

Efecto de la masa de grano y volteo en la calidad fisicoquímica y sensorial del cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonía Colombiana

Effect of bean mass and turning frequency on the physicochemical and sensory quality of cocoa (*Theobroma cacao* L.) in the Colombian Amazon

Laura Isabela Muñoz Marín¹   Pijeidi Londoño Peña²   Camila Andrea Jurado Noguera³  
Cesar Hernando Bolívar Herrera⁴   Juan Pablo Narváez-Herrera⁵  

Tecnóloga en Producción Agroindustrial, Institución Universitaria del Putumayo – UniPutumayo. Semillero de Investigación Victoria Amazónica, Mocoa, Putumayo, Colombia.¹

Tecnóloga en Producción Agroindustrial, Institución Universitaria del Putumayo – UniPutumayo. Semillero de Investigación Victoria Amazónica, Mocoa, Putumayo, Colombia.²

Tecnóloga en Producción Agroindustrial, Institución Universitaria del Putumayo – UniPutumayo. Semillero de Investigación Victoria Amazónica, Mocoa, Putumayo, Colombia.³

Ingeniero Químico. Institución Universitaria del Putumayo – UniPutumayo. Semillero de Investigación Victoria Amazónica, Mocoa, Putumayo, Colombia.⁴

Zootecnista, Doctor en Ciencias Animales. Institución Universitaria del Putumayo – UniPutumayo. Semillero de Investigación Victoria Amazónica, Mocoa, Putumayo, Colombia.⁵

ISSN 2619-2608

DOI: <https://doi.org/10.34069/RA/2026.17.06>

Cómo citar:

Muñoz Marín, L.I., Londoño Peña, P., Jurado Noguera, C.A., Bolívar Herrera, C.H., & Narváez-Herrera, J.P. (2026). Efecto de la masa de grano y volteo en la calidad fisicoquímica y sensorial del cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonía Colombiana. *Revista Científica Del Amazonas*, 9(17), 79-94.
<https://doi.org/10.34069/RA/2026.17.06>

Recibido: 12 de abril de 2026

Aceptado: 25 de junio de 2026



Resumen

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un cultivo de importancia económica en la Amazonía colombiana, cuya calidad depende en gran medida del manejo de la fermentación. Se evaluó el efecto de la proporción de llenado de bolsas y la frecuencia de volteo sobre la calidad fisicoquímica y sensorial del cacao clon CCN 51. Se empleó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3×3 , con tres niveles de llenado de bolsas (25, 50 y 75%) y tres frecuencias de volteo (1, 2 y 3 veces al día), para un total de nueve tratamientos y cinco repeticiones. Se analizaron pH y acidez titulable en masa fermentada y grano seco, contenido de polifenoles y perfil sensorial. Los resultados mostraron diferencias significativas en el pH de la masa fermentada y del grano seco, en la acidez titulable de la masa fermentada y en el contenido de polifenoles. El tratamiento con volteo intermedio y mayor proporción de llenado favoreció una mayor acidificación, mientras que tres volteos diarios conservaron mayor contenido de polifenoles. Sensorialmente, el cacao presentó mayor intensidad de aroma, acidez y sabor a cacao, aunque con baja complejidad aromática. Se concluye que el manejo del volteo y de la masa fermentada influye en la calidad final del cacao en sistemas de pequeña escala.

Palabras clave: acidez, fermentación, pH, polifenoles, poscosecha.

Abstract

Cocoa (*Theobroma cacao* L.) is a crop of economic importance in the Colombian Amazon, and its quality largely depends on fermentation management. This study evaluated the effect of bag filling proportion and turning frequency on the physicochemical and sensory quality of CCN 51 cocoa. A completely randomized 3×3 factorial design was used, with three bag filling levels (25, 50, and 75%) and three turning frequencies (1, 2, and 3 times per day), for a total of nine treatments with five replicates. Fermented mass pH, dried bean pH, titratable acidity in fermented mass and dried beans, polyphenol content, and sensory profile were evaluated. The results showed significant differences in fermented mass pH, dried bean pH, titratable acidity of the fermented mass, and polyphenol content. The treatment with intermediate turning frequency and higher filling proportion promoted greater acidification, whereas three turnings per day preserved higher polyphenol

content. Sensory evaluation showed greater intensity of aroma, acidity, and cocoa flavor, although with low aromatic complexity. It is concluded that turning management and fermented mass proportion influence the final quality of cocoa in small-scale fermentation systems.

Keywords: acidity, fermentation, pH, polyphenols, postharvest.

Introducción

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un cultivo estratégico en las regiones tropicales por su importancia económica, alimentaria y agroindustrial, así como por su uso en las industrias de alimentos, farmacéutica y cosmética (Vázquez-Ovando, 2016). En los territorios amazónicos, además de su valor comercial, el cultivo representa una alternativa productiva relevante para pequeños productores y sistemas agroforestales, por lo que la mejora de la calidad poscosecha constituye un factor clave para incrementar su competitividad. En el departamento del Putumayo, estudios recientes han resaltado la importancia de caracterizar y fortalecer los sistemas cacaoteros locales, dada la diversidad de materiales presentes y el potencial productivo de estas regiones (Apraéz Muñoz et al., 2024). La calidad final del grano depende en gran medida de las operaciones poscosecha, especialmente de la fermentación, proceso en el cual ocurren transformaciones bioquímicas y microbiológicas determinantes para la formación de compuestos precursores del aroma, sabor, color y otras propiedades del chocolate (Calvo et al., 2021; Góngora-Duarte et al., 2023).

Durante la fermentación, la degradación de azúcares del mucílago, la producción de metabolitos orgánicos, la acidificación progresiva de la masa y la oxidación de compuestos fenólicos modifican la composición del grano y condicionan su calidad fisicoquímica y sensorial (Rivera Fernández et al., 2012; Vázquez-Ovando, 2016). En este contexto, variables como pH, acidez total titulable, temperatura y contenido de polifenoles se consideran indicadores útiles para evaluar la evolución del proceso fermentativo y su efecto sobre la calidad del cacao (Portillo et al., 2011; Solórzano et al., 2021). Estas variables no actúan de manera independiente, sino que reflejan la interacción entre la actividad microbiana, la disponibilidad de oxígeno, la retención de calor en la masa fermentada y la transformación de compuestos asociados con el desarrollo del sabor, la reducción de la astringencia y la expresión del perfil sensorial del grano. En Colombia, investigaciones recientes han mostrado que la fermentación modifica de manera importante los atributos fisicoquímicos y sensoriales del cacao, y que dichas respuestas pueden variar según el clon, el origen geográfico y las condiciones de manejo poscosecha (García-Rincón et al., 2021; López-Hernández et al., 2023; Ramírez González et al., 2024).

En el departamento del Putumayo, el cacao constituye un renglón productivo de relevancia económica y social (Agrosavia, 2016). En zonas de piedemonte y llanura amazónica, el clon CCN 51 ha adquirido importancia por su adaptabilidad, productividad y aceptación comercial (Parra Pineda & Orozco Calero, 2021). Este clon ha sido ampliamente utilizado en diferentes regiones cacaoteras del país y su comportamiento durante la fermentación puede variar según las condiciones de madurez, manejo poscosecha y localización geográfica (López-Hernández et al., 2023). No obstante, en los sistemas de producción local persisten limitaciones en el manejo poscosecha, ya que la fermentación suele realizarse en recipientes de distinta capacidad, cajones, sacos o bolsas, bajo criterios empíricos definidos por la disponibilidad de tiempo, mano de obra y volumen de cosecha. Esta variabilidad puede afectar la aireación, la temperatura de la masa, la dinámica microbiana y, en consecuencia, la homogeneidad de la fermentación y la calidad final del grano (Penagos Muñeton, 2019). En sistemas de pequeña escala, esta situación adquiere especial importancia, debido a que los bajos volúmenes de cosecha pueden dificultar la conservación de calor y limitar la estabilidad del proceso fermentativo.

