

Obtención de bioproductos a partir de residuos del beneficio húmedo del café (pulpa)

Obtaining Bioproducts from Residues of the Wet Benefit of Coffee (Pulp)

Jairo Smith Triviño Pineda, José Contreras García **,
Claudia Milena Amoroch Cruz ***, Javier Eduardo Sánchez Ramírez ****

DOI: 10.15446/rev.colomb.biote.v23n2.90551

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados obtenidos a escala de laboratorio para el aprovechamiento de la pulpa de café (residuos) en el proceso de beneficio húmedo aplicando el concepto de biorrefinería. Los resultados mostraron que es posible tratar este residuo mediante procesos fermentativos y obtener bioetanol separado por medio de la destilación simple con un contenido de alcohol entre 3,85 % al 6,90 % por cada 250 ml de biomasa tratada en condiciones ambientales. Se observó en todos los ensayos que una variable importante es el tiempo de fermentación y la estructura inicial del residuo ya que esto influye sobre el rendimiento obtenido en términos del bioalcohol producido. Este trabajo forma parte de un estudio preliminar para la implementación del concepto de biorrefinería a los residuos generados en el beneficio húmedo del café. La búsqueda de alternativas que permitan el aprovechamiento de los residuos del café constituye una problemática actual. Estos residuos al no ser tratados, por lo general son vertidos a las fuentes hídricas y en ocasiones utilizados como enmiendas agrícolas en los cultivos, lo cual puede causar graves problemas de contaminación. Por este motivo es necesario realizar investigaciones en este campo que permitan su tratamiento o aprovechamiento integral.

Palabras clave: biorrefinería, bioetanol, café, pulpa, residuos.

ABSTRACT

This work presents the results obtained at a laboratory scale for the use of coffee pulp (residues) in the wet milling process applying the concept of biorefinery. The results showed that it is possible to treat this residue through fermentative processes and obtain bioethanol through simple distillation with an alcohol content between 3.85% to 6.90% for each 250ml of biomass with a solid-liquid ratio of 4 to 1 to environmental conditions. It was observed in all the tests that the fermentation time and the initial structure of the residue are important variables since they influence the yield obtained in terms of produced alcohol. This work is part of a preliminary study for the implementation of the biorefinery concept to the residues generated in the wet coffee mill. The search of alternatives that allow the use of coffee residues is a current problem. These residues, when not treated, are generally dumped into water sources and sometimes used as agricultural amendments in crops, which can cause serious contamination problems. For this reason, it is necessary to carry out research in this field for its treatment or comprehensive use.

Key words: biorefinery, bioethanol, coffee, pulp, waste.

Recibido: Febrero 15 de 2021

Aprobado: Diciembre 15 de 2021

* Ingeniero Agrícola. Grupo de investigación Agroindustria-USCO. jairo05_35_30@hotmail.com

** Ingeniero Agrícola. Grupo de investigación Agroindustria-USCO. j-c88@hotmail.com

*** Doctora en Biotecnología. Grupo de investigación Agroindustria-USCO. claudiamilena.amoroch@usco.edu.co

**** Doctor en Ingeniería Química, Ambiental y de Procesos. Grupo de investigación Agroindustria-USCO. jesr18@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

Actualmente el café lidera la lista de los productos que más se comercializan en los mercados nacionales e internacionales ya que muchos países tienen este producto como un pilar en su economía (Vegro y Florêncio, 2020); además, es el segundo producto más comercializado en el mundo después del petróleo y la segunda bebida más popular después del agua (Echeverri *et al.*, 2005; Figueroa *et al.*, 2012). Por esta razón se generan elevadas cantidades de residuos durante el procesamiento del café que deben ser tratados antes de su disposición final (Ravindran *et al.*, 2017).

La producción de café en Colombia durante 2016 fue de aproximadamente 14,2 millones de sacos de 60 kg entre el mes de enero y diciembre (FNC, 2016), siendo el departamento del Huila (Colombia) el primer productor de café con una participación nacional del 18,07 %; sin embargo, se presentó una disminución del 4,5 % para el año 2018 con unos 13,5 millones de sacos de 60 kg. En 2019 la producción aumentó en un 9 % con un total de 14,8 millones de sacos de 60 kg y para el año 2020 la producción de café disminuyó un 6,7 % para un total de 13,9 millones de sacos de 60 kg (FNC, 2019).

En el procesamiento del café, específicamente en el beneficio por vía húmeda, se obtienen como residuos pulpa fresca (exocarpo) y mucílago, que de forma habitual son vertidos a los medios receptores (Fernández *et al.*, 2020; Suarez, 2012). El impacto ambiental provocado por el alto contenido de cafeína y taninos los hacen tóxicos en la naturaleza y en las fuentes hídricas al ser vertidos. Esto genera graves problemas en los medios acuáticos como la desaparición de especies por la disminución del oxígeno debido a la elevada carga orgánica de estos residuos y el aumento de la acidez en las aguas, lo que resulta posteriormente en una proliferación de microorganismos indeseables, generación de malos olores, aparición de patógenos, moscas y otros insectos y provoca la contaminación del agua, hecho que limita su utilización para consumo humano, lo cual es bastante preocupante (Londoño *et al.*, 2020).

Estudios desarrollados hasta el momento indican que por cada kilogramo de café cereza se obtienen 436 gr de pulpa fresca. Con la producción nacional de 2019 se generaron 371 472 t de pulpa fresca de las cuales más del 80 % se ha vertido a las fuentes hídricas sin ningún tipo de aprovechamiento. Estas cifras son alarmantes teniendo en cuenta que en su mayoría estos residuos no están siendo tratados y su disposición final son ríos o lagos (Rodríguez y Zambrano, 2010).

Al comparar la contaminación causada por los residuos de la industria del café (pulpa) y la producida por el hombre en términos de carga orgánica en un agua residual urbana, se tiene que por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra que Colombia exporta, se generan 162 900 t de pulpa fresca, que al no ser tratados adecuadamente producen una contaminación equivalente a la orina y excretas generadas en un año por una población de 310 000 habitantes (Rodríguez, 2009).

Por otra parte, la producción de bioetanol ha experimentado un crecimiento en los últimos años en América Latina; en Colombia se estima un consumo medio de 1,9 millones de litros al día (FNBC, 2019), por lo que se hace conveniente implementar nuevos procesos y desarrollar tecnologías más eficientes que permitan su producción. Una alternativa es el aprovechamiento de residuos orgánicos biodegradables, como el caso de la pulpa del café; esto permitiría que Colombia camine en el desarrollo de procesos sostenibles y amigables con el medio ambiente, generando alternativas de desarrollo y contribuyendo al uso de energías limpias y a la sustitución de los combustibles fósiles (Soomro *et al.*, 2020).

El objetivo principal de este estudio, pues se centró en investigar el aprovechamiento de la pulpa de café mediante el proceso de fermentación para la obtención de bioetanol. Los procesos planteados en este estudio pueden ser de gran interés y dar el punto de partida a nivel local, para realizar otras investigaciones más profundas y poder dar soluciones medioambientales, económicas y sociales al sector cafetero enfocadas al tratamiento y aprovechamiento de los residuos generados en el procesamiento del café (Fernández *et al.*, 2020; FNC, 2014).

MATERIALES Y MÉTODO

Materia prima: pulpa de café

Como materia prima se utilizó pulpa de café variedad Castillo, procedente de la vereda Alto Fátima y El Mesón, del municipio de Garzón, departamento del Huila (Colombia). Para el estudio se utilizó pulpa de café obtenida del beneficio húmedo. El experimento se realizó en dos periodos del año de producción: la mitaca (primera fase o ensayo preliminar) y la cosecha (segunda fase o ensayo a mayor escala). Para el beneficio se emplearon 34 kg de café, donde después del beneficio húmedo se generaron como residuo 15 kg de pulpa. Las muestras fueron transportadas al laboratorio de microbiología de alimentos de la facultad de ingeniería de la Universidad Surcolombiana en contenedores limpios y refrigerados; esto con el fin de evitar alteraciones en la composición de la muestra.

Caracterización fisicoquímica y microbiológica

La caracterización del residuo (pulpa de café) se realizó mediante el análisis de los siguientes parámetros: pH, sólidos solubles, acidez titulable (expresado como ácido láctico), color, DQO y sólidos totales. Todos los ensayos fueron realizados según el método (AOAC International, 1995). Para la determinación del color se utilizó un colorímetro para líquidos Konica Minolta, modelo CR-410, usando el método CIE (Comisión Internacional Eclairage), usando el iluminante D65 y un ángulo de observación de 10°. La determinación de DQO total y DQO soluble se realizó mediante la metodología de reflujo abierto según el Standard Methods (APHA, 2005). Para el recuento de microorganismos, tanto de levaduras como de Bacterias Ácido Lácticas (BAL), se empleó la metodología descrita por Madigan *et al.* (2009).

Fases del ensayo: fermentación y destilación

1. Fase I. Fermentación en fase preliminar

Las fermentaciones se llevaron a cabo a temperatura ambiente de Neiva-Huila, entre 31,5 °C y 34,7 °C (Hurtado, 2012), en tanques de fermentación de 4 litros con tapa hermética que garantiza la anaerobiosis durante 20 días; se realizaron dos tratamientos con las levaduras nativas presentes en la pulpa de café. TP-1 empleó 2 kg de pulpa en 2 L de agua y TP-2 empleó 2 kg de pulpa triturada en 2 L de agua. Los tanques se mantuvieron completamente agitados para garantizar una muestra homogénea.

2. Fase II. Fermentación en ensayo a mayor escala

La fermentación en el ensayo a mayor escala se llevó a cabo por triplicado durante cinco días en tanques de fermentación de cinco litros con tapa que garantiza la anaerobiosis. Se realizaron dos tratamientos: TP-3, que contenía 4 kg de pulpa diluida en 1 L de agua y TP-4, que contenía 4 kg de pulpa triturada en 1 L de agua más la adición de 1,05 g de levaduras *Saccharomyces cerevisiae* (Var. bayanus). El líquido obtenido al finalizar la fermentación se llevó a destilación simple.

3. Destilación simple

El proceso de destilación simple se llevó a cabo en un montaje de laboratorio preparado para este estudio. La producción de bioetanol a partir de los residuos generados en la industria agroalimentaria como materia prima brinda la pertinencia de un biocombustible mucho más limpio y de bajo carbono que puede ser una alternativa de los combustibles fósiles (Ayodele *et al.*, 2020). La destilación del residuo fermentado se realizó empleando 250 ml de la muestra fermentada a una temperatura de 80 °C.

4. Medición del contenido de etanol

El contenido de etanol se midió usando el método del picnómetro; se utilizó la ecuación 1. Al destilado obtenido se le determinó el grado alcohólico con la ayuda del picnómetro (AOAC International, 1995). Con el volumen del destilado y los grados alcohólicos se determinó la cantidad de alcohol obtenido en el proceso de fermentación por cada litro de la solución de pulpa fermentada.

$$\rho = \left(\frac{m_c - m_a}{m_b - m_a} \right) * \rho_{H_2O}$$

Donde la ρ es la densidad de la muestra destilada (g/ml), m_a es la masa del picnómetro vacío (g), m_b es la m_b masa m_a del picnómetro lleno de agua destilada (g), m_c es la m_c masa del picnómetro lleno con muestra de pulpa (g) y la densidad del agua ρ_{H_2O} a 20 ° ρ_{H_2O} C (Garduño *et al.*, 2014). Debido a que en la ecuación anterior se tiene como resultado la densidad de la muestra, se buscaban los valores tabulados correspondientes al peso del etanol en % (Vogt, 1972).

Análisis estadístico

El análisis estadístico se hizo con el *software* Statgraphics Centurion XV. Los datos obtenidos se obtuvieron por triplicado de los parámetros fisicoquímicos (pH, sólidos solubles, acidez color y DQO) y microbiológicos (recuento de BAL y recuento de levaduras). Estos se sometieron a análisis de varianza simple (ANOVA) con el fin de evaluar el efecto del tiempo de fermentación y los rendimientos para cada uno de los tratamientos. Las diferencias estadísticas entre las medias se determinaron mediante comparaciones (LSD) de Fisher y se consideraron significativas a $P < 0,05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización fisicoquímica de la pulpa

Los datos obtenidos en la caracterización fisicoquímica de la pulpa se muestran en la tabla 1. Se puede observar que en términos generales la pulpa obtenida del beneficio húmedo está constituida en su mayoría por material orgánico debido a que la DQO es muy elevada. También presenta otros componentes como nitrógeno, lignina, celulosa, hemicelulosa, cafeína, taninos y demás.

Etapas de fermentación

La etapa de fermentación consiste en un proceso biológico de degradación anaerobia de los azúcares presen-

Tabla 1. Caracterización de la biomasa en las dos fases experimentales.

Fase		Fase preliminar		Fase de verificación a mayor escala	
Parámetro		TP-1	TP-2	TP-3	TP-4
pH		4,71±0,03	4,63±0,01	4,42±0,07	4,41±0,01
Sólidos solubles (°Brix)		1,97±0,06	2,90±0,00	6,56±0,21	10,27±0,44
Acidez (g/L)		0,72±0,02	1,08±0,01	3,54±0,45	3,96±0,36
Color	L*	33,91±0,03	32,00±0,11	27,42±0,14	26,92±0,42
	a*	8,14±0,03	9,46±0,04	6,08±1,00	4,96±0,13
	b*	11,07±0,01	8,04±0,12	2,31±0,54	3,72±0,43
DQO (ml/L)		-	-	93270,00±3222,28	332666,67±19139,84

tes, principalmente glucosa u otros nutrientes orgánicos hasta bioetanol y otros compuestos formados durante la fermentación (Puerta, 2010). Para este estudio se realizó el método de fermentación anaerobia no controlada, en el cual no se usa la pasteurización de la materia. En primera instancia se realizó la caracterización de la pulpa para luego dejarla fermentar en ausencia de oxígeno, además de colocar una trampa de gases con el fin de facilitar la salida de los gases producidos en la fermentación y evitar presiones excesivas. Dependiendo de los sólidos solubles de la pulpa varía el tiempo de fermentación como se muestra en los siguientes subtítulos.

1. Fermentación en fase preliminar

Una vez obtenidos los mostos de ambos tratamientos de la fase preliminar con levaduras nativas presentes en las muestras se procedió con los ensayos; se realizó el seguimiento de los parámetros como se muestra en la tabla 2 durante el proceso de fermentación de 20 días; cuando la actividad de las levaduras fue baja se detuvo el proceso ya que si continuaba se generaba acetogénesis (Suárez *et al.*, 2019). Para cada parámetro se realizó un análisis con el fin de explicar los cambios que suceden durante el proceso fermentativo.

Durante el seguimiento del proceso se observó una tendencia similar en el comportamiento de los sólidos solubles, lo que indica una disminución debido a que los microorganismos presentes han consumido los azúcares para realizar procesos biológicos, siendo este comportamiento típico según lo observado por Puerta (2012). Los datos obtenidos en el parámetro de los sólidos solubles generaron curvas similares para los dos tratamientos, como la tendencia reportada por Guevara *et al.* (2012) y Rodríguez (2013). En el caso del tratamiento TP-2, se observa que los sólidos solubles varían según la descomposición de la biomasa; por tanto, disminuye hasta estabilizarse, además de encontrarse un mayor descenso de los sólidos solubles, lo cual indica que el pretratamiento

de este residuo antes de la fermentación favorece la hidrólisis y la conversión de los azúcares hasta bioetanol.

El seguimiento del pH durante el tiempo de fermentación para TP-1 y TP-2 muestra un comportamiento similar durante el tiempo del ensayo. Durante los primeros días (0-8) se observa un descenso que puede ser debido a la transformación de los azúcares presentes en bioetanol y la desorción del CO₂ generado; a medida que se incrementa el tiempo de fermentación disminuye el pH. Esta disminución es debido a la salida de CO₂ y a la producción de ácidos; este comportamiento es similar a lo reportado por otros autores (Puerta, 2013; Rodríguez, 2013).

La acidez del material con los dos tratamientos se basó en el equivalente de ácido láctico; se observa que a medida que se incrementa el tiempo de fermentación aumenta la acidez. Según Acosta (2012), un elevado contenido de acidez inicial genera una baja velocidad de fermentación; esta investigación inicia con una baja acidez y a medida que pasa el tiempo aumenta gradualmente. Según Marín *et al.* (2003), al transcurrir la fermentación comienzan los procesos catabólicos por la degradación de la membrana celular y la presencia de los compuestos químicos y microorganismos que se derivan de este proceso, por tanto contribuyen al aumento de la acidez.

El color del tratamiento para pulpa y pulpa triturada con el espacio CIELab permitió una mejor observación de la evaluación del oscurecimiento del material. Teniendo en cuenta la coloración, se tomó como base representativa las coordenadas L y a* indicando un retroceso con respecto al tiempo atribuido a la homogenización del tratamiento. En este caso no se puede establecer relación entre ambos aspectos pues las concentraciones no siguieron una tendencia clara durante el proceso fermentativo; por lo tanto, se encuentra en el rango de la luminosidad poco oscura (Chiralt *et al.*, 2007) debido a la oxidación del material, lo cual aumenta la acidez haciendo que varíe la mecanización.

Tabla 2. Evolución de parámetros fisicoquímicos presentes en los dos tratamientos de la pulpa de café en el ensayo preliminar.

Tratamiento	Días/ parámetro	pH	Sólidos solubles (°Brix)	Acidez (g/L)	Color		
					L*	a*	b*
TP-1	0	4,71±0,03	1,97±0,06	0,72±0,02	33,91±0,03	8,14±0,03	11,07±0,01
	8	4,23±0,02	3,10±0,00	7,20±0,20	40,45±0,01	7,36±0,02	15,21±0,02
	15	4,24±0,01	2,67±0,23	9,43±0,03	33,35±0,16	6,41±0,41	9,08±0,49
	20	4,28±0,02	2,97±0,06	9,43±0,02	35,93±0,09	5,73±0,03	11,38±0,06
TP-2	0	4,63±0,01	2,90±0,00	1,07±0,01	31,99±0,11	9,46±0,04	8,04±0,12
	8	4,16±0,03	2,00±0,00	4,23±0,02	41,54±0,03	5,76±0,02	16,17±0,03
	15	4,18±0,03	1,97±0,06	6,48±0,01	31,87±0,09	7,68±0,02	8,25±0,08
	20	4,15±0,01	2,00±0,00	6,21±0,01	31,88±0,06	7,59±0,17	8,99±0,21

2. Fermentación en ensayo a mayor escala

Luego de obtener resultados del ensayo preliminar de la pulpa se procede a realizar el ensayo a mayor escala siguiendo la metodología descrita anteriormente. Tras la puesta en marcha de los ensayos se modificó el tiempo de fermentación a cinco días; la adición de levaduras *Saccharomyces cerevisiae* (Var. bayanus) se realizó según el seguimiento de los parámetros de la tabla 3.

Para el parámetro de pH se observó que poseen comportamiento similar; al adicionar levadura hubo mejores rendimientos en el tiempo de fermentación y producción

de bioetanol. Los resultados muestran que a medida que se incrementa el tiempo de fermentación disminuye el pH; en el rango de tiempo (0-2 días) hay transformación de compuestos químicos en producción de alcohol, ácidos lácticos y CO₂ que posteriormente se estabiliza inhibiendo el crecimiento de microorganismos en el rango de tiempo (2-5 días) y finalmente genera acetogénesis del alcohol siendo este comportamiento similar al reportado por Puerta (2013) y Rodríguez (2013).

La coordenada a* del sistema CIELab tomó una tonalidad entre rojo y verde; se reveló la presencia de valores de concentraciones de taninos según lo reportado por Noriega *et al.*, (2009), lo cual se ve reflejado en la curva

Tabla 3. Evolución de parámetros fisicoquímicos presentes en los dos tratamientos de la pulpa de café en el ensayo a mayor escala.

Tratamiento	Días/ Parámetro	pH	Sólidos solubles (°Brix)	Acidez (g/L)	Color			DQO Total (mg/L)	DQO Soluble (mg/L)
					L*	a*	b*		
TP-3	0	4,42 ±0,07	6,56 ±0,21	3,54 ±0,45	27,42 ±0,14	6,08 ±1,00	2,32 ±0,54	93270,00 ±3222,28	52683,67 ±1816,24
	1	4,23 ±0,04	6,37 ±0,39	5,12 ±0,29	29,38 ±0,13	12,50 ±0,84	5,47 ±0,79		
	2	4,02 ±0,05	5,74 ±0,22	6,99 ±1,17	29,42 ±1,57	11,51 ±2,02	5,49 ±2,55		
	3	4,00 ±0,06	5,43 ±0,13	8,21 ±0,73	28,13 ±1,60	10,46 ±2,06	4,61 ±2,18		
	4	3,97 ±0,09	5,33 ±0,13	9,66 ±0,86	27,08 ±1,70	10,49 ±1,87	4,69 ±1,94		
	5	3,92 ±0,04	5,26 ±0,09	10,09 ±1,02	29,39 ±0,94	10,90 ±1,20	5,82 ±1,62	189667,00 ±11503,6	
TP-4	0	4,41 ±0,01	10,27 ±0,44	3,96 ±0,36	26,92 ±0,42	4,96 ±0,13	3,72 ±0,43	332666,67 ±19139,84	292333,33 ±18610,03
	1	4,23 ±0,03	10,24 ±0,24	4,37 ±0,41	26,33 ±0,14	5,93 ±0,61	1,24 ±0,10		
	2	4,03 ±0,02	7,74 ±0,13	7,64 ±2,77	26,97 ±0,38	9,37 ±1,79	2,44 ±0,73		
	3	3,93 ±0,02	6,99 ±0,06	11,03 ±0,59	27,17 ±0,43	11,30 ±1,17	3,29 ±0,72		
	4	3,88 ±0,04	6,88 ±0,07	13,43 ±1,60	28,08 ±0,59	10,85 ±1,54	3,88 ±0,96		
	5	3,85 ±0,03	6,67 ±0,05	13,99 ±0,66	26,41 ±0,59	11,27 ±1,42	3,36 ±0,77	381166,67 ±18610,03	

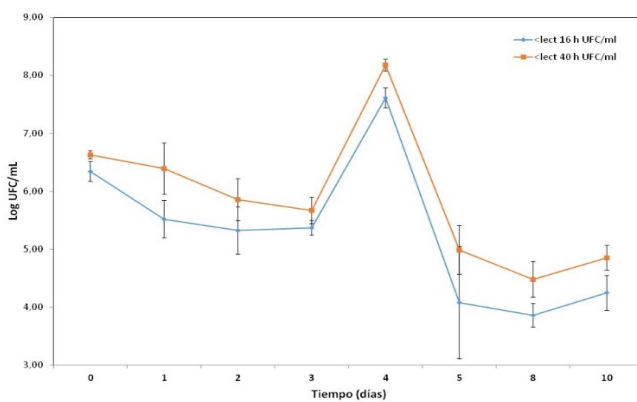
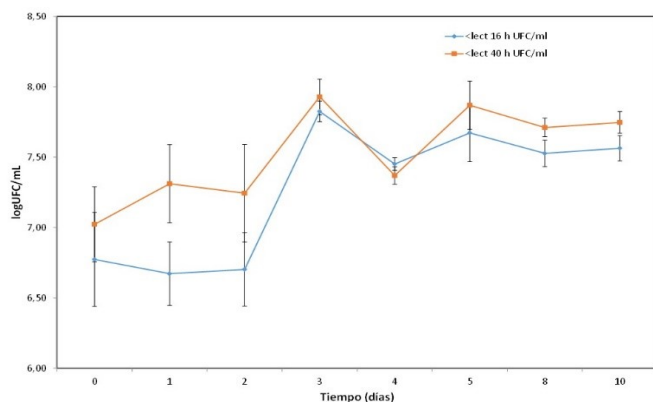


Figura 1. Recuento de BAL (izquierda) y levaduras (derecha) durante el proceso de fermentación con la biomasa de pulpa de café.

cromática de la coordenada a^* , donde se puede observar que para el tratamiento con TP-3 en el intervalo de tiempo 0 y 1 día hay un brusco incremento pasando de 6,08 a 12,50 y que luego hay un descenso suave para los siguientes días; en cambio, en el tratamiento TP-4 se presenta un incremento moderado en el intervalo de tiempo de 0 a 3 días y se estabiliza hasta el día 5. Tuvo una tonalidad rojiza en todo su proceso y estuvo en un rango de 8,56 y 10,71 tal como lo describe Chiralt *et al.* (2007). Esto indica que triturar y agregar las cepas de levaduras influye en el cambio de las coordenadas L y a^* .

El parámetro de DQO total en el ensayo presentó un incremento en este valor en el tratamiento de pulpa triturada con levadura debido a que se encuentra un mayor contenido de microorganismos en el medio y debido a la cantidad de oxígeno que requiere para oxidar la materia orgánica, lo cual difiere con lo descrito por Ramírez *et al.* (2015). Así, podemos decir que el 74,6 % de contaminación en el proceso de beneficio por 60 kg de café almendra de exportación es producido por la pulpa ya que se genera mayor volumen.

En la curva de crecimiento de las BAL en la pulpa de café se puede detallar que entre los días 0 y 4 se encuentra la fase exponencial y posteriormente se encuentra la fase de muerte para los días 4 y 5 tanto para las 16 como para las 40 horas de recuento de colonias, lo que forma curvas similares (figura 1). Se obtuvo un crecimiento máximo de 7,93 logUFC/ml que se presentó a los 3 días para las 16 horas y de 7,82 logUFC/ml para las 40 horas. Blandon *et al.* (1999), reportan identificación de microorganismos del género *Enterobacter*, *Staphylococcus*, *Serratia*, *Candida*, *Escherichia*, *Citrobacter*, *Hafnia* y *Streptomyces*. La comparación de sólidos solubles con el máximo crecimiento de BAL durante los primeros 2 o 3 días coincide con el máximo descenso de

sólidos solubles, lo cual es coherente ya que es la etapa de máximo crecimiento o exponencial donde se están consumiendo todos los azúcares disponibles.

En la figura se presenta la curva de crecimiento de las levaduras en la pulpa de café. Se puede detallar que entre los días 0 y 3 se encuentra la fase latencia; luego, entre los días 3 a 4 se encuentra la fase exponencial y posteriormente se encuentra la fase de muerte para los días 4 a 5. