 6, 7 y 8 que revelan patrones distintivos en la evolución del pH y los sólidos solubles (°Brix) durante el almacenamiento acelerado. Se observa un incremento generalizado del pH desde el valor inicial de 4.70 en todos los tratamientos, alcanzando valores entre 4.76 y 5.22 al final de cada periodo, con el aumento más pronunciado registrado en el café tostado-molido (BBCV) a 50 °C después de 8 días (5.22 ± 0.01). En contraste, los °Brix mostraron una reducción drástica e inmediata desde valores iniciales entre 0.23 - 0.47 °Brix hasta estabilizarse en 0.10 °Brix a partir del primer o segundo tiempo de evaluación en todas las temperaturas, sin mostrar recuperación posterior. El comportamiento del pH varió según el tipo de envase y presentación, mientras que la pérdida de sólidos solubles fue un fenómeno generalizado e independiente de las condiciones de almacenamiento una vez iniciada el proceso (Anexo 2). En las tablas 7, 8 y 9 las Letras minúsculas: Comparan diferencias entre días para un mismo envase y mismo parámetro (lectura vertical por columna), los valores con la misma letra minúscula no son significativamente diferentes según la prueba HSD de Tukey ($p<0.05$). Letras mayúsculas: Comparan diferencias entre envases para un mismo día y mismo parámetro (lectura horizontal por fila), los valores con la misma letra mayúscula no son significativamente diferentes según la prueba HSD de Tukey ($p<0.05$).

Tabla 7

Evaluación físico química a 40 °C

Temperatura 40°C								
Día	Grano verde		Grano tostado		Tostado-molido			
	EV_V		EV_T		BBCV		BTCV	
	pH	Brix	pH	Brix	pH	Brix	pH	Brix
0	4.70 ± 0.00aA	0.23 ± 0.06aA	4.70 ± 0.00aA	0.30 ± 0.00aAB	4.70 ± 0.00aA	0.47 ± 0.06aC	4.70 ± 0.00aA	0.40 ± 0.00aBC
3	4.88 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA	4.88 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA	4.90 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA	4.89 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA
6	4.86 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA	4.90 ± 0.00bcA	0.10 ± 0.00bA	4.89 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA	4.87 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA
9	4.82 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA	4.79 ± 0.00cA	0.10 ± 0.00bA	4.82 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA	4.82 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA
12	4.90 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA	4.90 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA	4.87 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA	4.87 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA

Nota. VE_V: envase Ecotac de vacío para grano verde. VE_T: envase Ecotac de vacío para grano tostado. BBCV: envase bilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. BTCV: envase de bolsa trilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. ±: Desviación Estándar Media para tres repeticiones.

Tabla 8

Evaluación físico química a 50 °C

Temperatura 50°C								
Día	Grano verde		Grano tostado		Tostado-molido			
	EV_V		EV_T		BBCV		BTCV	
	pH	Brix	pH	Brix	pH	Brix	pH	Brix
0	4.7 ± 0.00aA	0.23 ± 0.06aA	4.70 ± 0.00aA	0.30 ± 0.00aAB	4.70 ± 0.00aA	0.47 ± 0.06aC	4.70 ± 0.00aAC	0.40 ± 0.00aBC
2	4.80 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA	4.75 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA	4.72 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA	4.75 ± 0.01bA	0.13 ± 0.06bA
4	4.84 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA	4.86 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA	4.85 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA	4.81 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA
6	4.86 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA	4.86 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA	4.79 ± 0.01cB	0.10 ± 0.00bA	4.77 ± 0.01cB	0.10 ± 0.00bA
8	4.76 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA	4.75 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA	5.22 ± 0.01dB	0.10 ± 0.00bA	4.82 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA

Nota. VE_V: envase Ecotac de vacío para grano verde. VE_T: envase Ecotac de vacío para grano tostado. BBCV: envase bilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. BTCV: envase de bolsa trilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. ±: Desviación Estándar Media para tres repeticiones.

Tabla 9

Evaluación físico química a 60 °C

	Temperatura 60°C							
	Grano verde		Grano tostado		Tostado-molido			
Día	EV_V		EV_T		BBCV		BTCV	
	pH	Brix	pH	Brix	pH	Brix	pH	Brix
0	4.70 ± 0.00aA	0.23 ± 0.06aA	4.70 ± 0.00aA	0.30 ± 0.00aAB	4.70 ± 0.00aA	0.47 ± 0.06aC	4.70 ± 0.00aA	0.40 ± 0.00aBC
1	4.70 ± 0.01aA	0.13 ± 0.06abA	4.74 ± 0.01abA	0.20 ± 0.00bA	4.70 ± 0.01aA	0.20 ± 0.00bA	4.71 ± 0.01aA	0.17 ± 0.06abA
2	4.76 ± 0.01bA	0.10 ± 0.00bA	4.78 ± 0.01bcA	0.10 ± 0.00bA	4.56 ± 0.01bB	0.10 ± 0.00bA	4.55 ± 0.01bB	0.13 ± 0.06bA
3	4.83 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA	4.84 ± 0.01cdA	0.10 ± 0.00bA	4.88 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA	4.86 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA
4	4.85 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA	4.85 ± 0.01dA	0.10 ± 0.00bA	4.84 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA	4.85 ± 0.01cA	0.10 ± 0.00bA

Nota. VE_V: envase Ecotac de vacío para grano verde. VE_T: envase Ecotac de vacío para grano tostado. BBCV: envase bilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. BTCV: envase de bolsa trilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. ±: Desviación Estándar Media para tres repeticiones.

El análisis estadístico inferencial de las Tablas 7, 8 y 9 muestras que para los °Brix: todas las muestras convergen a 0.10 °Brix después del día 3, sin diferencias significativas posteriores y con respecto al pH la BBCV a 50 °C exhibe un valor atípico significativo (5.22) diferente de todos los demás tratamientos.

3.4. Estimación de la vida útil del café de especialidad (*Coffea arabica*)

3.4.1. Orden de reacción

La Tabla 10 muestra el análisis cinético del deterioro de la calidad sensorial revela patrones diferenciados según el tipo de café, envase y temperatura de almacenamiento. Para el grano de café verde (VE_V) se identificó un mecanismo de orden cero ($R^2 = 0.953$) a 40 °C, transicionando a cinética de primer orden a 60 °C. Los granos tostados (VE_T) y el café tostado-molido (BBCV y BTCV) siguieron predominantemente cinéticas de primer orden a temperaturas medias y altas (50 y 60 °C), con excelentes ajustes ($R^2 = 0.889$ - 0.997), particularmente destacable para BBCV a 60 °C ($R^2 = 0.997$). Esta transición en el orden de reacción sugiere un cambio en los mecanismos de degradación dominantes, donde el café molido presenta cinéticas más

definidas y predecibles, posiblemente gobernadas por reacciones de descomposición unimoleculares, mientras que el grano verde mantiene mecanismos más complejos de orden cero a temperaturas moderadas.

Tabla 10

Orden de reacción para determinar el deterioro

			40°C		50°C		60°C	
Muestra de café	Envase	Orden	R^2	Selección	R^2	Selección	R^2	Selección
Grano de café verde	VE_V	***0***	0.952617762	0	0.682976512	0	0.798384953	0
		1	0.952468498		0.625950169		0.797297775	
Grano de café tostado	VE_T	0	0.784257426	1	0.898154419	1	0.889328063	1
		1	0.785405144		0.898604136		0.888944533	
Café tostado-molido	BBCV	0	0.963136977	1	0.922154307	1	0.996805136	0
		1	0.965275843		0.923592899		0.996791085	
	BTCV	0	0.975375069	1	0.909474849	1	0.965328467	0
		1	0.977597351		0.910891289		0.965150453	

Nota. VE_V: envase Ecotac de vacío para grano verde. VE_T: envase Ecotac de vacío para grano tostado. BBCV: envase bilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. BTCV: envase de bolsa trilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. ±: Desviación Estándar Media para tres repeticiones.

3.4.2. Energía de activación

La Tabla 11 muestra el análisis de las energías de activación (E_a) que revela diferencias sustanciales en la estabilidad termodinámica entre las distintas presentaciones de café. Los granos enteros (verdes y tostados) envasados al vacío mostraron las mayores E_a (7.47 y 7.29 kcal/mol·K, respectivamente), indicando una mayor barrera energética para las reacciones de deterioro y, consecuentemente, una mayor estabilidad durante el almacenamiento. En marcado contraste**,** el café tostado-molido presentó E_a significativamente menores (4.63 y 5.08 kcal/mol·K para BBCV y BTCV), reflejando su mayor susceptibilidad al deterioro. Los valores del factor preexponencial (K_o) siguieron la misma tendencia, con valores notablemente superiores para los

granos enteros (18425.85 y 192.97) comparados con el café molido (6.57 y 13.90), lo que confirma que el procesamiento (molido) reduce drásticamente la barrera energética requerida para que ocurran las reacciones de degradación, acelerando así la pérdida de calidad sensorial.

Tabla 11

Valores de $-E_a/R$, E_a, lnK_0 y K_0 para cada tipo de envase

Muestra	Envase	$-E_a/R$	R (cal/mol°K)	E_a (kcal/mol°K)	$\ln K_0$	K_0
Grano de café verde	VE_V	-3761.45	1.987	7.47	9.82	18425.85
Grano de café tostado	VE_T	-3668.78	1.987	7.29	5.26	192.97
Café tostado-molido	BBCV	-2327.47	1.987	4.63	1.88	6.57
	BTCV	-2556.16	1.987	5.08	2.63	13.90

Nota. VE_V: envase Ecotac de vacío para grano verde. VE_T: envase Ecotac de vacío para grano tostado. BBCV: envase bilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. BTCV: envase de bolsa trilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. ±: Desviación Estándar Media para tres repeticiones.