Aunque estudios previos han señalado la importancia del control del pH, la acidez y los compuestos fenólicos en la fermentación del cacao (Portillo et al., 2011; Vázquez-Ovando, 2016), aún es limitada la información sobre el efecto de la relación masa-volumen en sistemas de fermentación en bolsas de pequeña escala y sobre la frecuencia de volteo en condiciones del piedemonte amazónico. Asimismo, se requiere mayor evidencia sobre cómo la interacción entre la proporción de llenado y el número de volteos diarios modifica simultáneamente la acidificación, la transformación de polifenoles y la expresión sensorial del cacao CCN 51. Este vacío restringe la formulación de criterios técnicos para estandarizar prácticas de beneficio adaptadas a los sistemas productivos regionales. Frente a esta situación, el presente estudio se propuso evaluar el efecto combinado de la proporción de llenado de bolsas de fermentación y el número de volteos diarios sobre variables fisicoquímicas y sensoriales del grano de cacao (*Theobroma cacao* L.) clon CCN 51. Con ello, se busca generar evidencia técnica que contribuya a la estandarización

de prácticas de fermentación en sistemas de bolsa, fortaleciendo la calidad del producto, la competitividad de los productores locales y la sostenibilidad del sistema cacaotero en el piedemonte amazónico colombiano.

Revisión de literatura

La fermentación del cacao constituye una etapa crítica en el beneficio poscosecha, en la cual se desarrollan procesos bioquímicos y microbiológicos responsables de la formación de compuestos precursores del aroma y sabor del chocolate. Este proceso implica la acción sucesiva de levaduras, bacterias ácido-lácticas y bacterias ácido-acéticas, que transforman los azúcares del mucilago en etanol, ácido láctico y ácido acético, generando un incremento progresivo de la temperatura y la acidificación de la masa (Vázquez-Ovando, 2016; Calvo et al., 2021; Góngora-Duarte et al., 2023). Durante esta etapa, la difusión de metabolitos hacia el interior del grano provoca la muerte del embrión y desencadena reacciones enzimáticas que modifican la estructura de los cotiledones, favoreciendo la formación de compuestos volátiles y la oxidación de polifenoles. Este último proceso es fundamental para la reducción de la astringencia y el amargor característicos del cacao no fermentado, así como para el desarrollo del color pardo típico del grano adecuadamente fermentado (Rivera Fernández et al., 2012; Cortez et al., 2023). Por tanto, la fermentación no debe entenderse únicamente como una etapa de remoción del mucilago, sino como un proceso integral en el que interactúan microorganismos, temperatura, aireación, acidez y transformación de compuestos bioactivos, todos ellos determinantes de la calidad final del cacao.

Diversas investigaciones han identificado variables fisicoquímicas como indicadores clave del avance y la calidad del proceso fermentativo. El pH y la acidez total titulable reflejan el grado de acidificación de la masa, asociado a la producción de ácidos orgánicos, principalmente ácido acético. Valores de pH cercanos o inferiores a 5,0 suelen indicar fermentaciones más completas, mientras que valores superiores pueden estar asociados a procesos incompletos o con deficiente actividad microbiana (Portillo et al., 2011; Solórzano et al., 2021). De manera complementaria, la temperatura es un parámetro determinante, ya que influye directamente en la actividad metabólica de los microorganismos y en la velocidad de las reacciones bioquímicas. Estudios recientes han demostrado que la dinámica del pH, la acidez y la temperatura durante la fermentación se relaciona estrechamente con la sucesión microbiana y con la formación de atributos de calidad del grano, por lo que estas variables deben analizarse de manera conjunta y no como indicadores independientes (Calvo et al., 2021; Peña González et al., 2023).

Por otra parte, el contenido de compuestos fenólicos, especialmente catequinas y epicatequinas, constituye un indicador relevante tanto de la calidad funcional como sensorial del cacao. Estos compuestos presentan una disminución progresiva durante la fermentación debido a procesos de oxidación y polimerización, los cuales están estrechamente relacionados con la reducción de la astringencia y la mejora del perfil sensorial del grano (Vázquez-Ovando, 2016). Sin embargo, la conservación parcial de polifenoles también puede representar un atributo funcional de interés, debido a su relación con la capacidad antioxidante del cacao; por ello, el reto tecnológico consiste en alcanzar un equilibrio entre la transformación fenólica necesaria para mejorar el perfil sensorial y la preservación de compuestos bioactivos de valor nutricional y funcional (Hurst et al., 2011; Cortez et al., 2023).

Entre los factores operativos que condicionan la eficiencia del proceso fermentativo, la aireación de la masa juega un papel fundamental. El volteo del grano permite homogenizar la temperatura, favorecer la oxigenación del sistema y estimular la actividad de bacterias ácido-acéticas, responsables de la conversión del etanol en ácido acético. Estudios reportan que una mayor frecuencia de volteo contribuye a una fermentación más uniforme y a una mejor calidad final del grano, aunque un exceso de manipulación puede generar pérdidas de calor y afectar la dinámica microbiana (Camu et al., 2008; Afoakwa et al., 2008; Velásquez-Reyes et al., 2021). En consecuencia, el volteo no necesariamente presenta una respuesta lineal sobre la calidad; frecuencias insuficientes pueden limitar la oxigenación y la producción de ácido acético, mientras que frecuencias excesivas pueden alterar la estabilidad térmica del sistema y modificar la transformación de polifenoles y compuestos aromáticos.

Adicionalmente, la relación entre la masa de grano y el volumen del sistema fermentador influye en la retención de calor, la disponibilidad de oxígeno y la acumulación de metabolitos. Sistemas con mayor volumen de masa tienden a conservar mejor la temperatura, favoreciendo el desarrollo microbiano, mientras que volúmenes reducidos pueden generar fermentaciones incompletas debido a pérdidas térmicas (Penagos Muñeton, 2019). Este aspecto es particularmente relevante en unidades productivas de pequeña escala, donde los volúmenes de cosecha son variables y, en muchos casos, insuficientes para garantizar condiciones térmicas estables durante toda la fermentación. En

este sentido, la implementación de sistemas alternativos como bolsas plásticas perforadas o bolsas de polietileno de alta densidad han sido explorados como una opción viable para pequeños productores, aunque su comportamiento depende de la interacción entre la carga de grano y las prácticas de manejo, como la frecuencia de volteo. Investigaciones en Colombia han mostrado que el clon, el tiempo de fermentación, el manejo poscosecha y las condiciones locales pueden modificar la expresión fisicoquímica y sensorial del cacao, lo que refuerza la necesidad de validar tecnologías adaptadas a contextos regionales específicos, como la Amazonía colombiana (Horta-Téllez et al., 2019; Polanía-Hincapié et al., 2023; Ramírez González et al., 2024).

A pesar de estos avances, aún existe limitada información sobre la interacción entre la proporción de llenado en sistemas de fermentación en bolsas y la frecuencia de volteo, particularmente en condiciones del piedemonte amazónico colombiano. Esta brecha de conocimiento restringe la formulación de recomendaciones técnicas adaptadas a sistemas productivos de pequeña escala, lo que justifica la necesidad de estudios que integren variables fisicoquímicas y sensoriales en la evaluación del proceso fermentativo del cacao clon CCN 51. En este orden de ideas, analizar simultáneamente pH, acidez titulable, polifenoles y atributos sensoriales permite comprender de manera más integral cómo las decisiones de manejo durante la fermentación inciden en la calidad final del grano y en su potencial aplicación para sistemas cacaoteros amazónicos de pequeña escala.

Metodología

Tipo de estudio y ubicación geográfica. Se realizó un estudio experimental con diseño factorial completamente aleatorizado. Las mazorcas de cacao del clon CCN 51 fueron recolectadas en predios productores ubicados en la vereda San Carlos, municipio de San Miguel, Putumayo, Colombia. El área de estudio se localiza en las coordenadas 0°19'58.45" N y 76°52'49.11" O, con condiciones de clima tropical húmedo, temperatura promedio anual de 28 °C, precipitación de 3500 mm/año y altitud aproximada de 380 m s. n. m. (IDEAM, 2018). La fase experimental se desarrolló en los laboratorios de la Institución Universitaria del Putumayo - UniPutumayo, sede Aire Libre, en el municipio de Mocoa.

Material vegetal. Se recolectaron 150 mazorcas de cacao clon CCN 51, equivalentes a 28 kg de masa inicial de grano fresco con mucílago, en estado de madurez fisiológica completa. Las mazorcas fueron abiertas entre 24 y 48 h después de la cosecha y los granos fueron mezclados y homogenizados antes del montaje experimental, con el fin de reducir la variabilidad inicial entre unidades experimentales.

Diseño experimental. Se empleó un arreglo factorial 3 × 3 con dos factores: Factor A: porcentaje de llenado de las bolsas (25, 50 y 75%) y Factor B: frecuencia de volteo (1, 2 y 3 volteos diarios). Se generaron nueve tratamientos, cada uno con cinco repeticiones, para un total de 45 unidades experimentales. Cada unidad experimental correspondió a una bolsa de fermentación con una masa específica de grano, asignada de acuerdo con el porcentaje de llenado establecido para cada tratamiento. La asignación de los tratamientos a las unidades experimentales se realizó bajo un esquema completamente aleatorizado, con el fin de reducir sesgos asociados a la ubicación o manipulación de las muestras.

