

EVALUACIÓN DE UN LAVADOR DE FLUJO HORIZONTAL PARA CAFÉ CON DEGRADACIÓN PREVIA DEL MUCÍLAGO

Carlos Eugenio Oliveros Tascón*, Juan Rodrigo Sanz Uribe*, Rubén Darío Medina Rivera**

OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; MEDINA R., R.D. Evaluación de un lavador de flujo horizontal para café con degradación previa del mucílago. Revista Cenicafé 70(1):30-43. 2019

En esta investigación se evaluó un equipo para el lavado del café, con bajo consumo de agua y de energía eléctrica, que podría ser empleado por pequeños productores que utilizan la fermentación natural. Se determinó el efecto de tres velocidades de giro del rotor y tres volúmenes específicos de agua en la remoción de mucílago, capacidad (kg h^{-1} de café lavado) y daño mecánico (%), bajo el diseño experimental completamente aleatorio, en arreglo factorial 3×3 . La unidad experimental estuvo conformada por 20 kg de café variedad Castillo® con mucílago degradado. En cada tratamiento se tuvieron siete unidades experimentales. Se observó que la remoción de mucílago es afectada por la velocidad de giro del rotor y el volumen específico de agua utilizado, pero no por su interacción. El daño mecánico a los granos no se afecta por la velocidad de giro ni el volumen específico de agua. La remoción de mucílago mayor del 96% se obtuvo con velocidad de giro del rotor de 300 r min^{-1} o con un volumen específico de agua de $0,7 \text{ L kg}^{-1}$ de café pergamino seco o más. El daño mecánico causado a los granos durante el lavado con el equipo varió entre 0,03% y 0,20%. Las aguas de lavado resultantes se adicionaron a la pulpa logrando su retención total, evitando la generación de vertimientos. Con el nuevo equipo se lava el café con menor consumo específico de energía eléctrica (1 kWh t^{-1} de café lavado), comparado con las tecnologías empleadas en Colombia, Ecomill® y Becolsub.

Palabras clave: Café lavado, consumo de agua, energía, fermentación, daño mecánico.

EVALUATION OF A HORIZONTAL FLOW COFFEE WASHER WITH PREVIOUS MUCILAGE DEGRADATION

This research evaluated a low-water and low-energy consumption coffee washing equipment that may be used by small producers who use natural fermentation. The three-speed effect of the rotor and three specific volumes of water in mucilage removal (response variable), capacity (kg.h^{-1} of washed coffee) and mechanical damage (%), under a completely randomized experimental design in a 3×3 factorial arrangement. The experimental unit consisted of 20 kg of Castillo® variety coffee with degraded mucilage. Each treatment had seven experimental units. Mucilage removal was affected by the rotation speed of the rotor or by the specific volume of water supplied, but not by the interaction of these two variables. The grain mechanical damage is neither affected by the rotation speed nor by the specific volume of water, nor by the interaction between them. Mucilage removal $>96\%$ was obtained with a rotation speed of 300 r.min^{-1} or with a specific volume of water equal or higher than 0.7 L.kg^{-1} of dry parchment coffee. The grain mechanical damage varied between 0.03% and 0.20%. The resulting waters were added to the pulp to obtain total retention and avoid spilling. This new equipment allows to wash coffee with lower energy consumption (1 kW.h.kg^{-1} of washed coffee) compared to technologies used in Colombia.

Keywords: Washed coffee, water consumption, energy, fermentation, mechanical damage.

*Investigador Principal e Investigador Científico III. Disciplina de Poscosecha, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

**Investigador Científico II. Disciplina de Biometría, Cenicafé.

En el proceso de beneficio húmedo del café se retiran de los frutos dos estructuras, la pulpa y el mucílago, que en variedad Colombia representan el 44,8% y 14,85%, respectivamente (Montilla *et al.*, 2008), antes de iniciar el proceso de secado. Para retirar el mucílago se emplean medios bioquímicos, enzimáticos y mecánicos, principalmente (Clarke y Macrae, 1987; Cleves, 1998; Coste, 1993; Menchu, 1973; Peñuela, Oliveros y Sanz, 2010; Wintgens, 2004).

En la fermentación natural el mucílago se degrada por efecto de enzimas (pectinasas y pectasas) y bacterias pectolíticas que están presentes en los frutos de café (Avallone, Guyot y Micheaux-Ferriere, 1999; Sivetz y Foot, 1963; Wintgens, 2004). Posteriormente, el mucílago degradado se retira de los granos mediante el lavado con agua limpia.

La remoción completa del mucílago con agua limpia, antes del secado, es necesaria para evitar daños en la calidad del café que pueden presentarse por fermentaciones no controladas y por la presencia del defecto fermento (Puerta, 2015).

Para el lavado del café en Colombia se utilizan las siguientes tecnologías:

Tanque con agitación manual. Empleado especialmente por pequeños productores de café. Los tanques pueden ser fabricados en mampostería, acero inoxidable o en polietileno de densidad media. La masa de café se cubre varias veces con agua limpia y se agita manualmente. El menor consumo específico de agua ($4,17 \text{ L kg}^{-1}$ de café pergamino seco-c.p.s.) se obtiene utilizando cuatro enjuagues, en un tanque con bordes redondeados, denominado tanque tina. En el primer enjuague se retira el 66% de la materia orgánica del mucílago y entre el primero y el segundo el 90% (Zambrano e Isaza, 1994).