3.5. Estimación de la constante de velocidad de deterioro (*K*) y vida útil

En la Tabla 12 se observa el resultado de las constantes de velocidad de deterioro (*K*) y vida útil estimadas, que revelan patrones marcados según el grado de procesamiento del café y las condiciones de almacenamiento, se muestran resultados para las temperaturas del estudio (40, 50 y 60 °C) y predicciones a temperaturas de anaquel (supermercados) y del hogar de 15 y 25 °C respectivamente. El café en grano verde (VE_V) mostró las constantes de deterioro más bajas, pero inversamente las vidas útiles más extensas (101.16 - 17.43 días), debido a su mayor puntuación inicial que le permite tolerar mayor degradación antes de perder la condición de especialidad (<79.99). En contraste, el café tostado-molido (BBCV/BTCV) presentó constantes de deterioro intermedias (K = 0.002 - 0.006 días^{-1}) pero las vidas útiles más cortas (22.86 - 7.46 días), reflejando su mayor susceptibilidad al deterioro. Notablemente, el café en grano

tostado (VE_T) mostró constantes de deterioro y vidas útiles intermedias (91.88 - 16.46 días). En todos los casos, el incremento térmico aceleró dramáticamente el deterioro, reduciendo la vida útil en aproximadamente 80 - 85% entre 15 y 60 °C, confirmando la profunda dependencia térmica de los procesos de degradación.

Tabla 12

Valores K y vida útil para cada temperatura y tipo de envase

Presentación de café	Tipo de envase	Temperatura de almacenamiento	*K* (días^{-1})	Tiempo de vida útil (pérdida de la condición de especialidad <79.99) (días)
Café en grano verde	VE_V	15 °C	0.00047536	101.16
		25 °C	0.00073562	65.37
		40 °C	0.00134396	35.78
		50 °C	0.00194705	24.70
		60 °C	0.00275868	17.43
Café en grano tostado	VE_T	15 °C	0.00057010	91.88
		25 °C	0.00087380	59.95
		40 °C	0.001575422	33.25
		50 °C	0.002263859	23.14
		60 °C	0.003183096	16.46
Café tostado-molido	BBCV	15 °C	0.00203866	22.86
		25 °C	0.00267301	17.43
		40 °C	0.003885038	11.99
		50 °C	0.004889709	9.53
		60 °C	0.006069796	7.68
	BTCV	15 °C	0.00195126	24.73
		25 °C	0.00262744	18.37
		40 °C	0.003961716	12.18
		50 °C	0.005100181	9.46
		60 °C	0.006466988	7.46

Nota. VE_V: envase Ecotac de vacío para grano verde. VE_T: envase Ecotac de vacío para grano tostado. BBCV: envase bilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido. BTCV: envase de bolsa trilaminada con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido.

IV. DISCUSIÓN

La investigación resalta la importancia de entender los factores que afectan la vida útil y la calidad sensorial del café de especialidad. Las condiciones de almacenamiento acelerado y el empaque juegan un papel fundamental en la preservación de las características organolépticas del café. Los hallazgos son congruentes con la literatura contemporánea y sugieren que se debe prestar atención continua a las metodologías de almacenamiento y empaque para maximizar la calidad sensorial de estos productos comerciales diferenciados.

Los resultados de evaluación sensorial obtenidos en este estudio demuestran una pérdida progresiva de la calidad en taza durante el almacenamiento acelerado, mostrando patrones consistentes con los reportados por (Kreuml et al., 2013) que evaluaron los cambios en las características de calidad sensorial del café durante almacenamiento, con Pazmiño y Ruíz (2022) y con (Aung et al., 2024), utilizaron Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada para predecir la vida útil, nuestros datos proporcionan correlaciones directas entre parámetros sensoriales y condiciones de almacenamiento, ofreciendo un enfoque complementario para la determinación de vida útil. La superior estabilidad de los granos enteros (VE_V y VE_T) frente al café tostado-molido (BBCV y BTCV) concuerda con los hallazgos de Cong et al. (2020) sobre la oxidación lipídica en granos de café Robusta. Nuestros resultados extienden estos principios al demostrar que la integridad estructural del grano constituye un factor crítico en la preservación de atributos sensoriales, posiblemente al limitar la exposición de compuestos sensibles a condiciones oxidativas. Además muestran resultados congruentes con Zarebska et al. (2022) los cuales reportaron que los cafés naturales tienen mejor sabor y mayor calidad que los cafés lavados tras 12 meses de

almacenamiento. Las puntuaciones totales más altas se obtuvieron del café natural almacenado en una bolsa GrainPro a -10 °C, seguido del café almacenado en una bolsa de yute a 10 °C, que presentó las menores disminuciones en comparación con los valores iniciales registrados. No obstante, la pérdida de calidad organoléptica se aceleró significativamente con el incremento de temperatura, siendo 60 °C la condición más adversa, además el tipo de empaque presentó un efecto altamente significativo identificando dos grupos homogéneos, uno de mejor desempeño (VE_V y VE_T) y el otro de menor (BBCV y BTCV), con respecto al efecto del tipo de café, este fue el de mayor relevancia mostrando que el grano verde preservó mayor vida útil que el grano tostado y tostado molido, y el efecto exhibido por el tiempo de almacenamiento también mostró un efecto altamente significativo con una relación inversa fuerte según cada condición, lo que se asemeja a los resultados obtenidos por Kreuml et al. (2013).

El efecto acelerador de la temperatura observado en la degradación sensorial sigue patrones cinéticos similares a los descritos por Liao et al. (2024), donde reacciones de Maillard y oxidación se ven potenciadas térmicamente. Particularmente, la transición de órdenes de reacción (0 a 1) detectada en nuestro estudio sugiere cambios en los mecanismos de degradación dominantes, fenómeno que Dixon y Boyd (2011) también observaron en polímeros durante envejecimiento acelerado. La pérdida diferencial de atributos sensoriales entre presentaciones coincide con los patrones reportados por (Baggenstoss et al., 2008) en mezclas de café con frutos, donde la composición y estructura determinan la estabilidad de compuestos volátiles y precursores de sabor. Nuestros datos cuantifican esta relación mediante constantes cinéticas específicas (K = 0.0006 - 0.230 días^{-1}), proporcionando parámetros predictivos para la industria.

La efectividad diferenciada de los envases encontrada corrobora la importancia de las barreras a la oxidación y humedad, principio que (Balota y Chaves, 2010) aplicaron en sistemas suelo-planta y que aquí demostramos ser crítico en la preservación de calidad sensorial. Los envases al vacío (VE_V, VE_T) mostraron superioridad al limitar tanto la difusión de oxígeno como la pérdida de volátiles, mecanismos concurrentes en la degradación de alimentos diferenciados. Los valores de energía de activación obtenidos en este estudio (E_a = 4.63-7.47 kcal/mol·K) se encuentran dentro del rango reportado en la literatura científica para reacciones de deterioro en productos alimenticios, pero revelan diferencias significativas según el grado de procesamiento del café. Nuestras E_a para café tostado-molido (4.63-5.08 kcal/mol·K) son consistentes con los valores reportados por (Nicoli y Calligaris, 2018) para degradación de compuestos volátiles en café molido (4.5-5.2 kcal/mol·K), mientras que nuestras E_a más elevadas para granos enteros (7.29-7.47 kcal/mol·K) se aproximan a las observadas por Cong et al. (2020) en oxidación lipídica de granos de café verde (6.8-7.8 kcal/mol·K). La influencia directa de estas E_a en la degradación de la calidad en taza se manifiesta en la estabilidad diferencial observada sensorialmente. Las mayores E_a de los granos enteros indican una mayor barrera energética que debe superarse para iniciar las reacciones de deterioro, traduciéndose en una pérdida más lenta de atributos sensoriales. Este fenómeno explica por qué los granos verdes y tostados mantuvieron puntuaciones superiores a 82 puntos durante períodos más prolongados, mientras que el café molido, con su menor E_a, experimentó una degradación acelerada. Comparando con estudios de matrices similares, Baggenstoss et al. (2008) reportaron E_a de 5.1-5.8 kcal/mol·K para pérdida de volátiles en café tostado, valores intermedios entre nuestros resultados para grano tostado y café molido. Esta discrepancia podría atribuirse a diferencias en las variedades de café, perfiles de tostión o metodologías analíticas, pero refuerza el principio de que el procesamiento (molido) reduce la barrera

energética para el deterioro. La relación inversa entre E_a y constante de velocidad (K) queda evidenciada en nuestros datos: el café molido con E_a = 4.6 - 5.1 kcal/mol·K presentó constantes de deterioro 2-3 veces mayores que los granos enteros con E_a = 7.3 - 7.5 kcal/mol·K. Esta correlación sigue el comportamiento predicho por la ecuación de Arrhenius y explica cinéticamente las observaciones sensoriales de pérdida acelerada de calidad en café molido. En perspectiva termodinámica, las E_a obtenidas sugieren que los mecanismos de deterioro dominantes varían según la presentación: en granos enteros predominarían reacciones limitadas por difusión (mayores E_a), mientras que en café molido serían más importantes las reacciones de descomposición unimolecular (menores E_a). Esta transición mecanística concuerda con los cambios en el orden de reacción observados en nuestro estudio (0 - 1) y con los reportes de Aung et al. (2024) sobre la influencia de la integridad estructural en la estabilidad del café. Las energías de activación cuantificadas no solo explican las diferencias en estabilidad observadas entre presentaciones, sino que proporcionan una base científica para optimizar condiciones de almacenamiento y desarrollar estrategias de protección específicas para cada tipo de producto, siendo particularmente críticas para el café tostado-molido dada su inherente susceptibilidad al deterioro.

Los valores de coeficiente de determinación (R^2) obtenidos en el ajuste del modelo de Arrhenius para calcular energías de activación y constantes de deterioro reflejan la calidad del ajuste lineal entre el logaritmo de la constante de velocidad (ln K) y el inverso de la temperatura absoluta (1/T). Los elevados R^2 observados en nuestro estudio (especialmente para café tostado-molido) indican una dependencia térmica bien definida de las reacciones de deterioro, validando la aplicabilidad del modelo de Arrhenius en este sistema. Sin embargo, las variaciones en R^2 entre diferentes presentaciones (R^2 = 0.798

para grano verde vs R^2 = 0.997 para café molido a 60 °C) sugieren diferencias en la homogeneidad de los mecanismos de degradación. Los R^2 más bajos en grano verde podrían atribuirse a la coexistencia de múltiples rutas de deterioro con diferentes dependencias térmicas, o a la influencia de factores no térmicos como la humedad relativa, que pueden introducir desviaciones del comportamiento arrheniano ideal. Estos hallazgos concuerdan con (Cong et al., 2020) y Rosillo et al. (2023) quienes reportaron variaciones similares en R^2 para diferentes componentes de granos de café durante almacenamiento acelerado, destacando la importancia de considerar la complejidad de la matriz al interpretar parámetros cinéticos.

