

MANEJO DE LIXIVIADOS Y AGUAS DE LAVADO EN EL PROCESO DE BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ¹

César Augusto Ramírez Gómez*; Carlos Eugenio Oliveros Tascón*;
Juan Rodrigo Sanz Uribe*

RAMÍREZ G., C.A.; OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R. Manejo de lixiviados y aguas de lavado en el proceso de beneficio húmedo del café. Revista Cenicafé 66(1): 46-60. 2015

Entre los desarrollos de Cenicafé se encuentra la tecnología para el beneficio ecológico del café y el manejo de los subproductos – Becolsub, que utiliza agua entre 0,7 - 1,0 L.kg⁻¹ de cps, evitando más del 90% de la carga contaminante. Esta tecnología ha sido adoptada por más del 90% de los usuarios potenciales y en ésta se ha procesado más de 30% del café de Colombia en los últimos años; sin embargo, los lixiviados son un problema, debido a su alta carga contaminante (DQO: 110.000 ppm.kg⁻¹). En este artículo se presenta la opción para aprovechar la energía térmica que se pierde durante el secado mecánico del café, y la energía solar utilizando secadores solares parabólicos, con el fin de reducir el impacto ambiental. La primera alternativa consistió en utilizar los gases calientes que salen a través de la chimenea para evaporar los lixiviados colocados en bandejas metálicas; con este sistema se evaporó el 71,52% del agua de los lixiviados, con un tiempo de secado de 1,64 L.h⁻¹. En la segunda alternativa, se utilizaron las aguas residuales procedentes del café procesado con la tecnología Becolsub y se utilizó la energía solar para deshidratarlos. En los secadores solares se evaporó el 92% del agua, con una velocidad de evaporación de 2,74 L.día-m² y una eficiencia del 84,36%, mientras que la evaporación natural del agua en las mismas condiciones fue 3,25 L.día-m². La materia resultante puede utilizarse como abono, con el fin de lograr un control total de la contaminación del agua, en el proceso del beneficio húmedo del café.

Palabras clave: Evaporación de lixiviados, secado mecánico, secado solar, aguas residuales.

MANAGEMENT OF LEACHATES AND WASTE WATERS COMING FROM WET COFFEE PROCESSING

Among the developments of Cenicafé it is found the technology for eco-friendly wet coffee processing with byproducts management – Becolsub, which utilizes small amounts of water and avoids more than 90% of the water contamination. The technology has been such impacting that more than 90% of the potential users have adopted it and processed more than 30% of the Colombian coffee in the last years. Besides these great results, the leachates continue being a problem because they are very difficult to be treated before throwing them to water streams. In this paper we present an option to take advantage of the thermal energy that is lost during mechanical coffee drying, to reduce the environmental impact. The first alternative consists in using the hot gases that exit throughout the chimney to evaporate the leachates put in metallic trays. With the arrangement it was allowed to evaporate a mean of 71,52% of the water in the leachates and it was obtained a drying time of 1,64L/h. In the second alternative, solar dryers were used to dry waste waters coming from coffee processed with the Becolsub technology. In solar tunnels it was evaporated 92% of the water and the evaporation rate was 2,74L/day/m², while natural evaporation of water in the same conditions is 3,47L/day/m². The resulting matter can be used as a source of organic matter or nutrients in order to achieve a total control of the water contamination by wet coffee processing.

Keywords: Coffee processing, eco-friendly leachates management, mechanical drying and solar drying.

¹ Fragmento del trabajo de tesis “ Disminución del impacto ambiental en la tecnología Becolsub, mediante la evaporación de lixiviados” presentado a la Universidad de Manizales, para optar el título de Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Manizales. 2011.

* Investigador Científico I, Investigador Principal e Investigador Científico II, respectivamente, Disciplina de Ingeniería Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

El mucílago del café en Colombia se retira utilizando la fermentación natural y la remoción mecánica con la tecnología Becolsub (**B**eneficio **E**cológico y manejo de **S**ubproductos).

Según resultados de estudios realizados por Cenicafé, el 72% de la carga contaminante generada por el Proceso de Beneficio Húmedo del Café (PBHC), correspondientes a un valor de DQO de 82.080 mg.kg⁻¹ de café cereza (cc), se ocasionan al despulpar y transportar la pulpa con agua, y el 28% restante de la contaminación corresponden a un valor de DQO 31.920 mg.kg⁻¹ de cc, y es ocasionada por las mieles de lavado (10, 12, 13, 17, 19). El menor consumo específico de agua en fermentación natural, de 4,17 L.kg⁻¹ de café pergamino seco (cps), se obtiene lavando el café en el tanque con cuatro enjuagues, generando efluentes con un promedio de contaminación cercana a 26.500 ppm de DQO por kilogramo de cps. (18)

Con la tecnología Becolsub aunque se reduce el consumo específico de agua hasta 0,7 L.kg⁻¹ de cps y se controla el 90% de la contaminación potencial del café, se generan lixiviados con una contaminación cercana a 110.000 ppm de DQO por kilogramo de cps. El potencial contaminante de la mezcla pulpa y mucílago presenta un valor de DQO de 115.100 mg.kg⁻¹ de cc (10, 14, 19).

Para el manejo y control de los vertimientos de las aguas residuales del Becolsub, Cenicafé ha desarrollado tecnologías que permiten remover entre el 80% y el 90% de la DQO. Sin embargo, estos efluentes presentan alta carga orgánica, que afecta a los ecosistemas, si son vertidos sin tratamiento previo. Con la mezcla de las mieles y la pulpa en la tecnología Becolsub se logra controlar el 92% de la contaminación potencial del café, estas aguas residuales o lixiviados contaminantes se ha recomendado depositarlos en un tanque

y utilizarlos mezclados con agua, con menor carga orgánica, para el riego sobre la pulpa o en los lombricultivos (1, 4, 9, 13).