Canal de correteo. El café se transporta con agua desde el tanque de fermentación hasta un canal abierto, con sección de 0,3 a 0,4 m de ancho, altura de 0,4 a 0,5 m y longitudes desde 5 a 10 m, dependiendo de la capacidad requerida (Roa *et al.*, 1999). Se suministra agua al canal de correteo y con una paleta se agita manualmente la masa de café, generando corrientes que arrastran los granos, permitiendo separarlos en diferentes tramos del canal, por sus diferencias en densidad. El consumo específico de agua es mayor a 20 L kg^{-1} de cps. En el canal de correteo se pueden lavar y clasificar 1.500 kg h^{-1} de café, con consumo de agua de 28 a 35 L kg^{-1} c.p.s. (Wilbaux, 1963).

Canal semi-sumergido. Con esta tecnología se utiliza una bomba para transportar el café hasta un canal con ranuras transversales en el fondo, separadas 50 cm. Los granos de mayor densidad (de mejor calidad), se sedimentan en los primeros tramos del canal, cayendo por las primeras ranuras a unas tolvas. Los flotes y gran parte de la pulpa son retirados del canal semisumergido. Con esta tecnología pueden procesarse hasta 15.000 kg h^{-1} de café lavado, con consumo de agua de $6,4 \text{ L kg}^{-1}$ de c.p.s. sin recircular (Roa *et al.*, 1999).

Ecomill®. Se utiliza para lavar café con mucílago previamente degradado mediante la fermentación natural o con aplicación de enzimas pectinolíticas (Oliveros *et al.*, 2013; Oliveros *et al.*, 2014; Oliveros *et al.*, 2011; Peñuela *et al.*, 2010). El proceso de fermentación se realiza en tanques diseñados para permitir la descarga del café cuando esté listo para iniciar el lavado, sin emplear agua. Mediante un transportador de tornillo sinfin el café se lleva hasta un lavador de flujo vertical ascendente, en el cual se retira del 96% al 97% del mucílago presente, con consumo específico de agua de 0,35 a $0,55 \text{ L kg}^{-1}$ de c.p.s. Las aguas residuales del lavado (ARL)

se adicionan a la pulpa, reteniendo el 100% de su volumen y controlando el 100% de la contaminación causada por ellas. Se diseñaron tres modelos con capacidades de 500, 1.500 y 3.000 kg h⁻¹ de café lavado.

Para retirar el mucílago, sin degradación previa, en Colombia se utiliza la tecnología Becolsub (Roa *et al.*, 1999). El mucílago del café recién despulpado es desprendido al someter los granos a esfuerzos principalmente cortantes, a colisiones entre ellos y fricciones con diferentes partes del equipo, en un dispositivo de flujo vertical ascendente. El consumo específico de agua varía entre 0,7 y 1,0 L kg⁻¹ de cps. Las ARL se mezclan con la pulpa, con un promedio de retención del 60% de su volumen y un control del 90% de la contaminación causada por estas (Roa *et al.*, 1999). Se diseñaron modelos con capacidades de 120, 240, 400 y 1.000 kg h⁻¹ de café lavado.

En la Tabla 1 se presenta la información de los equipos empleados para remover mucílago del café con desmucilaginado mecánico (Becolsub 300) y con degradación del mucílago mediante la fermentación natural (Ecomill® 500).

De acuerdo con la información presentada en la Tabla 1 con las tecnologías Becolsub 300 y Ecomill® 500 se reduce el consumo específico de agua con relación al tanque tina, canal de correteo y canal semi-sumergido en 88,0%, 97,5% y 92,2%, respectivamente.

La tecnología Ecomill®500 presenta ventajas con respecto a Becolsub en la reducción del consumo de agua y de energía, en 50,0% y 76,0%, respectivamente. Adicionalmente, con el Ecomill® se logra controlar el 100% de la contaminación causada por las aguas del lavado del café (Oliveros *et al.*, 2014).

A pesar de las ventajas técnicas y ambientales observadas con la tecnología Ecomill® su adopción en Colombia es reducida, debido principalmente a su alto costo. En esta investigación se evaluó un equipo diseñado para el lavado de café que podría ser empleado por pequeños productores que utilizan la fermentación natural. Se evaluó el efecto de la velocidad de rotación del rotor del lavador y del volumen específico de agua en la remoción de mucílago, la capacidad y el daño mecánico causado a los granos.

Con esta investigación, se tuvo como objetivo evaluar el efecto de la velocidad de giro del rotor y del caudal específico de agua, en el desempeño de un lavador diseñado para café con degradación previa del mucílago.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. Esta investigación se desarrolló en el Centro Nacional de Investigaciones de Café–Cenicafé, localizado en Manizales (Caldas), altitud de 1.310 m, con promedios de temperatura y humedad relativa de 21,5°C y 79,5%, respectivamente, y precipitación anual de 2.662 mm.