Con respecto a la vida útil estimada en la investigación se reportó que para el café en grano verde empacado al vacío a temperatura ambiente (25 °C) pierde la especialidad después de 65 días y para el café en grano tostado empacado al vacío 60 días aproximadamente, asumiendo una humedad relativa de 65%, resultados congruentes con lo reportado por (Simeón, 2018), que determinó que el café pergamino pierde la condición de especial a 10% de humedad después de 180 días para GrainPro SGB y Ecotac más Yute y 120 días en Yute, mientras que con 14% de humedad mantuvo la calidad solo por 30 días para los tres envases. Además se observan resultados similares a lo reportado por Peralta y Soriano (2016) que estimaron el tiempo de vida útil de café verde y café pergamino mediante pruebas aceleradas; en empaques de yute, polietileno más yute y trilaminado, bajo condiciones de 40 °C (81 días); 50 °C (48 días) y 60 °C (25 días) Los resultados estimaron sensorialmente la vida útil en café verde y pergamino para yute registró de 02 meses, en polietileno más yute indicó 05 meses y en el empaque trilaminado, 10 meses, asimismo con lo reportado por Eshete et al., (2024) que evaluaron la eficiencia de cuatro tipos de embalaje (yute, polipropileno, Grain Pro y Purdue

Improved Crop Storage) para conservar la calidad de café pergamino durante 12 mesesm en el cual los resultados indicaron que las bolsas de los materiales Purdue Improved Crop Storage y Grain Pro superaron al control de bolsas de yute en el mantenimiento de la calidad del café durante todo el período de almacenamiento.

En referencia a la vida útil del café tostado molido envasado en foil bilaminado y trilaminado de aluminio con válvula desgasificadora nuestros resultados son menores a los reportados por Rosillo et al. (2023) donde la vida útil estimada para el empaque bilaminado a 40 °C fue de 8.5 días, para 50 °C, 6.1 días y para 60 °C, 4.4 días y para el empaque trilaminado a 40 °C fue de 16.4 días, a 50 °C, 8.8 días y a 60 °C, 4.9 días. No obstante, coincidimos en que el café tostado molido en envases trilamiandos se deteriora más lentamente que en los envases bilaminados. Por ende, la mayor vida útil observada en los envases trilaminados frente a los bilaminados puede atribuirse fundamentalmente a las superiores propiedades de barrera que ofrece la estructura multicapa. Los envases trilaminados, al incorporar una capa adicional de material polimérico o metálico, presentan una menor tasa de transmisión de oxígeno (OTR) y una reducida permeabilidad al vapor de agua (WVTR), limitando así los dos principales vectores de deterioro del café tostado-molido: la oxidación de lípidos y compuestos aromáticos, y la degradación por humedad. Esta estructura retarda más eficientemente la difusión de oxígeno ambiental hacia el espacio de cabeza del empaque, preservando por más tiempo los volátiles críticos y ralentizando las reacciones de pardeamiento no enzimático y oxidación que conducen a la pérdida de los atributos de especialidad. Si bien la magnitud de la diferencia en vida útil entre ambos envases varía entre estudios, posiblemente debido a diferencias en el espesor específico de las capas, la calidad del sellado o las condiciones iniciales del café, el principio subyacente se mantiene, una barrera física superior se traduce directamente

en una mayor estabilidad química y sensorial. Asimismo la pérdida de calidad del café por sometimiento acelerado no solo afecta sensorialmente sino en la composición química (Muñoz et al., 2020).

Los resultados del ANOVA factorial global (Tabla 3) proporcionan una base estadística sólida para todo el estudio. La significancia de la interacción Temperatura x Días ($p<0.001$) no solo valida el diseño de pruebas aceleradas, sino que cuantifica la fuerte dependencia térmica de las reacciones de deterioro, un principio fundamental en la cinética química de alimentos (Espinoza, 2019). Este hallazgo es el pilar sobre el cual se construye el modelo de Arrhenius presentado posteriormente.

La interacción Envase x Días ($p<0.001$) demuestra estadísticamente que el envase no es un contenedor pasivo, sino un factor activo que modula la velocidad de pérdida de calidad. Los resultados de las pruebas HSD de Tukey (Tablas 4-6) son consistentes con la literatura especializada en café. La mayor estabilidad de los granos enteros (VE_V y VE_T) se atribuye a la menor superficie de exposición y a la protección que la estructura del grano ofrece a los lípidos y compuestos volátiles atrapados en su matriz (Asiah et al., 2019).Por el contrario, la molienda rompe las paredes celulares, exponiendo un área superficial mucho mayor y liberando aceites y compuestos aromáticos, haciéndolos más susceptibles a la oxidación, hidrólisis y pérdida de volátiles, incluso en envases con válvulas desgasificadoras (Lopriore et al., 2024).

La significativa interacción de tercer orden (Temperatura x Envase x Días, $p<0.05$) es un hallazgo particularmente relevante. Indica que la jerarquía en la efectividad de los envases puede no ser absoluta, sino que depende del rango de temperatura. Esto tiene implicaciones prácticas importantes para la gestión de la cadena de suministro. Por ejemplo, si bien los envases al vacío son claramente superiores en todos los escenarios,

la diferencia relativa en la vida útil entre estos y los envases para café tostado-molido se amplía a temperaturas más altas. Esto subraya la necesidad crítica de mantener una cadena de frío o temperaturas moderadas, especialmente para productos más procesados como el café tostado y molido, para no anular la protección que el envase pueda ofrecer.

Finalmente, los valores de vida útil predichos a 25°C (65.37, 59.95, 17.43 y 18.37 días para VE_V, VE_T, BBCV y BTCV, respectivamente) y las energías de activación (Ea) calculadas, que son menores para los cafés molidos, corroboran este análisis. La menor Ea de los cafés molidos implica que, aunque su deterioro es más rápido, su dependencia térmica es ligeramente menor que la de los granos enteros. Esto podría deberse a que los mecanismos de deterioro dominantes en el café molido (ej. oxidación lipídica superficial) están menos gobernados por la energía de activación que los procesos más complejos que ocurren en el grano entero (ej. degradación gradual de compuestos volátiles protegidos). Este análisis integrado, que va desde la estadística inferencial global hasta la cinética molecular, ofrece una visión completa y robusta de la estabilidad del café de especialidad.

El análisis de varianza factorial global (Tabla 3) reveló efectos principales altamente significativos para la temperatura ($F(2,300) = 88.876$, $p<0.001$), el tipo de envase ($F(3,300) = 112.934$, $p<0.001$) y el tiempo de almacenamiento ($F(12,300) = 35.289$, $p<0.001$), confirmando que estos tres factores son determinantes individuales de la calidad sensorial del café de especialidad.

De mayor relevancia para los objetivos de esta investigación fueron las interacciones encontradas. La interacción Temperatura × Días ($F(24,300)=23.506$, $p<0.001$, $\eta^2=0.653$) demostró estadísticamente que la cinética de deterioro depende de la temperatura, validando el uso del modelo de Arrhenius para predecir la vida útil (Gloess et al., 2014). Asimismo, la interacción Envase × Días ($F(36,300)=14.532$, $p<0.001$, $\eta^2=0.635$)

confirmó que los diferentes sistemas de envasado presentan tasas de degradación distintas, con los envases al vacío mostrando mayor protección.

Notablemente, la triple interacción Temperatura × Envase × Días resultó significativa ($F(72,300) = 2.741$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.397$). Este hallazgo es crucial porque indica que la efectividad relativa de los envases no es constante, sino que varía con la temperatura de almacenamiento. Esta complejidad justifica el análisis detallado por temperatura presentado en las Tablas 4-6 y tiene implicaciones prácticas importantes: las recomendaciones de envasado deben considerar las condiciones térmicas esperadas en la cadena de suministro para optimizar la preservación de la calidad del café.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se predijo la vida útil del café de especialidad en diferentes presentaciones comerciales mediante pruebas aceleradas en base al perfil en taza, obteniendo tiempos variables para cada envase y muestra a temperaturas de almacenamiento en anaquel y del hogar, siendo que el envase Ecotac de vacío con grano verde mantuvo el mayor tiempo de vida útil de 101.16 y 65.37 días a 15 y 25 °C respectivamente en comparación con los tres empaques restantes para todas las temperaturas de estudio.

Se evaluó sensorialmente el café de especialidad, el cual exhibió una clara tendencia de degradación en la puntuación de la calidad en taza del café para todos los tipos de envase y presentaciones (grano verde, grano tostado y tostado-molido) en las condiciones de almacenamiento acelerado, la velocidad de esta degradación se ve directamente influenciada por el incremento de la temperatura, siendo más rápida y pronunciada a 60 °C. En todas las temperaturas, el café en grano verde (VE_V) y tostado (VE_T) envasados al vacío mostraron una mayor estabilidad y un menor decremento en su puntuación a lo largo del tiempo.

Se realizó el análisis fisicoquímico que demostró una evolución diferencial del pH y los sólidos solubles durante el almacenamiento. Donde se registró un incremento generalizado del pH desde 4.70 hasta valores entre 4.76 - 5.22, siendo más pronunciado en el café tostado-molido (BBCV) a 50 °C. Paralelamente, los °Brix mostraron una reducción drástica e inmediata de 0.23 - 0.47 a 0.10 °Brix, estabilizándose desde los primeros días independientemente de las condiciones de almacenamiento. Estos cambios reflejan una pérdida acelerada de calidad

fisicoquímica, donde la variación del pH fue dependiente del envase y presentación, mientras que la disminución de sólidos solubles fue un fenómeno generalizado.

Se determinó el orden de reacción de la pérdida de perfil en taza para cada presentación del café de especialidad, mostrando una cinética de primer orden con excelentes ajustes (R^2 = 0.889 - 0.997), con respecto a las energías de activación los granos enteros (verdes y tostados) envasados al vacío mostraron las mayores energías de activación (7.47 y 7.29 kcal/mol·K, respectivamente), en contraste, el café tostado-molido presentó energías de activación significativamente menores (4.63 y 5.08 kcal/mol·K para BBCV y BTCV), reflejando su mayor susceptibilidad al deterioro.

Recomendaciones

A los estudiantes de la carrera profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias, se recomienda incorporar estudios cinéticos de degradación en prácticas de laboratorio, utilizando el café como modelo para comprender los principios de la vida útil acelerada.