Manejo de lixiviados de café. En Cenicafé se encontró que la pulpa mezclada con las mieles generadas durante el desmucilaginado mecánico, en el proceso de beneficio realizado en los módulos Becolsub, retiene aproximadamente el 65% de éstas, drenando un 35% en volumen, el cual está conformado por los lixiviados (12, 13). Los lixiviados se generan debido a que las mieles al entrar en contacto con la pulpa arrastran los fenoles presentes en éstas; los fenoles al contacto con el aire toman una coloración negra la cual es característica de los lixiviados.

En la Estación Experimental La Catalina, Zambrano y Cárdenas (16) diseñaron y evaluaron un prototipo de sistema para el tratamiento primario de los lixiviados de pulpa y mucílago, producidos en la tecnología Becolsub (STLB), utilizando los residuos producidos por un módulo Becolsub 600, que opera con un consumo de agua cercano a 1,2 L.kg⁻¹ de cps, con una DQO original para los lixiviados de 110.000 ppm y una remoción total alcanzada por el STLB de 67,04%; de esta manera se redujo la DQO de los lixiviados hasta 36.252 ppm, y puede esperarse su tratamiento secundario mediante la utilización de un Sistema Modular de Tratamiento de Aguas residuales del beneficio del café (SMTA). El sistema permitió reducir la contaminación hasta un rango entre 50,83 y 70,32 g de DQO, cuando el equipo se operó con un consumo de agua entre 0,6 y 1,0 L.kg⁻¹ de cps. De estas operaciones se produjo un lixiviado cuya DQO fue de 110.000 ppm. Respecto al beneficio convencional de café puede generarse una reducción de la carga contaminante para las aguas residuales entre el 77,5% y 83,8%, lo cual equivale a una disminución de la contaminación global para pulpa y mucílago entre 87,2% y 90,8%.

En Cenicafé, Narváez *et al.* (4) evaluaron una alternativa de evaporación mecánica para reducir el impacto ambiental generado por los lixiviados producidos por la tecnología Becolsub. La investigación se desarrolló utilizando un evaporador rústico conectado a la chimenea, por la cual son conducidos los gases de la combustión generados en una estufa campesina como energía térmica. Con el evaporador operado en las condiciones de trabajo de la estufa (15 h al día) se logró controlar el 100% de la contaminación generada por los lixiviados, en una finca con producción anual de 3.000 kg.año⁻¹ de cps (15.000 kg de cc) que utiliza la tecnología Becolsub. La eficiencia térmica del evaporador y del sistema global fue del 57,01% y 20,74%, respectivamente. El fluido concentrado presentó 295.000 ppm de DQO, 164.254 ppm de Sólidos Totales (ST) y 35% de grados brix (4).

Esta investigación tuvo como propósito buscar alternativas para el manejo de los lixiviados y aguas residuales resultantes del proceso del beneficio ecológico del café y, por ende, lograr un control de la carga contaminante generada en el proceso de beneficio húmedo del café y con la tecnología de beneficio ecológico de café Becolsub y ECOMILL®, que se podría aplicar al 42% de los medianos y grandes caficultores de diferentes producciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. Esta investigación se desarrolló en el Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé, localizado en Manizales (Caldas), a 1.310 m de altitud, con promedios de temperatura y humedad relativa de 21,5°C y 79,5%, respectivamente, y precipitación anual de 2.662 mm. Para el desarrollo de la investigación se realizaron dos fases: La primera consistió en determinar el porcentaje de

lixiviados generados con la tecnología Becolsub, utilizando un módulo para 300 kg de café cereza por hora y determinar su comportamiento de acuerdo a las recomendaciones establecidas por Cenicafé. La segunda fase consistió en la evaporación de los lixiviados resultantes del proceso en la fase anterior, utilizando los gases resultantes de la combustión del secado mecánico y la evaporación solar, utilizando secadores solares parabólicos con cubierta plástica.

Primera Fase: Descripción del equipo. Para el proceso se utilizó un equipo Separador Hidráulico de Tolva y Tornillo Sinfin (SHTS) diseñado por Oliveros *et al.* (6), el cual funciona con bajo consumo específico de agua (0,025 L.kg⁻¹ de cps), con el fin de realizar una clasificación del café por densidad y procesar únicamente los frutos maduros.

Posteriormente, el café clasificado fue transportado por medio del tornillo sinfin hasta la despulpadora de un Becolsub 300 (Figura 1), diseñado y construido en Cenicafé (5). El café despulpado fue clasificado por una zaranda circular de varillas y de allí conducido a un desmucilagimador tipo DESLIM, donde se removió el mucílago y se realizó el lavado mecánicamente, utilizando un controlador de caudal de agua (Figura 2a), diseñado por Sanz *et al.* (15), mientras que las mieles o mucílago concentrado (Figura 3a) y la pulpa resultantes se transportaron inmediatamente por medio de un tornillo sinfin al depósito para su posterior manejo y tratamiento (Figura 2b). La mezcla de pulpa y mucílago se colocó a drenar en canecas perforadas, como se muestra en la Figura 3b.