Tabla 1. Desempeño de tecnologías utilizadas en el lavado del café en Colombia.

Tecnología	Consumo de agua	Consumo de energía	Fuente
	(L kg ⁻¹ de c.p.s.)	(kWh t ⁻¹ de café lavado)	
Becolsub 300	1,0	16,7	Roa <i>et al.</i> (1999)
Ecomill® 500	0,5	4,0	Oliveros <i>et al.</i> (2013)

Descripción del equipo. En los ensayos se utilizó el equipo presentado en la Figura 1, conformado por:

Un tanque con capacidad para 250 L, utilizado generalmente para almacenamiento de agua, fabricado en polietileno de densidad media, con un cono truncado con inclinación de 60° colocado en su fondo para permitir la descarga por gravedad del café con mucílago degradado, en “punto” de lavado (Figura 1a). El tanque, con capacidad para 200 kg de café despulpado, está soportado en una estructura metálica independiente del lavador.

Un lavador con flujo de café horizontal (Figura 1b), con descargas axial del café

lavado y radial de las aguas de lavado. El café es transportado hasta el lavador por un tornillo sinfin ubicado en la base de la tolva del equipo. El rotor con agitadores similares a los utilizados en los equipos Ecomill® (Oliveros *et al.*, 2014) gira concéntricamente en una carcasa con perforaciones circulares, para permitir la expulsión de las ARL a medida que son desprendidas de los granos. El agua es suministrada al lavador en la parte superior de la carcasa, por medio de una bomba sumergible empleada en acuarios (Sanz, Oliveros, López, Mejía y Ramírez, 2007) (Figura 1c). El lavador está soportado en una estructura metálica con ruedas para facilitar su desplazamiento hasta la descarga del tanque.



Figura 1. Equipo utilizado. a. Vista general; b. Lavador; c. Suministro de agua.

Para el accionamiento del equipo en los ensayos se utilizó un motor de 736 W conectado al eje del lavador por medio de una transmisión de potencia, de poleas y banda. Para obtener las velocidades deseadas en el eje del lavador (300, 400 y 500 r min⁻¹) se empleó un variador de frecuencia.

Metodología. En esta investigación de tipo explicativa, se evaluó el efecto de tres velocidades de giro del rotor del lavador y tres volúmenes específicos de agua en la remoción de mucílago (variable de respuesta), capacidad (kg h⁻¹ de café lavado) y daño mecánico a los granos (%), bajo el diseño experimental completamente aleatorio en arreglo factorial 3x3, conformando los tratamientos presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Tratamientos considerados en la evaluación del lavador.

Tratamiento	Velocidad de giro del rotor (r min ⁻¹)	Volumen específico de agua (L kg ⁻¹ de c.p.s.)
1	300	0,5
2	300	0,7
3	300	1,0
4	400	0,5
5	400	0,7
6	400	1,0
7	500	0,5
8	500	0,7
9	500	1,0

La unidad experimental estuvo conformada por 20 kg de café Variedad Castillo® en punto de lavado, obtenido de café cereza con separación de flotes antes del despulpado, en máquina Jotagallo 4½, separación de pulpa y frutos sin despulpar en zaranda circular con aberturas de 8 mm y empleo del Fermaestro®,

para determinar la finalización del proceso de fermentación (Peñuela *et al.*, 2013), las unidades experimentales se asignaron aleatoriamente a los tratamientos, de acuerdo con el diseño experimental completamente aleatorio en arreglo factorial. Para cada tratamiento se tuvieron siete unidades experimentales.

Para la obtención de los caudales específicos de agua (L min⁻¹), correspondientes a los volúmenes específicos propuestos, se tuvo en cuenta el flujo de café lavado en la descarga del lavador y su equivalente en café pergamino seco, utilizando el factor reportado por Montilla *et al.* (2008). Para la medición de la velocidad de giro del rotor se utilizó un tacómetro marca METEK modelo 1716, con escala de 0 a 10.000 r min⁻¹ y resolución de 1 r min⁻¹ (Figura 2).

El flujo de café a través del lavador fue controlado por el alimentador de tornillo sinfín utilizado y su capacidad de transporte dependió principalmente de sus dimensiones (diámetro externo e interno, y paso), la velocidad de giro y la eficiencia de llenado. El café en punto de lavado es un material altamente viscoso, que presenta fuerte adherencia entre granos y las paredes y ductos por donde fluye, limitando e inclusive impidiendo el flujo desde la tolva hasta el alimentador. Experimentalmente se determinó la capacidad de transporte del alimentador con velocidades de giro de 300, 400 y 500 r min⁻¹. En la Figura 3 se presenta el comportamiento del tornillo sinfín del lavador con las velocidades de rotación consideradas. Se observa que la capacidad de transporte del alimentador varía linealmente con su velocidad de rotación en el intervalo 300 a 500 r min⁻¹, descrita por el modelo lineal presentado ($R^2 = 0,96$). Esta información se utilizó para definir el caudal de agua requerido en cada ensayo de cada tratamiento y obtener los volúmenes específicos presentados en la Tabla 3.



Figura 2. Medición de velocidad de giro del rotor del lavador.