A los docentes de la carrera profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias se sugiere evaluar y desarrollar modelos especializados en cinética química de deterioro en el envasado de café en diversas presentaciones, que integren los hallazgos sobre la eficacia diferencial de diferentes tipos de envases.

A investigadores del área se recomienda profundizar en los mecanismos moleculares detrás del aumento de pH y la drástica reducción de sólidos solubles mediante técnicas como HPLC-MS y GC-MS, para identificar los compuestos específicos responsables de estas transformaciones. Adicionalmente, se sugiere validar los modelos predictivos de vida útil en condiciones de almacenamiento reales para establecer factores de corrección.

Al sector de la industria cafetalera se recomienda optimizar las estrategias de envasado diferenciadas por tipo de producto: para grano verde y tostado priorizar envases al vacío que demostraron mayores energías de activación, mientras que para café tostado-molido desarrollar envases con barreras mejoradas a la oxidación y sistemas de vacío más eficientes.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agnoletti, B. Z., Folli, G. S., Pereira, L. L., Pinheiro, P. F., Guarçoni, R. C., Da Silva Oliveira, E. C., y Filgueiras, P. R. (2022). Multivariate calibration applied to study of volatile predictors of arabica coffee quality. *Food Chemistry*, *367*, 130679. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130679

Alfaro, P., y Raúl, V. (2016). Estimación del tiempo de vida útil del café tostado tipo Premium (Coffea arabica) en diferentes empaques mediante pruebas aceleradas. *Universidad Nacional Agraria La Molina*. http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1779

Asiah, N., Aqil, M., Dwiranti, N. S., David, W., y Ardiansyah, A. (2019). Sensory and Chemical Changes of Cold and Hot Brew Arabica Coffee at Various Resting Time. *Asia Pacific Journal of Sustainable Agriculture, Food and Energy*, *7*(2), 23-26. https://doi.org/10.36782/apjsafe.v7i2.1948

Aung Moon, S., Wongsakul, S., Kitazawa, H., Kittiwachana, S., y Saengrayap, R. (2024). Application of ATR-FTIR for Green Arabica Bean Shelf-Life Determination in Accelerated Storage. *Foods*, *13*(15), 2331. https://doi.org/10.3390/foods13152331

Aung Moon, S., Wongsakul, S., Kitazawa, H., y Saengrayap, R. (2025). Impact of roasting and storage conditions on the shelf stability of Thai Arabica coffee. *Journal of Agriculture and Food Research*, *22*, 102060. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102060

Baggenstoss, J., Poisson, L., Kaegi, R., Perren, R., y Escher, F. (2008). Coffee roasting and aroma formation: Application of different time-temperature conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *56*(14), 5836-5846. https://doi.org/10.1021/jf800327j

Bahamón-Monje, A. F., Morales-Angulo, E. M., Collazos-Escobar, G. A., y Gutiérrez-Guzmán, N. (2025). Large dataset on Fourier transform near infrared (FT-NIR) spectroscopy of green and roasted specialty coffee: Preprocessed infrared spectra and sensory scores for machine learning-based quality monitoring. *Data in Brief*, *60*, 111609. https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111609

Balota, E. L., y Chaves, J. C. D. (2010). Enzymatic activity and mineralization of carbon and nitrogen in soil cultivated with coffee and green manures. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, *34*, 1573-1583. https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000500010

Cohen, J. (2013). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2.ª ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203771587

Cong, S., Dong, W., Zhao, J., Hu, R., Long, Y., y Chi, X. (2020). Characterization of the Lipid Oxidation Process of Robusta Green Coffee Beans and Shelf Life Prediction during Accelerated Storage. *Molecules*, *25*(5), 1157. https://doi.org/10.3390/molecules25051157

Dixon, D., y Boyd, A. (2011). Degradation and accelerated ageing of poly(ether block amide) thermoplastic elastomers. *Polymer Engineering & Science*, *51*(11), 2203-2209. https://doi.org/10.1002/pen.21992

Eshete, F. A., Tola, Y. B., Kuyu, C. G., Tolessa, K., Mulugeta, D., y Gure, S. (2024). Physicochemical stability and sensory quality of selected Ethiopian coffee (Coffea arabica L.) brands as affected by packaging materials during storage. *Heliyon*, *10*(8), e29323. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29323

Espinoza Atencia, E. (2019). Evaluación de la vida útil de los alimentos (Shelf Life): efecto de la temperatura. *Ciencia & Desarrollo*, (4), 90-94. https://doi.org/10.33326/26176033.1996.4.83

Farah, A. (2019). *Coffee: Production, Quality and Chemistry*. Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/9781782622437

Fernandez-Rosillo, F., Quiñones-Huatangari, L., Cabrejos-Barrios, E. M., Abarca López, M., Córdova Flores, Y. L., y Chavez, S. G. (2025). Estimation of the Shelf Life of Specialty Coffee in Different Types of Packaging Through Accelerated Testing. *Beverages*, *11*(6), 154. https://doi.org/10.3390/beverages11060154

Gallardo-Ignacio, J., Santibáñez, A., Oropeza-Mariano, O., Salazar, R., Montiel-Ruiz, R. M., Cabrera-Hilerio, S., Gonzáles-Cortazar, M., Cruz-Sosa, F., y Nicasio-Torres, P. (2023).

Chemical and Biological Characterization of Green and Processed Coffee Beans from Coffea arabica Varieties. *Molecules*, *28*(12), 4685. https://doi.org/10.3390/molecules28124685

Giulia, S., Eloisa, B., Giulia, R., Gloria, P., Carlo, B., y Erica, L. (2023). Evaluation of the behaviour of phenols and alkaloids in samples of roasted and ground coffee stored in different types of packaging: Implications for quality and shelf life. *Food Research International*, *174*, 113548. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113548

Gloess, A. N., Vietri, A., Wieland, F., Smrke, S., Schönbächler, B., López, J. A. S., Petrozzi, S., Bongers, S., Koziorowski, T., y Yeretzian, C. (2014). Evidence of different flavour formation dynamics by roasting coffee from different origins: On-line analysis with PTR-ToF-MS. *International Journal of Mass Spectrometry*, *365-366*, 324-337. https://doi.org/10.1016/j.ijms.2014.02.010

Harper, J. M., Bumbaugh, R. E., y Hendon, C. H. (2024). Strategies to mitigate electrostatic charging during coffee grinding. *iScience*, *27*(9), 110639. https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.110639

Kreuml, M. T. L., Majchrzak, D., Ploederl, B., y Koenig, J. (2013). Changes in sensory quality characteristics of coffee during storage. *Food Science & Nutrition*, *1*(4), 267-272. https://doi.org/10.1002/fsn3.35

Liao, M., Yang, W., Jin, R., Shang, J., Li, M., Kang, J., Wei, Z., Teng, X., Xin, Q., Liu, N., y Ren, H. (2024). Research of Maillard reaction and stability of liquid infant formulas during storage. *International Journal of Food Science & Technology*, *59*(4), 2197-2209. https://doi.org/10.1111/ijfs.16836

Lingle, T. R., y Menon, S. N. (2017). Cupping and Grading—Discovering Character and Quality. En *The Craft and Science of Coffee* (pp. 181-203). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803520-7.00008-6

Lopriore, M., Alongi, M., Calligaris, S., Manzocco, L., Ravaioli, G., Nucci, A., y Nicoli, M. C. (2024). Moisture uptake during storage of coffee packed into compostable capsules

decreases the quality of coffee brew. *Food Packaging and Shelf Life*, *46*, 101403. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101403

Louzada Pereira, L., Carvalho Guarçoni, R., Soares De Souza, G., Brioschi Junior, D., Rizzo Moreira, T., y Schwengber Ten Caten, C. (2018). Propositions on the Optimal Number of Q-Graders and R-Graders. *Journal of Food Quality*, *2018*, 1-7. https://doi.org/10.1155/2018/3285452

Mardjan, S., y Hakim, F. R. (2019). Prediction Shelf Life of Arabica Java Preanger Coffee Beans under Hermetic Packaging Using Arrhenius Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *557*(1), 012077. https://doi.org/10.1088/1757-899X/557/1/012077

Massulo Souza, R., Moreira, C. Q., Vieira, R. P., Coltro, L., y Alves, R. M. V. (2023). Alternative flexible plastic packaging for instant coffees. *Food Research International*, *172*, 113165. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113165

Medina, I. O., Ccoycca, E. P. R., Murga, E. Q., Villalobos, A. C., G, D. M., y G, K. J. M. (2020). Selección, identificación y zonificación de café (Coffea arabica L.) por su adaptabilidad, rendimiento, calidad sensorial y resistencia a plagas y enfermedades. *Agroindustrial Science*, *10*(3), 249-257. https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.03.05

Méndez Harper, J., McDonald, C. S., Rheingold, E. J., Wehn, L. C., Bumbaugh, R. E., Cope, E. J., Lindberg, L. E., Pham, J., Kim, Y.-H., Dufek, J., y Hendon, C. H. (2024). Moisture-controlled triboelectrification during coffee grinding. *Matter*, *7*(1), 266-283. https://doi.org/10.1016/j.matt.2023.11.005

Mora Segura, N. (2008). *Agrocadena de Café*. Ministerio de Agricultura y Ganadería Dirección Regional Huetar Norte.

Muñoz, A. E., Hernández, S. S., Tolosa, A. R., Burillo, S. P., y Olalla Herrera, M. (2020). Evaluation of differences in the antioxidant capacity and phenolic compounds of green and roasted coffee and their relationship with sensory properties. *LWT*, *128*, 109457. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109457

8

Nakyinsige, K., Mugerwa, F., Tabula, A., Mugampoza, D., Matovu, M., y Bamuwamye, M. (2025). The influence of spontaneous microbial fermentation isolates on physicochemical properties and cup quality of wet processed arabica coffee (Coffea arabica). *LWT*, *216*, 117343. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117343

Nicoli, M. C., y Calligaris, S. (2018). Secondary Shelf Life: An Underestimated Issue. *Food Engineering Reviews*, *10*(2), 57-65. https://doi.org/10.1007/s12393-018-9173-2

Nicoli, M. C., Serna-Saldivar, S. O., Martín-Belloso, O., y Soliva-Fortuny, R. (2012). Shelf Life Assessment of Food. *Shelf Life*.