Sistema y condiciones de fermentación. La fermentación se realizó en bolsas de polietileno de alta densidad (HDPE) con capacidad de 6 L, dimensiones de 16 × 30 cm y perforaciones cada 5 cm para favorecer la aireación. Las bolsas fueron ubicadas sobre recipientes plásticos para recolectar el mucílago drenado y evitar el contacto directo de las unidades experimentales con el líquido exudado. El proceso fermentativo tuvo una duración de seis días bajo condiciones ambientales (25–38 °C). Los volteos se realizaron manualmente de acuerdo con la frecuencia asignada a cada tratamiento, mezclando la masa durante aproximadamente 5 minutos para favorecer la homogenización y oxigenación del sistema. Durante el proceso se procuró mantener condiciones similares de exposición ambiental entre tratamientos, con el fin de que las diferencias observadas fueran atribuibles principalmente a la proporción de llenado y a la frecuencia de volteo. Al finalizar la fermentación, los granos destinados a los análisis fisicoquímicos fueron sometidos a secado controlado a 103 °C durante 24 h para homogenizar la humedad antes de los análisis químicos. Las muestras destinadas al análisis sensorial fueron manejadas de manera independiente, con el fin de conservar sus características organolépticas.

Variables evaluadas

Parámetros fisicoquímicos en masa fermentada

pH de la masa fermentada. Se estimó mediante tiras indicadoras insertadas directamente en la masa **al finalizar el proceso fermentativo**, comparando la coloración obtenida con la escala de referencia del fabricante, de acuerdo con la metodología descrita por Portillo et al. (2011).

Acidez total titulable (ATT). Se determinó en 5 mL de mucilago filtrado mediante titulación con NaOH 0.1 N y fenolftaleína como indicador, expresando los resultados como porcentaje de ácido cítrico, de acuerdo con Penagos Muñeton (2019). La ATT fue utilizada como indicador de la acumulación de ácidos orgánicos generados durante la fermentación.

Parámetros químicos en grano seco

pH del grano seco. Se determinó en 5 g de grano descascarillado y molido, homogenizado en 100 mL de agua destilada caliente, dejando reposar la suspensión hasta alcanzar condiciones adecuadas para la lectura, con medición mediante potenciómetro, según Solórzano et al. (2021). Esta variable permitió evaluar la acidificación interna del cotiledón como resultado de la difusión de metabolitos ácidos durante la fermentación.

Acidez total titulable. Se determinó mediante titulación ácido-base en muestras de grano seco, siguiendo la metodología descrita por Penagos Muñeton (2019). Los resultados se expresaron como porcentaje de acidez titulable, permitiendo complementar la interpretación del pH del grano y estimar la incorporación de ácidos al cotiledón.

Polifenoles totales. Se cuantificaron mediante el método Folin–Ciocalteu, con lectura espectrofotométrica a 760 nm, según protocolos descritos para cacao por Vázquez-Ovando (2016). Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico por g de grano seco. Esta variable fue considerada un indicador de la transformación de compuestos fenólicos durante la fermentación y de su posible relación con atributos sensoriales como amargor y astringencia.

Análisis sensorial. Se evaluó 1 kg de grano seco por tratamiento mediante un panel de 15 panelistas entrenados, utilizando escalas sensoriales de acuerdo con las Normas Técnicas Colombianas NTC 3925 y NTC 5328 (ICONTEC, 1996; ICONTEC, 2004). Se calificaron atributos como aroma, sabor a cacao, notas frutales o florales, acidez, amargor, astringencia, textura en boca y retrogusto. Las muestras destinadas al análisis sensorial fueron manejadas de forma independiente a las empleadas para los análisis de laboratorio, con el fin de conservar sus características organolépticas. Los resultados sensoriales se analizaron de manera descriptiva mediante los puntajes promedio asignados por el panel, permitiendo caracterizar el perfil organoléptico del cacao obtenido bajo las condiciones evaluadas.

Análisis estadístico. Los datos fisicoquímicos se analizaron mediante un modelo factorial 3×3 , considerando como factores fijos el porcentaje de llenado de las bolsas y la frecuencia de volteo. Se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, seguido de un análisis de varianza (ANOVA). Las diferencias entre tratamientos se evaluaron mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0.05$. El análisis estadístico se realizó en el software RStudio (R Core Team, 2023).

Consideraciones éticas. El estudio no involucró experimentación con animales ni procedimientos invasivos en seres humanos. La participación en el análisis sensorial fue voluntaria, bajo criterios de consentimiento informado. Los panelistas fueron informados sobre el propósito de la evaluación y participaron únicamente en la valoración sensorial de muestras de cacao, sin exposición a procedimientos que representaran riesgo para su integridad.

Resultados y discusión

pH de la masa fermentada. El pH de la masa fermentada presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$), evidenciando el efecto de la frecuencia de volteo, la proporción de llenado de las bolsas y su interacción

sobre la acidificación del sistema fermentativo (Figura 1). Este comportamiento confirma que la acidificación del mucílago no estuvo determinada por un solo factor de manejo, sino por la combinación entre la cantidad de masa fermentada disponible y el grado de aireación generado por los volteos.

Los valores más bajos de pH se registraron en el tratamiento V2-75% (5.01 ± 0.04), el cual difirió significativamente de la mayoría de los tratamientos, indicando una mayor intensidad de acidificación del mucílago. En contraste, los tratamientos V1-25% (5.79 ± 0.06) y V2-25% (5.84 ± 0.06) presentaron los valores más altos de pH, lo que sugiere una menor eficiencia fermentativa bajo condiciones de baja masa fermentada. Estos resultados coinciden con lo reportado por Portillo et al. (2011), quienes señalan que las variaciones de pH durante el tratamiento poscosecha son un indicador sensible de la evolución fermentativa del cacao, así como con Solórzano et al. (2021), quienes relacionan valores de pH más bajos con una fermentación más completa y con mejores atributos físicos y sensoriales en licor de cacao. De manera similar, Calvo et al. (2021) destacan que los cambios de pH durante la fermentación reflejan la actividad metabólica de los microorganismos y la acumulación de ácidos orgánicos, especialmente ácido acético y ácido láctico, los cuales participan en la modificación estructural y bioquímica del grano.