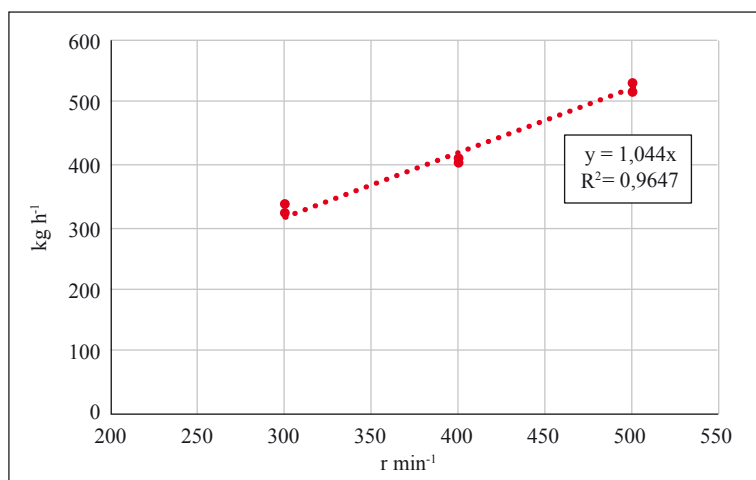


Figura 3. Capacidad de transporte del alimentador del lavador (kg h^{-1} de café con mucilago degradado en el proceso de fermentación natural).

Tabla 3. Caudal de agua a utilizar en los tratamientos.

Tratamiento	Velocidad de giro del rotor ($r \text{ min}^{-1}$)	Caudal de agua (L min^{-1})
T1	300	1,2
T2	300	1,6
T3	300	2,3
T4	400	1.4
T5	400	2,0
T6	400	2,9
T7	500	1,8
T8	500	2,6
T9	500	3,6

A partir de las dimensiones del tornillo sinfín alimentador del lavador (diámetros externo e interno, y paso), la velocidad de rotación y la densidad aparente del café, $830,21 \text{ kg m}^{-3}$ (Montilla *et al.*, 2008), se estimó la capacidad de transporte teórica. Con estos valores y la capacidad de transporte obtenida, experimentalmente se registró un coeficiente de llenado promedio para el tornillo sinfín alimentador de 0,33 (D.E. 0,032), valor bajo, característico de materiales que se adhieren a las superficies dificultando su flujo a través de tolvas.

En cada unidad experimental se obtuvo la siguiente información: capacidad del equipo en cinco muestras tomadas en la descarga del lavador, cada 15 s (Figura 4); porcentajes de mucílago inicial y final del café en muestras compuestas de 1,0 kg, tomadas antes y después de pasar el café por el lavador mecánico; y daño mecánico antes y después de pasar por el lavador en las muestras anteriores, separando y pesando los granos que presentarían a simple vista daño mecánico (granos trillados, mordidos o aplastados).

Para la medición de la potencia requerida en el eje del lavador en las mejores condiciones de operación, velocidad de giro y volumen específico de agua, se utilizó un transductor óptico de torque fabricado por Sensor Technology, referencia E200-ORT-12, con rango de 100 N m y exactitud $\pm 0,25\%$, y el software TorqueView® (Figura 5).

Para la variable de respuesta y las variables complementarias se obtuvieron los promedios y la variación de cada tratamiento. El ANAVA se realizó bajo el diseño experimental completamente aleatorio, en arreglo factorial

3x3 (tres velocidades de giro del rotor y tres caudales específicos de agua), al nivel del 5%. Si el ANAVA mostraba efecto de la interacción se seleccionaba la mejor combinación de velocidad de giro del rotor por caudal específico de agua, de acuerdo con la prueba de contraste al 5%. En el caso de no existir efecto de la interacción, se evaluó el efecto de cada uno de los factores por separado, y en el caso de existir efecto se definió la tendencia lineal o cuadrática, según prueba F al 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tiempo para alcanzar la degradación del mucílago mayor del 95%, empleando el Fermaestro®, fue de 18 h en todos los ensayos. El café utilizado presentó contenido promedio de mucílago de 18,9% (C.V. 18,8%), con valores mínimo y máximo de 13,6% y 22,9%, respectivamente. Este valor, inferior a los promedios para café recién despulpado, reportados para café variedad Colombia, por Montilla *et al.* (2008) del 27,0% y por Peñuela *et al.* (2010) del 28,0%, se debe a la remoción parcial de mucílago que ocurre durante el proceso de fermentación a medida



Figura 4. Medición en el lavador de la descarga de café.

que es degradado y evacuado del tanque. Similar resultado fue reportado por Oliveros *et al.* (2014).



Figura 5. Dispositivo experimental utilizado para la medición de torque y potencia durante el lavado de café.