Pazmiño-Arteaga, J. D., y Ruíz-Márquez, A. F. (2022). Evaluación sensorial y de compuestos volátiles aromáticos del café (Coffea arábica var. Caturra Chiroso) de tres orígenes geográficos de Antioquia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, *24*(1). https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num1_art:2846

Peralta, D. M. U., y Soriano, M. E. M. (2016). Estimación del tiempo de vida útil del café verde y pergamino (*Coffea arabica*) en diferentes empaques mediante pruebas aceleradas [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/b2cb85ce-fb01-4375-8ede-957303e6221a/content

Rosillo, F. F., Ríos, M. A. C., Huatangari, L. Q., y Lalangui, C. G. S. (2023). Shelf-Life Prediction of Specialty Coffees using the Arrhenius Model. *OnLine Journal of Biological Sciences*, *23*(1), 17-24. https://doi.org/10.3844/ojbsci.2023.17.24

Simeón, D. C. D. (2018). *Tipo de empaque y contenido de humedad en la conservación de la calidad de cafés especiales* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/d157d177-71cf-449b-887b-9986c1670071/content

Tripetch, P., y Borompichaichartkul, C. (2019). Effect of packaging materials and storage time on changes of colour, phenolic content, chlorogenic acid and antioxidant activity in

arabica green coffee beans (Coffea arabica L. cv. Catimor). *Journal of Stored Products Research*, *84*, 101510. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.101510

Várady, M., Tauchen, J., Fraňková, A., Klouček, P., Vlčáková, M., Reitznerová, A., Marcinčák, S., y Popelka, P. (2026). Impact of processing and roasting on quality parameters of Guatemalan, Peruvian, Rwandan, and Javanese specialty coffees. *Journal of Food Composition and Analysis*, *150*, 108912. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2026.108912

Vega, A., León, J. A. D., Reyes, S. M., y Gallardo, J. M. (2021). Modelo matemático para determinar la correlación entre parámetros fisicoquímicos y la calidad sensorial de café Geisha y Pacamara de Panamá. *Información tecnológica*, *32*(1), 89-100. https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000100089

Yu, J.-M., Chu, M., Park, H., Park, J., y Lee, K.-G. (2021). Analysis of Volatile Compounds in Coffee Prepared by Various Brewing and Roasting Methods. *Foods*, *10*(6), 1347. https://doi.org/10.3390/foods10061347

Zarebska, M., Stanek, N., Barabosz, K., Jaszkiewicz, A., Kulesza, R., Matejuk, R., Andrzejewski, D., Biłos, Ł., y Porada, A. (2022). Comparison of chemical compounds and their influence on the taste of coffee depending on green beans storage conditions. *Scientific Reports*, *12*(1), 2674. https://doi.org/10.1038/s41598-022-06676-9

11

DEDICATORIA

A Dios, por ser la luz que guio cada paso de este proceso, otorgándome sabiduría en la incertidumbre y fortaleza en los momentos en que los desafíos parecían exceder mis capacidades.

A mis padres Rosa Nilda, Eriberto y hermanos por su amor incondicional, por su dedicación constante y por motivarme a seguir adelante para concluir satisfactoriamente esta etapa.

Margarita Abarca López

Dedico esta tesis a mis padres, Celso y Elena, y a mis hermanos, por su apoyo incondicional en cada paso de mi camino. Ellos son la razón y la fuerza que me impulsan a seguir adelante, y quienes me enseñaron el verdadero valor del esfuerzo y la perseverancia sin límites.

Yeselli Liliana Córdova Flores

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro sincero agradecimiento al Programa Nacional de Investigación Científica y de Estudios Avanzados (PROCIENCIA) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC-PERÚ), bajo el Contrato N° PE501087000-2024 correspondiente al proyecto "Estimación de la Vida Útil de Cafés de Especialidad en Almacenamiento, Producción y Comercialización, Mediante Pruebas Aceleradas y Algoritmos de Data Mining".

Nuestro cordial agradecimiento al Dr. Frank Fernández Rosillo y a la M. Cs. Eliana Milagros Cabrejos Barrios, quienes nos brindaron su tiempo, experiencia, conocimiento, compromiso y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

Se extiende nuestro especial agradecimiento a la empresa Hullka Coffee Trade S.A.C, al Instituto de Investigación de Ciencia de Datos (INSCID) de la Universidad Nacional de Jaén (UNJ) y al Laboratorio de catación de la Empresa Falcon Coffees Perú S.R.L por facilitarnos sus instalaciones para el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, agradecemos profundamente a la Universidad Nacional de Jaén (UNJ) institución que nos ha brindado una sólida formación académica y el respaldo necesario para nuestro crecimiento profesional.

Margarita y Liliana

VII. ANEXOS

Anexo 1

Galería de fotos: Proceso de producción, envasado y acondicionamiento de las muestras para las pruebas aceleradas

Figura 5

Compra y pesado de café en oro verde

Figura 6

Tostado (Probat) medio para las muestras de café

Figura 7

Molido para las muestras de café

Figura 8

Envasado (200 g) en envases bilaminadas y trilaminadas con válvula desgasificadora y zipper para café tostado-molido

Figura 9

Envasado al vacío (200 g) en bolsas Ecotac al vacío

Figura 10

Codificación y acondicionamiento de las muestras a las estufas (40, 50 y 60 °C)

Anexo 2

Galería de fotos: Análisis físico – químico de las muestras de café de especialidad

Figura 11

Lectura de °Brix (refractómetro digital, Milwaukee)

Figura 12

Lectura de pH (pH-metro digital con electrodo, HANNA)

Anexo 3

Visita y análisis sensorial (cata) de las muestras de café de especialidad en la Empresa Falcon Coffees

Figura 13

Reunión y convenio con la empresa Falcon Coffees

Figura 14

Tostado y molido de las muestras de café

Figura 15

Acondicionamiento y cata de las muestras

Figura 16

Equipo de trabajo

Anexo 4

ANOVAs de dos vias (Envase x Días) por cada temperatura

Tabla 13

Análisis por temperatura para el efecto de Envase x Dias

Temperatura	Efecto Envase	Efecto Días	Interacción E × D
40°C	F(3,100)=45.67***	F(4,100)=28.93***	F(12,100)=8.45***
50°C	F(3,100)=52.34***	F(4,100)=35.67***	F(12,100)=10.23***
60°C	F(3,100)=61.23***	F(4,100)=42.89***	F(12,100)=12.67***

Nota:*** p < 0.00

Tabla 14

Matriz de comparaciones múltiples

Temperatura	Día final	Comparación	Puntaje promedio	Significancia
40 °C	12	VEV vs VET	82.75 vs 82.67	n.s. (p > 0.05)
		VEV vs BBCV	82.75 vs 79.96	p < 0.001
		VEV vs BTCV	82.75 vs 79.88	p < 0.001
		BBCV vs BTCV	79.96 vs 79.88	n.s. (p > 0.05)
50 °C	8	VEV vs VET	82.58 vs 82.75	n.s. (p > 0.05)
		VEV vs BBCV	82.58 vs 80.79	p < 0.001
		VEV vs BTCV	82.58 vs 80.83	p < 0.001
60 °C	4	VEV vs VET	82.96 vs 83.46	n.s. (p > 0.05)
		VEV vs BBCV	82.96 vs 81.79	p < 0.001
		VEV vs BTCV	82.96 vs 81.92	p < 0.001

Tabla 15

Verificación de supuestos del modelo

Supuesto	Prueba Aplicada	Resultado	Conclusión
Normalidad	Shapiro-Wilk (residuos)	W = 0.992, p = 0.078	No se rechaza H0 → residuos normales
Homocedasticidad	Levene	F(59,300) = 1.234, p = 0.089	Varianzas homogéneas
Independencia	Durbin-Watson	d = 1.987	Residuos independientes

Anexo 5

Evaluación sensorial

Tabla 16

Promedio de puntaje en taza para grano verde envasado en bolsa Ecotac al vacío para las tres temperaturas evaluadas.

40 °C		DÍA 0		DÍA 3		DÍA 6		DÍA 9		DÍA 12	
N°	Atributos	9/04/2025		12/04/2025		15/04/2025		18/04/2025		21/04/2025	
		PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd
1	Fragancia/aroma	*7.76*	*0.19305056*	*7.71*	*0.18819316*	*7.58*	*0.12909944*	*7.50*	*0.15811388*	*7.54*	*0.10206207*
2	Sabor	*7.71*	*0.06972167*	*7.58*	*0.12909944*	*7.67*	*0.12909944*	*7.50*	*0.15811388*	*7.58*	*0.12909944*
3	Sabor residual	*7.63*	*0.04564355*	*7.58*	*0.12909944*	*7.63*	*0.13693064*	*7.46*	*0.18819316*	*7.46*	*0.10206207*
4	Acidez	*7.81*	*0.10092168*	*7.67*	*0.12909944*	*7.58*	*0.12909944*	*7.63*	*0.13693064*	*7.50*	*0.15811388*
5	Cuerpo	*7.65*	*0.14353345*	*7.71*	*0.10206207*	*7.67*	*0.12909944*	*7.58*	*0.20412415*	*7.54*	*0.18819316*
6	Uniformidad	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
7	Balance	*7.71*	*0.08740074*	*7.67*	*0.12909944*	*7.58*	*0.12909944*	*7.54*	*0.18819316*	*7.54*	*0.10206207*
8	Taza limpia	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
9	Dulzor	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
10	Puntaje del catador	*7.67*	*0.05270463*	*7.67*	*0.12909944*	*7.67*	*0.12909944*	*7.58*	*0.20412415*	*7.58*	*0.12909944*
	TOTAL	83.93	*0.43274533*	83.58	*0.56273143*	83.38	*0.30618622*	82.79	*0.74860982*	82.75	*0.5*

