

Proceso de beneficio

Juan Rodrigo Sanz Uribe; Carlos Eugenio Oliveros Tascón;
César Augusto Ramírez Gómez; Aída Esther Peñuela Martínez;
Paula Jimena Ramos Giraldo

El proceso de beneficio de café consiste en un conjunto de operaciones para transformar los frutos de café, en café pergamino de alta calidad física y en taza, el cual por su estabilidad en un amplio rango de condiciones ambientales, es el estado en el cual se comercializa internamente este producto en Colombia.

El proceso de beneficio de café lo realizan los caficultores, en su gran mayoría, en las instalaciones que tienen en sus fincas, a las que denominan beneficiaderos, y donde realizan básicamente el recibo, despulpado, remoción de mucílago, lavado, diversas clasificaciones y secado.

En este capítulo se presentan los adelantos en la investigación que realiza Cenicafé para el adecuado proceso de beneficio del café con el fin de conservar la calidad del café obtenida durante la cosecha.



Cómo Citar:

Sanz-Urbe, J. R., Oliveros Tascón, C. E., Ramírez, C. A., Peñuela-Martínez, A. E., & Ramos Giraldo, P. J. (2013). Proceso de beneficio. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Vol. 3, pp. 09–47). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_28

Transporte del café en cereza hasta el beneficiadero

Una vez el café cereza es cosechado, se inicia su transporte al beneficiadero, éste puede llevarse a cabo en diferentes formas. La más común, es al hombro de los recolectores, sin embargo, esta labor es exigente físicamente si el beneficiadero no está cerca de las plantaciones. Por tal motivo, y para no someter a un sobreesfuerzo a los recolectores, se utilizan diferentes sistemas de transporte.

Transporte animal

En Colombia el uso de tracción animal ha sido parte de la historia cafetera (Figura 1), tanto así que una mula es parte del logotipo más importante de la institucionalidad cafetera. Sin embargo, se ha ido sustituyendo por otras clases de transporte.

No obstante, en las fincas en que se mantiene el transporte animal de café en cereza, es considerado un sistema económico, debido a que los animales tienen un valor inicial relativamente bajo (una mula puede costar \$ 2 millones en promedio), con una vida útil hasta de 25 años, y su sostenimiento menor a \$ 100.000/año, si se dispone de potreros u otras formas de proveer alimento (Sanz *et al.*, 2011).



Sin embargo, en los ejercicios económicos de los usuarios no se tiene en cuenta el valor de la adecuación de los caminos y su mantenimiento, lo mismo que el pago a los operarios que arrean, cargan y descargan las mulas, los cuales incrementan considerablemente los costos.

Sistema de vagoneta y malacate

Sanz *et al.* (2011), diseñaron, construyeron y evaluaron un sistema de vagoneta y malacate para transportar hasta 225 kg de café en cereza en pendientes hasta del 100%. La vagoneta y el malacate se unen a través de una sogá de fibra plástica que se utiliza para halar o dejar bajar controladamente la vagoneta en las plantaciones de café (Figura 2).

El malacate está compuesto principalmente por un motor de combustión interna de 9,56 kW (13 hp), un sistema de

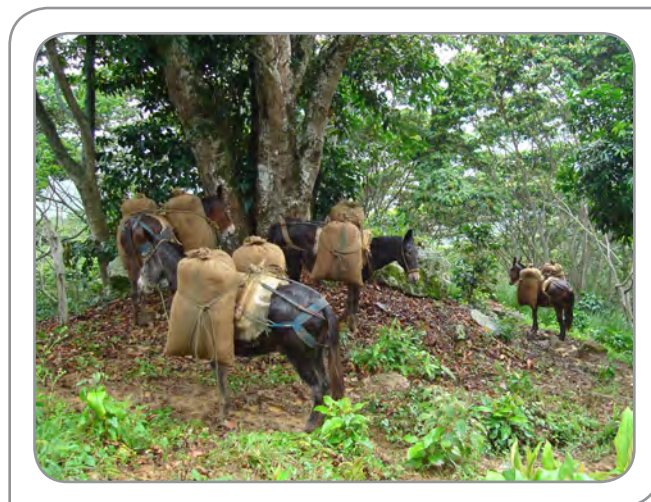


Figura 1.

Transporte de bultos de café en cereza con mulas.

reducción con relación total de 140:3, un embrague de bandas y poleas, un sistema de rueda libre y un sistema de freno de doble zapata de trabajo pesado. Adicionalmente, el malacate tiene un par de ruedas frontales para darle la posibilidad de ubicarlo en la parte alta del terreno donde se va a acopiar la carga. La velocidad de transporte es de 3,5 km/h. La vagoneta, con peso de 75 kg, tiene capacidad para 0,5 m³, y las ruedas fueron diseñadas para producir una presión de contacto menor a la presión de contacto que causa una persona caminando. En un tramo de 100 m y en terreno con una pendiente promedio de 100%, se obtuvo capacidad máxima de transporte de 8,6 t.h⁻¹ y costo específico de \$ 29.736 (kg.h.km⁻¹). No se observó compactación de los suelos como consecuencia de su empleo.



Figura 2.

Vagoneta y malacate para el transporte del café al beneficiadero.



La tecnología de vagoneta y malacate puede utilizarse para transportar el café recolectado y otros materiales como por ejemplo colinos de café y fertilizantes. La tecnología diseñada y evaluada es una alternativa con mejores características técnicas, económicas y ambientales que las que actualmente se usan en Colombia para transportar café en las fincas.

Cable aéreo de gravedad

Consiste de un cable de acero apoyado en dos soportes, sobre el cual se mueve una carga desde un punto elevado hasta un punto ubicado en un nivel inferior, utilizando la energía dada por la diferencia de alturas (Figura 3). Este sistema es recomendado en terrenos que presentan depresiones, pero solamente puede ser transportada una carga a la vez para evitar el descarrilamiento de las poleas.

Con el fin de determinar los parámetros que gobiernan este tipo de transportadores, con bultos de café cereza colgados de un dispositivo polea - gancho, Parra et al. (1989) fabricaron en Cenicafe un banco de pruebas con un cable de 12,7 mm de diámetro, suspendido entre

dos torres de acero, que tenía la posibilidad de variar la pendiente y las flechas o deflexiones. Con pendientes entre 10% y 12,5% y deflexiones máximas de 4% y 5%, las poleas con bujes en bronce fosforado presentaron excelente desempeño transportando sacos de 60 kg de café cereza, sin necesidad de dispositivo de frenado a la llegada. Con pendientes superiores al 15% o con poleas con rodamientos en lugar de bujes, se necesitan dispositivos de frenado en la descarga. Con deflexiones superiores a las mencionadas se presentan ondas en el cable que evitan la estabilidad del sistema de transporte.

Con base en la experiencia adquirida en la investigación mencionada se recomienda que para el transporte por cable aéreo de gravedad se tenga en cuenta:

- Realizar un plano topográfico detallado y seleccionar la altura de las dos torres.
- Seleccionar adecuadamente el cable.
- Diseñar las estructuras que soportan el cable. Las torres que sostienen el cable deben estar diseñadas a flexo compresión, debido a que las tensiones máximas en el cable tienen componentes verticales y horizontales.

El diámetro mínimo de cables de acero para transportadores de café cereza por cable aéreo de gravedad, en las condiciones que se enumeraron, debe ser de 12,70 mm (1/2") para longitudes hasta 300 m, y debe agregarse 3,17 mm (1/8") al diámetro por cada 120 m adicionales de longitud.

Cable aéreo motorizado

El cable aéreo motorizado es un sistema de transporte que permite el traslado de café cereza desde un punto inferior a otro de mayor altura, tanto en sacos como a granel. En Cenicafe se diseñó y construyó un sistema

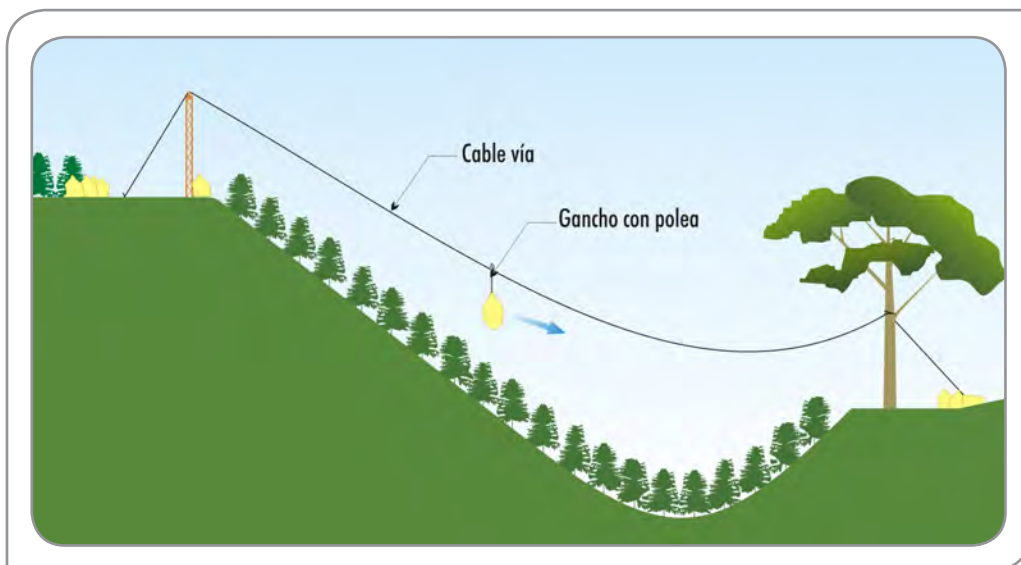


Figura 3.

Esquema de un cable aéreo de gravedad.

Los transportadores por cable aéreo de gravedad son una alternativa ecológica dado que no utilizan motores, son instalaciones que intervienen poco el paisaje y reducen el esfuerzo humano en una labor ardua.

de cable aéreo abierto, con una góndola metálica con capacidad para 125 kg (Patiño, 1992 y Patiño et al., 1994), halado por un malacate, como se muestra en el esquema de la Figura 4.

El sistema consistió en un cable vía de mayor diámetro (16 mm), por el cual se desplazan las poleas de la góndola que lleva la carga, y se le diseñaron cambios de dirección con tramos curvos para darle mayor flexibilidad al sistema. Así mismo, el malacate halaba la carga con un cable más flexible y de menor diámetro (6 mm). Los siete soportes que fueron necesarios para cubrir una longitud total de 180 m fueron diseñados y construidos en acero de bajo contenido de carbono, y fueron anclados al suelo por medio de zapatas de concreto reforzado. El sistema tenía una pendiente máxima de 30% y el malacate fue diseñado para obtener una velocidad en la carga de $1,3 \text{ m.s}^{-1}$. En condiciones de trabajo con la carga de diseño se obtuvo una capacidad máxima de $1,6 \text{ t.h}^{-1}$ y se requirió de un motor eléctrico de 4,9 kW. Para llevar la góndola hasta el punto más bajo se utilizó la gravedad con control de velocidad por frenado.

El sistema puede también transportar otros materiales como fertilizante y material de construcción, tanto para ascenso como para descenso. Sin embargo, los materiales usados y el factor de seguridad de 3,5 hacen este sistema inseguro para el movimiento de personas.



El sistema evaluado cuenta con una ventaja ecológica, dado que la intervención del paisaje es mínima comparada con carreteras y caminos internos, debido a que el cable está suspendido y solamente se necesita la instalación de unas pocas torres, que en algunos casos pueden ser los mismos árboles de la finca. La capacidad y el bajo costo comparado con carreteras y caminos, puede ser llamativa económicamente para medianos y grandes productores.

Transporte de café en cereza por cafeductos

Un cafeducto consiste en una tubería de PVC inclinada y recta, normalmente de 160 mm de diámetro, por el

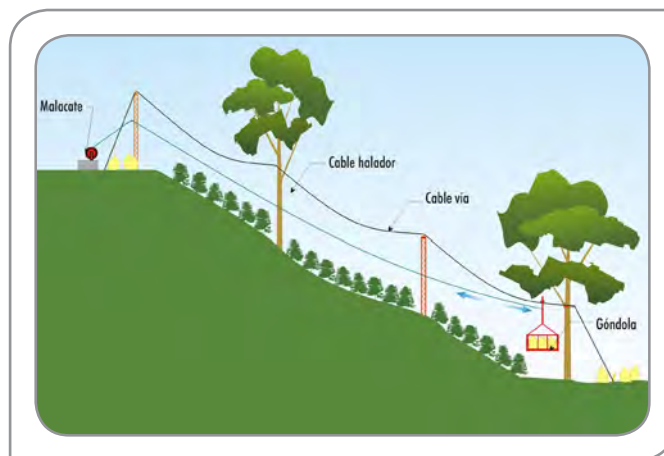


Figura 4.

Sistema de cable aéreo motorizado.

cual se transporta café en cereza desde lugares más elevados hasta el beneficiadero o lugares de acopio, utilizando cantidades considerables de agua.

Patiño (1990) realizó en Cenicafe una investigación para analizar este sistema de transporte. La evaluación consistió en determinar las cantidades mínimas de agua para transportar café cereza por cafeductos, utilizando diferentes inclinaciones de la tubería PVC sanitaria y diferentes diámetros. Se encontraron las relaciones que determinan las capacidades de transporte y, en particular, se demostró que con inclinaciones menores a 20° con respecto a la horizontal, la capacidad de transporte es independiente del diámetro de la tubería utilizada en el cafeducto y que la selección de un diámetro más grande se hace para evitar obstrucciones con las impurezas que acompañan el café en cereza recolectado. Para las inclinaciones mayores a 20° se observó que con el aumento del diámetro aumenta la capacidad de transporte.



La principal desventaja que posee este sistema corresponde a la contaminación del agua utilizada. Se recomienda recircular el volumen de agua, pero esta opción incrementa los costos de inversión y de operación del cafeducto.

Recibo de café en cereza en el beneficiadero

Existen dos formas para recibir los frutos de café que llegan desde los lotes, antes de empezar el proceso de beneficio: **Tolvas húmedas y tolvas secas**.

Las **tolvas húmedas** son sistemas de almacenamiento temporal, que utilizan agua para transportar los frutos de café hasta las máquinas, por lo que no requieren de ángulos pronunciados para lograr ese propósito. Así mismo, no se hace necesario aumentar su altura para almacenar grandes cantidades de café. El problema con este tipo de recibo es que necesita un sistema de separación de frutos y agua, y un sistema de bombeo para establecer la recirculación del agua con el fin de reducir el consumo específico de agua. No obstante, con la recirculación del agua, en razón a la baja eficacia de separación de los dispositivos conocidos, se obtienen consumos de agua mayores de 5 L.kg^{-1} de c.p.s. En la Figura 5 se observa una tolva húmeda en una finca cafetera.

Por otro lado, las **tolvas secas** son un complemento para reducir los consumos de agua y la contaminación de ésta, ya que solamente utilizan la gravedad para hacer llegar los frutos hasta las máquinas dentro del beneficiadero. Para lograr este objetivo, requieren ángulos de 45° que obligan a tener grandes alturas si se quiere almacenar grandes cantidades de café en cereza, y la necesidad, en la mayoría de los casos, de un desnivel importante entre ésta y las máquinas (Figura 6).



Figura 5.

Tolva húmeda para el recibo de café en cereza en los beneficiaderos.



Figura 6.

Tolva seca para el recibo de café en cereza en los beneficiaderos

Clasificación de la materia prima

La calidad en taza del café se encuentra estrechamente relacionada con el tipo de materia prima que se procese en el beneficiadero, la cual normalmente es muy variable, en la cual se encuentran:

- Frutos en todos los estados de maduración en diferentes proporciones.
- Frutos defectuosos provenientes de plantas con alguna enfermedad o con deficiencias nutricionales.
- Frutos atacados por insectos, como la broca, lo mismo que impurezas pesadas y livianas.

De igual manera, la calidad de la materia prima depende de la época en que se realice la cosecha, pues a principio y final de la cosecha, cuando los frutos maduros son más escasos, se presentan con mayor frecuencia y en mayor cantidad frutos indeseables en la masa cosechada, como frutos verdes.

Marín et al. (2003) estudiaron el efecto de los diferentes estados de desarrollo del fruto de café sobre la calidad en taza, encontrando que:

- Las tazas mejor calificadas fueron preparadas en su totalidad con frutos maduros o con frutos sobremaduros (Figura 7).
- Las tazas de café preparadas solamente con frutos pintones presentaron calificaciones intermedias, lo cual permite concluir que estos frutos causarían daño a la taza si se presentan en grandes cantidades dentro la masa de café a procesar.

- Las tazas de café preparadas en su totalidad con frutos verdes y con frutos secos obtuvieron las calificaciones más bajas, evidenciando que estos tipos de frutos son los que mayor daño causan a la calidad de la bebida, y por esta razón deben estar en el menor contenido posible dentro de la materia prima a procesar.

Puerta (2000) realizó una investigación en la que determinó que a partir de un contenido del 2,5% de frutos verdes se aprecia un rechazo de las tazas del 30% o mayor, por defectos como sucio, fermento, *stinker*, tierra y otros sabores desagradables, lo mismo que una reducción del 7% en la relación café en cereza a café pergamino seco.

Una correcta homogeneidad de la materia prima en el beneficio se lograría a través de un proceso estricto de control de la recolección. Sin embargo, esto implicaría mayor inversión en la etapa más costosa en la producción de café, la cosecha.

Separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín

Para lograr la mejor calidad de la materia prima es recomendable realizar una clasificación antes de pasar al despulpado, esto se logra a través de la clasificación por densidad en agua, en la cual se remueven la mayoría de los frutos secos e impurezas livianas. Un estudio realizado por Peñuela (2010) demostró que aproximadamente el 23% de las muestras de café sin clasificación por densidad, antes del despulpado, presentaron defectos en taza.