A medida que la masa de café avanza en el interior del lavador es sometida al efecto de la fuerza centrífuga que se genera por el giro del rotor. Debido a ello, el mucílago degradado comienza a separarse y a ser expulsado a través de las perforaciones de la carcasa a medida que avanza en el interior del lavador. El agua que se adiciona facilita la separación del mucílago de la superficie de los granos y su expulsión, al disminuir la viscosidad. La mayor remoción de mucílago degradado ocurre en los primeros 2/3 del lavador (Figura 6). El mucílago que todavía no ha sido degradado es removido por efecto de esfuerzos cortantes que actúan en su superficie, por fricción y por colisiones entre granos y partes internas del lavador, especialmente en el último tercio (Oliveros *et al.*, 2011; Oliveros *et al.*, 2014).

Cerca a la descarga de café se suministra agua limpia con el fin de aumentar la remoción de mucílago y obtener un producto como se observa en la Figura 7.



Figura 6. Remoción de mucílago en el lavador.

Para la variable de respuesta (remoción de mucílago), el ANAVA ($p \leq 0,05$) no mostró efecto de la interacción volumen específico de agua x velocidad de giro del rotor del lavador (Figura 8a), pero sí de los factores por separado (efectos simples).

Los resultados obtenidos para la variable de respuesta se presentan en la Tabla 4.

Se observó una tendencia lineal decreciente para la velocidad de rotación (Figuras 8a y 8b), esto es, mayor remoción de mucílago con la menor velocidad de giro de rotor y tendencia cuadrática para el volumen específico de agua (Figura 8c). Se observa que el volumen específico de agua tiene mayor efecto en la remoción de mucílago, siendo más alto con valores de 0,7 y 1,0 L kg⁻¹ de cps. Este resultado podría atribuirse al aumento en el flujo de café que ingresa al lavador cuando aumenta la velocidad de giro del rotor, debido a que el sinfín alimentador está colocado en el mismo eje y como se observa en la Figura 3, el flujo de café aumenta al incrementar la velocidad de giro del alimentador. Cuando esto ocurre el mucílago adicional que ingresa con el café al lavador no alcanza a ser retirado del equipo.



Figura 7. Café lavado obtenido con el nuevo equipo.

Los promedios variaron entre 92,76% (D.E. 1,50%) y 98,77% (D.E. 0,55%). Teniendo en cuenta la remoción de mucílago antes del lavado, durante el proceso de fermentación, con volumen específico de

Tabla 4. Promedios y Desviación Estándar (D.E.) para la variable remoción de mucílago, con el volumen específico de agua (L kg⁻¹ de cps) y la velocidad de giro del rotor del lavador.

Volumen específico de agua (L kg ⁻¹ de c.p.s.)	Velocidad de giro del rotor del lavador (r min ⁻¹)						Promedio (%)	D.E. (%)
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.		
	300		400		500			
0,5	95,40	0,83	92,76	1,50	93,51	2,69	93,89	2,08
0,7	97,69	1,45	97,11	0,87	96,89	1,60	97,23	1,32
1,0	98,76	1,27	98,77	0,55	97,94	1,18	98,49	1,07
Promedio (%)	97,28		96,21		96,11			
D.E. (%)	1,84		2,78		2,66			