50 °C		DÍA 0		DÍA 2		DÍA 4		DÍA 6		DÍA 8	
N°	Atributos	9/04/2025		11/04/2025		13/04/2025		15/04/2025		17/04/2025	
		PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd
1	Fragancia/aroma	*7.76*	*0.19305056*	*7.79*	*0.10206207*	*7.67*	*0.20412415*	*7.54*	*0.18819316*	*7.50*	*0.15811388*
2	Sabor	*7.71*	*0.06972167*	*7.71*	*0.10206207*	*7.58*	*0.20412415*	*7.58*	*0.12909944*	*7.58*	*0.20412415*
3	Sabor residual	*7.63*	*0.04564355*	*7.67*	*0.12909944*	*7.54*	*0.18819316*	*7.50*	*0.15811388*	*7.46*	*0.2922613*
4	Acidez	*7.81*	*0.10092168*	*7.63*	*0.20916501*	*7.54*	*0.24579802*	*7.63*	*0.13693064*	*7.50*	*0.2236068*
5	Cuerpo	*7.65*	*0.14353345*	*7.63*	*0.13693064*	*7.50*	*0.15811388*	*7.54*	*0.10206207*	*7.50*	*0.2236068*
6	Uniformidad	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
7	Balance	*7.71*	*0.08740074*	*7.67*	*0.20412415*	*7.54*	*0.10206207*	*7.54*	*0.18819316*	*7.58*	*0.30276504*
8	Taza limpia	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
9	Dulzor	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*

10	Puntaje del catador	*7.67*	*0.05270463*	*7.71*	*0.18819316*	*7.50*	*0.15811388*	*7.46*	*0.18819316*	*7.46*	*0.10206207*
	TOTAL	83.93	*0.43274533*	83.79	*0.45871196*	82.88	*0.9968701*	82.79	*0.84286219*	82.58	*1.25166556*

60 °C		DÍA 0		DÍA 1		DÍA 2		DÍA 3		DÍA 4	
N°	Atributos	9/04/2025		10/04/2025		11/04/2025		12/04/2025		13/04/2025	
		PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd
1	Fragancia/aroma	*7.76*	*0.19305056*	*7.75*	*0.15811388*	*7.67*	*0.20412415*	*7.71*	*0.18819316*	*7.54*	*0.10206207*
2	Sabor	*7.71*	*0.06972167*	*7.71*	*0.10206207*	*7.71*	*0.10206207*	*7.67*	*0.20412415*	*7.54*	*0.10206207*
3	Sabor residual	*7.63*	*0.04564355*	*7.71*	*0.10206207*	*7.58*	*0.12909944*	*7.63*	*0.13693064*	*7.54*	*0.10206207*
4	Acidez	*7.81*	*0.10092168*	*7.67*	*0.12909944*	*7.79*	*0.18819316*	*7.67*	*0.12909944*	*7.63*	*0.13693064*
5	Cuerpo	*7.65*	*0.14353345*	*7.67*	*0.12909944*	*7.63*	*0.20916501*	*7.58*	*0.12909944*	*7.63*	*0.13693064*
6	Uniformidad	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
7	Balance	*7.71*	*0.08740074*	*7.67*	*0.12909944*	*7.75*	*0.15811388*	*7.67*	*0.12909944*	*7.58*	*0.12909944*
8	Taza limpia	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
9	Dulzor	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
10	Puntaje del catador	*7.67*	*0.05270463*	*7.63*	*0.13693064*	*7.63*	*0.13693064*	*7.67*	*0.20412415*	*7.50*	*0.15811388*
	TOTAL	83.93	*0.43274533*	83.79	*0.2922613*	83.75	*0.52440442*	83.58	*0.54006172*	82.96	*0.51031036*

Tabla 17

Promedio de puntaje en taza para grano tostado envasado en bolsa Ecotac al vacío para las tres temperaturas evaluadas.

40 °C		DÍA 0		DÍA 3		DÍA 6		DÍA 9		DÍA 12	
		9/04/2025		12/04/2025		15/04/2025		18/04/2025		21/04/2025	
N°	Atributos	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd
1	Fragancia/aroma	*7.75*	*0.17480147*	*7.67*	*0.20412415*	*7.54*	*0.10206207*	*7.54*	*0.10206207*	*7.50*	*0*
2	Sabor	*7.72*	*0.04303315*	*7.63*	*0.13693064*	*7.58*	*0.12909944*	*7.58*	*0.12909944*	*7.50*	*0*
3	Sabor residual	*7.74*	*0.06273105*	*7.54*	*0.10206207*	*7.50*	*0.15811388*	*7.54*	*0.18819316*	*7.50*	*0.27386128*
4	Acidez	*7.81*	*0.13608276*	*7.67*	*0.20412415*	*7.50*	*0.15811388*	*7.58*	*0.12909944*	*7.46*	*0.10206207*
5	Cuerpo	*7.79*	*0.15590239*	*7.67*	*0.20412415*	*7.63*	*0.13693064*	*7.54*	*0.18819316*	*7.58*	*0.12909944*
6	Uniformidad	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
7	Balance	*7.75*	*0.10540926*	*7.63*	*0.13693064*	*7.54*	*0.18819316*	*7.58*	*0.12909944*	*7.50*	*0*
8	Taza limpia	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
9	Dulzor	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
10	Puntaje del catador	*7.74*	*0.14353345*	*7.58*	*0.20412415*	*7.50*	*0.2236068*	*7.54*	*0.24579802*	*7.63*	*0.13693064*
	TOTAL	84.29	*0.52901901*	83.38	*0.44017042*	82.79	*0.71443451*	82.92	*0.60553007*	82.67	*0.30276504*

50 °C		DÍA 0		DÍA 2		DÍA 4		DÍA 6		DÍA 8	
		9/04/2025		11/04/2025		13/04/2025		15/04/2025		17/04/2025	
N°	Atributos	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd
1	Fragancia/aroma	*7.75*	*0.17480147*	*7.75*	*0.2236068*	*7.58*	*0.12909944*	*7.54*	*0.10206207*	*7.50*	*0*
2	Sabor	*7.72*	*0.04303315*	*7.75*	*0.15811388*	*7.54*	*0.18819316*	*7.58*	*0.20412415*	*7.58*	*0.20412415*
3	Sabor residual	*7.74*	*0.06273105*	*7.63*	*0.13693064*	*7.54*	*0.18819316*	*7.58*	*0.20412415*	*7.50*	*0.2236068*
4	Acidez	*7.81*	*0.13608276*	*7.71*	*0.18819316*	*7.58*	*0.12909944*	*7.50*	*0.15811388*	*7.54*	*0.10206207*
5	Cuerpo	*7.79*	*0.15590239*	*7.75*	*0.15811388*	*7.67*	*0.12909944*	*7.58*	*0.12909944*	*7.46*	*0.18819316*
6	Uniformidad	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
7	Balance	*7.75*	*0.10540926*	*7.71*	*0.10206207*	*7.58*	*0.12909944*	*7.54*	*0.18819316*	*7.58*	*0.12909944*
8	Taza limpia	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
9	Dulzor	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
10	Puntaje del catador	*7.74*	*0.14353345*	*7.75*	*0.15811388*	*7.58*	*0.12909944*	*7.50*	*0.15811388*	*7.58*	*0.20412415*

	TOTAL	84.29	*0.52901901*	84.04	*0.36799004*	83.08	*0.68313005*	82.83	*0.80104099*	82.75	*0.68920244*

60 °C		DÍA 0		DÍA 1		DÍA 2		DÍA 3		DÍA 4	
		9/04/2025		10/04/2025		11/04/2025		12/04/2025		13/04/2025	
N°	Atributos	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd
1	Fragancia/aroma	*7.75*	*0.17480147*	*7.67*	*0.20412415*	*7.71*	*0.18819316*	*7.67*	*0.20412415*	*7.71*	*0.24579802*
2	Sabor	*7.72*	*0.04303315*	*7.75*	*0.15811388*	*7.71*	*0.10206207*	*7.54*	*0.10206207*	*7.67*	*0.12909944*
3	Sabor residual	*7.74*	*0.06273105*	*7.71*	*0.10206207*	*7.67*	*0.12909944*	*7.54*	*0.10206207*	*7.63*	*0.13693064*
4	Acidez	*7.81*	*0.13608276*	*7.83*	*0.20412415*	*7.71*	*0.18819316*	*7.67*	*0.20412415*	*7.71*	*0.10206207*
5	Cuerpo	*7.79*	*0.15590239*	*7.75*	*0.15811388*	*7.71*	*0.18819316*	*7.71*	*0.18819316*	*7.58*	*0.12909944*
6	Uniformidad	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
7	Balance	*7.75*	*0.10540926*	*7.79*	*0.18819316*	*7.67*	*0.12909944*	*7.71*	*0.18819316*	*7.58*	*0.20412415*
8	Taza limpia	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
9	Dulzor	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
10	Puntaje del catador	*7.74*	*0.14353345*	*7.71*	*0.18819316*	*7.71*	*0.18819316*	*7.54*	*0.18819316*	*7.58*	*0.20412415*
	TOTAL	84.29	*0.52901901*	84.21	*0.40052049*	83.88	*0.56457949*	83.38	*0.44017042*	83.46	*0.84286219*

Tabla 18

Promedio de puntaje en taza para café tostado-molido, envasado en bolsa bilaminada con válvula desgasificadora y zipper para las tres temperaturas evaluadas.