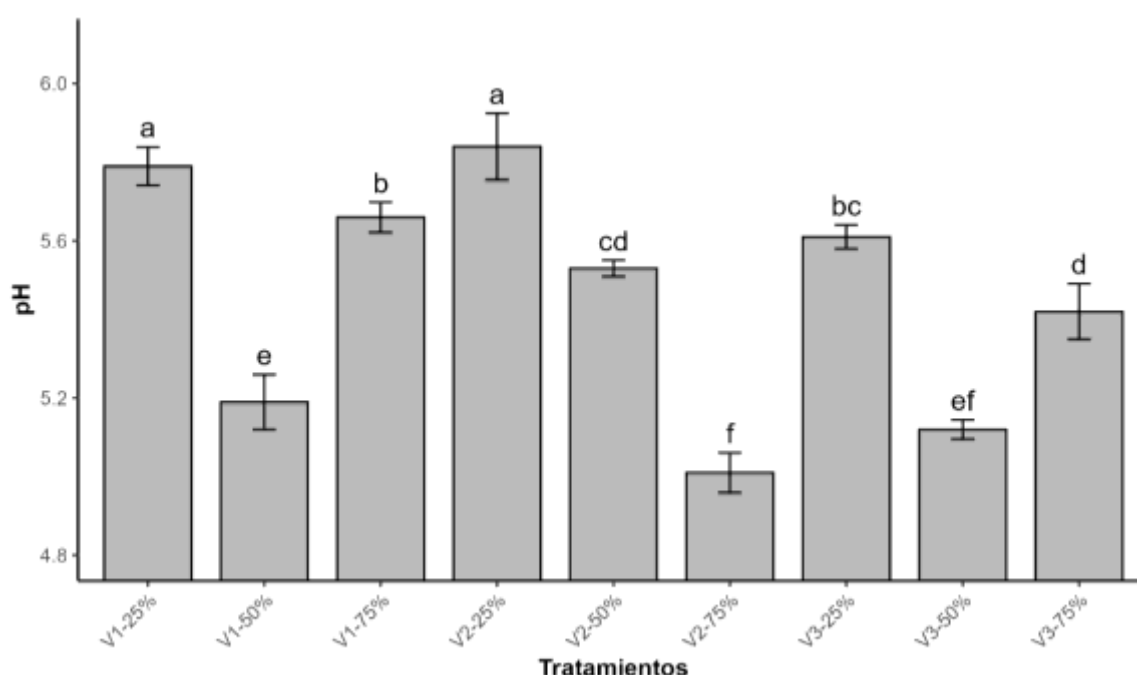


Figura 1. pH de la masa fermentada de cacao CCN 51 bajo diferentes tratamientos. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Aunque no se observó una respuesta lineal en todos los tratamientos, se identificó una tendencia según la cual ciertas combinaciones de mayor llenado y volteo moderado favorecieron una mayor acidificación de la masa fermentada. En particular, el comportamiento de V2-75% sugiere que una frecuencia intermedia de volteo, combinada con una alta proporción de masa, puede generar un equilibrio adecuado entre oxigenación y conservación de calor, promoviendo la oxidación del etanol a ácido acético por acción de bacterias ácido-acéticas. Esta interpretación coincide con Penagos Muñeton (2019), quien destacó que la relación entre masa de grano y volumen del sistema fermentador influye directamente en la retención térmica y en la estabilidad del proceso fermentativo. En sistemas de pequeña escala, como los evaluados en este estudio, este aspecto adquiere especial importancia, debido a que volúmenes reducidos de grano pueden perder calor con mayor facilidad y limitar la actividad microbiana responsable de la acidificación.

Los valores relativamente bajos de pH observados en V1-50% y V3-50% sugieren que la acidificación del mucílago no dependió exclusivamente del número de volteos, sino de la interacción entre aireación, masa fermentada y dinámica térmica. En este sentido, Afoakwa et al. (2008) señalaron que la aireación es un factor determinante en la

conversión del etanol en ácido acético, mientras que Calvo et al. (2021) destacan que la dinámica de fermentación del cacao responde a interacciones complejas entre actividad microbiana, temperatura y uniformidad del sistema. Asimismo, estudios sobre el efecto del volteo han demostrado que la aireación favorece el desarrollo de bacterias ácido-acéticas; sin embargo, su efecto puede ser variable cuando la manipulación excesiva reduce la estabilidad térmica de la masa fermentada. Así, una mayor frecuencia de volteo no necesariamente implica una acidificación más eficiente si se compromete la estabilidad térmica del proceso.

Desde una perspectiva aplicada, estos resultados indican que el tratamiento V2-75% generó condiciones más favorables para la acidificación de la masa fermentada, posiblemente por combinar una mayor retención de calor con una oxigenación suficiente. En contraste, los tratamientos con 25% de llenado presentaron menor acidificación, lo cual sugiere que las masas pequeñas podrían ser menos eficientes para sostener una fermentación homogénea en sistemas de bolsa. Esta información es relevante para pequeños productores, ya que permite orientar prácticas sencillas de manejo poscosecha, como evitar volúmenes demasiado bajos de fermentación y ajustar la frecuencia de volteo para no afectar la temperatura interna del sistema.

pH del grano seco. Se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, lo que evidencia que la frecuencia de volteo y la proporción de llenado de las bolsas influyeron en la intensidad de la acidificación final del grano (Figura 2). El valor más bajo se observó en el tratamiento V2-75%, mientras que los valores más altos se registraron en V2-25% y V1-25%, lo que sugiere que la combinación entre una frecuencia intermedia de volteo y una alta masa fermentada favoreció una mayor difusión de metabolitos ácidos hacia el interior del grano. Este comportamiento fue consistente con lo observado en el pH de la masa fermentada, donde el tratamiento V2-75% también presentó mayor acidificación, lo que indica una relación directa entre la dinámica ácida del mucílago y la acidificación interna del cotiledón.

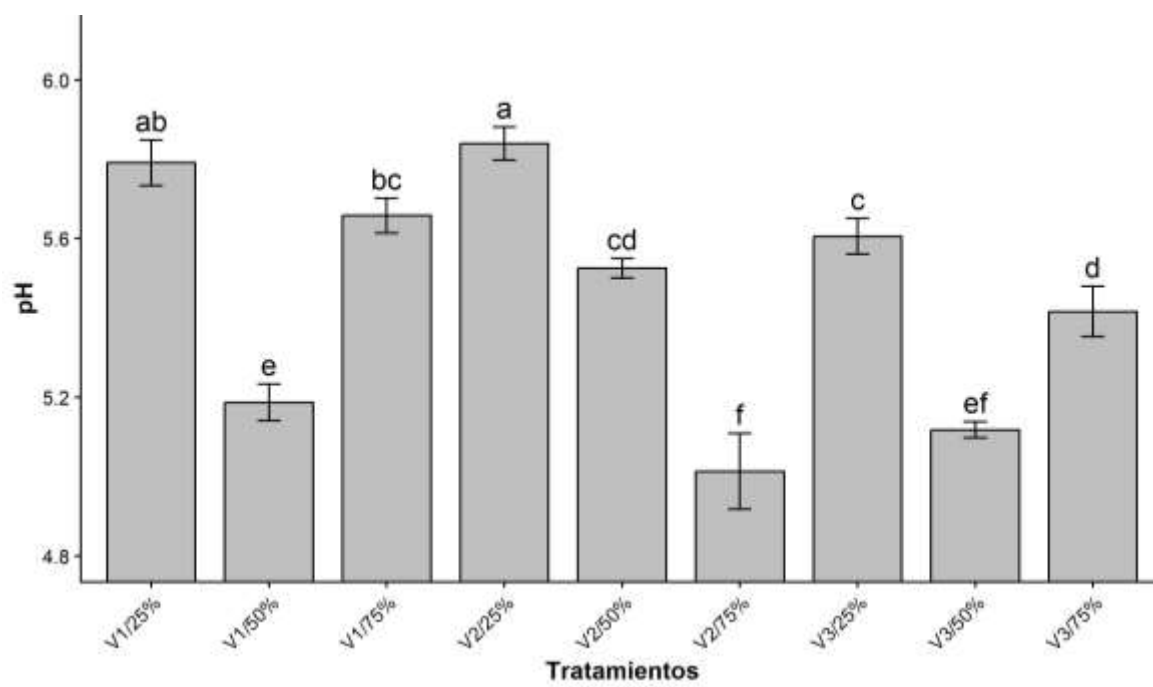


Figura 2. pH del grano seco de cacao CCN 51 bajo diferentes tratamientos. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

La disminución del pH en el grano seco puede interpretarse como una consecuencia de la penetración de ácido acético desde el mucílago hacia el cotiledón durante la fermentación, proceso estrechamente relacionado con la actividad de bacterias ácido-acéticas y con la disponibilidad de oxígeno en el sistema. En este sentido, Afoakwa et al. (2008) señalaron que la conversión del etanol en ácido acético constituye una fase crítica del proceso fermentativo, ya que determina la muerte del embrión, la activación de enzimas endógenas y la posterior formación

de precursores de aroma y sabor. De forma complementaria, Portillo et al. (2011) reportaron que la acidificación es un indicador sensible de la intensidad del tratamiento poscosecha, mientras que Solórzano et al. (2021) relacionaron valores más bajos de pH con una fermentación más completa y con mejores atributos de calidad del cacao. Así, el menor pH observado en V2-75% puede interpretarse como evidencia de una fermentación más activa, en la cual la mayor masa fermentada pudo favorecer la retención de calor y la frecuencia intermedia de volteo pudo aportar oxigenación suficiente para estimular la producción de ácidos orgánicos.

La acidificación del grano no dependió exclusivamente del número de volteos, sino de la interacción entre aireación, masa fermentada y retención térmica. Aunque V2-75% presentó el menor pH, otros tratamientos como V1-50% y V3-50% también mostraron valores relativamente bajos, lo que sugiere que existen combinaciones específicas de manejo que favorecen la incorporación de compuestos ácidos al cotiledón. Esta interpretación coincide con Penagos Muñeton (2019), quien destacó que la relación entre masa de grano y volumen del sistema fermentador condiciona la evolución del proceso fermentativo y la uniformidad de sus resultados. Desde esta perspectiva, los tratamientos con menor proporción de llenado, especialmente V1-25% y V2-25%, pudieron presentar una menor eficiencia fermentativa debido a una limitada conservación de calor y a una menor estabilidad de las condiciones internas del sistema.