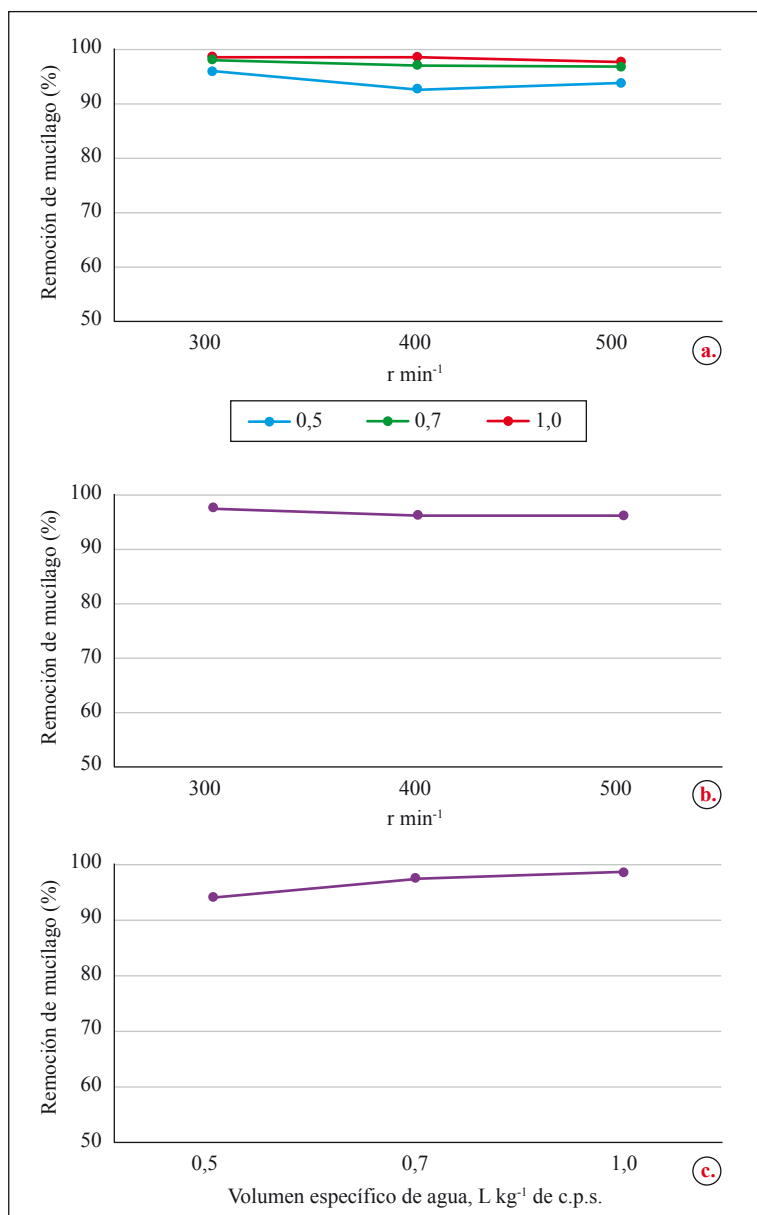


Figura 8. Efecto de la velocidad de giro del eje del lavador y del volumen específico de agua en la remoción de mucilago. **a.** y **b.** Tendencia de la velocidad de rotación; **c.** Tendencia para el volumen específico del agua.

0,7 L kg^{-1} de c.p.s. y 300 $r \text{ min}^{-1}$ en el eje del rotor puede obtenerse remoción total de mucilago superior al 97% y, adicionalmente, lograr la retención total del volumen de

aguas de lavado al adicionarlas a la pulpa (Oliveros *et al.*, 2014) (Oliveros *et al.*, 2013), como se observa en la Figura 9, evitando la generación de vertimientos.



Figura 9. Aplicación a la pulpa de las aguas resultante del lavado del café con el nuevo equipo. **a.** Drenajes después de 24 h; **b.** Retención total con adición a la pulpa de los drenajes a las 36 h.

El ANAVA ($p \leq 0,05$) no mostró efecto de la interacción volumen específico de agua x velocidad de rotación en la variable flujo de café lavado. Este resultado se explica teniendo en cuenta que el flujo de café a través del lavador depende principalmente de la rotación del tornillo sinfín del alimentador (Figura 10). El flujo de café varió entre $260,5 \text{ kg h}^{-1}$ (D.E. $27,55 \text{ kg h}^{-1}$) y $370,33 \text{ kg h}^{-1}$ (D.E. $33,52 \text{ kg h}^{-1}$ de café lavado), que se alcanza con velocidad de giro del alimentador de 500 rpm. Los resultados obtenidos para esta variable se presentan en la Tabla 5.

El daño mecánico promedio causado a los granos por el equipo varió entre 0,03% (D.E. 0,05%) y 0,20% (D.E. 0,41%), Tabla 6. El ANAVA ($p \leq 0,05$) no mostró efecto de los factores por separado ni de la interacción volumen específico de agua x velocidad de rotación, lo que indica que el daño mecánico no depende del equipo ni de su operación, en las condiciones consideradas en esta investigación.

El daño mecánico causado a los granos de café en el proceso de beneficio, principalmente, es debido a la tecnología empleada y su estado, a la calibración y a la presencia de

frutos verdes y secos que llegan con el café al beneficiadero.

El comportamiento de la potencia en el eje del lavador operado con velocidad de giro del rotor de 300 r min^{-1} y volumen específico de agua de $0,7 \text{ L kg}^{-1}$ de cps se presenta en la Figura 11. Se observan condiciones estables de operación a los 100 s de iniciado el proceso de lavado. A partir de allí ocurren variaciones en la potencia, entre 80 y 156 W, atribuibles a fluctuaciones en el flujo de café que ingresa al lavador, ocasionadas por el tipo de alimentador empleado, de tornillo sinfín. El promedio de la potencia obtenida en la operación del lavador, en 11 lotes de café diferentes, fue 134,6 W (D.E. 8,05 W).

En la Tabla 7 se presenta la información de energía específica, consumo específico de agua y daño mecánico de tecnologías desarrolladas para retirar el mucílago del café, con y sin degradación previa del mucílago. El menor consumo específico de energía en el lavado del café se obtiene con el nuevo equipo ($1,0 \text{ kWh t}^{-1}$ de café lavado). El consumo específico de agua (L kg^{-1} de cps) con el nuevo equipo es superior al observado en la tecnología Ecomill®

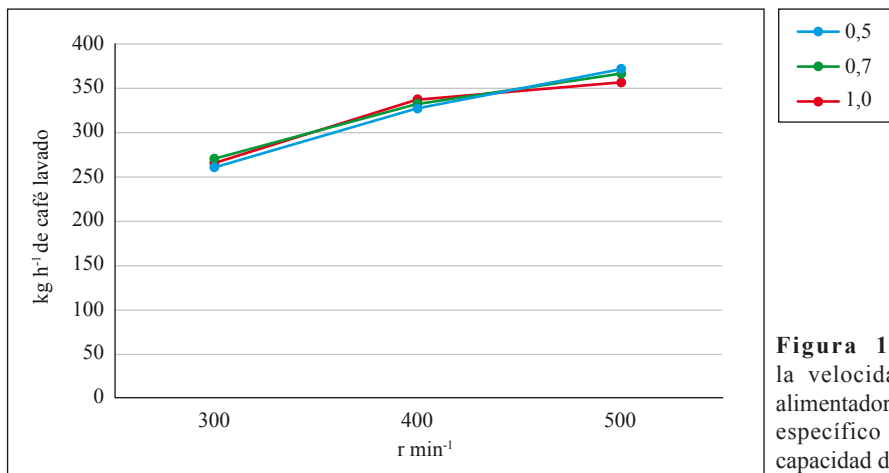


Figura 10. Efecto de la velocidad de giro del alimentador y del volumen específico de agua en la capacidad del lavador.