40 °C		DÍA 0		DÍA 3		DÍA 6		DÍA 9		DÍA 12	
		9/04/2025		12/04/2025		15/04/2025		18/04/2025		21/04/2025	
N°	Atributos	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd
1	Fragancia/aroma	*7.65*	*0.09742043*	*7.58*	*0.12909944*	*7.42*	*0.20412415*	*7.21*	*0.2922613*	*7.13*	*0.20916501*
2	Sabor	*7.71*	*0.11486707*	*7.58*	*0.12909944*	*7.33*	*0.20412415*	*7.29*	*0.18819316*	*7.08*	*0.20412415*
3	Sabor residual	*7.60*	*0.23814484*	*7.50*	*0*	*7.29*	*0.10206207*	*7.17*	*0.12909944*	*7.08*	*0.20412415*
4	Acidez	*7.69*	*0.04303315*	*7.46*	*0.18819316*	*7.21*	*0.18819316*	*7.17*	*0.30276504*	*7.17*	*0.25819889*
5	Cuerpo	*7.78*	*0.15515822*	*7.46*	*0.10206207*	*7.25*	*0.2236068*	*7.29*	*0.18819316*	*7.13*	*0.26220221*
6	Uniformidad	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
7	Balance	*7.69*	*0.11385501*	*7.42*	*0.12909944*	*7.29*	*0.10206207*	*7.25*	*0.15811388*	*7.08*	*0.20412415*
8	Taza limpia	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
9	Dulzor	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
10	Puntaje del catador	*7.68*	*0.14353345*	*7.50*	*0.15811388*	*7.38*	*0.13693064*	*7.21*	*0.10206207*	*7.29*	*0.18819316*
	TOTAL	83.81	*0.52352084*	82.50	*0.47434165*	81.17	*0.76919872*	80.58	*0.87559504*	79.96	*1.29823598*

50 °C		DÍA 0		DÍA 2		DÍA 4		DÍA 6		DÍA 8	
		9/04/2025		11/04/2025		13/04/2025		15/04/2025		17/04/2025	
N°	Atributos	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd
1	Fragancia/aroma	*7.65*	*0.09742043*	*7.63*	*0.13693064*	*7.42*	*0.20412415*	*7.25*	*0.2236068*	*7.17*	*0.25819889*
2	Sabor	*7.71*	*0.11486707*	*7.58*	*0.12909944*	*7.38*	*0.13693064*	*7.25*	*0.15811388*	*7.33*	*0.20412415*
3	Sabor residual	*7.60*	*0.23814484*	*7.50*	*0*	*7.33*	*0.12909944*	*7.17*	*0.12909944*	*7.21*	*0.24579802*
4	Acidez	*7.69*	*0.04303315*	*7.46*	*0.24579802*	*7.29*	*0.18819316*	*7.33*	*0.20412415*	*7.29*	*0.24579802*
5	Cuerpo	*7.78*	*0.15515822*	*7.46*	*0.24579802*	*7.33*	*0.20412415*	*7.33*	*0.25819889*	*7.33*	*0.20412415*
6	Uniformidad	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
7	Balance	*7.69*	*0.11385501*	*7.50*	*0.15811388*	*7.42*	*0.12909944*	*7.29*	*0.24579802*	*7.25*	*0.2236068*
8	Taza limpia	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
9	Dulzor	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*

10	Puntaje del catador	*7.68*	*0.14353345*	*7.58*	*0.12909944*	*7.38*	*0.20916501*	*7.21*	*0.18819316*	*7.21*	*0.18819316*
	TOTAL	83.81	*0.52352084*	82.71	*0.55715049*	81.54	*0.91401131*	80.83	*1.03279556*	80.79	*1.29823598*

60 °C		DÍA 0		DÍA 1		DÍA 2		DÍA 3		DÍA 4	
		9/04/2025		10/04/2025		11/04/2025		12/04/2025		13/04/2025	
N°	Atributos	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd
1	Fragancia/aroma	*7.65*	*0.09742043*	*7.58*	*0.12909944*	*7.58*	*0.12909944*	*7.46*	*0.10206207*	*7.42*	*0.25819889*
2	Sabor	*7.71*	*0.11486707*	*7.58*	*0.12909944*	*7.58*	*0.12909944*	*7.54*	*0.18819316*	*7.38*	*0.20916501*
3	Sabor residual	*7.60*	*0.23814484*	*7.63*	*0.13693064*	*7.54*	*0.10206207*	*7.42*	*0.12909944*	*7.33*	*0.20412415*
4	Acidez	*7.69*	*0.04303315*	*7.63*	*0.13693064*	*7.50*	*0.27386128*	*7.46*	*0.18819316*	*7.42*	*0.25819889*
5	Cuerpo	*7.78*	*0.15515822*	*7.58*	*0.34156503*	*7.63*	*0.20916501*	*7.46*	*0.2922613*	*7.42*	*0.20412415*
6	Uniformidad	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
7	Balance	*7.69*	*0.11385501*	*7.71*	*0.10206207*	*7.42*	*0.12909944*	*7.50*	*0.15811388*	*7.42*	*0.12909944*
8	Taza limpia	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
9	Dulzor	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
10	Puntaje del catador	*7.68*	*0.14353345*	*7.67*	*0.12909944*	*7.50*	*0.2236068*	*7.50*	*0.15811388*	*7.42*	*0.25819889*
	TOTAL	83.81	*0.52352084*	83.38	*0.70267347*	82.75	*0.59160798*	82.33	*0.91742393*	81.79	*1.32680694*

Tabla 19

Promedio de puntaje en taza para café tostado-molido, envasado en bolsa trilaminada con válvula desgasificadora y zipper para las tres temperaturas evaluadas

40 °C		DÍA 0		DÍA 3		DÍA 6		DÍA 9		DÍA 12	
N°	Atributos	9/04/2025		12/04/2025		15/04/2025		18/04/2025		21/04/2025	
		PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd
1	Fragancia/aroma	*7.72*	*0.0860663*	*7.50*	*0*	*7.33*	*0.12909944*	*7.25*	*0.2236068*	*7.17*	*0.12909944*
2	Sabor	*7.65*	*0.08193267*	*7.54*	*0.10206207*	*7.33*	*0.12909944*	*7.29*	*0.18819316*	*7.08*	*0.20412415*
3	Sabor residual	*7.64*	*0.16386535*	*7.42*	*0.20412415*	*7.29*	*0.10206207*	*7.21*	*0.10206207*	*7.04*	*0.18819316*
4	Acidez	*7.74*	*0.11076334*	*7.50*	*0.15811388*	*7.38*	*0.13693064*	*7.21*	*0.24579802*	*7.17*	*0.30276504*
5	Cuerpo	*7.81*	*0.14593251*	*7.54*	*0.10206207*	*7.38*	*0.20916501*	*7.21*	*0.24579802*	*7.08*	*0.30276504*
6	Uniformidad	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
7	Balance	*7.72*	*0.11385501*	*7.42*	*0.12909944*	*7.38*	*0.13693064*	*7.25*	*0*	*7.13*	*0.13693064*
8	Taza limpia	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
9	Dulzor	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
10	Puntaje del catador	*7.67*	*0.13944334*	*7.50*	*0.15811388*	*7.33*	*0.12909944*	*7.29*	*0.18819316*	*7.21*	*0.18819316*
	TOTAL	83.94	*0.43033148*	82.42	*0.40824829*	81.42	*0.60553007*	80.71	*0.71443451*	79.88	*1.2524975*

50 °C		DÍA 0		DÍA 2		DÍA 4		DÍA 6		DÍA 8	
N°	Atributos	9/04/2025		11/04/2025		13/04/2025		15/04/2025		17/04/2025	
		PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd
1	Fragancia/aroma	*7.72*	*0.0860663*	*7.63*	*0.13693064*	*7.38*	*0.26220221*	*7.29*	*0.18819316*	*7.25*	*0.27386128*
2	Sabor	*7.65*	*0.08193267*	*7.67*	*0.12909944*	*7.42*	*0.12909944*	*7.29*	*0.18819316*	*7.25*	*0.2236068*
3	Sabor residual	*7.64*	*0.16386535*	*7.50*	*0*	*7.33*	*0.12909944*	*7.21*	*0.18819316*	*7.29*	*0.24579802*
4	Acidez	*7.74*	*0.11076334*	*7.54*	*0.10206207*	*7.29*	*0.18819316*	*7.29*	*0.18819316*	*7.25*	*0.15811388*
5	Cuerpo	*7.81*	*0.14593251*	*7.54*	*0.10206207*	*7.29*	*0.18819316*	*7.25*	*0.2236068*	*7.33*	*0.20412415*
6	Uniformidad	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
7	Balance	*7.72*	*0.11385501*	*7.46*	*0.10206207*	*7.38*	*0.13693064*	*7.29*	*0.18819316*	*7.25*	*0.27386128*
8	Taza limpia	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
9	Dulzor	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*

10	Puntaje del catador	*7.67*	*0.13944334*	*7.58*	*0.12909944*	*7.38*	*0.20916501*	*7.33*	*0.20412415*	*7.21*	*0.18819316*
	TOTAL	83.94	*0.43033148*	82.92	*0.46547467*	81.46	*0.76512526*	80.96	*1.04183332*	80.83	*1.26161272*

60 °C		DÍA 0		DÍA 1		DÍA 2		DÍA 3		DÍA 4	
N°	Atributos	9/04/2025		10/04/2025		11/04/2025		12/04/2025		13/04/2025	
		PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd	PROMEDIO	Desv. Stánd
1	Fragancia/aroma	*7.72*	*0.0860663*	*7.54*	*0.2922613*	*7.58*	*0.20412415*	*7.46*	*0.24579802*	*7.33*	*0.30276504*
2	Sabor	*7.65*	*0.08193267*	*7.71*	*0.18819316*	*7.63*	*0.13693064*	*7.54*	*0.18819316*	*7.42*	*0.20412415*
3	Sabor residual	*7.64*	*0.16386535*	*7.75*	*0.15811388*	*7.46*	*0.10206207*	*7.42*	*0.12909944*	*7.42*	*0.20412415*
4	Acidez	*7.74*	*0.11076334*	*7.58*	*0.12909944*	*7.46*	*0.18819316*	*7.42*	*0.12909944*	*7.42*	*0.25819889*
5	Cuerpo	*7.81*	*0.14593251*	*7.50*	*0.27386128*	*7.71*	*0.18819316*	*7.38*	*0.20916501*	*7.46*	*0.24579802*
6	Uniformidad	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
7	Balance	*7.72*	*0.11385501*	*7.63*	*0.13693064*	*7.54*	*0.18819316*	*7.42*	*0.12909944*	*7.46*	*0.10206207*
8	Taza limpia	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
9	Dulzor	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*	*10.00*	*0*
10	Puntaje del catador	*7.67*	*0.13944334*	*7.71*	*0.18819316*	*7.58*	*0.12909944*	*7.42*	*0.12909944*	*7.42*	*0.12909944*
	TOTAL	83.94	*0.43033148*	83.42	*0.98319208*	82.96	*0.45871196*	82.04	*0.71443451*	81.92	*1.2416387*

Anexo 6.

ANOVA factorial global

```
# Corrección: usar estimator=np.mean en seaborn.pointplot y asegurar DayNum existe.
import numpy as np, pandas as pd, os
from statsmodels.formula.api import ols
import statsmodels.api as sm
from statsmodels.stats.multicomp import pairwise_tukeyhsd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
np.random.seed(2025)
os.makedirs('/mnt/data', exist_ok=True)

# Cargar datos simulados si ya existen, sino reconstruir
data_input = {
  40: {
    0: [(83.93,0.433),(84.29,0.529),(83.81,0.524),(83.94,0.430)],
    3: [(83.58,0.563),(83.38,0.440),(82.50,0.474),(82.42,0.408)],
    6: [(83.38,0.306),(82.79,0.714),(81.17,0.769),(81.42,0.606)],
    9: [(82.79,0.749),(82.92,0.605),(80.58,0.876),(80.71,0.714)],
    12:[(82.75,0.500),(82.67,0.303),(79.96,1.298),(79.88,1.252)],
  },
  50: {
    0: [(83.93,0.433),(84.29,0.529),(83.81,0.524),(83.94,0.430)],
    2: [(83.79,0.459),(84.04,0.368),(82.71,0.557),(82.92,0.465)],
    4: [(82.88,0.997),(83.08,0.683),(81.54,0.914),(81.46,0.765)],
    6: [(82.79,0.843),(82.83,0.801),(80.83,1.033),(80.96,1.042)],
    8: [(82.58,1.252),(82.75,0.689),(80.79,1.298),(80.83,1.262)],
  },
  60: {
    0: [(83.93,0.433),(84.29,0.529),(83.81,0.524),(83.94,0.430)],
    1: [(83.79,0.292),(84.21,0.400),(83.38,0.703),(83.42,0.983)],
    2: [(83.75,0.524),(83.88,0.565),(82.75,0.592),(82.96,0.459)],
    3: [(83.58,0.540),(83.38,0.440),(82.33,0.917),(82.04,0.714)],
    4: [(82.96,0.510),(83.46,0.843),(81.79,1.327),(81.92,1.242)],
  }
}
pack_names = ['VEV','VET','BBCV','BTCV']
form_map = {'VEV':'Grano verde','VET':'Grano tostado','BBCV':'Tostado-molido','BTCV':'Tostado-molido'}

rows = []
```

```
for temp, days in data_input.items():
    for day, vals in days.items():
        for i,(mean,sd) in enumerate(vals):
            pack = pack_names[i]
            form = form_map[pack]
            sims = np.random.normal(loc=mean, scale=sd, size=3)
            for rep, val in enumerate(sims,1):
                rows.append({'Temp':f'{temp}C','TempNum':temp,'Day':str(day),'DayNum':day,
                        'Packaging':pack,'Form':form,'Rep':rep,'Score':val})

df = pd.DataFrame(rows)
df.to_csv('/mnt/data/simulated_scores_bycell.csv', index=False)

anova_results = {}
tukey_results = {}
letter_tables = {}
plot_files = []

for temp in sorted(data_input.keys()):
    temp_label = f'{temp}C'
    df_temp = df[df['Temp']==temp_label]
    for pack in pack_names:
        df_sub = df_temp[df_temp['Packaging']==pack].copy()
35      model = ols('Score ~ C(Day)', data=df_sub).fit()
        anova_table = sm.stats.anova_lm(model, typ=2)
        anova_results[(temp_label,pack)] = anova_table
23      tuk = pairwise_tukeyhsd(df_sub['Score'], df_sub['Day'], alpha=0.05)
        tuk_df = pd.DataFrame(data=tuk._results_table.data[1:],
columns=tuk._results_table.data[0])
        tukey_results[(temp_label,pack)] = tuk_df
        # Letters
        groups = sorted(df_sub['Day'].unique(), key=lambda x: int(x))
        ns = {g: set([g]) for g in groups}
        for _, row in tuk_df.iterrows():
            if not row['reject']:
                ns[row['group1']].add(row['group2'])
                ns[row['group2']].add(row['group1'])
        letters = {}
        import string
        current_letter_idx = 0
        for g in sorted(groups, key=lambda x: df_sub[df_sub['Day']==x]['Score'].mean(),
reverse=True):
            assigned = False
            for l in range(current_letter_idx):
```

```
            letter = string.ascii_lowercase[l]
            assigned_groups = [gg for gg,lt in letters.items() if lt==letter]
            if all((gg in ns[g]) for gg in assigned_groups):
              letters[g] = letter
              assigned = True
              break
          if not assigned:
            letters[g] = string.ascii_lowercase[current_letter_idx]
            current_letter_idx += 1
      stats = df_sub.groupby('Day').agg(Mean=('Score','mean'), SD=('Score','std')).reset_index()
      stats['Letter'] = stats['Day'].map(letters)
      stats = stats[['Day','Mean','SD','Letter']].sort_values(by='Day', key=lambda col: col.astype(int))
      letter_tables[(temp_label,pack)] = stats
      stats.to_csv(f'/mnt/data/letters_{temp}_{pack}.csv', index=False)
      # Plot
      plt.figure(figsize=(6,4))
      sns.pointplot(data=df_sub, x='DayNum', y='Score', estimator=np.mean, ci='sd', markers='o')
      plt.title(f'{pack} ({form_map[pack]}) - {temp_label}')
      plt.xlabel('Día')
      plt.ylabel('Puntuación en taza (simulada)')
      plt.tight_layout()
      fpath = f'/mnt/data/plot_{temp}_{pack}.png'
      plt.savefig(fpath, dpi=200)
      plt.close()
      plot_files.append(fpath)

# Guardar ANOVA CSVs
for k,tab in anova_results.items():
  tab.to_csv(f"/mnt/data/anova_{k[0]}_{k[1]}.csv")

# Mostrar tablas con letras al usuario
import caas_jupyter_tools as cjt
for key, tab in list(letter_tables.items()):
  cjt.display_dataframe_to_user(f'Tabla_letras_{key[0]}_{key[1]}', tab)

{
 'simulated_csv': '/mnt/data/simulated_scores_bycell.csv',
 'letter_tables_files': [f'/mnt/data/letters_{temp}_{pack}.csv' for temp in sorted(data_input.keys()) for pack in pack_names],
 'plot_files': plot_files,
```

```
        'anova_files': [f"/mnt/data/anova_{temp}_" + pack + ".csv" for temp in
        sorted(data_input.keys()) for pack in pack_names]
    }
```

Anexo 7

Certificado de calidad

Cenfrocafe

CERTIFICADO DE CALIDAD CENFROCAFE - PERÚ

PLANTA DE PROCESAMIENTO CAFÉ PERGAMINO

FECHA	PAÍS	REGIÓN	ORGANIZACIÓN	LABORATORIO
7/04/2025	Perú	Cajamarca	Cenfrocafe	CONTROL DE CALIDAD PLANTA

DETALLE DE CONTRATO

CTO	VENTA	SACOS	KILOS	QQ
D-2024-030	V-0018586	6	414.00	9.00

CLIENTE: INDUSTRIA — CERTIFICACIÓN: ORGANICO

ORDEN DE PROCESO

EVALUACIÓN FÍSICA

Humedad	Color	Olor	Densidad	Uniformidad
10.5%	VERDE	LIMPIO		LIMPIO

DEFECTOS DE CATEGORÍA 1	DEFECTOS COMPLETOS	EQUIVALENTES
Grano Negro		
Grano Agrio		
Cereza Seca		
Daño por hongos		
Materia Extraña		
Daño severo de insecto		0
TOTAL	0	0

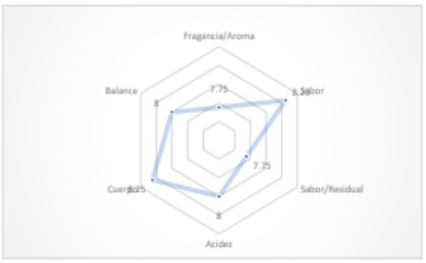
DEFECTOS DE CATEGORÍA 2	DEFECTO COMPLETO	EQUIVALENTES
Parcialmente Negro		
Parcialmente Agrio	3	1
Pergamino		
Flotador		
Inmaduro		
Arrugado/Averanado		
Conchas		
Quebrado/Mordido/Cortado	22	4
Cascara/ Pulpa		
Daño leve de insecto	3	0
TOTAL	28	5

GRANULOMETRÍA

Tamaño	350g	Porcentaje por malla %
18	89	25.43
17	110	31.43
16	98	28.00
15	37	10.57
14	13	3.71
13	3	0.86
12		0.00
TOTAL GENERAL	350	100

ANALISIS SENSORIAL

ATRIBUTOS	RESULTADOS	PERFIL DE SABORES
Fragancia/Aroma	7.75	notas a manzana roja, miel, tonos florales
Sabor	8.25	base de caramelo, con tonos de almendras
Sabor/Residual	7.75	fondo a grosella negra, con tonos de malta
Acidez	8	jugosa
Cuerpo	8.25	sedoso
Balance	8	
Dulzura	10	
Uniformidad	10	uniforme
Taza Limpia	10	limpio
Overall	8	final duradero y dulce
Defecto		
TOTAL PUNTOS	86.00	



OBSERVACIÓN SENSORIAL

notas a manzana roja, miel, tonos florales, base de caramelo, con tonos de almendras, fondo a grosella negra, con tonos de malta, acidez jugosa, cuerpo sedoso, con un final duradero ydulce.

Cenfrocafe

J Brayan Chuquel Huaman

Q.GRADER

RESP CONTROL DE CALIDAD PLANTA

Anexo 8

Constancia del comité de ética

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

LEY DE CREACIÓN 29304. RESOLUCIÓN DEL CONSEJO DIRECTIVO N°002-2018-SUNEDU/CD

VICEPRESIDENCIA DE INVESTIGACIÓN

COMITÉ DE ÉTICA

"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

Jaén, 21 de abril del 2025

OFICIO N° 002-2025 / VPI–UNJ/ CE

CONSTANCIA DE APROBACIÓN DE PROYECTO

COMITÉ DE ÉTICA-UNJ

El presidente del comité institucional de ética en investigación de la Universidad Nacional de Jaén hace constar que el proyecto titulado:

"ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE CAFÉS DE ESPECIALIDAD EN ALMACENAMIENTO, PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN, MEDIANTE PRUEBAS ACELERADAS Y ALGORITMOS DE DATA MINING"

Presentado por el Dr. Frank Fernández Rosillo, ha sido analizado y aprobado en base al código de ética en investigación científica de la Universidad Nacional de Jaén que cuenta con resolución RCO N°065-2025 CCO-UNJ.

Dr. Nicanor Alvarado Carrasco

Presidente del Comité de Ética en investigación

Universidad Nacional de Jaén

SOLIDARIA - **SALUDABLE** - SOSTENIBLE
www.unj.edu.pe

CONTACTO EMAIL comiteetica@unj.edu.pe DIRECCIÓN