Asimismo, la tendencia inversa observada entre pH del grano y acidez titulable refuerza la idea de que ambos parámetros son complementarios en la evaluación de la fermentación. Un menor pH, acompañado de mayor acidez, refleja una mayor incorporación de ácidos al cotiledón y, por tanto, una fermentación más intensa. En términos de calidad, esta condición puede favorecer la formación de compuestos precursores del sabor; no obstante, un exceso de acidificación también puede afectar negativamente el perfil sensorial si no se acompaña de una adecuada transformación de compuestos fenólicos. En este sentido, Calvo et al. (2021) señalaron que la dinámica de fermentación del cacao responde a interacciones complejas entre variables microbiológicas, químicas y físicas, lo que explica la variabilidad observada entre tratamientos. Por ello, el pH del grano seco debe interpretarse en conjunto con la acidez titulable y el contenido de polifenoles, ya que una fermentación eficiente no depende únicamente de alcanzar valores bajos de pH, sino de lograr un balance entre acidificación, transformación fenólica y desarrollo de atributos sensoriales deseables.

La comparación entre el pH de la masa fermentada y el pH del grano seco permite inferir que la proporción de llenado y el volteo no solo modificaron el ambiente externo de fermentación, sino también la composición interna del grano. Este aspecto es relevante porque la acidificación del cotiledón participa en la activación de procesos enzimáticos asociados con la formación de precursores de aroma, color y sabor. Sin embargo, una acidificación excesiva o mal equilibrada podría favorecer notas ácidas intensas o limitar la expresión de atributos aromáticos más complejos. En este sentido, el tratamiento V2-75% parece representar una condición favorable para inducir una fermentación más intensa, aunque su efecto final debe analizarse de manera integrada con la respuesta sensorial y la transformación de polifenoles.

Acidez titulable en masa fermentada. La acidez titulable del mucílago presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$), evidenciando el efecto de la interacción entre la frecuencia de volteo y la proporción de llenado de las bolsas sobre la dinámica fermentativa (Figura 3). Este resultado confirma que la acumulación de ácidos orgánicos en la masa no dependió únicamente del número de volteos ni del volumen de grano por separado, sino del balance entre aireación, retención térmica y actividad microbiana durante el proceso.

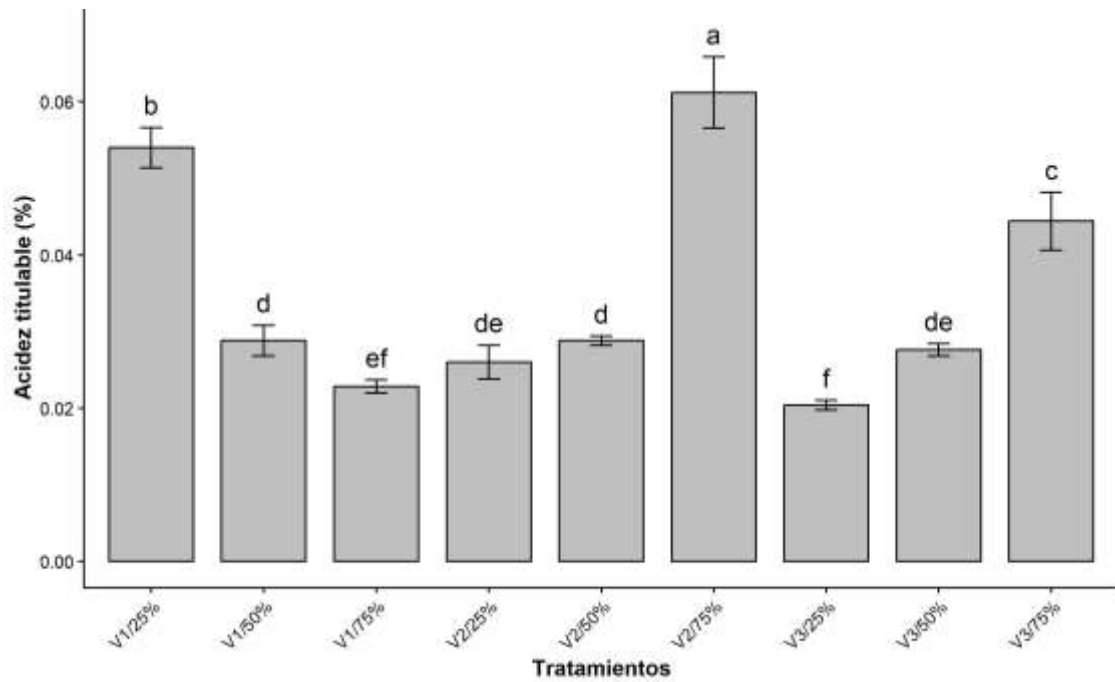


Figura 3. Acidez titulable (%) en la masa fermentada de cacao CCN 51 bajo diferentes tratamientos. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

El mayor valor de acidez se registró en el tratamiento V2-75% (0.0612 ± 0.002), el cual difirió significativamente del resto de los tratamientos, indicando una mayor producción y acumulación de ácidos orgánicos bajo condiciones de alta masa fermentada y una frecuencia intermedia de volteo. Este comportamiento sugiere que la combinación entre una adecuada aireación y una mayor retención térmica favorece la actividad de bacterias ácido-acéticas responsables de la oxidación del etanol, proceso clave en la fase intermedia de la fermentación (Afoakwa et al., 2008). La respuesta observada es coherente con los resultados de pH de la masa fermentada y del grano seco, en los cuales V2-75% también presentó los menores valores, confirmando que este tratamiento generó un ambiente fermentativo más acidificado y probablemente más activo desde el punto de vista bioquímico.

En contraste, los valores más bajos de acidez se observaron en tratamientos como V3-25% y V1-75%, los cuales presentaron diferencias significativas frente a los tratamientos de mayor acidez. Estos resultados indican que condiciones de baja masa fermentada o una aireación no equilibrada pueden limitar la acumulación de ácidos en el mucílago, ya sea por una menor actividad microbiana o por pérdidas de calor que afectan la estabilidad del proceso. Este comportamiento coincide con lo reportado por Portillo et al. (2011), quienes señalan que la acidificación del mucílago depende directamente de la interacción entre temperatura y disponibilidad de oxígeno. En particular, el bajo valor observado en V3-25% puede asociarse con una posible pérdida de estabilidad térmica por la combinación de baja masa y mayor manipulación, mientras que el comportamiento de V1-75% sugiere que una masa alta, sin suficiente aireación, tampoco garantiza por sí sola una mayor producción de ácidos.

La tendencia observada indica que mayores proporciones de llenado, como 75%, no necesariamente reducen la acidez, sino que, en interacción con la frecuencia de volteo, pueden favorecer su acumulación en el mucílago. En particular, el volteo intermedio parece optimizar la oxigenación sin generar pérdidas excesivas de calor, lo cual resulta determinante para la actividad microbiana y la producción de metabolitos ácidos. Esta interpretación es consistente con Penagos Muñeton (2019), quien destaca que la relación masa-volumen influye en la estabilidad térmica y en la eficiencia del proceso fermentativo. Desde una perspectiva microbiológica, este equilibrio resulta relevante porque las levaduras y bacterias ácido-lácticas predominan en las fases iniciales, mientras que las bacterias ácido-acéticas requieren mayor disponibilidad de oxígeno para transformar el etanol en ácido acético. Por ello, una frecuencia de volteo moderada puede favorecer la transición entre fases fermentativas sin comprometer la temperatura interna de la masa.

Asimismo, la relación inversa observada entre acidez titulable y pH en la masa fermentada refuerza la coherencia de los resultados, evidenciando que los tratamientos con mayor acumulación de ácidos corresponden a aquellos con menores valores de pH. En este sentido, Calvo et al. (2021) señalan que la producción de ácidos orgánicos forma parte de un proceso complejo en el que la actividad microbiana, la aireación y la temperatura determinan la calidad final del cacao. Esta relación también permite interpretar que la acidez titulable no debe analizarse de forma aislada, sino como un indicador complementario del pH y de la posterior acidificación del cotiledón. En consecuencia, el aumento de acidez en la masa fermentada puede favorecer la difusión de ácidos hacia el grano, la muerte del embrión y la activación de reacciones enzimáticas asociadas con la formación de precursores de aroma y sabor.

Los resultados evidencian que la interacción entre masa fermentada y aireación regula la cinética de producción de ácidos, constituyéndose en un factor determinante para la optimización del proceso fermentativo en sistemas de pequeña escala. Estos resultados sugieren que, para fermentaciones en bolsas, no sería recomendable trabajar con volúmenes muy bajos de grano ni con frecuencias de volteo excesivas sin considerar la retención térmica. Por el contrario, una mayor proporción de llenado combinada con una frecuencia intermedia de volteo podría constituir una estrategia sencilla para mejorar la acidificación del mucílago y la uniformidad del proceso fermentativo en cacao CCN 51 producido en el piedemonte amazónico colombiano.