Segunda Fase: Descripción del equipo. Con el volumen de lixiviados obtenidos se procedió a realizar el cálculo y el diseño de los evaporadores de bandejas, utilizando el sistema de evaporación

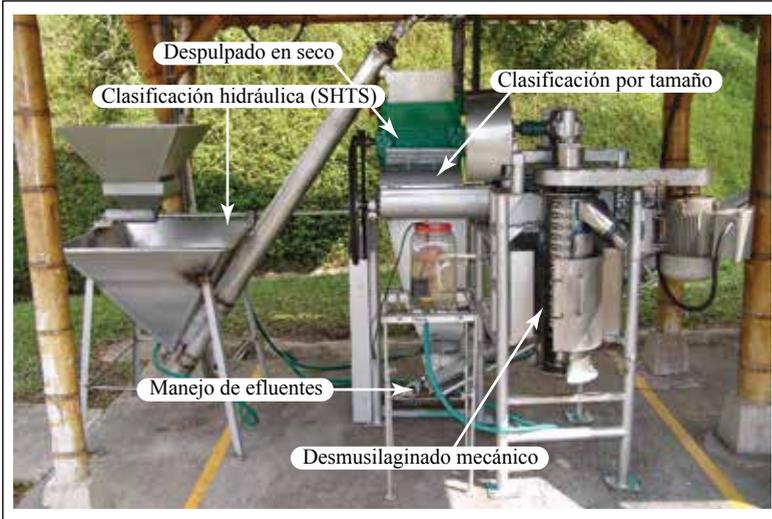


Figura 1. Partes del módulo de beneficio ecológico Becoslub 300 - Cenicafé.



Figura 2. a. Control de caudal de agua; b. Mezcla y transporte de pulpa y mucílago.

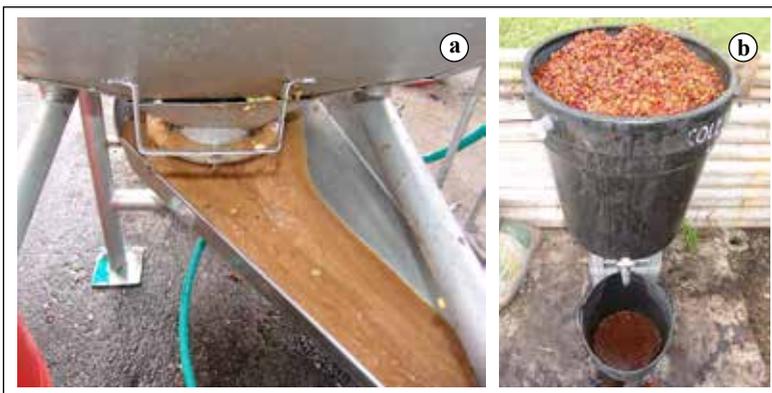


Figura 3. a. Mucílago concentrado; b. Lixiviados generados en el proceso.

mecánica, para lo cual se empleó un secador mecánico comercial, con capacidad de 56 kg de café pergamino seco (Figura 4); los gases resultantes de la combustión fueron conducidos por una chimenea donde se ubicaron los evaporadores para deshidratar los lixiviados resultantes en el proceso (Figura 5).

También se utilizó un secador parabólico (Figura 6), con cubierta plástica (7, 11), con el fin de aprovechar la energía solar y deshidratar térmicamente estos lixiviados.

Metodología. En la primera fase para el proceso de beneficio con el equipo Becolsub, la unidad experimental (u.e.) estuvo constituida por 300 kg de café Variedad Castillo®. Como variables se determinaron el volumen de mieles mezcladas (V_{mm}), la masa de las mieles mezcladas a la pulpa (M_{mm}) y el porcentaje de retención de las mieles lograda por la pulpa (R), dados por las Ecuaciones <1>, <2> y <3>.

$$V_{mm} = \frac{M_{mm}}{\rho} \quad <1>$$

Donde:

V_{mm} : Volumen de mieles mezcladas (L)

M_{mm} : Masa de mieles mezcladas (kg)

ρ : Densidad de las mieles (kg.L^{-1})

El peso de las mieles mezcladas con la pulpa se determinó a partir de la Ecuación <2>.

$$M_{mm} = M_p - 0,4M_{cc} \quad <2>$$

Donde:

La pulpa corresponde al 0,4 del peso del fruto.

M_{mm} : Masa de las mieles mezcladas a la pulpa (kg)

M_p : Masa de la pulpa + mucílago (kg)

M_{cc} : Masa del café cereza (kg)

El porcentaje de retención de mieles (R) se determinó utilizando la Ecuación <3>:

$$R = \frac{V_{mm} - V_l}{V_{mm}} = 100\% \quad <3>$$

Donde:

R : Retención (%)

V_{mm} : Volumen de mieles mezcladas (L)

V_l : Volumen de lixiviados (L)

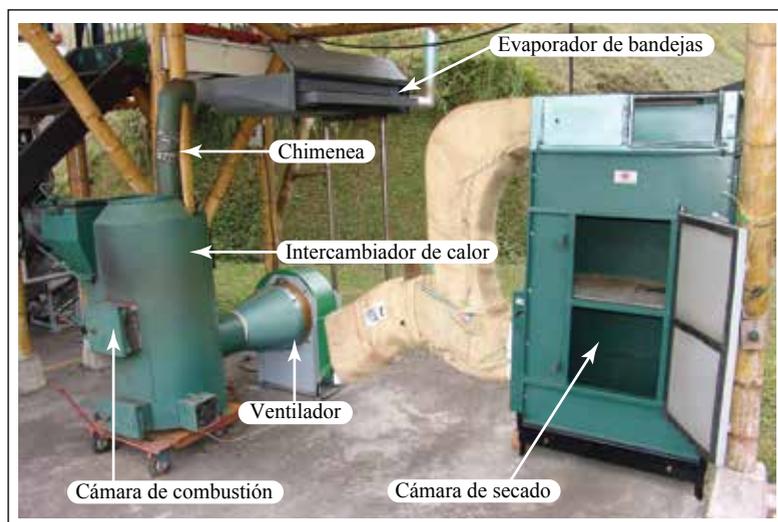


Figura 4. Partes del secador mecánico de café con intercambiador vertical de calor de combustión indirecta.