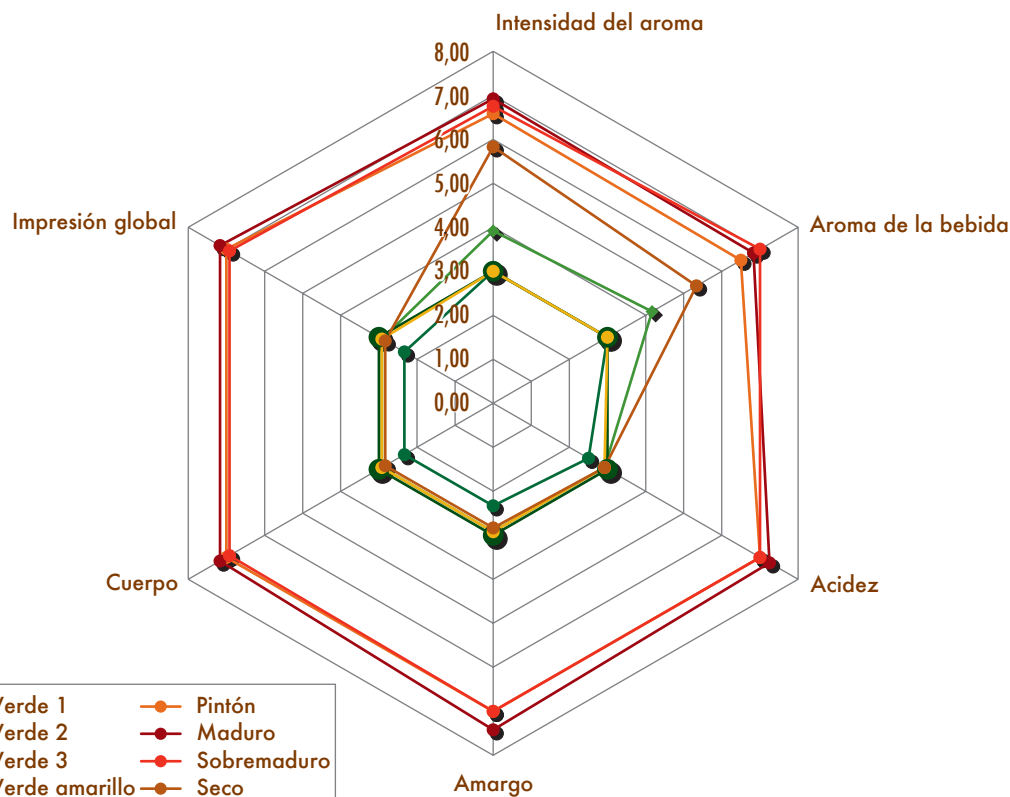


Figura 7.

Calificación de taza para los diferentes estados de madurez.

Oliveros *et al.* (2007) desarrollaron un sistema continuo para realizar la clasificación por densidad en agua y remover simultáneamente los frutos livianos y las impurezas densas y duras. El sistema se llama **Separador Hidráulico de Tolva y Tornillo Sinfín (SHTTS)**, el cual consiste en una tolva de precipitación y un transportador de tornillo sinfín inclinado, ubicado en la base de la tolva para extraer del fondo el material decantado, como puede apreciarse en el esquema de la Figura 8. La tolva de precipitación se llena con agua limpia, la cual al ser alimentada con una masa heterogénea de frutos de café e impurezas, permite que los objetos menos densos floten, y que los de mayor densidad vayan hasta el fondo de la tolva. **Los frutos e impurezas que se identifican como de menor densidad son principalmente frutos secos, vanos, brocados, hojas y palos. Los materiales de mayor densidad, más comunes, diferentes a los frutos, son las piedras y los objetos metálicos, entre otros.**

La descarga del transportador de tornillo sinfín está en un nivel más alto que el agua en la tolva de precipitación, permitiendo que el líquido que acompaña los frutos transportados regrese por gravedad a la tolva. Para evitar que los objetos duros y pesados sean transportados con los frutos densos, la alimentación del transportador de tornillo sinfín inclinado se realiza 5 cm arriba de la base de la tolva, formando así un apéndice o “trampa de piedras”, donde quedan atrapados estos objetos. Para que la tolva de precipitación y la “trampa de piedras” funcionen adecuadamente, los frutos de café deben alimentarse en forma dosificada, sobre la cara posterior de la tolva.

En fincas de producciones pequeñas la alimentación dosificada puede hacerse a mano, sin embargo, cuando la producción es mayor, la alimentación dosificada a mano se vuelve engorrosa, lo que hace necesario la implementación de un sistema de alimentación como el dosificador mostrado en la Figura 8. Así mismo, la remoción del material flotante puede ser mecanizada con un mecanismo giratorio simple, que empuje los flotes afuera de la tolva de precipitación sin que vayan acompañados de agua.

Oliveros *et al.* (2009) desarrollaron una investigación con el fin de optimizar el desempeño del **SHTTS**, en el cual utilizaron tornillos sinfín de tres diámetros diferentes (80, 114 y 168 mm), tres ángulos de inclinación del tornillo sinfín (40°, 60° y 80°) y cuatro velocidades de giro (100, 200, 300 y 400 r.min⁻¹). En las Figuras 9, 10 y 11 se muestran las capacidades medias de transporte de los separadores hidráulicos con tornillo sinfín de 80, 114 y 168 mm de diámetro, respectivamente, para las tres diferentes inclinaciones evaluadas.

En el mismo estudio, se halló que la potencia en todos los casos estuvo por debajo de los 500 W, que la eficacia de remoción de frutos de menor densidad es de 96,7% en promedio y que la eficacia de separación de objetos duros y densos es de 88,2%, en promedio, con una moda de 100%. Los mejores resultados se obtuvieron cuando el tornillo sinfín trabaja a una inclinación de 60° con respecto a la horizontal, ya que se obtiene que el consumo específico de agua sea menor que 0,01 L.kg⁻¹ de café en cereza.

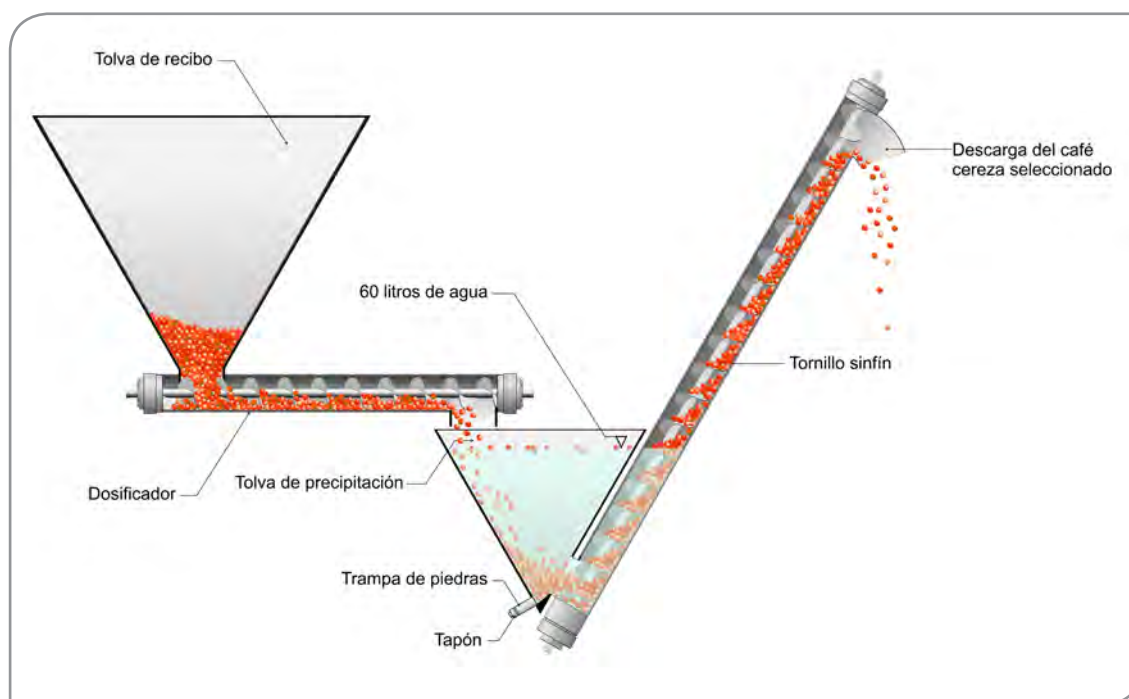


Figura 8.

Esquema de funcionamiento del separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín.

Consideraciones prácticas

Al sistema SHTTS se le hallaron ventajas económicas por evitar los gastos de mantenimiento de las despulpadoras por daños por objetos duros y por evitar el desgaste propiciado por el despulpado de frutos secos.

Clasificación hidráulica para pequeñas necesidades

Por la posibilidad de utilizar solamente mano de obra familiar, los caficultores con bajas producciones generalmente recolectan café de mejor calidad. Sin embargo, la masa cosechada puede contener frutos secos y maduros atacados por la broca o por enfermedades, los cuales deben ser retirados para obtener un producto final de alta calidad.

Para que no incurran en grandes inversiones para realizar la clasificación del café en cereza, se recomienda que utilicen canecas limpias, para hacer flotar en agua el café antes de despulparlo. Esta labor puede ser también aprovechada para remover las impurezas densas y duras que acompañan los frutos que quedan en el fondo de la caneca.

Tanque sifón con bajo consumo específico de agua

El tanque sifón es un sistema hidráulico que se utiliza para la clasificación por densidad del café en cereza, separando de igual manera el material flotante, y los objetos duros y densos.

El sistema consiste en un tanque con fondo en forma de pirámide invertida, el cual tiene un tubo sifón, en forma de U invertida (Figura 12), el cual presenta una presión negativa en su extremo dentro del tanque, para succionar agua y el material que se deposita en el fondo. La presión de succión puede ser calibrada para que no haya arrastre de impurezas pesadas, de acuerdo con la altura que hay entre el nivel de agua y la descarga del tubo.

Márquez (1987) realizó un trabajo de optimización en el que diseñó un tanque de solamente 1,0 m³ y encontró que para obtener mayor capacidad con menor consumo de agua, se debe tener una diferencia de altura de 0,7 m, entre el nivel de agua en el tanque y la descarga del café, cuando se utilizan tubos de 88 ó 114 mm de diámetro. En las

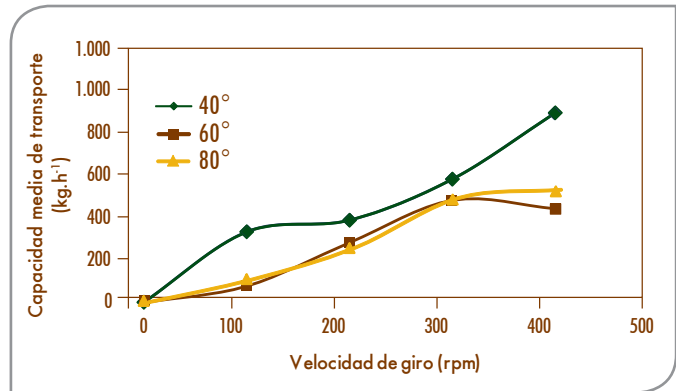


Figura 9.

Capacidad media de transporte para el separador con tornillo sinfín de 80 mm de diámetro.

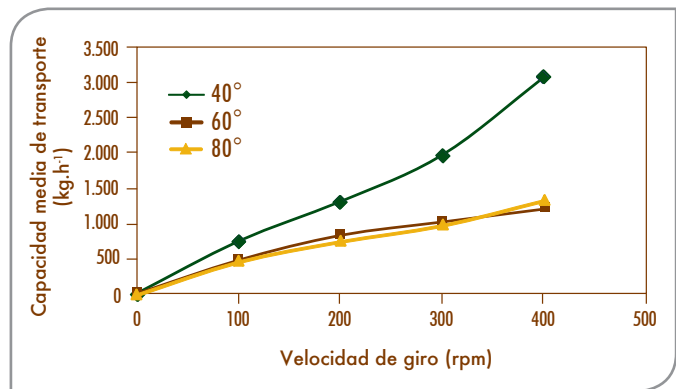


Figura 10.

Capacidad media de transporte para un separador con tornillo sinfín de 114 mm de diámetro.

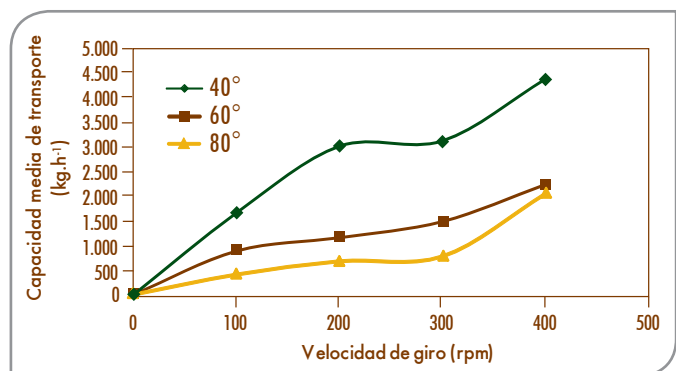


Figura 11.

Capacidad media de transporte para un separador con tornillo sinfín de 168 mm de diámetro.

condiciones de mejor operación encontró que el consumo específico de agua fue de $7,5 \text{ L.kg}^{-1}$ de café pergamino seco, que la capacidad varió entre 2.000 y 2.500 kg.h^{-1} de café en cereza, que la eficacia de separación de flotes fue de 88,9% en promedio y que la eficacia promedio de separación de material pesado fue de 49,3%.

Con el fin de disminuir el consumo específico de agua en este dispositivo hidráulico, se planteó el circuito hidráulico de la Figura 12. Allí se tiene que el café en cereza almacenado en la tolva de recibo (tolva húmeda) es movido hasta el tanque sifón por el agua que se obtiene de un sistema de separación de agua y frutos, que se ubica antes de entrar a la despulpadora y del agua que se obtiene de utilizar otro sistema de separación del agua que transporta los flotes fuera del tanque sifón. El sistema requiere de una bomba que transporte el agua nuevamente hasta la tolva húmeda. Con este sistema de recirculación se obtienen disminuciones en el consumo específico de agua hasta valores cercanos a $1,0 \text{ L.kg}^{-1}$ de café pergamino seco, en épocas de alto flujo de café. Sin embargo, para poderlo obtener se requiere de una alta inversión en equipos y tubería.

Clasificación de frutos de café por tamaño

Con la introducción de la variedad Castillo®, que presenta diferencias marcadas en el tamaño de los granos con relación a otras variedades como Caturra y Colombia, se dificulta el despulpado del café con las máquinas actuales, debido a que en éstas los granos pasan por

canales estrechos y fijos, en los que por trabajar con una calibración para el espesor promedio, se causa daño mecánico a los granos de mayor tamaño.

Una manera de solucionar este problema consiste en realizar una separación de los frutos de café en dos tamaños, con el fin de alimentarlos a dos sistemas de despulpado calibrados diferentemente (Figura 13). Se recomienda que la separación se haga con una zaranda cilíndrica de varillas que tenga una separación de 12 mm, de tal manera que se obtengan separadamente frutos con espesor menor y mayor a esta dimensión. La labor de despulpado cuando las producciones son menores puede hacerse en una sola despulpadora que tenga los canales calibrados para dos diferentes tamaños, en lugar de utilizar dos máquinas despulpadoras como sugiere la Figura 13.

Clasificación de frutos de café por color

Con el fin de clasificar la masa de café cosechada por estados de desarrollo, se cuenta con un selector electrónico de frutos de café por color, el cual recibe la materia prima proveniente del campo y realiza la identificación, clasificación y separación de cuatro estados de desarrollo de los frutos de café, inmaduros,

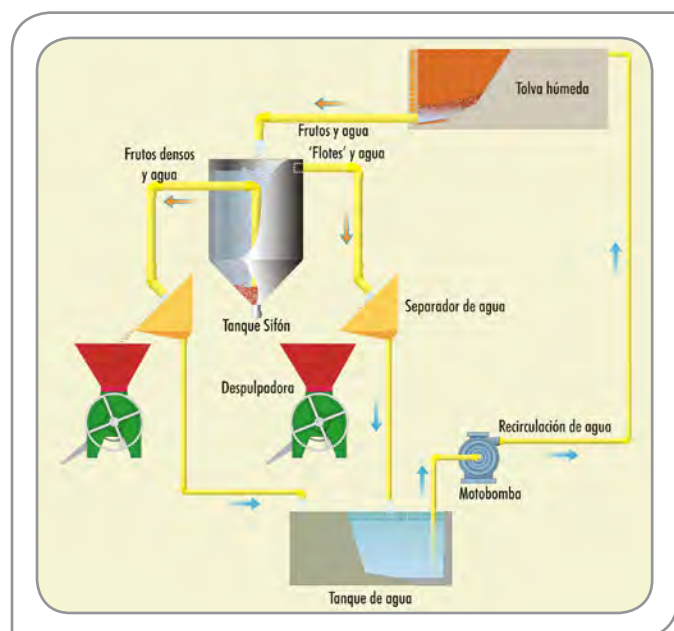


Figura 12.

Tanque sifón con sistema de recirculación de aguas.

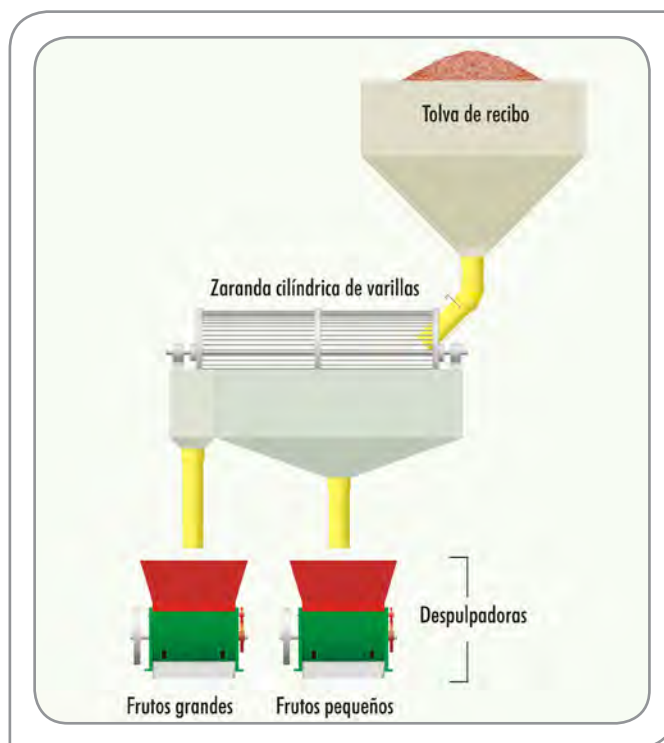


Figura 13.

Diagrama del montaje para clasificación de frutos de café por tamaño, con el fin de disminuir los daños causados en el despulpado.

pintones, maduros y sobremaduros. La clasificación de estos estados de maduración se realiza con base en el cambio cromático experimentado por los frutos a lo largo de su ciclo de desarrollo (Marín *et al.*, 2003; Ramos, 2008; Aristizábal *et al.*, 2012).

La clasificación de frutos por color se basa en la detección de componentes cromáticas roja, verde y azul sobre la superficie de los frutos de café, y la implementación de una estrategia de identificación generada por dichas componentes de color o sus posibles relaciones matemáticas (Sanz *et al.*, 2008; Ramos *et al.*, 2010). La estrategia implementada obtuvo una eficacia de identificación desde del 95% para todos los estados, a 50 frutos por segundo, con la capacidad de alimentar una despulpadora de 300 kg.h⁻¹.

La máquina seleccionadora de frutos de café por color (Figura 14) cuenta con los equipos listados a continuación:

- 1. Separador de tolva y tornillo sinfín**, donde se realiza una primera clasificación seleccionando y separando impurezas livianas y pesadas, entre ellas frutos secos, como el primer estado a retirar del proceso.
- 2. Separador de racimos**, conformado por un sistema de doble banda inclinada con movimiento ascendente. Los frutos en racimos, por tener más de un punto de apoyo, siguen el movimiento de las bandas y los frutos que vienen de forma individual ruedan en sentido contrario al movimiento de las mismas; los racimos salen del proceso y los frutos individuales entran en un alimentador de frutos uno a uno.

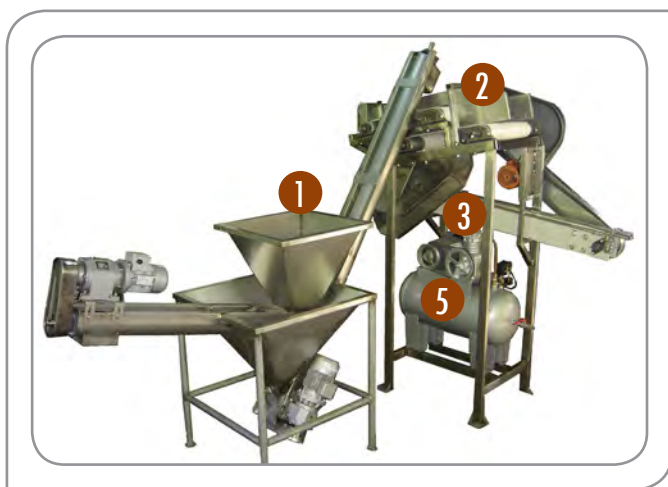


Figura 14.

Máquina seleccionadora de frutos de café por color.

- 3. Alimentador de frutos uno a uno**, conformado por una banda lineal, se encarga de exponer los frutos de forma individual, enfrente de un sistema electrónico de identificación, donde se relacionan las características del color con el estado de desarrollo de los frutos.
- 4. Sistema electrónico de identificación**, está conformado por un sistema óptico, un sistema de iluminación, un sensor de color y una unidad central de proceso. Con este sistema se relacionan las componentes de color vistas por el sensor sobre la superficie de cada fruto y se determina mediante un algoritmo¹ el estado de desarrollo de cada fruto observado.
- 5. Sistema separador/eyector**, conformado por un compresor de aire y un sistema electroneumático, es controlado por el sistema de identificación, con el fin de retirar del proceso los frutos identificados como no deseados.

La separación de los frutos que sean rechazados del proceso, la realiza el sistema separador/eyector, controlado por el sistema de identificación, en este caso la eficacia de separación fue superior al 34%, evidenciando un ajuste en la máquina para llegar comercialmente con ella a los caficultores.

Los costos de fabricación de este tipo de máquina son bajos, comparados con otras máquinas seleccionadoras usadas en los procesos de industrialización del café, debido a la tecnología electrónica utilizada.

Separadora mecánica de frutos verdes

Aunque en la recolección manual selectiva de café se busca desprender solamente frutos maduros, por factores como la desuniformidad de la maduración a nivel del glomérulo, la rapidez con que se efectúa el desprendimiento (<1 s/fruto), la técnica utilizada para desprenderlos, y por limitaciones visuales y de espacio, entre otros, generalmente se recolecta un porcentaje importante de frutos inmaduros, que al beneficiarlos y secarlos causan daños a la taza (Puerta *et al.*, 2000).

En Cenicafé, Oliveros *et al.* (2010) evaluaron un equipo de flujo de producto vertical ascendente, para separar frutos verdes, fabricado por la empresa colombiana JMEstrada², el cual consta de un rotor que gira a 362 r.min⁻¹ en el centro de una canasta o carcasa cilíndrica de 36 cm de diámetro y 128 cm de altura, con perforaciones de 8 mm x 40 mm y 57,6% de área perforada. El rotor consta de tres secciones: Inferior, con tornillo sinfín de 32 cm de diámetro, 28 cm de altura y paso de 14 cm; intermedia, en forma de cono truncado de 25 cm de altura, 15 cm de diámetro en la

¹ Algoritmo: Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema (www.rae.es)

² (www.jmestrada.com)

base y 28 cm en su parte alta, en la cual se comprime la masa y se despulpan los frutos de café; y superior, de sección cilíndrica de 28 cm de diámetro y 74 cm de altura, con ocho aletas de 2 cm de altura, soldadas en su superficie. Por efecto de la fuerza centrífuga generada por el rotor y a través de las aberturas de la carcasa, una parte del material, café despulpado y pulpa, es evacuado radialmente, mientras que el material restante, compuesto principalmente de frutos sin despulpar (secos, verdes y pintones), café despulpado y pulpa, fluye axialmente y es descargado en la parte superior del equipo. El equipo (Figura 15), que opera sin agua, es accionado por un motor de 5,5 kW.

Los frutos con mucílago, principalmente maduros y sobremaduros, se despulpan al ser comprimidos en la sección cónica del equipo. En la Figura 16 se presenta material descargado radialmente (café despulpado y pulpa) y axialmente (frutos verdes y pintones).

El café despulpado, con 50,3% de pulpa, es procesado en módulo Becolsub para retirarle la pulpa y el mucílago, obteniendo el café lavado que se presenta en la Figura 17, donde se observa el efecto limpiador del postratamiento.

Los resultados obtenidos en la evaluación de la separadora JM Estrada 2500, con porcentaje inicial de frutos verdes de 4%, 7% y 10%, se presentan en la Tabla 1.

El desempeño del equipo en la separación de frutos verdes, daño mecánico en los granos de café y frutos sin despulpar no es afectado por el flujo de café en el equipo y el porcentaje inicial de frutos verdes en el rango de 4% al 10%. Se observó que a mayor porcentaje de frutos verdes en la masa inicial menor porcentaje de frutos maduros que sale acompañando a los frutos verdes. Los frutos maduros que salen por la descarga radial son despulpados posteriormente en el módulo Becolsub.

Con el equipo se logra una ventaja que no ofrecen las despulpadoras utilizadas actualmente para café en Colombia, no se ocasiona daño mecánico a los granos de café.

Cuando se procesa el café resultante de la separadora JM Estrada 2500 en el módulo Becolsub, se reduce la capacidad de la despulpadora, por el alto porcentaje de



Figura 15.

Máquina para separar frutos verdes de café JM Estrada 2500, con sistema de alimentación controlada (a), rotor y canasta (b).

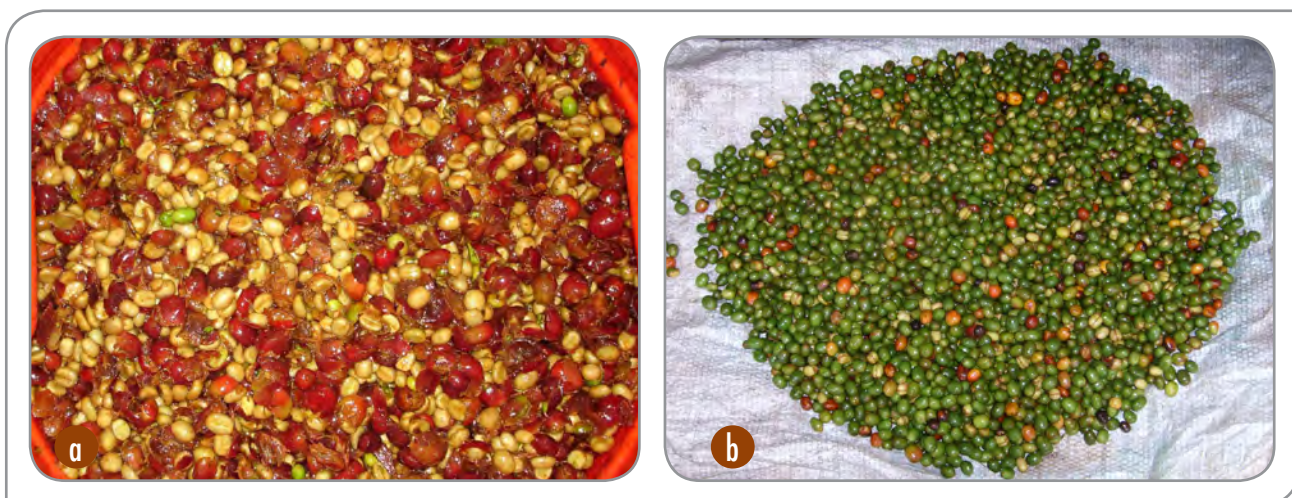


Figura 16.

Material producido con la separadora de verdes: En la descarga radial a y axial b.



Figura 17.

Café lavado obtenido a partir de café cereza con 10% de frutos verdes y posterior tratamiento con Becolsub para remover la pulpa y el mucílago presentes.

pulpa presente, y se incrementa el volumen específico de agua, alcanzado valores hasta de 5,25 L.kg⁻¹ de café seco. Las mieles generadas en el proceso (agua + mucílago) y la pulpa resultantes de 40 kg de material descargado radialmente se mezclaron obteniendo los resultados presentados en la Tabla 2. Los volúmenes de lixiviados son elevados al igual que la DQO, por lo cual se recomienda llevarlos a plantas de tratamiento para disminuir su impacto ambiental.

Los resultados obtenidos con la máquina JM Estrada 2500, con flujo de café en cereza en el rango de 1.500 a 2.500 kg.h⁻¹ y porcentaje de frutos verdes inicial del 4% al 10%, indican que esta máquina es apropiada para

separar frutos verdes, con una eficacia promedio de 98,3%, sin causar daño mecánico a los granos. El café despulpado por la máquina presenta 50,6% de pulpa y 1,2% de frutos maduros sin despulpar. La primera se retira utilizando una despulpadora convencional, los segundos son despulpados al pasar el café por la despulpadora. Al procesar el café con la tecnología Becolsub, desarrollada en Cenicafé (Roa et al., 1999), para retirar el mucílago por medio mecánico y controlar parte de la contaminación, se generan lixiviados con carga de 61.200 a 112.500 mg.L⁻¹, que deben ser tratados para reducir su impacto ambiental.

Despulpado de café

El despulpado del café es la primera etapa del beneficio húmedo en la que el fruto pasa por una transformación, dado que se dejan libres de pulpa o cáscara, las dos semillas que normalmente se encuentran dentro. Esta labor la realizan eficientemente las máquinas despulpadoras, las cuales aplican esfuerzos cortantes y de compresión a los frutos para que la pulpa se rasgue y salgan libremente los dos granos, gracias también a la acción lubricante del mucílago que las recubre.

Tipos de despulpadora

Existen varias clases de despulpadoras: Las máquinas más comunes en Colombia son las de cilindro horizontal, las de cilindro vertical y, menos usadas, las de disco.

Las despulpadoras de cilindro horizontal, cuentan con un cilindro ubicado en un eje horizontal, el cual está recubierto por una lámina, llamada camisa, con protuberancias, llamadas “dientes” o “uñas” (Figura 18). Cuando el cilindro gira, presiona los frutos contra un pechero para que las

Rendimiento (kg.h ⁻¹ de café cereza)	Separación de frutos verdes	Daño Mecánico	Frutos maduros sin despulpar (%)	Frutos maduros en descarga axial
1.500	98,5	0,0	1,32	0,05
2.000	98,3	0,0	0,53	0,05
2.500	99,4	0,0	0,51	0,02

Tabla 1.

Resultados obtenidos en la evaluación de la separadora mecánica de frutos verdes de café JMEstrada 2500. Fuente Oliveros et al. (2010).

Tratamiento	Consumo específico de agua (L.kg ⁻¹ cps)	Volumen de lixiviados (L)	DQO (mg.L ⁻¹)	kg DQO	kg DQO/100 kg de café cereza
1 (1.500 kg.h - 4%)	2,73	5,30	81.500	0,43	1,08
2 (2.000 kg.h - 4%)	2,89	4,00	122.500	0,49	1,23
3 (2.500 kg.h - 4%)	4,39	6,00	95.700	0,57	1,44
4 (1.500 kg.h - 7%)	4,25	8,00	59.200	0,47	1,18
5 (2.000 kg.h - 7%)	5,25	9,50	61.200	0,58	1,45

Tabla 2.

Consumo específico de agua, volumen de lixiviados y demanda química de oxígeno (DQO) de los lixiviados al procesar el café con la separadora mecánica de frutos verdes JMEstrada 2500, en un módulo Becolsub 1000. Fuente Oliveros et al. (2010).

semillas salgan del fruto. Para que los granos y la pulpa vayan por caminos separados, los granos son obligados a moverse por canales labrados en el pechero de la máquina, hasta el punto de descarga del café despulpado, mientras que las uñas agarran la pulpa y la sueltan en la parte posterior de la máquina por efecto de la fuerza centrífuga.



Figura 18.

Despulpadora de cilindro horizontal.



Figura 19.

Despulpadora de cilindro vertical.

Las máquinas despulpadoras de cilindro vertical (Figura 19), trabajan de manera similar a las de cilindro horizontal, con la ventaja que la disposición le permite manejar mayor número de canales, por lo que con bajo volumen pueden alcanzar capacidades relativamente altas (hasta 2.500 kg.h). Sin embargo, el mayor número de mecanismos hace que este tipo de despulpadora sea más compleja.

Las máquinas de disco también presionan los frutos contra una superficie fija con un disco giratorio que tiene protuberancias en ambas caras (Figura 20). Tiene la ventaja que en muy bajo volumen se puede tener grandes capacidades, ya que se pueden instalar varios discos en un solo eje. La capacidad de estas máquinas es del mismo orden que las de cilindro vertical por cada disco.

Despulpado del café sin agua

Hasta hace algunas décadas, se pensaba que las máquinas despulpadoras necesitaban agua para realizar bien su trabajo. Con la motivación de reducir el consumo de agua en esta etapa, Álvarez (1991) condujo una investigación para determinar los volúmenes mínimos requeridos para realizar el despulpado de café en máquinas de cilindro horizontal, encontrando que cuando esta operación se hacía sin agua, las características del producto eran iguales a las del café procesado con agua, y que la potencia requerida era igual.



Este resultado permitió concluir que el fruto de café maduro tiene el agua suficiente para llevar a cabo el despulpado en máquinas de cilindro horizontal sin requerir agua adicional (Despulpado en seco). Con estos datos, Zambrano (1994) y Zambrano et al. (1999) determinaron que el uso de agua para el despulpado del café, el transporte de la pulpa hasta las fosas y el transporte del café despulpado contribuye con 82,9 g de DQO/kg de café en cereza, el cual es equivalente al 72% de la contaminación potencial del agua por beneficio húmedo.



Figura 20.

Despulpadora de disco.

Estos antecedentes motivaron a los fabricantes de máquinas de cilindro vertical a mejorar el diseño para realizar el despulpado de café sin agua. Álvarez (1995) condujo una serie de ciclos de diseño, con el objetivo de encontrar la forma de realizar el despulpado de café en máquinas de cilindro vertical sin el uso de agua, logrando finalmente el propósito sin afectar la capacidad de procesamiento de las despulpadoras.

Si bien en las máquinas de disco se han logrado reducciones significativas en el uso del agua, no se ha logrado la reducción total del uso del líquido para realizar la labor.

Clasificación del café despulpado por tamaño

Como se describió anteriormente, los frutos que tienen mucílago, ya sean pintones, maduros y sobremaduros, son despulpados con facilidad en las máquinas utilizadas, sin embargo, los frutos que carecen de éste, como los verdes y secos, pasan enteros o ligeramente dañados, acompañando a los granos despulpados. **Dado que los frutos sin mucílago son de mayor tamaño que los granos despulpados, pueden ser retirados del flujo principal por medio de un sistema de clasificación por tamaño.** Para tal fin existen las zarandas o cribas, las cuales por medio de algún tipo de movimiento exponen los granos a aberturas de un tamaño y forma preestablecidos, para que pasen o se retengan.