Acidez titulable en grano seco. Los resultados presentaron una variación numérica entre tratamientos; sin embargo, no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre medias ($p > 0.05$), lo que indica que la proporción de llenado de las bolsas y la frecuencia de volteo no generaron un efecto estadísticamente comprobable sobre la acidez titulable del grano seco bajo las condiciones evaluadas (Figura 4). No obstante, la variabilidad observada entre tratamientos sugiere que la transferencia de ácidos hacia el cotiledón pudo estar influenciada por la interacción entre masa fermentada, aireación y estabilidad térmica, aunque con una respuesta heterogénea dentro de cada tratamiento.

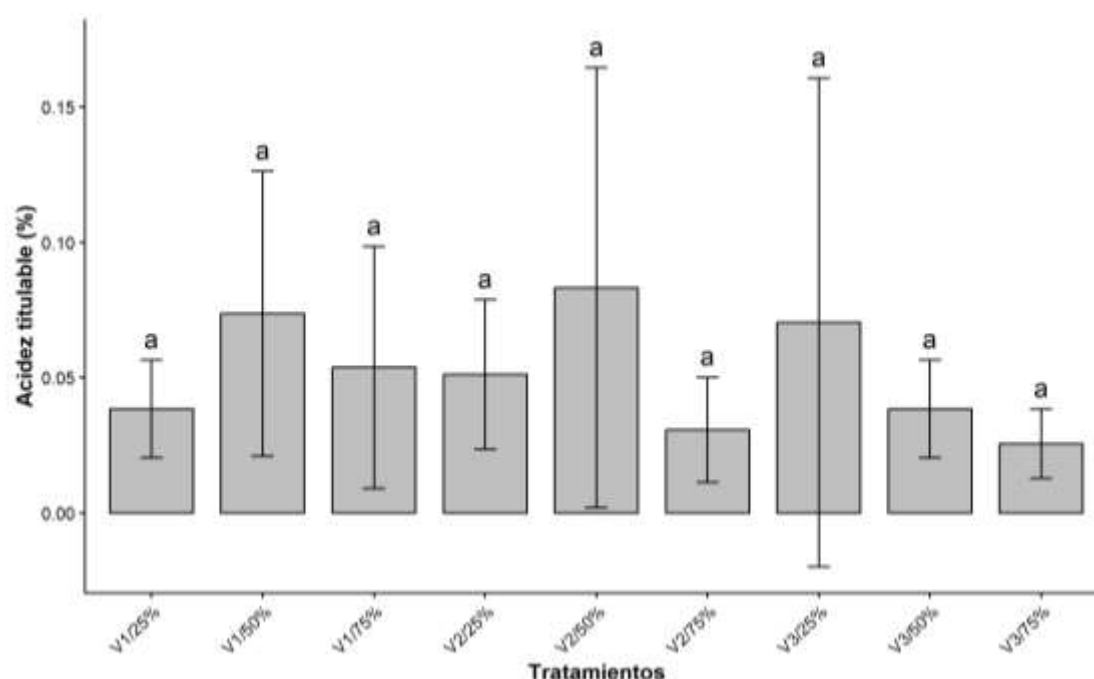


Figura 4. Acidez titulable (%) del grano de cacao bajo diferentes tratamientos. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p > 0.05$).

A pesar de la ausencia de diferencias significativas, los valores más altos se observaron en tratamientos como V2-50%, mientras que otros tratamientos presentaron valores relativamente menores. Esta tendencia numérica podría indicar que ciertas combinaciones intermedias entre masa fermentada y aireación favorecieron un balance entre la producción de ácidos en el mucílago y su posterior difusión hacia el interior del grano. Sin embargo, debido

a la ausencia de significancia estadística, esta interpretación debe asumirse como una tendencia y no como un efecto concluyente. Este comportamiento coincide con lo planteado por Penagos Muñeton (2019), quien destacó que la relación entre masa de grano y volumen del sistema fermentador influye en la estabilidad térmica y en la evolución del proceso fermentativo.

Desde el punto de vista microbiológico, la acumulación de ácido en el grano no depende únicamente de la producción de metabolitos en la masa fermentada, sino también de la aireación del sistema, ya que el volteo favorece la oxidación del etanol a ácido acético por acción de bacterias ácido-acéticas (Afoakwa et al., 2008). En este sentido, la mayor acidez numérica observada en algunos tratamientos intermedios sugiere que no siempre una mayor masa implica una mayor acidificación del cotiledón, sino que existe una interacción entre retención de calor, disponibilidad de oxígeno y eficiencia de difusión de metabolitos. Este tipo de respuesta no lineal también ha sido señalado por Calvo et al. (2021), quienes indican que la dinámica de fermentación del cacao depende de múltiples factores físicos, químicos y microbiológicos que actúan de forma simultánea.

Adicionalmente, la tendencia inversa entre acidez titulable y pH observada en este estudio concuerda con lo reportado por Portillo et al. (2011) y Solórzano et al. (2021), quienes señalan que la acidificación del grano constituye un indicador importante de la intensidad del proceso fermentativo y del desarrollo de atributos de calidad. Sin embargo, en este caso, el pH del grano seco mostró una respuesta más sensible entre tratamientos que la acidez titulable, lo que sugiere que ambos indicadores, aunque complementarios, pueden responder con diferente grado de precisión a los cambios ocurridos durante la fermentación.

Polifenoles. El contenido de polifenoles totales presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$), evidenciando un efecto marcado de la frecuencia de volteo y de la proporción de llenado sobre la transformación de compuestos fenólicos durante la fermentación (Figura 5). Este resultado indica que las condiciones de manejo del sistema fermentativo no solo afectaron la acidificación de la masa y del grano, sino también la conservación o degradación de compuestos bioactivos asociados con la calidad funcional y sensorial del cacao.

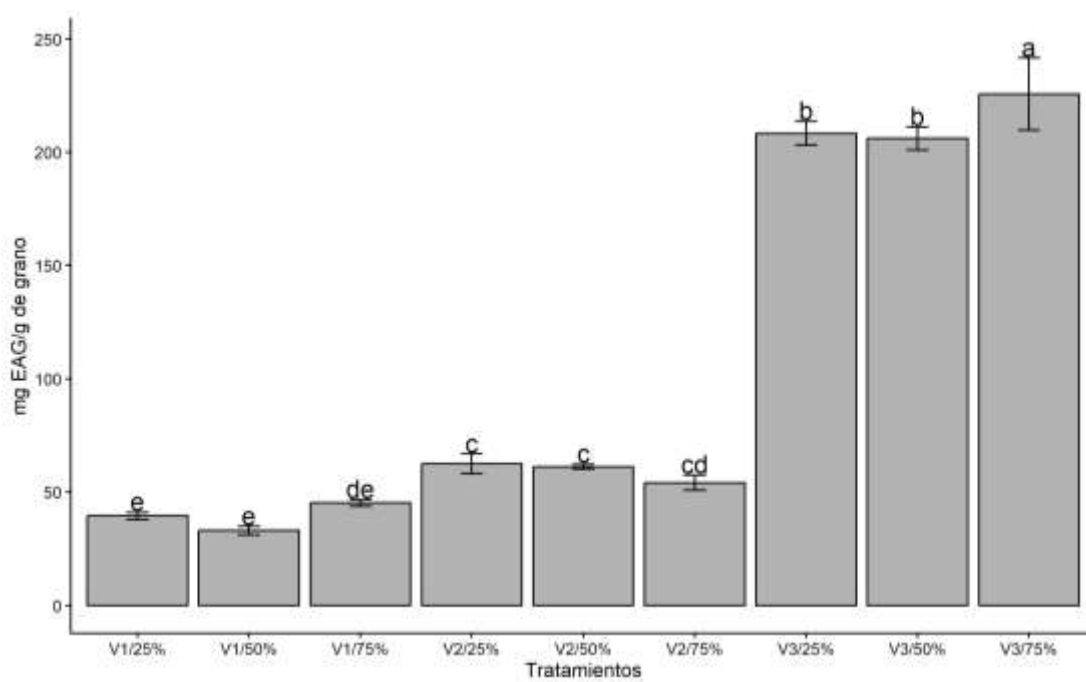


Figura 5. Contenido de polifenoles totales en grano de cacao CCN 51 bajo diferentes tratamientos de fermentación. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Los valores más altos se registraron en los tratamientos con tres volteos diarios (V3), particularmente en V3-75%, que presentó la mayor concentración de polifenoles y difirió significativamente del resto de los tratamientos. De

manera similar, V3–25% y V3–50% también mostraron valores elevados. En contraste, los tratamientos con menor frecuencia de volteo (V1), especialmente V1–25% y V1–50%, presentaron los contenidos más bajos, mientras que los tratamientos intermedios (V2) mostraron concentraciones moderadas, configurando un patrón transicional en la dinámica de transformación fenólica. Este comportamiento sugiere que el número de volteos tuvo un papel determinante en la conservación de polifenoles, aunque su efecto estuvo condicionado por la proporción de llenado de las bolsas.