Figura 5. Dispositivo de bandejas para la evaporación de los lixiviados.



Figura 6. Secador solar parabólico.

Se realizaron 24 repeticiones y se evaluaron principalmente las variables: volumen de mieles mezcladas (V_{mm}), masa de las mieles mezcladas a la pulpa (M_{mm}) y el porcentaje de retención de las mieles lograda por la pulpa (R). Para cada variable se realizó un análisis descriptivo.

Se seleccionó el porcentaje de retención de mieles (R) obtenido en esta fase, luego de 96 h de lixiviados después de cada una de las pruebas, y se procedió a realizar los diseños de los evaporadores y su posterior evaluación como se describe en la segunda fase.

Para la segunda fase se utilizaron los dispositivos diseñados para el proceso de evaporación con el equipo de secado, los lixiviados evaporados y el porcentaje de retención de éstos, mediante las Ecuaciones <4> y <5>.

Para la fase II se realizaron 14 repeticiones para el proceso de evaporación con el equipo de secado, la unidad experimental consistió en 50 L de lixiviados y la variable de respuesta fue la cantidad de litros de lixiviados evaporados (V_{le}).

$$V_{le} = \frac{V_{li} - V_{lf}}{V_{li}} = 100\% \quad <4>$$

Donde:

- V_{le} : Lixiviados evaporados (%)
- V_{li} : Volumen inicial de lixiviados (L)
- V_{lf} : Volumen final de lixiviados evaporados (L)

La eficiencia del evaporador se halló dividiendo el tiempo necesario sobre el tiempo real de evaporación de las pruebas, utilizando la Ecuación <5>.

$$\eta = 100 \left(\frac{t}{t_r} \right) \quad <5>$$

- η : Eficiencia del evaporador (%)
- t : Tiempo calculado de secado (h)
- t_r : Tiempo real de secado (h)

Adicionalmente, se obtuvo el control de la contaminación (C_c) y la retención total de los lixiviados generados con el uso de la tecnología (R_i). El porcentaje de control de la contaminación se obtuvo mediante la Ecuación <6>.

$$C_c = [(0,28R) + 72] 100\% \quad <6>$$

Donde:

C_c : Control de la contaminación (%)

R_i : Retención (%)

Análisis de la información. Esta es una investigación exploratoria y descriptiva. Por cada prueba y con la información obtenida se realizó un balance de masa general, se realizó el análisis descriptivo con los respectivos promedios, la desviación estándar, el coeficiente de variación y los límites superiores e inferior con un nivel de confianza del 95%, para cada una de las variables mencionadas en el proceso y en cada una de las fases evaluadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desempeño operativo del Becolsub 300

Los valores principales del desempeño de la tecnología de Becolsub 300 se presentan en la Tabla 1, donde se muestra que el promedio de la masa procesada fue de 248,38 kg de café cereza, con un límite superior de 268,99 kg y un límite inferior de 227,76 kg de café cereza. De acuerdo a los resultados, el módulo Becolsub 300 presentó un desempeño operativo inferior al esperado, con un promedio de 233,86 kg de café cereza por prueba, de esta masa el 14,52% del café cereza aproximadamente 35,54 g se separó por flotación en el separador hidráulico de tornillo sinfín.

El café despulpado correspondió al 82,68% de la masa recibida, aproximadamente 206,04

kg, un 25% por debajo del rendimiento operativo del equipo (300 kg.h⁻¹), la zaranda de varillas retiró principalmente los frutos sin despulpar y parte de la pulpa, en promedio 14,52 kg (6,79%) de la masa recibida.

En la Tabla 2 se presentan los valores promedio de rendimiento del proceso operativo del Becolsub. El tiempo total del proceso fue de 52,90 min, la masa de café desmucilaginado obtenida fue de 89,79 kg, el suministro de agua en el proceso fue 0,78 L.min⁻¹. El total de agua utilizada fue de 41,03 L, el peso de la pulpa generada fue de 93,42 kg y el promedio de la masa de pulpa + mucílago fue de 165,25 kg.

En la Figura 2b se observa el transporte de la pulpa y el mucílago concentrado por intermedio del tornillo sinfín mezclado con la pulpa.

En la Tabla 3 se registran los valores para los lixiviados generados en el proceso. En las primeras 24 h se obtuvieron 44,03 L, lo que equivale al 76,46% del total de lixiviados generados, que fueron en total 57,43 L en promedio, en un tiempo total de 96 h; adicionalmente, se registró un valor mínimo de 28 L, correspondientes a la prueba con la menor cantidad de café (199 kg de cc) y un máximo de 91 L de lixiviados correspondientes a una de las pruebas con la mayor cantidad de café cereza procesado (313 kg de cc).

En la Tabla 4 se presentan los valores de los efluentes generados y el control de contaminación de la carga contaminante alcanzada en el proceso. El peso de la mezcla pulpa+mucílago fue de 165,3 kg, en promedio, y después del drenado de los fluidos (lixiviados) el peso disminuyó a 93,4 kg. El agua adicionada fue de 41,4 L.

Tabla 1. Desempeño operativo de la tecnología Becolsub.