Dada la forma semi-elipsoide de los granos de café despulpado, con el fin de remover principalmente los frutos secos y verdes que no fueron despulpados, se utilizan aberturas alargadas en las cuales se clasifican los granos por espesor (la menor dimensión). De esa manera, los frutos secos y verdes son retenidos, mientras que el café despulpado pasa la zaranda, siempre que su espesor sea inferior al ancho de las aberturas. Esta característica hace que el ancho de las aberturas sea un aspecto crítico en la eficiencia del beneficio de café, ya que una subestimación de esta dimensión genera pérdidas considerables, en razón a que una cantidad apreciable de granos buenos de gran tamaño, pueden quedar retenidos con los frutos que no fueron despulpados. Así mismo, la sobreestimación de ella trae como consecuencia la aparición de material indeseable en el café del flujo principal.

En el mercado existen principalmente dos maneras de formar las aberturas de las zarandas: Perforaciones oblongas troqueladas sobre láminas o con arreglos de varillas paralelas, igualmente espaciadas, ya sean de sección circular o planas. Así mismo, existen dos maneras de mover las zarandas, en vaivén y rotatorias.

Zarandas de vaivén. Las zarandas de vaivén (Figura 21) son estructuras planas construidas normalmente en lámina troquelada con perforaciones oblongas, a las cuales se les imprime un movimiento oscilatorio unidireccional, con una carrera de unos pocos centímetros. El plano de la zaranda tiene una pequeña inclinación con respecto a la horizontal de tal manera que con el movimiento promueve la exposición de todo el material a las aberturas, lo mismo que el desplazamiento hacia adelante, de los granos de café que están sobre ella. Las zarandas rotatorias están reemplazando las de vaivén, porque éstas son para bajas capacidades, porque son ruidosas y porque la vibración que producen es perjudicial para otras estructuras.



Figura 21.

Zaranda plana de vaivén.

Zarandas rotatorias. Las zarandas rotatorias son normalmente cilindros de lámina troquelada o de varillas paralelas que giran lentamente sobre su eje, para exponer los frutos a las aberturas (Figura 22). Se acostumbra una pequeña inclinación con la horizontal o incluir hélices internas para generar el movimiento del material retenido hacia adelante.



Figura 22.

Zaranda rotatoria cilíndrica de varillas.

Ancho de las aberturas de la zaranda. Cuando las variedades de café más sembradas eran Colombia y Caturra, se acostumbraba seleccionar una abertura con un ancho de 7,5 mm. Sin embargo, con la introducción de la Variedad Castillo®, que tiene un gran contenido de granos de mayor tamaño, esta dimensión se ha aumentado hasta 8,0 mm. No obstante, cuando esta selección del ancho de las aberturas se hace *a priori*, se corre el riesgo de aumentar las pérdidas de café bueno con los de menor calidad. Por tal razón se podría disponer de láminas troqueladas con anchos alrededor de las dimensiones mencionadas, o cilindros de varillas con diferentes separaciones, según el caso, para ser cambiadas en los momentos en que se note el

incremento de las pérdidas o el incremento de material indeseable en la masa principal de café.

Láminas troqueladas versus zarandas de varillas. En el conocimiento popular en la caficultura colombiana hay diferentes conceptos acerca de los dos tipos de aberturas usadas en las zarandas para café despulpado. Hay personas que prefieren las láminas troqueladas porque retienen mayor cantidad de pulpa suelta, lo cual es explicable por la menor área perforada, comparada con la de varillas, lo que significa una mayor área donde quedar adheridas. Sin embargo, la menor área perforada crea la necesidad de mayor tiempo de retención del café dentro del dispositivo, lo que significa mayores dimensiones en las construcciones.

Las zarandas de varillas, por otro lado, tienen una mayor capacidad, de acuerdo a su longitud, con la restricción que no son adecuadas para remover trozos de pulpa. La Tabla 3 muestra las recomendaciones para la selección del diámetro y la longitud de las zarandas cilíndricas, de acuerdo a la capacidad requerida. Allí se puede observar la necesidad de mayor longitud cuando se usan zarandas cilíndricas de lámina troquelada.

Remoción de mucílago de café

El mucílago es una película gelatinosa constitutiva del café que queda expuesta cuando el fruto es despulpado, la cual está fuertemente adherida al endocarpio o pergamino, y se caracteriza por tener una fuerte capacidad de retención de agua debido a su composición, por lo que su contenido de humedad puede ser muy variable de acuerdo con las condiciones climáticas que prevalezcan durante la recolección.

El mucílago del café representa en promedio el 14,85% del peso del fruto fresco (Rodríguez, 2009) y 25,3% del peso del café recién despulpado (Peñuela, 2010). Rodríguez (1999) reportó valores de contenido de

Capacidad de la despulpadora (kg.h ⁻¹)	Diámetro (m)	Longitud varillas	Longitud lámina troquelada
		(m)	(m)
200	0,25	0,30	0,40
300	0,25	0,50	0,50
600	0,40	0,50	0,60
900	0,40	0,50	0,70
2.500	0,40	1,00	1,20
5.000	0,40	1,60	2,00
7.500	0,40	2,00	2,50

Tabla 3.

Datos prácticos para la construcción de zarandas cilíndricas.

humedad entre 89% y 96%. El mismo autor, reportó que los principales compuestos constituyentes del mucílago presentan valores promedio de 10,97% base seca (b.s.) de sustancias pécticas (que le dan consistencia gelatinosa), azúcares totales de 79,74% b.s., celulosa y cenizas.



Las razones por las cuales es necesario retirar el mucílago se centran en tres aspectos principalmente.

- *La primera razón se refiere a que el café colombiano pertenece al segmento del mercado de los denominados cafés suaves lavados, en los que hay una combinación entre la variedad de café de la especie Coffea arabica y el método de beneficio que involucra el despulpado y la remoción de mucílago antes del secado.*
- *Otra razón para retirar el mucílago es que esta película gelatinosa crea una barrera natural al flujo de humedad hacia el exterior del grano durante el secado, obteniendo un tiempo de secado muy prolongado y deterioro de la calidad del grano, no solamente físico sino también en taza, por lo que su eliminación facilita el secado.*
- *El tercer argumento para retirar el mucílago está relacionado con la inocuidad del producto, dado que al remover esta capa se disminuye considerablemente la carga microbiana presente en el grano.*

Dentro del proceso de beneficio húmedo se tienen diferentes alternativas para remover el mucílago del café despulpado; éstos incluyen medios naturales, mecánicos y con adición de enzimas. Los métodos naturales se refieren a la degradación del mucílago por medio de la fermentación natural y posterior lavado, mientras que los métodos mecánicos se refieren a máquinas que agitan la masa de café despulpado para remover el mucílago. También se pueden adicionar enzimas pectinolíticas para acelerar el proceso de degradación de mucílago y tener café lavado más rápidamente.

Fermentación natural del mucílago

La fermentación natural es la manera más sencilla y tradicional para degradar el mucílago, dado que en ella se interrelacionan los agentes suministrados naturalmente por el ambiente. El mucílago del café con su composición rica en azúcares y agua, es un medio propicio para que los microorganismos, como levaduras, mohos y bacterias, realicen las transformaciones de estos compuestos, generando sustancias como alcoholes y ácidos orgánicos que son solubles en el agua, por lo que se facilita el lavado posterior.

En este proceso, que sucede espontáneamente, se lleva a cabo su control a través del tiempo, con el cual se determina la finalización del mismo. En estudios realizados por Peñuela et al. (2010), se evaluó el efecto de la selección del café antes del despulpado (Calidad de la materia prima) y de la cantidad de café en el tanque sobre el tiempo de fermentación, determinado mediante una remoción de mucílago superior al 97%.

En la Figura 23 se observan diferencias en la apariencia de la masa de café despulpado con y sin selección (Calidad), debida principalmente a la cantidad de frutos secos que ingresan directamente a la masa de café que no ha tenido selección, la proporción de estos frutos representó para este estudio aproximadamente 6% más en relación con el café que ha sido clasificado.

Con estas dos condiciones de calidad de café en el tanque, se realizó el **seguimiento a la temperatura de la masa durante el proceso de fermentación, obteniéndose mayores valores en la masa de café sin clasificación, especialmente al final de la fermentación.** Esta condición se puede generar debido a la mayor cantidad de materia orgánica y microorganismos suministrados por los frutos secos. Todo lo anterior, hace que el tiempo de fermentación sea menor en este tipo de masa respecto a la masa proveniente de café clasificado, como se observa en la Tabla 4.

En este estudio se identificó además el **efecto sobre la calidad en taza de no seleccionar la materia prima antes del despulpado**, dado que se obtuvo menor proporción de tazas (11,5%) con impresión global mayor que 7,0 que clasifica al café como bueno, respecto a la proporción de tazas con la misma calificación para el café clasificado (19,3%). Adicionalmente, el café sin selección presentó mayor cantidad de notas desagradables, tales como ásperas, astrigentes y leñosas no agradables.

No se obtuvieron diferencias respecto a los resultados de la evaluación del efecto de la cantidad de café en el tanque sobre el tiempo de fermentación (Tabla 5).



Figura 23.

Aspecto de la masa de café desulpado. **a.** Sin clasificación; **b.** Con clasificación.

Identificación del punto de lavado

Para determinar el momento en el que se debe lavar el café, con el fin de eliminar el mucílago degradado y los subproductos de la fermentación, el caficultor debe recurrir a métodos tradicionales, que se han utilizado para determinar de forma fácil pero subjetiva el punto de lavado³.

En Cenicafé se realizó la evaluación de los dos métodos más utilizados por los caficultores, para la determinación del punto final de la fermentación, con el fin de determinar su eficacia (Peñuela, 2010), **el método del orificio en la masa y el método del tacto**. La evaluación consistió en identificar la respuesta en el tiempo a medida que avanzó el proceso de fermentación.

Con el método del orificio en la masa se identificó el punto de lavado cuando el proceso de fermentación llevaba transcurrido un tiempo de 7,29 h y con el método del tacto el tiempo promedio de punto de lavado ocurrió a las 10,23 h de iniciado el proceso. Con los dos métodos, el tiempo determinado para lavar el café fue diferente del momento determinado con el método de referencia, es decir, cuando se detecta que la remoción de mucílago es superior al 97% mediante reacción con enzima pectinolítica, el cual es de $15,5 \pm 0,9$ horas.

Los métodos utilizados tradicionalmente para identificar el punto de lavado presentaron error, dando respuesta afirmativa mucho antes de degradar completamente mucílago. Con el tiempo obtenido en

Materia prima	Tiempo para remoción mayor a 97% (h)
Con selección	16,31 a
Sin selección	15,00 b

Tabla 4.

Promedio de tiempo de remoción para dos clases de materia prima.

Letras no comunes implican diferencia estadística al 5% según prueba de t.

Materia prima	Cantidad de café en el tanque (%)			
	25	50	75	100
Clasificada (h)	16,4 a	16,4 a	16,2 a	16,25 a
Sin clasificar (h)	15,0 b	15,0 b	14,6 b	15,40 b

Tabla 5.

Promedios de tiempo (hora) de remoción para diferentes cantidades.

Letras no comunes implican diferencia estadística al 5% según prueba de t.

³ Punto de lavado. Es el momento del proceso de fermentación de mucílago en el que éste alcanza la degradación y se pueden retirar sus residuos por medio del lavado, para que no se alteren las características sensoriales del café y el grano pueda continuar con la etapa de secado.

cada método se obtuvieron porcentajes de remoción en promedio de 58% y 74% para el método del orificio y del tacto, respectivamente.

Método para identificar el momento final de fermentación de mucílago de café

En Cenicafé se desarrolló un método para determinar objetivamente el punto de lavado del café en fermentación, basado en la relación entre el cambio de volumen de la masa de café y el porcentaje de remoción de mucílago (Peñuela *et al.*, 2010; Peñuela y Pabón, 2012; Peñuela *et al.*, 2012). Este desarrollo es el resultado de un proceso de diseño, selección y evaluación de un dispositivo en forma de cono truncado perforado, dentro del cual se deposita una muestra de café despulpado de 500 cm³, (Figura 24 a), proveniente de la masa de café que inicia la fermentación (Figura 24 b y c), el dispositivo se cierra (Figura 24 d) y se coloca en el interior de la masa apoyado sobre la base, de forma que se vea su ubicación dentro del tanque (Figura 24 e).

Cuando el café se encuentra listo para ser lavado, debe observarse en la parte aguda del dispositivo un espacio vacío de 85 mm, que coincide con la primera marca del dispositivo (Figura 24 f) y corresponde al mucílago degradado y drenado a través de las perforaciones. Cuando el café está en este estado tiene una remoción de mucílago mayor al 95%, suficiente para iniciar el lavado de forma segura.

Como resultado de la determinación del punto de lavado en 65 pruebas realizadas en fincas de caficultores de Caldas, Risaralda y Valle del Cauca, permitió obtener una eficacia del 97%, un resultado destacado dada la diversidad de los factores que afectan el proceso, tales como: Condiciones ambientales, variedad, calidad de café, formas de procesamiento y tipo de infraestructura, lo cual indica la robustez del método y la posibilidad de aplicación en la diversidad de la caficultura (Peñuela y Pabón, 2012).

Durante esta evaluación, también se registró el tiempo obtenido según el método y el tiempo utilizado tradicionalmente por el caficultor y se identificó que, en el 25% de los casos, el tiempo definido por el caficultor para lavar el café fue igual al determinado por el método, sobreestimado en el 36,5% y subestimado en el 38,5%.

Adicionalmente, se tomaron muestras de café lavado de acuerdo a la recomendación del método y se llevaron al secador inmediatamente hasta obtener una humedad entre el 10% y 12%. Como resultado de este proceso se obtuvieron 94% de las muestras con taza limpia y 92% de ellas con calificación mayor que 75 puntos, lo cual clasifica



Figura 24.

Dispositivo utilizado para el uso del método para identificar el punto final de fermentación. **a.** Inicio del proceso con café despulpado; **b., c., d. y e.** Pasos para el llenado del dispositivo como cono truncado; **f.** Finalización del proceso con café listo para lavar.

al café como de **calidad buena**, de acuerdo con la escala de evaluación⁴. Lo anterior permitió concluir que con el uso de este método es posible disminuir los riesgos sobre la calidad del café, debidos a la fermentación.

Recomendaciones para el manejo del dispositivo

Para obtener una correcta respuesta en la identificación del punto final de la fermentación es necesario seguir las siguientes recomendaciones:

- El café debe estar recién despulpado, por lo que no se debe mezclar café de diferentes tandas de despulpado.
- La muestra de café a ser depositada en el dispositivo debe ser representativa de la totalidad de la masa que estará en proceso de fermentación.
- Para permitir el adecuado flujo de mucílago dentro del dispositivo y permitir su drenado, el café despulpado debe contener máximo de 10% de pulpa y seguir los requisitos definidos en la NTC2090.

⁴ SCAA: Asociación Americana de Cafés Especiales, por su sigla en inglés

- Colocar el dispositivo con la muestra de café recién despulpado dentro de la masa de café y apoyado sobre la base, de forma que se observe el lugar en el que fue colocado, para poder realizar el seguimiento del proceso.

Ventajas del manejo del dispositivo

- El uso de esta metodología se convierte en una herramienta de control no solo de la fermentación, sino de los procesos de selección, despulpado, clasificación y aplicación de las Buenas Prácticas Agrícolas, dadas las recomendaciones para obtener buenos resultados.
- Ayuda a controlar el proceso de fermentación de una manera objetiva.
- La etapa de fermentación continúa siendo sencilla, en la que el uso del dispositivo y método no complican la operación de la etapa.
- Utilizando esta metodología, la indicación del punto de lavado no depende del tiempo ni de otros factores que puedan afectar el proceso de fermentación tales como madurez del café, condiciones ambientales, tipo de tanque, cantidad de café, variedad, condiciones de proceso.
- Con el uso repetido del método, el caficultor aprende a conocer el proceso y da mayor posibilidad de control ante el efecto de factores externos.

Uso de enzimas pectinolíticas para remover el mucílago

Otra alternativa para remover el mucílago del café es mediante la aplicación de enzimas pectinolíticas al café despulpado, cuyo uso ha sido estudiado en diferentes países productores desde hace más de 50 años, con los resultados esperados en la disminución del tiempo de proceso, ya que las enzimas activan las reacciones que en condiciones naturales tienden a ser lentas.

Sin embargo, solo con el apoyo de la biotecnología se logró el desarrollo de una preparación enzimática de alta concentración específica para actuar sobre el mucílago del café y que recientemente fue evaluada en Cenicafé, en aspectos técnicos como tiempo de remoción y concentración, aspectos ambientales como la identificación de la carga orgánica adicional en el agua residual y en la calidad final del café respecto al análisis físico y sensorial. Inicialmente se obtuvieron resultados en el laboratorio, los cuales posteriormente fueron validados en el campo (Peñuela *et al.*, 2011).

En esta investigación se evaluó el efecto de la aplicación de cuatro concentraciones de enzima, desde 100 mg.kg⁻¹ hasta 400 mg.kg⁻¹ a la masa de café despulpado, en tres temperaturas del ambiente, 15 °C, 20 °C y 25 °C, sobre el tiempo de remoción. Se tuvo como testigo la fermentación natural.

Se obtuvieron valores de remoción de mucílago mayores del 80% en una hora, para todos los tratamientos, sin diferencias bajo las temperaturas evaluadas, sin embargo los resultados mostraron una tendencia lineal positiva para la concentración, es decir, a mayor concentración de enzima mayor remoción de mucílago en una hora. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 6.

Los resultados mostraron que es posible obtener una remoción de mucílago mayor al 98% en un tiempo de tres horas, cuando se aplica enzima a una concentración de 100 mg.kg⁻¹ (Miligramos de enzima por cada kilogramo de café despulpado). Así mismo, se identificó que la adición de enzimas al proceso no afecta la carga orgánica del agua de lavado, al ser comparada con el agua de fermentación natural, es decir, no hubo diferencias en los valores de sólidos (totales y solubles), ni en los de demanda química de oxígeno, por lo que el agua de lavado puede continuar con el proceso de tratamiento de aguas residuales, como

Concentración Temperatura	100		200		300		400		Prom. (%)	D.E. (%)
	Prom. (%)	D.E. (%)	Prom. (%)	D.E. (%)	Prom. (%)	D.E. (%)	Prom. (%)	D.E. (%)		
15 °C	82,7	3,9	87,4	4,5	90,4	3,3	91,9	3,2	88,1	5,0
20 °C	86,4	2,8	88,4	2,7	88,7	2,2	89,2	4,0	88,2	3,0
25 °C	85,6	1,9	84,9	6,7	86,1	6,4	89,9	3,3	86,6	5,0
Prom.	84,9		86,9		88,4		90,3			
D. E.	3,2		4,7		4,4		3,5			

Tabla 6.

Promedio (Prom.) y desviación estándar (D.E.) para el porcentaje de remoción de mucílago en una hora, de acuerdo a la concentración y la temperatura.

se realiza normalmente con las provenientes del lavado de café con fermentación natural, con el fin de remover la mayor cantidad de carga orgánica antes de ser liberada a las fuentes de agua (Peñuela *et al.*, 2010). La Tabla 7, muestra los valores promedio obtenidos.

Para determinar el efecto de la adición de enzimas sobre la calidad final del café, en todas las muestras evaluadas se controlaron factores que pueden afectarla, como son la calidad de la recolección, la variedad de café (para este caso se trabajó con la Variedad Castillo®), la presencia de impurezas y de frutos de menor calidad antes del despulpado, la remoción completa del mucílago y el secado solar inmediato después del lavado, hasta obtener una humedad final entre 10% y 12% base húmeda (b.h.) Posteriormente, las muestras se enviaron al panel de catación para su evaluación sensorial.

La calidad sensorial del café no se afectó por la adición de enzimas como ayudante del proceso de remoción de mucílago. Ninguna de las muestras analizadas por el

panel de catación, provenientes de los tratamientos con y sin aplicación de enzimas, presentó defectos ni rechazo. Además, la proporción de tazas con más de 75 puntos⁵, considerada como una calidad usual buena, fue de 64,3% cuando provenían de fermentación natural y 67,9% cuando se aplicó enzima.

En la Tabla 8 se observan las diferencias de tiempo de proceso entre los tratamientos con enzimas y fermentación natural; la adición de enzimas al proceso disminuyó a una décima parte el tiempo establecido por los caficultores para remover el mucílago por fermentación natural.

Consideraciones prácticas

En el proceso de validación en el campo en fincas de caficultores ubicadas en diferentes departamentos cafeteros del país, la calidad del café despulpado presentó gran variación de condiciones al momento de realizar las evaluaciones, tales como diferentes variedades, época de cosecha, calidad de la recolección y condiciones del proceso de beneficio en cada finca, sin embargo, el valor de remoción de mucílago obtenido en el campo (97%) fue similar al obtenido en el laboratorio (98%), resultado que genera confianza en la efectividad de la enzima.

Esto indica que se puede obtener café de mejor calidad en taza cuando se controla el proceso de fermentación a través de la aplicación de enzimas, debido a que se obtiene una alta remoción de mucílago en poco tiempo de proceso. Para la aplicación de enzimas al café despulpado se recomienda seguir el procedimiento Anexo No. 14.

En cuanto a la calidad física, las muestras obtenidas de los dos tratamientos en cada finca mostraron un promedio de porcentaje de almendra sana de 77,0% y 77,2% para el café por fermentación natural y con adición de enzima, respectivamente. Respecto a la calidad en taza, el 70% de las muestras a las cuales se les aplicó la enzima tuvieron una calificación de calidad usual buena, mientras que en las muestras procedentes de fermentación natural fue del 55%.

Indicador	Valores de referencia	Fermentación natural	Valores obtenidos (enzimas)
Sólidos suspendidos totales (mg.L ⁻¹)	< 4.000	3.480	3.040
Sólidos totales (mg.L ⁻¹)	30.000*	23.751	21.295
D.Q.O. (mg.L ⁻¹)	27.000*	27.561	27.700
pH	3,5 - 4,0	3,83	5,64 - 5,96

* Valores aproximados

Tabla 7.

Indicadores de la calidad de aguas residuales del lavado del café.

⁵ Para la evaluación, el panel de catación utilizó la escala de la Asociación Americana de Cafés Especiales- SCAA.

Además de la disminución del tiempo en el proceso, las ventajas que se obtienen al utilizar enzimas se resumen a continuación:

- Se puede aplicar en bajas concentraciones, con buenos resultados en los aspectos técnicos y ambientales.
- La adición de enzimas facilita la determinación del momento oportuno para lavar el café, en los casos en los cuales se tenga dificultad para hacerlo.
- Permite aumentar la capacidad de procesamiento sin necesidad de aumentar infraestructura, es decir, en épocas de plena cosecha en las que se debe procesar varios lotes de café en el mismo día, se puede lavar sin necesidad de disponer de más tanques para la fermentación.
- Permite dar continuidad al beneficio, en general, y disminuir el tiempo total de proceso.
- Se puede realizar una mejor programación de actividades en la finca, dado el control del proceso.

Desmucilaginado mecánico de café

El mucílago que recubre el pergamino de los granos de café puede ser removido por medios mecánicos a través del uso de agitadores a altas velocidades, que causan esfuerzos cortantes a la masa de café despulpaado y promueven colisiones entre los mismos granos, y entre los granos y las partes fijas y móviles de la máquina, para realizar este desprendimiento.

Sin embargo, esas acciones deben ser adecuadas para evitar que los granos queden con restos de mucílago, que continúan en procesos de fermentación que causan defectos en la calidad del café, con sabores como vinagre, fermento, *stinker* y otros que no son aceptados en la comercialización del café. Los restos de mucílago toman una apariencia rojiza durante el secado, que le dan un aspecto manchado al pergamino de los granos, el cual se detecta fácilmente y ocasionan el rechazo del producto. Si por el contrario la agitación dentro de la máquina es más fuerte de la requerida, se corre el riesgo de causar daño mecánico a los granos.

Tecnología Deslim. Oliveros *et al.* (1995), desarrollaron un equipo para el desprendimiento, lavado y limpieza del

mucílago que recubre el café despulpaado, sin necesidad de someter esa capa gelatinosa a degradación por otros medios, como la fermentación natural. El equipo es denominado Deslim por las labores que realiza al café (Desmucilaginado, Lavado y Limpieza) y con el cual se disminuye sustancialmente el consumo específico de agua, al pasar de un consumo específico de agua de más de 20 L.kg⁻¹ de café pergamino seco a menos de 1,0 L.kg⁻¹, cuando se opera de la manera recomendada.

El desmucilaginado Deslim consta de una parte fija o carcasa, que en este caso es una lámina con perforaciones oblongas, y una parte giratoria denominada rotor. El equipo es de flujo ascendente por acción de un tornillo sinfín en la base del rotor, que al girar fuerza a los granos de café despulpaado a entrar a la cámara de agitación. Posteriormente, en el rotor se encuentran los agitadores de tipo Colmecano (Figura 25), los cuales cuentan con

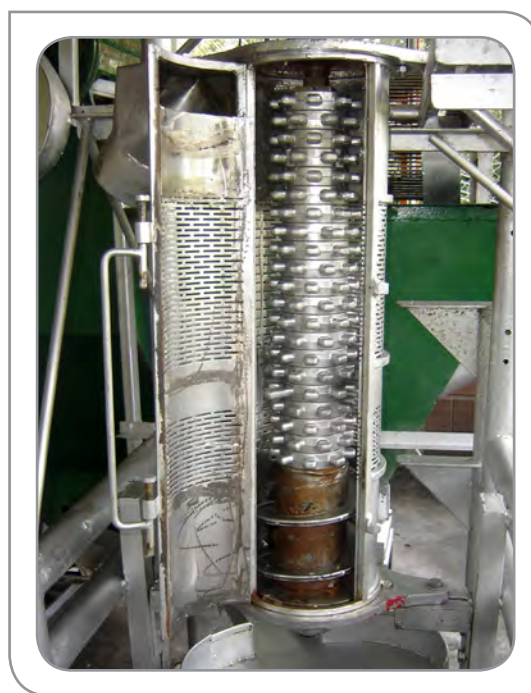


Figura 25.

Desmucilaginado mecánico Deslim.

	Remoción de mucílago (%)		Tiempo de fermentación natural (h)
	Adición de enzimas (3 horas)	Fermentación natural	
Promedio	97,0	96,9	27,3
Mínimo	93,9	94,8	16,0
Máximo	98,9	98,7	48,0
Desv. Estándar	1,3	1,1	13,0

Tabla 8.

Valores promedio, mínimo y máximo para la remoción de mucílago y tiempo de fermentación natural, para los dos procesos evaluados.

ocho dientes de sección rectangular que al girar causan los esfuerzos cortantes suficientes para desprender el mucílago que recubre los granos de café. Para disminuir la energía necesaria en el eje de la máquina y lograr el flujo de mucílago a través de las perforaciones de la carcasa, por efecto de la fuerza centrífuga (Figura 26), en la parte superior de la máquina se adiciona una pequeña cantidad de agua. Cuando el café llega al punto más alto de la cámara se encuentra libre de mucílago e impurezas, listo para pasar a la etapa de secado.

Adicionalmente, para aprovechar el movimiento dentro de la máquina, algunos agitadores poseen dientes más largos con el fin de mantener limpias las perforaciones de la carcasa, por las fuerzas de arrastre que generan sobre la superficie interna de ésta, al girar a 870 revoluciones por minuto. Estos dedos le dan la característica autolimpiante al equipo Deslim.

El café procesado con el equipo Deslim, operado de la manera recomendada por Cenicafé, presenta una remoción de mucílago superior al 98% y un daño mecánico que varía entre 0,8 y 1,1% (Mejía *et al.*, 2007). Así mismo, el café resultante del proceso con desmucilaginado mecánico presenta calidad en taza igual a la que presenta el café procesado con fermentación natural. El trabajo realizado por Pabón *et al.* (2008, 2009), en el que dejaron café desmucilaginado mecánicamente de un día a otro, demostró que más del 70% de las tazas de café dieron calificación superior o igual a seis en la impresión global y que más del 50% de las tazas fueron calificadas con calidad superior.



Figura 26.

Desmucilagador Deslim en funcionamiento.

De acuerdo a un proceso de escalonamiento hacia arriba y hacia abajo, desarrollado por Oliveros y Guansekarán (1995), a partir del modelo con capacidad para 300 kg de café cereza por hora, se determinaron las dimensiones de los modelos de mayor y menor capacidad. Es así como

se llegó con gran exactitud a los modelos para procesar 100, 600, 1.200 y 2.500 kg.h⁻¹ de café en cereza, obteniendo los mismos resultados de consumo específico de agua, remoción de mucílago, calidad, daño mecánico y requerimiento de potencia.

Tecnología Becolsub

El desarrollo de la tecnología para el desmucilaginado mecánico con muy poca agua dio origen a la tecnología Becolsub (Roa *et al.*, 1997; Oliveros *et al.*, 1998; Roa *et al.*, 1999), la cual consiste en un proceso en el que se integran el despulpado del café sin agua, la remoción mecánica del mucílago del café en un desmucilagador Deslim y el transporte y mezcla de la pulpa y el mucílago en un transportador de tornillo sinfín (Sanz, 1995). La alta concentración de mucílago y la viscosidad de la mezcla mucílago-agua, permiten que durante el transporte en el tornillo sinfín se promueva una retención del fluido superior al 50%, lo que hace posible mayor control de la contaminación generada en el proceso con Becolsub. El valor alcanzado, de alrededor del 20%, sumado al control obtenido en el despulpado sin agua (72%), permiten controlar más del 90% de la contaminación potencial obtenida con beneficio húmedo de café (Roa *et al.*, 1999).

La tecnología Becolsub (Figura 27) se ofreció en módulos con las diferentes capacidades de los equipos Deslim (100, 300, 600, 1.200 y 2.500 kg.h⁻¹ de café en cereza), en principio con la opción de elegir el uso o no de la zaranda. Sin embargo, por los menores costos y por la posibilidad de volver aparentemente buenos a granos de café guayaba y media cara, los caficultores optaron por la opción sin zaranda, lo que podría tener poco efecto sobre la calidad física de los granos, pero sí un efecto adverso



Figura 27.

Módulo Becolsub con capacidad para 300 kg.h⁻¹ de café en cereza.

sobre la calidad en taza, especialmente si son altos los porcentajes de estos granos, como es característico de las recolecciones de principio y final de cosecha. Dada la afectación sobre la calidad en taza de esta aparente recuperación de granos defectuosos, la recomendación actual es utilizar clasificación por tamaño en zarandas, antes de pasar al desmucilagador mecánico.

Según Sanz *et al.* (2011), hay cerca de 15.000 unidades de Becolsub de diferentes capacidades, utilizadas por más del 80% de los potenciales usuarios, con las que se procesa aproximadamente la mitad del café de Colombia, lo que convierte a esta tecnología en un ejemplo de adopción. Tomando como base una producción anual de 10 millones de sacos, los equipos mencionados evitan que cada año más de 400.000 m³ de mucílago vayan a las corrientes naturales de agua.

Control flujos en la tecnología Becolsub. El desempeño ecológico de la tecnología Becolsub observado en las condiciones controladas de Cenicafé, no se presenta en las fincas. Salazar (2005), en una muestra de 203 caficultores ubicados en los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda, Antioquia, Cauca, Santander, Huila y Valle del Cauca, encontró que el 32% de ellos usa módulo Becolsub, de los cuales el 20% utiliza menos de 1,0 L.kg⁻¹ de c.p.s., el 26% no sabe cuánto es el consumo específico de agua en su beneficiadero, el 32% utiliza entre 1,0 y 5,0 L.kg⁻¹ de c.p.s. y el 12% utiliza más de 5,0 L.kg⁻¹ de c.p.s.

Las diferencias entre lo recomendado y lo práctico, relacionadas con el consumo específico de agua, pueden atribuirse a que los fabricantes de los equipos Becolsub no ofrecen algún sistema de regulación de



Figura 28.

Máquina despulpadora tradicional con dosificador de tornillo sinfín.

caudal de agua, a máquinas despulpadoras calibradas con una capacidad diferente a la nominal del módulo, a diferencias de presión en la red de suministro de agua, o a que el control del agua se deja principalmente a operarios que abren a voluntad la válvula que regula el agua en el desmucilagador.

Para evitar estos problemas Sanz *et al.* (2011) propusieron un sistema para dosificar el flujo de café en cereza en la despulpadora y otro sistema para el control del flujo de agua al desmucilagador mecánico. El primero consistió en cambiar el método de dosificación tradicional utilizado en las máquinas despulpadoras, por un sistema de mayor

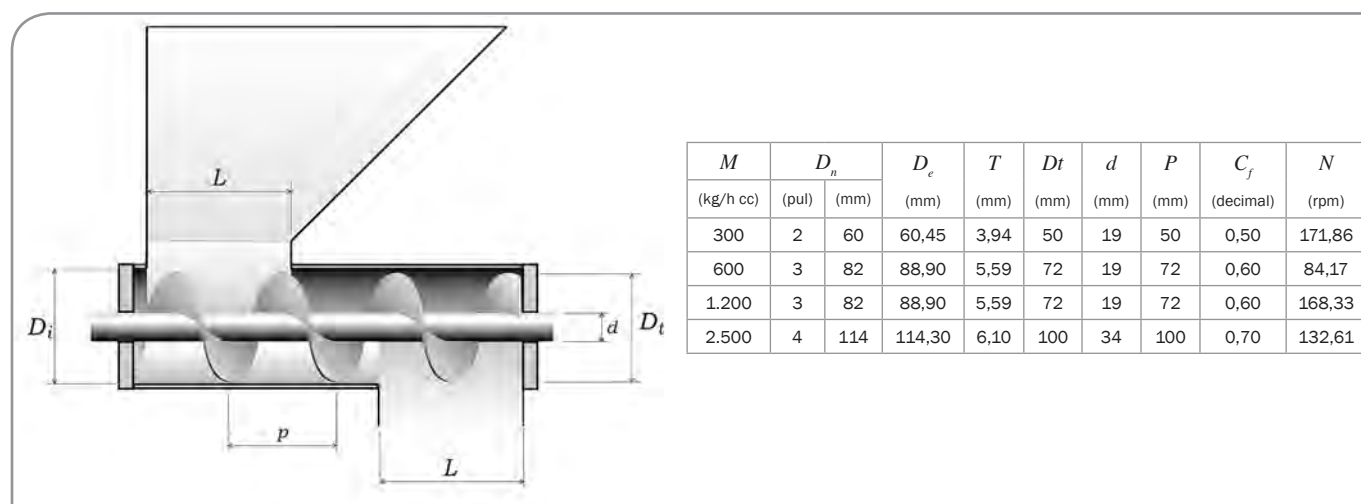


Figura 29.

Dimensiones principales para la dosificación de café en cereza con tornillo sinfín.



Figura 30.

Sistema de control de flujo de agua con motobomba y control de nivel.

exactitud y precisión como es un alimentador de tornillo sinfín (Figura 28).

En la Figura 29 se presentan las dimensiones principales del tornillo sinfín para obtener las capacidades principales requeridas en los módulos Becolsub.

Para controlar el flujo de agua se diseñó un sistema con una pequeña motobomba centrífuga y un control de nivel, de tal manera que se suministre siempre la misma cantidad de agua sin la necesidad de la intervención del operario (Figura 30).

Con el uso de los dos sistemas se logró un consumo específico de agua de $0,75 \text{ L.kg}^{-1}$ de café pergamino seco y una remoción de más del 98% del mucílago, con las mismas características de calidad del producto.

Otros desmucilaginosos mecánicos. La industria nacional ha hecho también aportes en el desarrollo de máquinas para remover el mucílago del café. Una de ellas es el desmucilaginoso mecánico de la empresa Penagos Hermanos y Cía. Ltda., quienes desarrollaron un equipo de flujo ascendente con agitadores con dedos de sección circular y canasta de varillas longitudinales, denominado Delva, el cual también es de varias capacidades. Uno de estos equipos fue evaluado en Cenicafé siguiendo las recomendaciones del fabricante y se obtuvo un consumo específico de agua promedio de $1,5 \text{ L.kg}^{-1}$ de café pergamino seco, con el que se logró una retención de líquidos en la pulpa muy pobre, la cual es perjudicial para los objetivos ecológicos,

pues los líquidos que drenan no solamente contienen sus materiales contaminantes propios sino también los materiales contaminantes de la pulpa.

Otra empresa nacional que realizó un desarrollo similar, es la empresa JM Estrada, que diseñó el desmucilaginoso mecánico de rotor varillas, argumentando menor requerimiento de potencia y menor daño mecánico sobre el café. Mejía *et al.* (2007) evaluaron el desempeño técnico y ambiental de uno de estos equipos, comparado con un módulo Becolsub de capacidad similar. En cuanto al desempeño técnico, el equipo con rotor de varillas presentó una remoción de mucílago entre 79,2% y 82,4%, un daño mecánico sobre el producto entre 0,3% y 0,4% y un requerimiento de potencia entre 2,5 y 2,7 kW. La remoción de mucílago es muy baja comparada con el 98% de remoción en el desmucilaginoso Deslim, lo que hace necesario una remoción de mucílago posterior con agua. Si bien el daño mecánico obtenido con el equipo con rotor de varillas fue la mitad del obtenido con el desmucilaginoso Deslim, los dos daños causados al producto se encuentran en límites en los cuales no se causa perjuicio económico al caficultor. Además, cabe anotar que el requerimiento de potencia es igual para ambos equipos.

El consumo específico de agua con el desmucilaginoso con rotor de varillas es de $3,32 \text{ L.kg}^{-1}$ de café pergamino seco, incluyendo los enjuagues adicionales para remover el mucílago que no remueve el equipo. Este valor está muy por encima del consumo específico de agua que se obtiene con el uso del módulo Becolsub, el cual es menor a $1,0 \text{ L.kg}^{-1}$ de café pergamino seco.

Lavado de café

Una vez degradado el mucílago por fermentación natural o por la adición de enzimas, se procede con el lavado, el cual tiene como finalidad principal remover definitivamente el mucílago de los granos de café, con el fin de evitar manchas sobre el pergamino o la aparición posterior de sabores defectuosos. Sin embargo, dada la necesidad del uso de agua en esta etapa, muchos de los dispositivos usados para lavado son usados simultáneamente para la clasificación del café por densidad.

En el lavado interviene el agua necesariamente como insumo al proceso, por lo que se deben considerar dos aspectos fundamentales para que la operación sea eficaz: La calidad y la cantidad. En cuanto al primer aspecto se recomienda utilizar agua limpia, no recirculada, de modo que no genere contaminación cruzada al café y no altere su inocuidad final.

La cantidad del agua que se utilice en el proceso depende de la forma como se realice la operación. Existen diferentes tecnologías para realizarla, las cuales difieren principalmente

en la infraestructura disponible y en el efecto sobre los volúmenes de agua que se usan en el proceso.

En Colombia se utilizan las siguientes tecnologías para lavar y clasificar café en proceso con fermentación natural:

Agitación manual en el tanque. El menor volumen específico de agua ($4,17 \text{ L.kg}^{-1}$ de c.p.s.) se logra utilizando un tanque con bordes redondeados y una paleta, denominado tanque tina, como se muestra en la Figura 31 (Zambrano, 1993; Zambrano e Isaza, 1994). Se emplean cuatro enjuagues, cubriendo totalmente la masa con agua limpia en cada uno, y retirando los granos que

flotan, de inferior calidad. Si se disponen adecuadamente estas mieles y se despulpa el café sin utilizar agua se logra controlar el 85% de la contaminación potencial. En Cenicafé se ha observado rendimiento de 270 kg.h^{-1} de café lavado y aguas residuales de lavado con carga de contaminación de 25.946 mg.L^{-1} .

Sanz *et al.* (2007) desarrollaron una paleta para agitar la masa de café durante el lavado del café en el tanque, con la cual se logra reducir la energía utilizada en 41,6% y 29,0% en el primer y segundo enjuagues, respectivamente, con relación a la paleta diseñada por Zambrano (Zambrano, 1993).



Figura 31.

a. Tanque con aristas redondeadas, “tanque tina”; b. Paleta para agitar la masa de café durante el lavado.



Figura 32.

Canal de correteo utilizado para el lavado y clasificación del café. a. Café transportado con agua desde el tanque de fermentación; b. Agitación manual del café.

Canal de correteo. Dispositivo hidráulico, generalmente de sección transversal rectangular y ligera pendiente (Figura 32), empleado para lavar, limpiar y clasificar el café (Roa *et al.*, 1999). El café se deposita inicialmente en un tramo del canal, se cubre con una lámina de agua de 2 a 3 cm y se agita con una paleta; al agitar la masa de café y el agua se generan fuertes corrientes que arrastran los granos de mayor densidad en el fondo del canal y los de menor densidad y gran parte de la pulpa en la superficie. El agua utilizada generalmente no se recircula y el volumen específico es mayor que 20 L.kg⁻¹ de c.p.s. En el canal de correteo, en promedio se logra lavar y clasificar 1.500 kg.h⁻¹ de café, utilizando de 20 a 25 m³ de agua (28 a 35 mg.L⁻¹ de c.p.s.) con aguas residuales con carga de 3.940 mg.L⁻¹ de DQO.

Con motobomba sumergible. Se lava el café pasándolo de un tanque a otro, generalmente cuatro veces, utilizando una motobomba sumergible (Figura 33), con una relación café/agua de 2/3 en masa. El agua se recircula solamente en el tercer enjuague. Se estima un volumen específico de 9,0 mg.L⁻¹ de c.p.s. y carga contaminante de 12.692 L.kg⁻¹ de DQO por cada kilogramo de café pergamino seco. Como ventajas de esta tecnología de lavado se tiene la alta capacidad, se puede realizar la remoción de material flotante (Café de mala calidad), remoción de mucílago no desprendido durante el proceso de fermentación y posibilidad de transportar el café a los secadores utilizando la bomba sumergible. Como desventajas, el costo de la bomba, el relativo alto consumo específico de agua y el costo de la planta para el tratamiento de las aguas utilizadas.

Tecnología ECOMILL®

Esta tecnología fue desarrollada en Cenicafé (Oliveros *et al.*, 2011; Oliveros, 2012) para remover el mucílago degradado en proceso con fermentación natural y con empleo de enzimas pectinolíticas (Peñuela *et al.*, 2011), con bajo impacto ambiental. En la Figura 34 se presentan tres modelos desarrollados, con capacidad para 500, 1.500 y 3.000 kg.h⁻¹ de café lavado.

La tecnología ECOMILL® consta de:

- Un lavador con flujo de café en la dirección vertical ascendente y descarga radial de las mieles a través de las perforaciones de la canasta. El lavador se diseñó a partir de los equipos Deslim desarrollados en Cenicafé (Roa *et al.*, 1999), con modificaciones en el rotor para permitir un mayor flujo de café lavado y disminuir el daño mecánico causado a los granos, con óptimo aprovechamiento del agua y de la potencia empleadas. El caudal de agua requerido por el lavador se regula por medio de válvulas. El modelo ECOMILL® 500 cuenta con una entrada de agua en la parte superior del lavador. El modelo ECOMILL® 1.500 cuenta con dos entradas de agua, en la parte media y superior, y el ECOMILL® 3.000 dispone de tres entradas de agua, una en cada tercio del lavador.
- Un tanque de sección cilíndrica con descarga en forma de cono truncado invertido, con ángulo de 60° respecto a la horizontal y descarga con diámetro de 22cm, para permitir el flujo del café en punto de lavado por gravedad. El tanque se fabrica preferiblemente en



Figura 33.

Lavado de café utilizando bomba sumergible. **a.** Tipo de bomba empleada; **b.** Descarga del café lavado.



Figura 34.

Tecnología ECOMILL® desarrollada en Cenicafé (Oliveros *et al.*, 2011; Oliveros, 2012).

- a. ECOMILL® 500;
- b. ECOMILL® 1.500;
- c. ECOMILL® 3.000.

lámina de acero inoxidable calibre 18, referencia 430, o en otros materiales como plástico, para disminuir costos, sin afectar su resistencia mecánica.

- Un alimentador de café al lavador, constituido por un tornillo sinfín con carcasa desmontable, para permitir la limpieza al finalizar el lavado del café. En la descarga de café al lavador se colocó un ducto de igual diámetro que la carcasa en forma de T invertida, para disminuir los daños causados a los granos por el rotor del lavador.

La información sobre el desempeño de los equipos ECOMILL® se presenta en la Tabla 9.

La remoción del mucílago degradado presente en el café al inicio del lavado con los equipos es superior al 95%. Datos obtenidos por Tibaduiza (2011) indican que durante la fermentación se presenta drenaje de mucílago que varía entre 20% y 33% del contenido total, por lo que la remoción global con el lavador es superior al 99%.

El consumo específico de agua varía entre 0,34 y 0,50 L.kg⁻¹ de c.p.s., el cual como se observa en la Tabla 10, es notoriamente inferior al consumo que se obtiene con las otras tecnologías utilizadas en Colombia para retirar el mucílago. Debido a lo anterior la carga orgánica de las mieles producidas también aumenta, por lo cual se deben manejar o tratar para evitar la contaminación de las fuentes de agua.

Rendimiento (kg.h ⁻¹ de café lavado)	Remoción de mucílago (%)	Agua utilizada (L.kg ⁻¹ de c.p.s.)	Daño mecánico (%)	Potencia (W)
500	97,1	0,34	0,31	1.007,10
1.500	95,1	0,42	0,30	2.417,00
3.000	96,5	0,50	0,40	2.685,60

Tabla 9.

Desempeño de los equipos ECOMILL® 500, 1.500 y 3.000 en lavado del café en proceso con fermentación natural.

Tecnología	Consumo específico de agua (L.kg ⁻¹ de c.p.s.)	Contaminación (DQO - mg.L ⁻¹)
Canal de correteo	20,0	5.867
Bomba	9,0	12.692
Tanque Tina	4,2	25.946
BECOLSUB	1,0	82.474
ECOMILL®	0,3	152.866

Tabla 10.

Consumo específico de agua y DQO en las tecnologías utilizadas para el lavado del café en Colombia.

El daño mecánico causado a los granos de café con la tecnología ECOMILL®, varía entre 0,31% y 0,40%, y es inferior al observado con el Becolsub (Roa *et al.*, 1999).

Para el manejo de las mieles generadas con la tecnología ECOMILL® se pueden utilizar los secadores solares tipo túnel, de bajo costo y fácil construcción, en los que se pueden depositar 12 L de mieles por cada metro cuadrado de piso (Figura 35). En las condiciones ambientales de Chinchiná (Caldas), ésta se puede secar por efecto de las energías del sol (Directa y difusa) y del aire, hasta un contenido de humedad entre el 10% y 12%, en un período entre 5 y 9 días. En cada metro cuadrado (m²) de piso de secador se pueden depositar 12 L de mieles, la cual puede secarse hasta contenido de humedad del 10% al 12%, en 5 a 9 días. Para

agilizar el proceso de secado, deben revolverse diariamente las mieles, mínimo cuatro veces.

Como ejemplo de aplicación de esta alternativa se consideró una finca con producción anual de 20.000 kg de c.p.s. (1.600 @.año⁻¹ de c.p.s.) que dispone de un equipo ECOMILL® 500. En el día pico, asumiéndolo igual al 2% de la producción anual, se obtendrían aproximadamente 800 kg de café, generando 457 L de mieles (Mucilago y agua adicionada durante el lavado). Para el secado de estas mieles se necesitan 38 m² de área de secador. Asumiendo una semana con 4 días de igual flujo de café, se necesitarían 153 m², que tendrían un costo de \$ 3.000.000. Utilizando esta alternativa se lograría controlar el 100% de la contaminación generada con ECOMILL®.



Figura 35.

Secadores solar tipo túnel utilizado para secar mieles producidas con la tecnología ECOMILL®. **a.** Vista exterior; **b.** Interior.



Figura 36.

Mieles de café obtenidas con ECOMILL®. **a.** Secas ; **b.** Molidas.

Característica	Valor
Humedad, %	6,6
pH	4,9
Densidad real, g.ml ⁻¹	0,65
Conductividad eléctrica, mS.cm ⁻¹	6,68
Cenizas, %	8,7
Pérdidas por volatilización, %	91,3
Retención de agua, %	186,8
N.total, %	2,55
C.O.ox, %	33,1
P, %	0,29
K, %	4,52
Ca, %	1,02
Mg, %	0,33
Fe, mg.kg ⁻¹	971
Mn, mg.kg ⁻¹	89
Zn, mg.kg ⁻¹	142
Cu, mg.kg ⁻¹	46

Tabla 11.

Caracterización química de mucílago seco del café.

Por cada tonelada de café en cereza procesado con la tecnología ECOMILL® se obtienen aproximadamente 225 L de mieles, que al secarlas como las que se observan en la Figura 36, dentro del rango entre el 10% y 12%, pesan aproximadamente 25 kg. En la Tabla 11 se presenta información de la composición química del mucílago de café con 6,6% de humedad. Por su aporte de nutrientes, este material puede ser utilizado como complemento en la fertilización orgánica.

Otra alternativa para el manejo de la mieles generadas con ECOMILL® es mezclarlas con la pulpa, tal como es recomendado con la tecnología Becolsub. Las mieles obtenidas con ECOMILL® deben almacenarse en un tanque y aplicarlas a la pulpa fresca obtenida el día siguiente, utilizando una bomba de rotor abierto de baja potencia

(<¼ hp). En observaciones realizadas en Cenicafé aplicando a la pulpa mieles obtenidas con ECOMILL®, con volumen específico de agua de 0,3 L.kg⁻¹ de c.p.s., se ha observado retención de 90% y control de la contaminación del 100% (Tibaduiza, 2011), aplicando a la pulpa seca el bajo volumen de lixiviados producidos.

A partir de los valores de potencia presentados en la Tabla 12, se calculó el consumo de energía eléctrica (kW.h⁻¹) y los costos correspondientes para la obtención de una tonelada de café seco, con los equipos ECOMILL® y la tecnología Becolsub, que se presentan en la Tabla 12. Se observa notoria reducción en el costo con la tecnología ECOMILL®. Con el equipo ECOMILL® 3.000 se aprovecha más eficientemente la energía entregada por el motor para lavar café y se obtiene el menor costo de energía eléctrica.

Clasificación del café

Anteriormente se describieron algunos equipos que son usados simultáneamente para el lavado y clasificación. En este capítulo se describirán los equipos que se usan exclusivamente para la clasificación del café lavado.

Canal semisumergido. El café previamente lavado se transporta por medio de una bomba sumergible hasta un canal de 0,2 m de ancho con longitud de 2 y 3 m, con ranuras en el fondo, separadas 50 cm. El principio de funcionamiento es similar al del canal de correteo. Los granos de mayor densidad, generalmente de mejor calidad, que se sedimentan en los primeros tramos del canal, son arrastrados por el flujo de agua y separados a través de las aberturas en el fondo del canal. Los granos de menor densidad y gran parte de la pulpa son arrastrados por las corrientes de agua en la superficie del canal. Con las motobombas sumergibles utilizadas se logra procesar hasta 7.000 kg.h⁻¹ de c.p.s. con volumen específico de agua de 6,4 L.kg⁻¹ de c.p.s., sin recircular, y aguas residuales, con carga de 17.505 L.kg⁻¹ de DQO (15). La Figura 37 muestra algunos detalles de una canal semisumergido comercial.

Equipo	Capacidad (kg.h ⁻¹ de café lavado)	Potencia (W)	Consumo Energía (kWh.t ⁻¹ de c.p.s.)
ECOMILL® 500	500	1.007,1	3,82
ECOMILL® 1.500	1.500	2.417,0	3,06
ECOMILL® 3.000	3.000	2.685,6	1,70
Becolsub 300	123	1.342,8	20,72
Becolsub 600	246	2.238,0	17,26
Becolsub 1.000	410	3.580,8	16,57
Becolsub 2.500	1.025	4.936,8	9,14

Tabla 12.

Consumo de energía eléctrica (kW.h/t c.p.s.) en la remoción del mucílago con fermentación natural y lavado con ECOMILL® y mecánicamente con Becolsub, de acuerdo a la capacidad y potencia de los equipos.



Figura 37.

Canal semisumergido. **a.** Vista general; **b.** Vista interna.

Hidrociclón. Una vez lavado el café, se requiere retirar granos de inferior calidad (Vanos, brocados, entre otros) e impurezas, principalmente pulpa, antes de iniciar el proceso de secado. El hidrociclón es un recipiente de sección circular con fondo cónico, al cual llega café transportado con agua, utilizando una bomba sumergible (Figura 38). La masa transportada es sometida en el interior del tanque a fuerzas que causan que los granos de mejor calidad sean descargados en la parte inferior mientras que los materiales de menor densidad (Pulpa y granos, principalmente) son levantados y descargados en la parte superior. En investigación realizada en Cenicafé (Aristizábal *et al.*, 1997) se observó en promedio separación de 71,6% de las impurezas y 24,8% de granos brocados, con consumo específico de agua de $1,9 \text{ L.kg}^{-1}$ de c.p.s., con recirculación y capacidad de 1.640 kg.h^{-1} de café lavado. Detalles para la construcción, instalación y operación de hidrociclones para diferentes capacidades de procesamiento son presentados en el Avance Técnico de Cenicafé No. 241.

Beneficio de café y las Buenas Prácticas de Manufactura

Las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) son los principios básicos y prácticas generales de higiene en la manipulación, preparación, elaboración, envasado, almacenamiento, transporte y distribución de alimentos para consumo humano, con el objeto de garantizar que los productos se fabriquen en condiciones sanitarias adecuadas y se disminuyan los riesgos inherentes a la producción (Ministerio de Salud y Protección Social, 1997). Si bien el café no es un alimento, el proceso de beneficio de café se considera regido por el decreto 3075 de 1997, por ser el proceso para obtener un producto para el consumo humano. Las BPM son normas dirigidas



Figura 38.

Hidrociclón para la clasificación de café lavado.

a sectores específicos relacionados todos con productos que puedan incidir directamente sobre la salud de las personas, existiendo así las BPM farmacéuticas, las de alimentos, las de cosméticos, las de productos naturales, las de insumos médico quirúrgicos, entre otros.

Al seguir Buenas Prácticas de Manufactura en el proceso de beneficio de café se garantiza además de un producto para consumo humano higiénico y de buena calidad, reducciones en el consumo de agua, en la energía eléctrica y en el impacto ambiental. Para tal fin debe considerarse el proceso a utilizar, la infraestructura donde se lleva a cabo el proceso, las máquinas y equipos en los que se lleva a

cabo el proceso, y la calidad y estado de la materia prima a transformar.

Proceso. Las principales etapas del proceso de beneficio húmedo son recibo, clasificación por densidad del café en cereza, despulpado, clasificación por tamaño del café despulpado, remoción de mucílago, lavado, clasificación por densidad del café lavado y, por último, secado. La Figura 39 muestra un diagrama de flujo de un proceso de beneficio por vía húmeda, en el cual se utilizan tres clasificaciones para obtener un café de excelente calidad.

Así mismo, en el proceso de beneficio húmedo debe considerarse el proceso del café rechazado en cada una de las clasificaciones. Se debe tener en cuenta que este café no es de buena calidad y por tal razón debe mantenerse al margen del proceso principal. Por otro lado, los subproductos pulpa y mucílago deben ser manejados de manera que ocasionen la menor contaminación posible, de acuerdo a las recomendaciones mostradas con anterioridad en este manual.

El personal que haga uso de los equipos para procesamiento de café debe estar capacitado y contar con las competencias necesarias para desarrollar la puesta en marcha de los equipos, limpieza, mantenimiento preventivo, calibración, verificación y operación.

Infraestructura. Para asegurar que el producto que se está obteniendo cumple con los estándares de higiene y

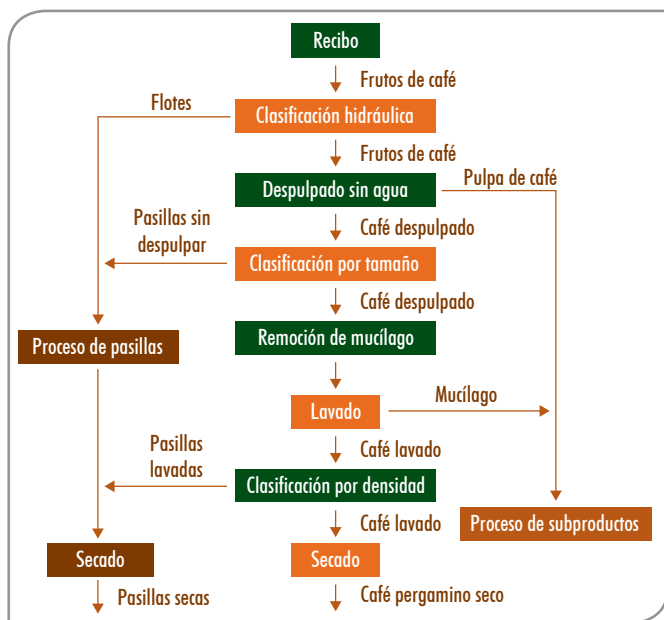


Figura 39.

Diagrama de flujo del proceso de beneficio de café por vía húmeda con tres clasificaciones.

calidad, se recomienda seguir algunos lineamientos en la construcción que alberga las máquinas y equipos:

El diseño del beneficiadero debe estar acorde con la producción que se espera procesar (Puerta, 2006); si el sistema está sobredimensionado se pierde dinero en una inversión inicial mayor a la requerida; si está subdimensionado, se incurriría en prácticas inapropiadas para suplir las necesidades de procesamiento de café. En el diseño se deben tener en cuenta aspectos como la ventilación, iluminación, accesos adecuados a las labores que se desarrollan en él, drenajes, seguridad para los operarios, seguridad para evitar hurtos, señalización, puntos de suministro de agua limpia, tomas eléctricos adecuados a los requerimientos, distribución adecuada para realizar el proceso de manera eficiente y evitar contaminaciones cruzadas.

Antes de la época de cosecha se recomienda adelantar una verificación, limpieza y mantenimiento a la infraestructura, realizando las actividades listadas a continuación, al menos cada 6 meses:

- Verificar que todas las áreas del beneficiadero se encuentren libres de suciedad con protecciones para lluvia, polvo, animales, plagas y sustancias contaminantes.
- Verificar la disponibilidad correcta de acometidas de agua y energía, que no existan fugas de agua y las conexiones eléctricas estén correctamente aisladas y protegidas de los sistemas de transmisión mecánicos y tránsito de personas.
- Verificar que los desagües y tuberías de transporte de café se encuentren limpios y sin obstrucciones.
- Verificar la disponibilidad correcta del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales; éste deberá recibir las aguas generadas en el proceso de beneficio húmedo con remoción de mucílago por fermentación natural en tanques.
- Verificar la disponibilidad de fosas para la descomposición de la pulpa.
- Verificar que las instalaciones se encuentren sin residuos de café, mucílago y pulpa de anteriores procesos y en condiciones aceptables.
- En caso que se encuentren defectos como perforaciones, fisuras o hendiduras que favorezcan la proliferación de hongos sobre el café a procesar se recomienda realizar acciones correctivas para mejorar las condiciones de infraestructura.

Máquinas y equipos. Antes y durante de la época de cosecha es necesario realizar una verificación y mantenimiento de las máquinas y equipos. Cada una de las máquinas tienen sistemas de suministro de energía mecánica, ya sea por sistemas de transmisión mecánico o motores eléctricos directos, los cuales deben tener el sistema de protección

eléctrico, conforme a las especificaciones que el fabricante muestre en la placa de cada equipo.

Acciones de mantenimiento, calibración y verificación deben realizarse de forma periódica sobre las máquinas y equipos. Se recomienda realizar el mantenimiento preventivo de forma semestral, antes de la época de cosecha, así como las actividades de calibración y verificación de forma semanal, durante la época de cosecha.

Separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín.

Por medio de este equipo se realiza una primera selección del café que llega a la finca, con esta máquina se separan frutos de café de inferior calidad o impurezas livianas por medio de una tolva de precipitación y un tornillo sinfín que se encarga de transportar el café de buena calidad a la siguiente máquina (la despulpadora). Para verificar el funcionamiento de este equipo en diferentes capacidades es necesario referenciar el Avance Técnico de Cenicafe No. 360 (Oliveros *et al.*, 2007).

Despulpadora. Esta máquina se encarga de desprender la pulpa de las semillas de café con mucílago adherido. Para el correcto mantenimiento, calibración, verificación y uso de esta máquina se deben referenciar los Avances Técnicos de Cenicafe No. 164 y 294 (Álvarez, 1991; Oliveros *et al.*, 2001). Para el procesamiento de café comercial las revoluciones del cilindro horizontal de la despulpadora no deben superar las 180 r.min⁻¹. Verifique que los sistemas de transmisión estén en correcto funcionamiento, esto garantiza un correcto flujo de café en la despulpadora.

Es necesario determinar el rendimiento de la despulpadora, midiendo, en funcionamiento continuo, la cantidad de café cereza despulpado entregado por unidad de tiempo y compararlo con el que debería entregar según información del fabricante.

Zaranda. Esta máquina realiza una clasificación del material despulpado y puede seleccionar frutos que no fueron despulpados, pulpa, granos media cara e impurezas, este material debe ser depositado en un recipiente independiente del café que fue seleccionado como de buena calidad. En esta máquina se debe verificar continuamente el tipo de material que clasifica como de mala calidad y el tipo de material que clasifica de buena calidad, con el fin de ajustar la velocidad de giro y las dimensiones de las aberturas, si es necesario.

Desmucilagador mecánico – Deslim. En esta máquina ingresa el café clasificado por la zaranda como de buena calidad. Está conformado por un rotor que gira a 870 r.min⁻¹, un conjunto de agitadores que se encargan de generar esfuerzos cortantes sobre los granos de café despulpados. Las demás piezas de esta máquina deben encontrarse en buenas condiciones, para esto se recomienda referenciar el Avance Técnico de Cenicafe No. 238 (Roa *et al.*, 1997).

En esta máquina se debe garantizar el caudal de agua que se presenta en la Tabla 13, conforme se muestra en el Avance Técnico de Cenicafe No. 405 (Sanz *et al.*, 2011), para cada modelo. El flujo de agua debe ingresar al desmucilagador una vez la masa de café ocupe la mitad del mismo.

Limpieza de las máquinas. Todas las máquinas deben permanecer limpias antes, durante y después de la cosecha. Una vez utilizadas, cada una de las máquinas debe ser limpiada como se explica al final de la descripción del proceso.

Todas las máquinas deben contar con la respectiva protección mecánica y eléctrica.

Materia prima. Antes de realizar el proceso de beneficio, es necesario considerar la variedad y procedencia del lote de café a procesar, registrarlo para posteriores manejos administrativos y con fines de trazabilidad.

Café en cereza. Realizar una caracterización de la masa de café cosechado que llega al beneficiadero. Se procede a tomar una muestra compuesta de 1 kg de café cereza, se separan los frutos por estados de maduración y, posteriormente, se pesan los frutos en cada estado. Con esto se podría generar una acción correctiva o preventiva en el campo, si exceden los límites permitidos.

Café en cereza clasificado. Materia prima que se clasifica por densidad en el separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín; el café de buena calidad se precipita y luego es depositado en la despulpadora, la materia prima de inferior calidad, presente en la superficie de la tolva, debe ser procesada de forma independiente como café pasilla o de mala calidad, se puede realizar un proceso aparte con tanques de

Capacidad Becolsub (kg.h ⁻¹ de café en cereza)	Caudal de agua (L.min ⁻¹)	
	Límite inferior	Límite superior
300	0,70	1,00
600	1,40	2,00
1.200	2,80	4,00
2.500	5,83	8,33

Tabla 13.

Flujos de agua recomendados en los desmucilagadores mecánicos Deslim.

Tabla 14.

Rangos establecidos para la evaluación de muestras de café despulpado.

Característica	Porcentaje
Pulpa en el café despulpado	<2,0%
Granos sin despulpar	<1,0%
Granos mordidos	<0,5%
Granos trillados	<0,5%

fermentación o tener un montaje de maquinaria similar sólo para este tipo de materia prima.

Café despulpado. Café al cual se le ha retirado la pulpa. En esta parte del proceso se debe, al menos, cada 8 días realizar un muestreo de los frutos despulpados con el fin de determinar si existe algún problema en este proceso. Para esta medición se deben tomar 300 g de café despulpado y determinar en esta muestra el porcentaje de café trillado, mordido, frutos sin despulpar y pulpa en la muestra; además, se debe tomar una muestra de 1 kg de pulpa y determinar el porcentaje de granos sanos que se encuentran en este material. En ambos casos, se deben verificar los rangos establecidos en la Norma ICONTEC 2090 (Tabla 14), y tomar las acciones correctivas necesarias.

Café despulpado clasificado. Esta es la materia prima que separa la zaranda, como frutos que no fueron despulpados, gran parte de la pulpa, granos media cara e impurezas; el manejo de este material es similar al del café cereza clasificado.

Café lavado. Café sin mucílago. Puede ser el café que se obtiene luego de aplicar los cuatro enjuagues o procesado con el desmucilagador Deslim, listo para ser llevado al secado. Se recomienda iniciar el proceso de secado lo más rápido posible, en caso de que la infraestructura no lo permita y el café lavado sea resultado del desmucilagado mecánico, éste debe ser llevado a un tanque de espera sin agua, por un tiempo máximo de 14 horas y luego realizar un enjuague antes de ser llevado al secado. Se referencia el Avance Técnico de Cenicafé No. 388 para este procedimiento.

Con relación a la materia prima procesada, es necesario llevar un historial de la cantidad de café procesado con los equipos de beneficio, llevando el registro en la bitácora de mantenimiento las horas de uso de los mismos.

Proceso - beneficio de café con desmucilagado mecánico

1. Recibo de los frutos de café cosechados
2. Caracterización de la masa de café cosechado

3. Depósito de la masa de café cosechada en la tolva de recibo.
4. El proceso a partir de este punto es ejecutado totalmente por el conjunto de máquinas ensambladas, sin embargo, el operario debe supervisar esta labor, verificando el correcto funcionamiento de las máquinas en cada fase del proceso listado a continuación:
 - a. Clasificación de los frutos de café en el separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín
 - b. Separación del material que flota en la superficie de la tolva del separador hidráulico. Esto lo puede realizar el sistema automáticamente, sin embargo, en caso de ser necesario el operario debe realizar esta labor con un recipiente perforado
 - c. Despulpado de café sin agua
 - d. Clasificación mediante zaranda del material despulpado
 - e. Ingreso del café despulpado de buena calidad al desmucilagador y limpiador
5. Secado del café lavado, lo más rápido posible

Proceso - beneficio de café con tanques de fermentación

1. Verificación de que las rejillas (Compuertas - tapones) de drenaje del tanque de fermentación, se encuentren abiertas antes de iniciar el proceso de despulpado
2. Recibo de los frutos de café cosechados
3. Caracterización de la masa de café
4. Depósito de la masa de café cosechada en la tolva de recibo
5. Clasificación de los frutos de café en el separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín
6. Separación del material que flota en la superficie de la tolva del separador hidráulico. Esto lo puede realizar el sistema automáticamente, sin embargo, en caso de ser necesario el operario debe realizar esta labor con un recipiente perforado
7. Despulpado de café sin agua
8. Clasificación mediante zaranda del material despulpado
9. Depósito del café despulpado en tanques de fermentación, controlando la degradación del mucílago y el punto de lavado con la metodología propuesta por Peñuela *et al.* (2010), Peñuela y Pabón (2011) y Peñuela *et al.* (2012)
10. Cerramiento de las compuertas (Tapones) de drenaje al finalizar el proceso de despulpado
11. Lavado del café según el método de los cuatro enjuagues (Zambrano, 1994). El agua que se utiliza

en este proceso debe ser llevada a un sistema de tratamiento de aguas residuales.

12. Secado del café lavado, lo más rápido posible

Proceso - beneficio de café con la tecnología ECOMILL®

1. Recibo de los frutos de café cosechados
2. Caracterización de la masa de café cosechado
3. Depósito de la masa de café cosechada en la tolva de recibo
4. El proceso a partir de este punto es ejecutado totalmente por el conjunto de máquinas ensambladas, sin embargo, el operario debe supervisar esta labor, verificando el correcto funcionamiento de las máquinas en cada fase del proceso listado a continuación:
 - a. Clasificación de los frutos de café en el separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín
 - b. Separación del material que flota en la superficie de la tolva del separador hidráulico. Esto lo puede realizar el sistema automáticamente, sin embargo, en caso de ser necesario el operario debe realizar esta labor con un recipiente perforado
 - c. Despulpado de café sin agua
 - d. Clasificación mediante zaranda del material despulpado
 - e. Depósito del café despulpado en tanques de fermentación, con el control de la degradación del mucílago y el punto de lavado con la metodología propuesta por Peñuela *et al.* (2010), Peñuela y Pabón (2011) y Peñuela *et al.* (2012)
 - f. Apertura de las compuertas (tapones) del tanque para descargar las mieles que drenan durante el proceso de fermentación
 - g. Lavado del café con ECOMILL®, verificando que el caudal de agua suministrado sea el requerido en cada modelo
 - h. Secado del café procesado, lo más rápido posible

Actividades posteriores al proceso de beneficio de café por cualquiera de los métodos descritos

1. Verificar que todas las máquinas se encuentren apagadas
2. Realizar un barrido sobre las máquinas, retirando los granos y pulpa adherida
3. Lavar los equipos utilizados para el proceso, teniendo en cuenta el uso eficiente del agua para tal fin
4. Verificar que no existan residuos de café en las máquinas utilizadas en el proceso de beneficio

5. El agua utilizada en el proceso de lavado debe ser conducida al sistema de tratamiento de aguas residuales
6. Verificar que todas las llaves de agua se encuentren debidamente cerradas
7. Verificar que todos los equipos se encuentren desconectados de la corriente eléctrica

Beneficiaderos comunitarios de café y centrales de beneficio. En los últimos años, en Colombia se ha venido incrementando la comercialización del café en diferentes estados, como café en cereza y, principalmente, café húmedo o lavado, para ser beneficiado total o parcialmente, en grandes beneficiaderos, en centrales de beneficio o en centrales de secado. En estos casos se utilizan las mismas tecnologías tradicionales de beneficio, con las mismas deficiencias observadas en los beneficiaderos de las grandes fincas, con el agravante de la pérdida de calidad y de peso seco del café húmedo por las demoras excesivas (hasta de una semana) a las que está sometido, antes de iniciarse el proceso del secado. Por tal motivo, es necesario proponer alternativas tecnológicas en el beneficio del café para mantener la calidad, disminuir los costos de beneficio, disminuir el consumo de agua y evitar su contaminación.

En la Disciplina de Ingeniería Agrícola de Cenicafé se han desarrollado tecnologías para hacer sostenible la actividad cafetera a través de maquinaria eficiente, eficaz y ecológica para el beneficio de café, la cual aplica para grandes y pequeños beneficiaderos.

Dentro de las ventajas que tienen las centrales de beneficio y beneficiaderos comunitarios se destaca que los caficultores deben preocuparse solamente por producir café en cereza de primera calidad, pues no tendrían que utilizar recursos adicionales como tiempo e infraestructura, entre otros, para realizar este tipo de labor; se tiene mayor control sobre todas las etapas del proceso, lo que resulta en una mejor consistencia del producto; se tiene mayor control sobre el impacto ambiental, ya que existen alternativas para el manejo ecológico de grandes volúmenes de subproductos, con la potencialidad que además puedan generar valor agregado; y mejor aprovechamiento de la economía de escala, debido a los menores costos fijos y variables que genera la adquisición y manejo de equipos de gran capacidad.

A pesar de las ventajas que traen consigo las centrales de beneficio y beneficiaderos comunitarios, también existen algunas desventajas que pueden ser determinantes en el éxito o fracaso de cualquier proyecto. Las más importantes son la mayor carga y volumen a transportar que cuando se vende café mojado o seco, y que no se dispone de mucho tiempo para transportar el café en cereza hasta las instalaciones de beneficio de café, dado que un retraso en el inicio del proceso tiene efecto directo y negativo sobre la calidad final del producto.

En particular, para resolver la mayoría de las deficiencias anotadas en los grandes beneficiaderos se construyó y puso en funcionamiento, en el año de 1996, con la colaboración del Comité de Cafeteros de Caldas y de la Cooperativa de Caficultores de Anserma, la Central de Beneficio Ecológico, ubicada en dicho municipio (Roa et al., 1999). La Figura 40 muestra algunos detalles externos de la construcción.

- Control del 92% de la contaminación de las aguas
- Introducción del canal semisumergido para la clasificación y limpieza del café en cereza, con recirculación del agua
- Introducción de un sistema rápido para determinar con exactitud la relación café cereza por café pergamino seco, con el fin de que los caficultores obtengan el precio justo por su producto

Los logros de dicha construcción fueron los siguientes:

- Eliminación del agua en el despulpado y en el transporte de la pulpa y del café despulpado
- Introducción de dos desmucilaginosos mecánicos Deslim 2.500, alimentados cada uno por dos despulpadoras de eje horizontal
- Introducción en gran escala de la mezcla del mucílago concentrado y la pulpa en tornillo sinfín
- Introducción del secador intermitente de flujos concurrentes, IFC, que seca el café con completa uniformidad, con mayor eficiencia térmica, mayor control de la operación y mínimos tiempos de carga y descarga
- Carácter completamente modular, que permite aumentar la capacidad de beneficio, sin incurrir en modificaciones onerosas
- Reducción del espacio físico hasta la tercera parte de los beneficiaderos tradicionales, reduciéndose el consumo del agua desde 40,0 L a menos de 1,0 L de agua por kilogramo de café pergamino seco

Esta Central ha sufrido algunas modificaciones y actualizaciones en la tecnología del proceso de beneficio húmedo y secado mecánico del café, y opera en condiciones normales cumpliendo con las normas vigentes de calidad y de manejo del medio ambiente, atendiendo la demanda de los caficultores de la región.

Con la misma filosofía de la Central de Beneficio de Anserma, actualmente se está construyendo la primera central de beneficio con la tecnología ECOMILL® en el municipio de Belén de Umbría, Risaralda. La central está diseñada inicialmente para procesar la mitad del café que producen 97 familias cafeteras, que hacen parte de la Asociación de Cafeteros de la Cuchilla del San Juan, de ese municipio, quienes en total poseen un área sembrada de 500 ha. Con esta central se espera reducir la contaminación del agua, pagar el precio justo a los asociados, proporcionar una calidad consistente de café al tener un control adecuado de las operaciones que hacen parte del proceso y un modelo a replicar por el resto de la caficultura colombiana.



Figura 40.

Central de Beneficio Ecológico de Café en Anserma (Caldas).

Recomendaciones prácticas

- Utilice sistemas de transporte hacia el beneficiadero con bajos o nulos consumos de agua.
- Clasifique el café en cereza por densidad, antes de empezar el procesamiento. Use preferiblemente el separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín (SHTTS), porque además de remover los frutos menos densos, remueve las impurezas livianas y pesadas y permite dosificar el café que llega al desmucilagador, en las fincas que utilizan la tecnología Becolsub.
- En caso de no tener SHTTS utilice recirculación de agua para reducir el consumo de ésta.
- Despulte el café sin agua.
- Transporte el café de una etapa a otra, dentro del beneficiadero, en lo posible sin agua o utilizando recirculación de agua.
- Transporte la pulpa de café a los lugares de depósito sin utilizar agua.
- Utilice zaranda para la clasificación del café despulpado. Con esta práctica se remueven del proceso principal los frutos verdes, los frutos secos y trozos de pulpa.
- Cuando se usa la fermentación natural para la degradación del mucílago, se recomienda realizar el lavado una vez se alcance una degradación superior al 95%. Este punto puede determinarse de manera exacta y confiable con el sistema del recipiente perforado en forma de cono truncado.
- Cuando no se disponga de otra opción con menor consumo específico de agua, se recomienda lavar el café en los tanques de fermentación, preferiblemente con las aristas redondeadas (tanques tina), con cuatro enjuagues.
- Las enzimas pectinolíticas pueden ser usadas para acelerar el proceso de degradación de mucílago en un tiempo de 3 horas, sin afectar la calidad del café.
- Se recomienda usar la tecnología ECOMILL® con el fin de obtener un control del 100% de la contaminación, con aprovechamiento eficiente del agua y de la energía utilizada.
- Se recomienda, en donde sea posible, el uso de centrales de beneficio de café para obtener las ventajas económicas y ecológicas de este sistema de procesamiento.
- En el caso de disponer de desmucilagador mecánico se recomienda tener siempre calibrados los flujos de agua y café para obtener las ventajas ecológicas de la tecnología Becolsub, las cuales son reducción del consumo específico de agua a menos de 1,0 L por cada kilogramo de café pergamino seco producido y el control de más del 90% de la contaminación de las aguas.

Literatura citada

- ÁLVAREZ G., J. *Despulpado del café sin agua*. Chinchiná : CENICAFÉ, 1991. 6 p. (Avances Técnicos No. 164)
- ÁLVAREZ G., J. *Informe anual de actividades*. Chinchiná : CENICAFÉ, 1995. 14 p.
- MARÍN L., S.M.; ARCILA P., J.; MONTOYA R., E.C.; OLIVEROS T., C.E. *Cambios físicos y químicos durante la maduración del fruto de café (Coffea arabica L. var. Colombia)*. *Cenicafé* 54(3):208-225. 2003.
- MÁRQUEZ G., S.M. *Evaluación y optimización de la operación del tanque sifón para el clasificado del café cereza*. Medellín : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de agronomía, 1987. 117 p. Tesis: Ingeniero agrícola.
- MEJÍA G., C.A.; OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; MORENO C., E.L.; RODRÍGUEZ H., L.A. *Evaluación del desempeño técnico y ambiental de un desmucilagador de café con rotor de varillas*. *Cenicafé* 58(2):122-133. 2007.
- MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL. *Decreto 3075 de 1997*. Bogotá : El Ministerio, 1997. 32 p.
- MONTILLA P., J. *Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café*. Manizales : Universidad de Caldas. Facultad de ciencias agropecuarias, 2006. 107 p. Tesis: Ingeniera agrónoma.
- NARVÁEZ M., L.H. *Manejo de las mieles generadas en la tecnología Becolsub para la disminución del impacto ambiental generado por los lixiviados*. Pasto : Universidad de Nariño. Facultad de ciencias agrícolas, 2000. 104 p. Tesis: Ingeniero agrónomo.
- OLIVEROS T., C.E. *Determinación del consumo específico de agua para el lavado del café con tecnología Deslim, en proceso con fermentación natural*. p. 2-21. En: CENICAFÉ. *Informe anual de actividades 2012*. Chinchiná : CENICAFÉ, 2012. 34 p.
- OLIVEROS T., C.E.; GUNASEKARAN, S. *Predicción teórica del consumo de potencia y de la tasa promedia cortante aplicada en el desmucilagador mecánico de café*. *Cenicafé* 46(2):112-122. 1995.
- OLIVEROS T., C.E.; PABÓN U., J.P. *Separación de frutos de café verdes por medios mecánicos*. *Cenicafé* 61(3):262-271. 2010.
- OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; MONTOYA R., E.C.; MORENO C., E.L. *Dispositivo hidráulico de bajo impacto ambiental para la limpieza y clasificación del café en cereza*. *Cenicafé* 60(3):229-238. 2009.
- OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; MONTOYA R., E.C.; MORENO C., E.L. *Equipo para el lavado ecológico del café con mucílago degradado con fermentación natural*. *Revista de ingeniería Universidad de los Andes* 33(1):61-67. 2011.
- OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; RAMÍREZ G., C.A.; ÁLVAREZ H., J.R.; ROA M., G.; ÁLVAREZ G., J. *Desmucilagadores mecánicos de café*. Chinchiná : CENICAFÉ, 1995. 4 p. (Avances Técnicos No. 217).
- OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; RAMÍREZ G., C.A.; ÁLVAREZ G., J.; ÁLVAREZ H., J.R. *El Becolsub 300*. Chinchiná : CENICAFÉ, 1998. 8 p. (Avances Técnicos No. 253).
- OLIVEROS T., C.E. ÁLVAREZ G., J.; ÁLVAREZ M., F.; RAMÍREZ G., C.A.; ÁLVAREZ H., J.R. *El Becolsub 100: Beneficio ecológico para pequeños caficultores*. Chinchiná : CENICAFÉ, 1999. 4 p. (Avances Técnicos No. 261).
- OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; PEÑUELA M., A.E. *Secador solar de túnel para café pergamino*. Chinchiná : CENICAFÉ, 2006. 8 p. (Avances Técnicos No. 353).
- OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; PEÑUELA M., A.E. *Secador parabólico mejorado*. Chinchiná : CENICAFÉ, 2008. 8 p. (Avances Técnicos No. 376).
- PABÓN U., J.P.; SANZ U., J.R.; OLIVEROS T., C.E. *Efecto de dos prácticas empleadas con café desmucilagador mecánicamente en la calidad y el impacto ambiental*. *Cenicafé* 59(3):214-226. 2008.
- PABÓN U., J.P.; SANZ U., J.R.; OLIVEROS T., C.E. *Manejo del café desmucilagador mecánicamente*. Chinchiná : CENICAFÉ, 2009. 8 p. (Avances Técnicos No. 388).
- PARRA R., H.; ÁLVAREZ M., F.; ROA M., G. *Transporte de café cereza por cable aéreo de gravedad*. *Revista facultad nacional de agronomía Medellín* 42(2):31-57. 1989.
- PATIÑO T., A. *Evaluación de cafeductos*. Chinchiná : Comité Departamental de Cafeteros de Antioquia : CENICAFÉ, 1990. 64 p.
- PATIÑO V., F. *Diseño y construcción de un transportador mecánico de café cereza por cable aéreo*. Cali : Universidad del Valle, 1992. 326 p. Tesis: Ingeniero mecánico.

- PEÑUELA M., A.E. Estudio de la remoción del mucílago de café a través de fermentación natural. Manizales : Universidad de Manizales, 2010. 82 p. Tesis: Maestra en desarrollo sostenible y medio ambiente.
- PEÑUELA M., A.E.; OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R. Remoción del mucílago de café a través de fermentación natural. *Cenicafé* 61(2):159-173. 2010.
- PEÑUELA M., A.E.; PABÓN U., J.P.; SANZ U., J.R. Evaluación de métodos para identificar el punto de lavado del café en fermentación natural: Investigación participativa informe de resultados. Chinchiná : CENICAFÉ, 2010. 17 p.
- PEÑUELA M., A.E.; PABÓN U., J.P. Evaluación de una metodología para identificar el punto final de la fermentación del mucílago de café: Investigación participativa informe de resultados. Chinchiná : CENICAFÉ, 2012. 11 p.
- PEÑUELA M., A.E.; PABÓN U., J.P.; OLIVEROS T., C.E. Enzimas: Una alternativa para remover rápida y eficazmente el mucílago de café. Chinchiná : CENICAFÉ, 2011. 8 p. (Avances Técnicos No. 406).
- PEÑUELA M., A.E.; PABÓN U., J.P.; RODRÍGUEZ V., N.; OLIVEROS T., C.E. Evaluación de una enzima pectinolítica para el desmucilaginado del café. *Cenicafé* 61(3):241-250. 2010.
- PEÑUELA M., A.E.; SANZ U., J.R.; OLIVEROS T., C.E. Método e implemento para determinar la finalización de procesos críticos que incluyan disminución de densidad aparente: Solicitud de patente de invención No. 12-012992. [Patente]. Chinchiná (Caldas) : Superintendencia de industria y comercio, 2012.
- PUERTA Q., G.I. Influencia de los granos de café cosechados verdes, en la calidad física y organoléptica de la bebida. *Cenicafé* 51(2):136-150. 2000.
- PUERTA Q., G.I. Buenas prácticas agrícolas para el café. Chinchiná : CENICAFÉ, 2006. 12 p. (Avances Técnicos No. 349).
- RAMÍREZ G., C.A.; OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G. Construya el secador solar parabólico. Chinchiná : CENICAFÉ, 2002. 8 p. (Avances Técnicos No. 305).
- RAMÍREZ G., C.A. Disminución del impacto ambiental en la tecnología Becolsub mediante la evaporación de lixiviados: Informe anual de actividades Octubre 2009 – Septiembre 2010. Chinchiná : CENICAFÉ, 2010. 7 p.
- RAMÍREZ G., C.A. Evaluación de la deshidratación de las mieles resultantes del lavado del café con ECOMILL®: Informe anual de actividades Octubre 2011 – Septiembre 2012. Chinchiná : CENICAFÉ, 2012. 24 p.
- RAMOS G., P.J. Diseño construcción y evaluación de un sistema de identificación de estados de madurez a altas velocidades. Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, 2008. 159 p.
- REST, D.J. VAN. Sorting coffee cherries. *World crops* 22(2):82-87. 1970.
- ROA M., G.; OLIVEROS T., C.E.; ÁLVAREZ G., J.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; ÁLVAREZ H., J.R.; DÁVILA A., M.T.; ZAMBRANO F., D.A.; PUERTA Q., G.I.; RODRÍGUEZ V., N. Beneficio ecológico del café. Chinchiná : CENICAFÉ, 1999. 273 p.
- ROA M., G.; OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; ÁLVAREZ G., J.; RAMÍREZ G., C.A.; ÁLVAREZ H., J.R. Desarrollo de la tecnología Becolsub para el beneficio ecológico del café. Chinchiná : CENICAFÉ, 1997. 6 p. (Avances Técnicos No. 238).
- RODRÍGUEZ V., N. Obtención de pectinas a partir de la pulpa del café: Informe anual de actividades 1999. Chinchiná : CENICAFÉ, 1999. 90 p.
- RODRÍGUEZ V., N. Utilización de la pulpa de café para el cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus*: Informe anual de actividades 1992-1993. Chinchiná : CENICAFÉ, 1993. 15 p.
- RODRÍGUEZ V., N. Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas. Valencia : Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de ingeniería hidráulica y medio ambiente. 508 p. Tesis: Doctor en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- SALAZAR G., M.R.; CHAVES C., B.; RIAÑO H., N.M.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. Crecimiento del fruto de café *Coffea arabica* var. Colombia. *Cenicafé* 45(2):41-50. 1994.
- SANZ U., J.R. Transporte de la pulpa de café a los procesadores mediante tornillo sinfín. Chinchiná : CENICAFÉ, 1996. 8 p. (Avances Técnicos No. 226).
- SANZ U., J.R.; OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A.; LONDOÑO G., M.T. Sistema de malacate y vagón para transporte de café en cereza en condiciones de alta pendiente. *Cenicafé* 62(2). 2011.
- SANZ U., J.R., OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A.; LÓPEZ P., U.; VELÁSQUEZ H., J. Controle los flujos de café y agua en el módulo Becolsub. Chinchiná : CENICAFÉ, 2011. 8 p. (Avances Técnicos No. 405).

- SANZ U., J.R.; RAMOS G., P.J.; OLIVEROS T., C.E. Algorithm to identify maturation stages of coffee fruits. San Francisco : IEEE computer society, 2008. p 8.
- TIBADUIZA, V. C.A. Evaluación de alternativas para el de manejo de mieles del proceso de beneficio de café con el equipo ECOLAV. p. 4-8. En: CENICAFÉ. Informe anual de actividades 2011. Chinchiná : CENICAFÉ, 2011. 18 p.
- URIBE H., A.; SALAZAR A., J.N. La pulpa del café es un excelente abono. Chinchiná : CENICAFÉ, 1983. 6 p. (Avances Técnicos No. 111).
- ZAMBRANO F., D.A. Lavado del café en los tanques de fermentación. Cenicafé 45(3):106-118. 1994.
- ZAMBRANO F., D.A.; ISAZA H., J.D. Demanda química de oxígeno y nitrógeno total, de los subproductos del proceso tradicional de beneficio húmedo del café. Cenicafé 49(4):279-289. 1998.
- ZAMBRANO F., D.A., ISAZA H., J.D., RODRÍGUEZ V., N.; LÓPEZ P., U. Tratamiento de aguas residuales del lavado del café. Chinchiná : CENICAFÉ, 1999. 26 p. (Boletín Técnico No. 20).
- ZULUAGA V., J.; ZAMBRANO F., D. Manejo del agua en el proceso de beneficio húmedo del café para el control de la contaminación. Chinchiná : CENICAFÉ, 1993. 4 p. (Avances Técnicos No. 187).