Estos resultados sugieren que una mayor frecuencia de volteo no necesariamente favoreció la oxidación de compuestos fenólicos. Por el contrario, bajo las condiciones evaluadas, el incremento del volteo parece haber estado asociado con una mayor conservación de polifenoles en el grano. Esto podría indicar que una mayor manipulación de la masa modificó la dinámica térmica del sistema fermentativo y redujo la eficiencia de las reacciones de oxidación y polimerización catalizadas por enzimas como el polifenol oxidasa, las cuales normalmente contribuyen a la disminución de la astringencia y al desarrollo del perfil sensorial del cacao (Afoakwa et al., 2008; Vázquez-Ovando et al., 2016). En este sentido, la aireación inducida por el volteo puede favorecer ciertos procesos fermentativos, como la actividad de bacterias ácido-acéticas, pero no necesariamente garantiza una mayor degradación de polifenoles si se altera la estabilidad térmica o la continuidad de las reacciones oxidativas.

La respuesta observada confirma que la relación entre aireación, acidificación y transformación de compuestos fenólicos no es lineal. Mientras el tratamiento V2–75% favoreció una mayor acidificación de la masa fermentada y del grano, los tratamientos V3 mostraron una mayor conservación de polifenoles. Esto indica que las condiciones que intensifican la acidificación no siempre coinciden con aquellas que promueven una mayor transformación fenólica. En este sentido, Vázquez-Ovando et al. (2016), Calvo et al. (2021) y Cortez et al. (2023) señalan que la dinámica de fermentación depende de la interacción entre múltiples factores, entre ellos la aireación, la temperatura, la actividad enzimática, la composición del grano y la uniformidad del sistema, lo que puede generar respuestas diferenciales en la degradación de compuestos fenólicos.

La mayor conservación de polifenoles puede tener una doble interpretación. Por un lado, representa un atributo funcional de interés, debido a la asociación de estos compuestos con la capacidad antioxidante del cacao. Por otro lado, una menor transformación fenólica durante la fermentación puede relacionarse con mayor persistencia de amargor y astringencia, atributos que pueden afectar la aceptabilidad sensorial si se expresan con alta intensidad. Por tanto, los tratamientos con tres volteos podrían conservar un mayor potencial funcional, pero también requerir ajustes de manejo para mejorar la transformación sensorial del grano.

En contraste, los menores valores observados en V1 sugieren una mayor transformación o pérdida de compuestos fenólicos durante la fermentación. No obstante, una menor concentración de polifenoles no debe interpretarse automáticamente como mejor calidad, ya que la calidad final depende del equilibrio entre reducción de astringencia, desarrollo de aroma, acidez adecuada y expresión del sabor a cacao. En consecuencia, los resultados indican que la frecuencia de volteo es una variable crítica en la transformación de polifenoles y que, bajo las condiciones evaluadas, tres volteos diarios favorecieron su conservación, con posibles implicaciones sobre la calidad funcional y sensorial del cacao CCN 51.

Análisis sensorial. El análisis realizado con un panel de 15 evaluadores sobre las muestras seleccionadas con tres volteos evidenció un perfil organoléptico caracterizado por una alta intensidad en atributos como aroma (15 puntos), acidez (13 puntos) y sabor a cacao (12 puntos), lo que sugiere un producto con características sensoriales favorables y acordes con un cacao fermentado de perfil básico bien definido (Figura 6). La selección de estas muestras respondió a su apariencia de fermentación y a su comportamiento fisicoquímico general.



Figura 6. Perfil sensorial del cacao CCN 51 evaluado. Los valores representan las puntuaciones promedio obtenidas para cada atributo sensorial.

Adicionalmente, se registraron puntuaciones intermedias en amargor (12 puntos), complejidad (10 puntos), astringencia (9 puntos) y textura en boca (8 puntos). Aunque el amargor y la astringencia fueron perceptibles, su intensidad no predominó sobre el perfil global, lo que indica un equilibrio sensorial aceptable. Esta interpretación resulta relevante si se considera que los tratamientos con tres volteos presentaron contenidos elevados de polifenoles, lo cual podría asociarse con cierta persistencia de sensaciones astringentes, aunque sin comprometer la aceptabilidad general del producto. En este sentido, la presencia moderada de amargor y astringencia puede interpretarse como una consecuencia parcial de la conservación de compuestos fenólicos durante la fermentación, especialmente en tratamientos donde el volteo frecuente pudo limitar su oxidación o polimerización completa.

En contraste, atributos como el retrogusto (2 puntos) y las notas frutales o florales (0 puntos) presentaron baja intensidad, indicando un desarrollo limitado de compuestos aromáticos secundarios. Este comportamiento sugiere que, aunque el proceso fermentativo permitió consolidar un perfil sensorial dominado por aroma, acidez y sabor a cacao, no fue suficiente para promover una mayor complejidad aromática. La ausencia de notas frutales o florales puede estar relacionada con las condiciones propias del clon CCN 51, la escala de fermentación, la dinámica de aireación y la posible limitación en la formación o retención de compuestos volátiles asociados con perfiles aromáticos más complejos.

Estos resultados son coherentes con el comportamiento fisicoquímico observado durante la fermentación. La presencia de una acidez sensorial relativamente alta coincide con la formación de ácidos orgánicos durante el proceso, mientras que la persistencia de amargor y astringencia moderados puede relacionarse con una transformación incompleta de compuestos fenólicos. En este sentido, Afoakwa et al. (2008) y Vázquez-Ovando et al. (2016) señalan que la fermentación regula simultáneamente la generación de precursores de aroma y la oxidación de polifenoles, dos procesos determinantes en la calidad sensorial final del cacao. Por tanto, el perfil sensorial obtenido refleja el equilibrio alcanzado entre acidificación, conservación de polifenoles y desarrollo de atributos primarios del cacao.

La integración de los resultados fisicoquímicos y sensoriales permite señalar que los tres volteos diarios favorecieron la conservación de polifenoles y permitieron obtener un perfil sensorial aceptable, caracterizado por aroma, acidez y

sabor a cacao; sin embargo, también se evidenció una complejidad aromática limitada. Esto sugiere que una mayor frecuencia de volteo puede ser útil para mantener ciertos compuestos bioactivos, pero no necesariamente garantiza el desarrollo de notas sensoriales diferenciadas o de mayor persistencia.

El perfil sensorial obtenido refleja un cacao con buena expresión de atributos primarios, especialmente aroma y sabor a cacao, pero con margen de mejora en el desarrollo de notas aromáticas más complejas y en la persistencia del sabor. Esto sugiere que la optimización de las condiciones de fermentación, particularmente en la combinación entre masa fermentada y frecuencia de volteo, podría mejorar no solo la calidad fisicoquímica, sino también la complejidad sensorial del producto final. Estos resultados son relevantes para pequeños productores que emplean sistemas de fermentación en bolsas, ya que muestran que el manejo del volteo puede influir no solo en la acidificación y en el contenido de polifenoles, sino también en la expresión sensorial del cacao CCN 51.

Como limitaciones del estudio, se reconoce que no se realizó seguimiento continuo de la temperatura interna de la masa ni caracterización microbiológica de las fases fermentativas. Asimismo, el análisis sensorial tuvo un alcance descriptivo y se aplicó a muestras seleccionadas, por lo que sus resultados deben interpretarse como una aproximación al perfil organoléptico y no como una comparación estadística entre todos los tratamientos. Futuras investigaciones deberían validar estos resultados en condiciones de finca, incorporar mediciones de temperatura, dinámica microbiana, ácidos orgánicos específicos, compuestos volátiles y análisis sensorial comparativo entre tratamientos, con el fin de establecer protocolos de fermentación más precisos para sistemas de pequeña escala en la Amazonía colombiana.

Conclusiones

La fermentación del cacao CCN 51 en sistemas de bolsa estuvo influenciada por la interacción entre la frecuencia de volteo y la proporción de llenado, con una respuesta no lineal del sistema. La combinación de una frecuencia intermedia de volteo y alta masa fermentada favoreció una mayor acidificación de la masa fermentada y del grano seco, mientras que la mayor frecuencia de volteo se asoció con una mayor conservación de polifenoles, lo que sugiere una menor transformación fenólica bajo estas condiciones. En términos sensoriales, las muestras evaluadas presentaron buena expresión de aroma, acidez y sabor a cacao, aunque con baja complejidad aromática. En consecuencia, la optimización del proceso fermentativo debe orientarse hacia un balance entre aireación y proporción de masa fermentada, como criterio técnico para mejorar la calidad fisicoquímica y sensorial del cacao en sistemas de pequeña escala. Estos resultados aportan información útil para la estandarización de prácticas poscosecha en sistemas de fermentación en bolsa, especialmente para pequeños productores de cacao CCN 51 del piedemonte amazónico colombiano.

Referentes Bibliográficas

- Afoakwa, E. O., Paterson, A., Fowler, M., & Ryan, A. (2008). Flavor formation and character in cocoa and chocolate: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48(9), 840–857. <https://doi.org/10.1080/10408390701719272>
- Apraetz Muñoz, J. J., Burgos Jiménez, G., & Burbano Ijaji, E. J. (2024). Caracterización morfoagronómica in situ de cacao nativo (*Theobroma cacao* L.) de Puerto Asís, Putumayo, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 81–102. <https://doi.org/10.22490/21456453.7569>
- Calvo, A. M., Botina, B. L., García, M. C., Cardona, W. A., Montenegro, A. C., & Criollo, J. (2021). Dynamics of cocoa fermentation and its effect on quality. *Scientific Reports*, 11, 16746. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95703-2>
- Camu, N., González, Á., De Winter, T., Van Schoor, A., De Bruyne, K., Vandamme, P., Takrama, J. S., Addo, S. K., & De Vuyst, L. (2008). Influence of turning and environmental contamination on the dynamics of populations of lactic acid and acetic acid bacteria involved in spontaneous cocoa bean heap fermentation in Ghana. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(1), 86–98. <https://doi.org/10.1128/AEM.01512-07>
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, AGROSAVIA. (2016). *PECTIA: Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación del sector Agropecuario colombiano 2017–2027*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12759>

- Cortez, D., Quispe-Sanchez, L., Mestanza, M., Oliva-Cruz, M., Yoplac, I., Torres, C., & Chavez, S. G. (2023). Changes in bioactive compounds during fermentation of cocoa (*Theobroma cacao*) harvested in Amazonas-Peru. *Current Research in Food Science*, 6, 100494. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100494>
- García-Rincón, P. A., Núñez-Ramírez, J. M., & Bahamón-Monje, A. F. (2021). Características fisicoquímicas y sensoriales de almendras fermentadas de cacao nacional (*Theobroma cacao* L.) con adición de probióticos en el Centro de Investigaciones Amazónicas, CIMAZ Macagual (Caquetá, Colombia). *Ingeniería y Competitividad*, 23(2), e21210885. <https://doi.org/10.25100/iyv.v23i2.10885>
- Góngora-Duarte, A.F., Morales-Espitia, F.J., Trujillo-González, J.M., & Torres-Mora, M.A. (2023). Caracterización de los procesos en el beneficio del cacao (*Theobroma cacao* L.) en producciones a pequeña escala en el municipio de Guamal del Piedemonte llanero colombiano. *Tecnológicas*, 26(57), e201. <https://doi.org/10.22430/22565337.2633>
- Horta-Téllez, H. B., Sandoval-Aldana, A. P., García-Muñoz, M. C., & Cerón-Salazar, I. X. (2019). Evaluation of the fermentation process and final quality of five cacao clones from the department of Huila, Colombia. *DYNA*, 86(210), 233–239. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.75814>
- Hurst, W. J., Krake, S. H., Bergmeier, S. C., Payne, M. J., Miller, K. B., & Stuart, D. A. (2011). Impact of fermentation, drying, roasting and Dutch processing on flavan-3-ol stereochemistry in cacao beans and cocoa ingredients. *Chemistry Central Journal*, 5, 53. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-5-53>
- Instituto Colombiano de Normas Técnica y Certificación, ICONTEC. (2004). *Análisis sensorial. Directrices para el uso de escalas de respuesta cuantitativas* (NTC 5328).
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC. (1996). *Análisis sensorial. Metodología. Guía general* (NTC 3925).
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2018). *Metodología de la operación estadística variables meteorológicas*. <https://www.ideam.gov.co/transparencia/datos-abiertos/seccion-de-datos-abiertos>
- López-Hernández, M. del P., Melo-Martínez, S. E., & Criollo-Núñez, J. (2023). Efecto del estado de madurez, genotipo y localización geográfica sobre las características fisicoquímicas del grano de cacao durante la fermentación. *Ingeniería y Competitividad*, 25(3), e-20412503. <https://doi.org/10.25100/iyv.v25i2.12503>
- Parra Pineda, M. A., & Orozco Calero, A. (2021). *Alternativas de comercialización para el cacao en el marco de la sustitución de cultivos de uso ilícito en San Miguel, Putumayo*. Una mira desde la Asociación de Productores de Cacao La Florida (ASOPROCAF). <https://hdl.handle.net/20.500.14625/30674>
- Penagos Muñeton, A. (2019). *Estandarización del proceso de fermentación de cacao (Theobroma cacao L.) en función de la relación entre la masa de grano y el volumen del cajón fermentador* (Tesis de grado), Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76069>
- Peña González, M. A., Ortiz Urgiles, J. P., Santander Pérez, F. A., Lazo Vélez, M. A., & Caroca Cáceres, R. S. (2023). Physicochemical changes during controlled laboratory fermentation of cocoa (CCN-51) with the inclusion of fruits and on-farm inoculation. *Brazilian Journal of Food Technology*, 26, e2023013. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.01323>
- Polanía-Hincapié, P. A., Suárez, J. C., Hernández, H. E., Ramón-Triana, V. Y., Cuéllar-Álvarez, L. N., & Casanoves, F. (2023). Influence of fermentation time on the chemical and functional composition of different cocoa clones from southern Colombia. *Fermentation*, 9(11), 982. <https://doi.org/10.3390/fermentation9110982>
- Portillo, E., Labarca, M., Grazziani, L., Cros, E., Assemat, S., Davrieux, F., & Boulager, R. (2011). Influencia de las condiciones del tratamiento poscosecha sobre la temperatura y acidez en granos de cacao Criollo (*Theobroma cacao* L.). *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 28(Supl. 1), 646–660. https://www.revfacagronluz.org.ve/indsupl_2011.html
- R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1370298755636824325>
- Ramírez González, A. F., Gutiérrez García, G. A., Polanía-Hincapié, P. A., López, L. J., & Suárez, J. C. (2024). Fermentation and its effect on the physicochemical and sensory attributes of cocoa beans in the Colombian Amazon. *PLOS ONE*, 19(10), e0306680. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306680>
- Rivera Fernández, R. D., Barrera Álvarez, A. E., Guzmán Cedeño, A. M., Medina Quinteros, H. N., Casanova Ferrín, L. M., Peña Galeas, M. M., & Nivela Morante, P. E. (2012). Efecto del tipo y tiempo de fermentación en la calidad física y química del cacao (*Theobroma cacao* L.) tipo Nacional. *Ciencia y Tecnología*, 5(1), 7–12. <https://doi.org/10.18779/cyt.v5i1.120>
- Solórzano, C. Y. E., Franco, K. J. B., García, D. A. T., Escobar, Á. O. F., Navarrete, Y. T., & Vera, J. (2021). Efecto de la fermentación de cacao (*Theobroma cacao* L.), variedad nacional y trinitario, en cajas de maderas no

- convencionales sobre la calidad física y sensorial del licor de cacao. *Revista de Investigación Talentos*, 8(2), 42–55. <https://doi.org/10.33789/talentos.8.2.153>
- Vázquez-Ovando, A., Ovando-Medina, I., Adriano-Anaya, L., Betancur-Ancona, D., & Salvador-Figueroa, M. (2016). Alcaloides y polifenoles del cacao, mecanismos que regulan su biosíntesis y sus implicaciones en el sabor y aroma. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 66(3), 239–254. <https://doi.org/10.37527/2016.66.3.010>
- Velásquez-Reyes, D., Gschaedler, A., Kirchmayr, M., Avendaño-Arrazate, C., Rodríguez-Campos, J., Calva-Estrada, S. de J., & Lugo-Cervantes, E. (2021). Cocoa bean turning as a method for redirecting the aroma compound profile in artisanal cocoa fermentation. *Heliyon*, 7(8), e07694. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07694>