	Masa de café cereza		Masa de café flotado		Masa clasificada en la zaranda		Masa de café cereza despulpado		Rendimiento del despulpado
	(kg)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg/h)	
Límite superior	268,99	40,69	16,57	8,22	3,42	225,61	85,11	245,50	
Límite inferior	227,76	30,40	12,47	5,36	2,18	186,47	80,26	222,22	
Promedio	248,38	35,54	14,52	6,79	2,8	206,04	82,68	233,86	
C. V. %	19,65	34,29	33,44	49,88	52,46	22,49	6,95	11,78	

Tabla 2. Rendimientos operativos del equipo Becolsub.

	Masa del café desmucilaginado	Masa pulpa + mucilago	Agua utilizada	Tiempo de despulpado	Total de agua utilizada	Peso final pulpa
	(kg)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)
Límite superior	98,04	180,81	0,79	57,26	44,67	99,11
Límite inferior	81,54	149,69	0,76	48,54	37,39	87,72
Promedio	89,79	165,25	0,78	52,90	41,03	93,42
C. V. %	21,75	22,30	5,71	19,52	21,01	14,44

Tabla 3. Lixiviados generados en el proceso con el Módulo Becolsub 300.

	Lixiviados				Porcentaje Lixiviados				Total de lixiviados
	24 h	48 h	72 h	96 h	24 h	48 h	72 h	96 h	
	(L)	(L)	(L)	(L)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Límite superior	49,72	9,49	5,47	2,27	80,15	16,18	9,18	4,29	63,84
Límite inferior	38,35	6,47	3,39	0,49	72,77	11,63	6,25	1,13	51,01
Promedio	44,03	7,98	4,43	1,38	76,46	13,90	7,72	2,71	57,43
C. V. %	37,99	53,18	65,82	85,24	12,94	45,38	51,94	97,60	32,56

Tabla 4. Efluentes generados en el proceso, control de los lixiviados y control general de la contaminación.

	Mezcla pulpa + mucilago	Pulpa después de drenado	Mezcla agua + mucilago	Lixiviados	Agua adicionada	Retención	Control contaminación
	(kg)	(kg)	(L)	(L)	(L)	(%)	(%)
Límite superior	180,81	99,11	90,53	63,84	44,98	65,81	90,43
Límite inferior	149,69	87,72	72,62	51,01	37,78	55,33	87,49
Promedio	165,25	93,42	81,58	57,43	41,38	60,57	88,96
C. V. %	22,30	14,44	26,00	26,47	20,59	16,43	5,91

Luego de 96 h de iniciadas las pruebas, en la pulpa permanecieron 24,2 L de los fluidos adicionados (mucílago+agua), con un promedio de la retención en la pulpa del 60,6%, con límites superior e inferior de 65,81% y 55,33%, respectivamente, ligeramente inferiores a los obtenidos en Cenicafé por Roa *et al.* (13), debido posiblemente dos factores. Primero, el año 2009 fue un año atípico para la caficultura colombiana, por cuenta de factores como el clima y la baja fertilización, mayores niveles de precipitación en las zonas cafeteras y el consecuente aumento en los niveles de infección por roya, explican este comportamiento, afectando la productividad y la calidad del cultivo. Así la producción cafetera colombiana del 2009 fue de 7,8 millones de sacos, como consecuencia de una caída de 32% en la producción (2); y segundo, al uso del separador hidráulico de tornillo sinfín, que podría adicionar agua a las cerezas en el proceso de clasificación de los frutos maduros.

El control de la contaminación total fue del 89%, en promedio, con límites superior e inferior de 90,43% y 87,49%, respectivamente, valores cercanos al 92%, como los obtenidos por Ramírez (9), con lo que se corroboran las bondades de la tecnología Becolsub.

En la Figura 3a se observa el mucílago concentrado adicionado a la pulpa y en la Figura 3b, los lixiviados generados en el proceso.

Resultados de las pruebas del evaporador con el secado mecánico. En la Tabla 5 se presentan los valores del desempeño del secador mecánico. En promedio el tiempo de secado fue de 33,31 h, temperatura de secado para el café de 51,85°C, y por tanda de secado se obtuvieron en promedio 40,875 kg de cps, el consumo de carbón fue de 1,56 kg.h⁻¹ y el total por tanda de secado fue de 44,33 kg en promedio.

La temperatura de los gases de combustión en la chimenea, a la entrada al evaporador, varió entre 227°C y 189°C, con promedio de 209°C, la cual es apropiada para el calentamiento de las bandejas; la temperatura de salida estuvo en un promedio en 39°C. Si se expresa el calor entregado a las bandejas como función directa de las diferencias de las temperaturas de entrada y de salida de los gases, ésta presenta poca variación, con un promedio de 192°C.

En la Figura 7 se observa una tendencia en el descenso de la temperatura inicial (208°C). En la entrada de la bandeja # 1 la temperatura fue de 58,68°C y se estabilizó a medida que los gases pasaban por las siguientes bandejas, hasta la bandeja # 6 (32,53°C); la temperatura de salida de los gases al exterior fue de 33,29°C, en promedio.

En la Tabla 6 se presentan los valores de los volúmenes para los lixiviados dispuestos inicialmente en cada bandeja para su evaporación. El promedio del porcentaje de evaporación para las pruebas fue de 71,52%, con un límite superior de 74,45% e inferior de 68,59%. En promedio, se dispusieron en el evaporador 33,62 L de lixiviados, con un límite superior de 41,72 L e inferior de 25,52 L. Las bandejas # 1 y # 2, con temperaturas más altas, 59°C y 42°C, en promedio, respectivamente, presentaron porcentajes de evaporación de 75% y 73%, respectivamente.