Tabla 5. Promedios y Desviación Estándar (D.E.) para la variable flujo de café lavado, con el volumen específico de agua ($L\ kg^{-1}$ de cps) y la velocidad de giro del rotor del lavador evaluados.

Volumen específico de agua ($L\ kg^{-1}$ de c.p.s.)	Velocidad de giro del rotor del lavador ($r\ min^{-1}$)						Promedio (%)	D.E. (%)
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.		
	300		400		500			
0,5	260,50	27,55	326,42	35,70	370,33	33,52	319,08	32,26
0,7	269,30	27,40	332,53	32,87	365,81	49,24	322,55	36,50
1,0	266,30	32,96	336,96	33,65	356,47	58,68	319,91	41,76
Promedio (%)	265,37		331,97		364,20			
D.E. (%)	28,15		32,64		46,17			

Tabla 6. Promedios y Desviación Estándar (D.E.) para la variable daño mecánico causado a los granos durante el lavado, con el volumen específico de agua ($L\ kg^{-1}$ de cps) y la velocidad de giro del rotor del lavador evaluados.

Volumen específico de agua ($L\ kg^{-1}$ de c.p.s.)	Velocidad de giro del rotor del lavador ($r\ min^{-1}$)						Promedio (%)	D.E. (%)
	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.	Promedio	D.E.		
	300		400		500			
0,5	0,16	0,27	0,03	0,08	0,13	0,24	0,11	0,19
0,7	0,09	0,16	0,07	0,15	0,20	0,41	0,12	0,24
1,0	0,09	0,14	0,03	0,05	0,10	0,26	0,07	0,15
Promedio (%)	0,11		0,04		0,14			
D.E. (%)	0,19		0,09		0,30			

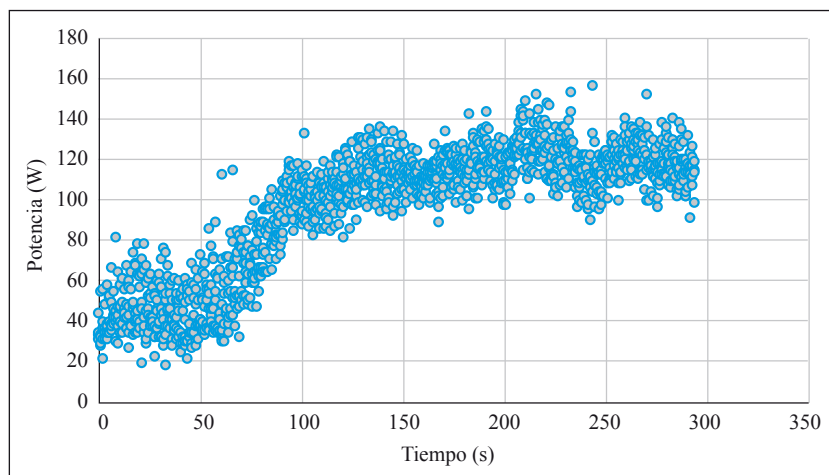


Figura 11. Comportamiento de la potencia en el eje del lavador a 300 r min⁻¹ y 0,7 L kg⁻¹ de café pergamino seco.

Tabla 7. Desempeño de tecnologías utilizadas en el lavado del café.

Equipo	Energía específica	Consumo específico de agua	Daño mecánico	Fuente
	(kWh t ⁻¹ de café lavado)	(L kg ⁻¹ de c.p.s.)	(%)	
Becolsub 300	16,7	1	<0,20	Oliveros <i>et al.</i> (1998)
Ecomill® 500	4,0	0,5	0,30	Oliveros <i>et al.</i> (2013)
Nuevo	1,1	0,7	0,03 - 0,20	Esta investigación

500 (28,5%) e inferior al Becolsub 300 (30%). El daño mecánico causado a los granos con las tres tecnologías está entre 0,03% y 0,3%.

Puede concluirse que:

- La tecnología evaluada permite remover al menos el 97% del mucílago presente en el café despulpado, con degradación previa mediante la fermentación natural. Los mejores resultados se obtienen con velocidad de giro del rotor de 300 r min⁻¹ o volumen específico de agua de 0,7 L kg⁻¹ de c.p.s. o más. El daño mecánico causado a los granos durante el lavado con el equipo varía entre 0,03% y 0,20%.
- La remoción de mucílago es afectada por la velocidad de giro del rotor o el volumen

específico de agua utilizado, mas no por la interacción velocidad de giro x volumen específico de agua. El flujo de café lavado es afectado por la velocidad de giro únicamente. El daño mecánico a los granos no es afectado ni por la velocidad de giro y el volumen específico de agua, ni por la interacción velocidad de giro x volumen específico de agua utilizado.

- Con la nueva tecnología se lava café con menor consumo específico de energía (1,0 kWh t⁻¹ de café lavado) que con la tecnología Ecomill®500, en la cual se emplean 4,0 kWh t⁻¹ de café lavado).
- Las aguas residuales del lavado del café (288 L t⁻¹ de café cereza) pueden secarse utilizando energía solar o adicionar a la pulpa en proporción de 1,5:1 (1,5 kg de pulpa

por 1,0 L de aguas residuales de lavado) para controlar el 100% de la contaminación causada por ellas.

- Con relación al lavado en tanque tina, con la nueva tecnología se logra la reducción en el consumo específico de agua de 83,2%, control del 100% de la contaminación causada por las aguas de lavado y empleo de energía mecánica en lugar de energía humana para obtener igual rendimiento (300 a 350 kg h⁻¹ de café lavado).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Cenicafé, especialmente a los señores Ricardo Grisales y Javier Velásquez por el apoyo recibido en la construcción y evaluación del equipo.

LITERATURA CITADA

- Avallone, S., Guyot, B., y Micheaux-Ferriere, N. (1999, Agosto). *Cell wall polysaccharides of coffee bean mucilage. Histological characterization during fermentation*. Trabajo presentado en XVIII Colloque Scientifique International sur le Café, Helsinki, Finlandia (p. 463-470). París: ASIC.
- Clarke, R., y Macrae, R. T. (1987). *Coffee Vol 2*. Amsterdam: Elsevier Applied Science.
- Cleves S., R. (1998). *Tecnología en beneficiado de café*. (2a Ed.). San José Costa Rica: Cléves y Faith.
- Coste, R. (1993). *Coffee: The plant and the product*. Londres: MacMillan Press.
- Menchu E., J. (1973). *Manual práctico de beneficios de café*. (Vol. 13). Guatemala, Guatemala: Asociación Nacional de Café. Subgerencia de Asuntos Agrícolas.
- Montilla P., J., Arcila P., J., Aristizábal L., M., Montoya R., E.C, Puerta Q., G.I., Oliveros T., C.E. y Cadena G., G. (2008). Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficio húmedo tradicional. *Cenicafé*, 59(2), 120-142.
- Oliveros T., C.E., Sanz U., J.R. Montoya R., E.C. y Ramírez G., C.A. (2011). Equipo para el lavado ecológico del café con mucilago degradado con fermentación natural. *Revista de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Universidad de los Andes*, 33, 61-67.
- Oliveros T., C.E., Sanz U., J.R., Ramírez G., C.A., y Tibaduiza V., C.A. (2013). *ECOMILL: tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café*. (Avance Técnico No. 432). Manizales: Cenicafé.
- Oliveros T., C.E., Tibaduiza V., C.A., Montoya R., E.C., Sanz U., J.R. y Ramírez G., C.A. (2014). Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café en proceso con fermentación natural. *Cenicafé*, 65(1), 44-56.
- Peñuela M., A.E., Oliveros T., C.E. y Sanz U., J.R. (2010). Remoción del mucilago de café a través de fermentación natural. *Cenicafé*, 61(2), 159-173.
- Peñuela M., A.E., Pabón U., J.P. y Sanz U., J.R. (2013). *Método fermaestro: Para determinar la finalización de la Fermentación del mucilago de café*. (Avance Técnico No. 431). Manizales: Cenicafé.
- Peñuela M., A.E., Pabón U., J.P., Rodríguez V., N. y Oliveros T., C.E. (2010). Evaluación de una enzima pectinolítica para el desmucilaginado del café. *Cenicafé*, 61(3), 241-251.
- Puerta Q., G.I. (2015). *Buenas prácticas para la prevención de los defectos de la calidad del café: fermento, reposado, fenólico y mohoso*. (Avance Técnico No. 461). Manizales: Cenicafé.
- Roa M., G., Oliveros T., C.E., Álvarez G., J., Ramírez G., C.A., Sanz U., J.R., Dávila A., M.T., Álvarez H., J.R., Zambrano F., D.A., Puerta Q., G.I. y Rodríguez V., N. (1999). *Beneficio ecológico del café*. Chinchiná: Cenicafé.
- Sanz U., J.R., Oliveros T., C.E., López P., U., Mejía G., C. y Ramírez G., C.A. (2007). *Paleta plástica para lavar café con menor esfuerzo*. (Avance Técnico No. 361). Manizales: Cenicafé.
- Sivetz, M. y Foot, H.E. (1963). *Coffee processing technology*. Westport: The AVI publishing Company.
- Wilbaux, R. (1963). *Coffee processing*. (Boletín no oficial de trabajo N° 20). Roma: FAO.
- Wintgens, J. (2004). *Coffee: Growing, processing, sustainable production. A guidebook for Growers, Processors. Traders and Researchers*. Wienheim: Wiley-VCH Verlag.
- Zambrano F., D.A., y Isaza H., J.D. (1994). Lavado del café en los tanques de fermentación. *Cenicafé*, 45(3), 106-118.