El total de lixiviados evaporados fue de 111,60 L para un total de 183,30 h utilizadas en el secado del café, con una relación de 1,64 L.h⁻¹ de lixiviado evaporado. Adicionalmente, el consumo de carbón fue de 1,56 kg.h⁻¹, con un rendimiento de combustible de 2,38 kg.L⁻¹ de lixiviado evaporado.

Tabla 5. Desempeño operativo del secador mecánico para café.

Pruebas	Horas de secado	Temp. del aire de secado	Temp. de los gases de entrada	Temp. de los gases de salida	Temp. ambiente	Café pergamino seco
	(h)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(kg)
Límite superior	35,45	53,60	227,64	42,13	24,27	43,875
Límite inferior	31,16	50,10	189,59	36,46	21,07	37,750
Promedio	33,31	51,85	208,62	39,29	22,67	40,875
C.V.%	11,21	5,84	15,80	12,50	4,44	12,95

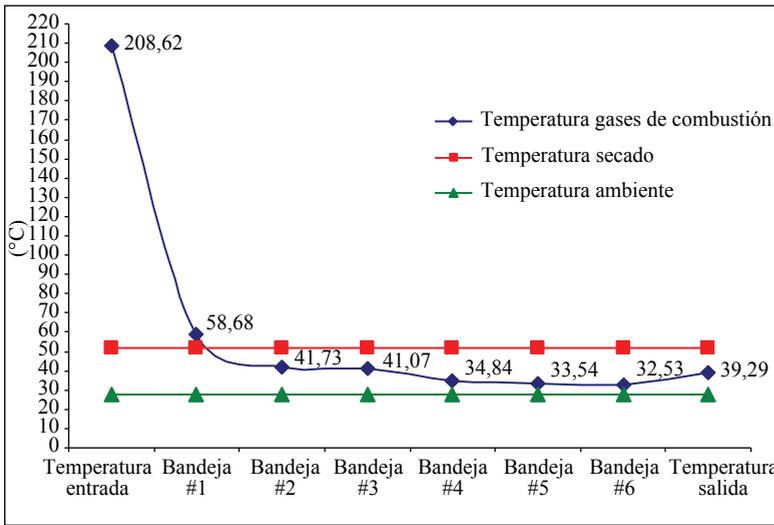


Figura 7. Temperaturas de los gases de combustión y de las bandejas del evaporador.

La eficiencia calculada fue del 64%, con una evaporación real de 71,52% de los lixiviados, lo que indica que el diseño del evaporador de bandejas es apropiado.

En general, la evaporación de líquidos alcanzada es alta (68,59% al 74,45%), por lo que se considera que el dispositivo diseñado es adecuado para evaporar los lixiviados generados en el proceso de beneficio ecológico del café, en una finca con una producción anual de 2.750 kg de cps.

Resultados de las pruebas del evaporador con el secado solar. Se realizaron pruebas

exploratorias preliminares con el fin de evaporar los lixiviados generados en el lavado mecánico del café fermentado con ECOMILL® (8), con un consumo de 0,4 L de agua por cada kilogramo de café procesado.

Con el fin de utilizar la radiación solar se utilizó un secador solar parabólico, los efluentes generados en el proceso se dispusieron en el piso del secador, previamente cubierto con plástico Agroplas N calibre # 8.

En la Tabla 7 se presentan los valores de altura de las mieles, evaporación diaria, temperatura media diaria, humedad relativa

Tabla 6. Lixiviados evaporados en cada una de las bandejas del evaporador.

			<u>Límite superior</u>	<u>Límite inferior</u>	<u>Promedio</u>	<u>S.T.D.</u>	<u>C.V. (%)</u>
Bandeja # 1	L	(l)	8,41	5,97	7,19	1,92	26,71
	L.E.	(l)	6,29	4,46	5,38	1,44	26,77
	L. N. E.	(l)	2,52	1,11	1,82	1,11	61,14
	E	(%)	84,13	67,27	75,70	13,27	17,52
Bandeja # 2	L	(l)	7,96	5,14	6,55	2,22	33,94
	L.E.	(l)	5,01	3,86	4,44	0,90	20,28
	L. N. E.	(l)	3,32	0,90	2,11	1,91	90,33
	E	(%)	85,01	60,08	72,54	19,62	27,04
Bandeja # 3	L	(l)	7,91	5,15	6,53	2,17	33,24
	L.E.	(l)	4,86	3,78	4,32	0,85	19,57
	L. N. E.	(l)	3,45	0,98	2,21	1,95	87,95
	E	(%)	84,24	57,91	71,07	20,72	29,15
Bandeja # 4	L	(l)	7,67	3,56	5,62	3,23	57,52
	L.E.	(l)	5,27	2,42	3,85	2,24	58,31
	L. N. E.	(l)	2,94	0,61	1,77	1,83	103,58
	E	(%)	83,29	60,80	72,05	17,70	24,56
Bandeja # 5	L	(l)	7,29	3,04	5,17	3,35	64,75
	L.E.	(l)	5,07	1,95	3,51	2,45	69,99
	L. N. E.	(l)	2,67	0,66	1,67	1,58	94,76
	E	(%)	82,28	58,94	70,61	18,37	26,02
Bandeja # 6	L	(l)	3,71	1,40	2,56	1,82	71,05
	L.E.	(l)	2,28	0,95	1,62	1,04	64,61
	L. N. E.	(l)	1,53	0,32	0,93	0,95	102,36
	E	(%)	75,54	58,73	67,14	14,52	21,63
E.T.		(%)	74,45	68,59	71,52	2,79	3,91

L. = Lixiviados; L.E. = Lixiviados Evaporados; L.N.E. = Lixiviados No Evaporados; E. = Evaporación; E.T. = Evaporación Total.

Tabla 7. Relaciones de evaporación de efluentes en el secador solar parabólico.

Evaporación total del día (mm)	Temperatura media día (°C)	Humedad relativa media día (%)	Brillo solar (h)
3,47	22,40	74,30	5,66

y brillo solar, de los cálculos diarios de Evaporación Tanque Clase A de la estación meteorológica Cenicafé-La Granja, aledaña a las instalaciones de Ingeniería Agrícola de Cenicafé.

Se colocaron en el piso del secador 2.761 L de efluentes, de los cuales se evaporaron 2.538 L, correspondientes al 92%; el efluente que no evaporó, correspondió a 126 L de lodos y 97 L de lixiviados drenados de los lodos, con valores del 3,51% y 4,56%, respectivamente. El promedio de la evaporación diaria en el secador fue de 3,15 mm.día⁻¹ y la evaporación media en el Tanque Clase A fue de 3,30 mm.día⁻¹, valores cercanos a la evaporación media mensual de 3,47 mm.día⁻¹ para Cenicafé (3).

En la Figura 8 se observa la tasa de evaporación, para la cual se hizo un ajuste de regresión lineal, se observa una tasa de evaporación para el Tanque Clase A de $3,25 \text{ mm.día}^{-1}$ con un coeficiente de determinación de 0,99 y una tasa de evaporación en el secador solar de $2,74 \text{ mm.día}^{-1}$ con un $R^2=0,98$, con una eficiencia de 84,36% de los efluentes colocados en el secador, valor promisorio para el tratamiento de los lixiviados, aunque menor que la evaporación en tanque, debido a que el mucílago está constituido por una capa gruesa de tejido esponjoso de 4,0 a 2,0 mm de espesor, contiene 15% de sólidos en forma de hidrogel y en su composición química el 85% es agua y un 15% de materia seca, lo cual hace que la evaporación sea más lenta.

A los efluentes deshidratados (Figura 9) se realizaron los análisis físico-químicos, los cuales muestran una humedad final de 14%, pH de 5,6, contenido de potasio de 4,24% y de nitrógeno total 2,87% (Tabla 8), valores que indican que podrían ser

utilizados como fuente de materia orgánica o nutrientes.

En la Figura 10 se observa cómo los efluentes resultantes del proceso del beneficio del café, altamente contaminantes, pueden transformarse en un subproducto con valor agregado (bioabono), y podría ser una alternativa viable para un alto número de productores de café en Colombia, protegiendo el recurso agua.

Con esta investigación se generan alternativas para el manejo de los lixiviados producidos en la tecnología Becolsub y de las mieles del lavado mecánico, utilizando la energía térmica no aprovechada en equipos para secado mecánico y con secadores solares diseñados para café, tipo parabólico o túnel.

Los aspectos más importantes generados en esta investigación desde el enfoque ambiental son los siguientes:

- Desde el punto de vista del manejo del recurso agua se evita su deterioro, ya que

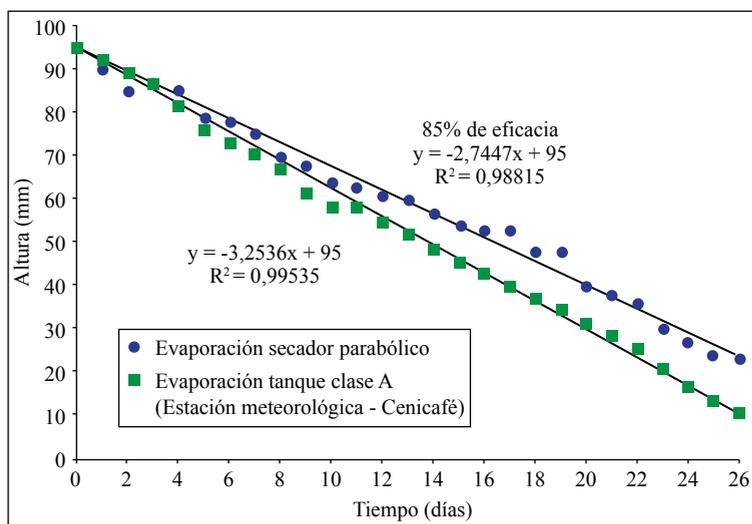


Figura 8. Regresión lineal entre la evaporación diaria de los efluentes en el secador solar parabólico y la evaporación en Tanque Clase A de la estación meteorológica Cenicafé - La Granja.



Figura 9. Efluentes deshidratados utilizando la energía solar.

Tabla 8. Caracterización físico-químico de los efluentes secos.

Referencia	Valor
Humedad (%)	14
pH	5,6
Densidad real (g.mL ⁻¹)	0,69
Conductividad Eléctrica (mS. cm ⁻¹)	8,36
Cenizas (%)	11,5
Pérdidas por volatilización (%)	88,5
Retención de agua (%)*	151
N total (%)	2,87
C.O.ox (%)	29,7
P (%)	0,27
K (%)	4,62
Ca (%)	1,03
Mg (%)	0,31
Fe (mg.kg ⁻¹)	26
Mn (mg.kg ⁻¹)	88
Zn (mg.kg ⁻¹)	83
Cu (mg.kg ⁻¹)	45

Métodos: pH: pasta saturada; Humedad: 70°C/ 24h; Nt.: Semimicrokjeldahl; K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn, Cu: Espectrofotometría de Absorción Atómica. P: Colorimétrico con molibdo vanadato de amonio. CE: Conductivimétrico. COox.: Walkley Black. Cenizas: 475°C/4h

Nota: Resultados expresados en base seca. * Retención de agua en base húmeda



Figura 10. Bioabono obtenido después de la deshidratación de los efluentes concentrados del beneficio del café, utilizando la energía solar.

se disminuye la contaminación generada por los lixiviados, principal problema de los adoptantes de la tecnología Becolsub, que aunque permite controlar el 92%, se generan lixiviados para los cuales es necesario disponer de tratamientos primarios y secundarios, con el fin de disminuir su carga orgánica a niveles aceptables antes de ser vertidos a los cuerpos de agua.

- Con el sistema propuesto de evaporación se pasa de tener un residuo líquido altamente contaminante a obtener un residuo seco, el cual no se estaría descargando en las fuentes de agua naturales, y por lo tanto, no se impactarían éstas, obteniéndose un control cercano al 100%.
- Se generó información para el manejo por evaporación de los lixiviados y mieles de lavado mecánico utilizando la energía mecánica y solar para el secado del café.
- Con estos resultados se beneficiarían más del 95% de productores de café de Colombia (aproximadamente 500.000), los cuales serían los potenciales usuarios de esta tecnología completamente amigable con el ambiente.
- Los residuos finales obtenidos con esta tecnología podrían ser utilizados, después de realizada la investigación pertinente, como fuente de abono orgánico para las mismas fincas de los productores, generando un valor agregado.
- Se podrían generar tecnologías mixtas como la evaporación solar y mecánica y/o recirculación de las aguas residuales (mucílago concentrado y lixiviados) sobre la pulpa, para controlar el 100% de la contaminación generada por la tecnología Becolsub y ECOMILL®.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS por la cofinanciación de este estudio y al Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé, por su constante apoyo al servicio todos los caficultores de Colombia.

LITERATURA CITADA

1. DÁVILAA., M.T.; RAMÍREZ G., C.A. Lombricultura en pulpa de café. Chinchiná : Cenicafe, 1996. 11 p. (Avances Técnicos No. 225)
2. FEDERACAFÉ. El mercado del café: Congreso cafetero informe gerencia general. Bogotá : FEDERACAFÉ, 2009. [En línea]. Disponible en internet: http://www.cafedecolombia.com/congresocafetero/2009/02.Informe_GG_2009_Mercado_del_Cafe.pdf. Consultado en Febrero de 2015.
3. JARAMILLOR., A. Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia. Cenicafe 57(4):288-298. 2006.
4. NARVÁEZ M., L.H.; RAMÍREZ G., C.A.; OLIVEROS T., C.E.; ÁLVAREZ, F. Manejo de las mieles generadas en la tecnología BECOLSUB para eliminar el impacto ambiental ocasionado por los lixiviados del café. Revista facultad nacional de agronomía Medellín 56(2):1969-1981. 2003.
5. OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; RAMÍREZ G., C.A.; ÁLVAREZ G., J.; ÁLVAREZ H., J. El BECOLSUB 300. Chinchiná : Cenicafe, 1998. 8 p. (Avances Técnicos No. 253)
6. OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; RAMÍREZ G., C.A.; MEJÍA G., C.A. Separador hidráulico de tolva y tornillo sin fin. Chinchiná : Cenicafe, 2007. 8 p. (Avances Técnicos No. 360)
7. OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; PEÑUELA M., A.E. Secador parabólico mejorado. Chinchiná : Cenicafe, 2008. 8 p. (Avances Técnicos No. 376)
8. OLIVEROS T., C.E.; SANZ U., J.R.; RAMÍREZ G., C.A.; TIBADUIZA V., C.A. Ecomill®: Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café. Chinchiná : Cenicafe, 2013. 8 p. (Avances Técnicos No. 432)

9. RAMÍREZ G., C.A. Evaluación técnica y económica de módulos "BECOLSUB 600 y 1000 MÓVILES". p. 3-10. En: CENICAFÉ. Informe anual de actividades de la disciplina de Ingeniería agrícola Octubre 1997 - Septiembre 1998. Chinchiná : Cenicafé, 1998. café utilizando macrófitas acuáticas. Valencia : Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de ingeniería hidráulica y medio ambiente, 2009. 508 p. Tesis: Doctorado.
10. RAMÍREZ G., C.A. Disminución del impacto ambiental en la tecnología BECOLSUB, mediante la evaporación de lixiviados". Manizales : Universidad de Manizales. Facultad de ciencias contables, económicas y administrativas, 2011. 105 p. Tesis: Maestría.
11. 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)
12. 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)
13. ROA M., G.; OLIVEROS T., C.E.; ÁLVAREZ G., J.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; DÁVILA A., M.T.; ÁLVAREZ H., J.R.; ZAMBRANO F., D.A.; PUERTA Q., G.I.; RODRÍGUEZ V., N. Beneficio ecológico del café. Chinchiná : Cenicafé, 1999. 273 p.
14. RODRÍGUEZ V., N. Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del
15. 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)
16. ZAMBRANO F., D.A.; CÁRDENAS C., J. Manejo y tratamiento primario de lixiviados producidos en la tecnología BECOLSUB. Chinchiná : Cenicafé, 2000. 8 p. (Avances Técnicos No. 280)
17. 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.
18. ZAMBRANO F., D.A.; RODRÍGUEZ V., N. Construya su tanque tina para la fermentación y el lavado del café. Chinchiná: Cenicafé, 2011. 4p. (Avance Técnico No. 408).
19. ZULUAGAV., 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).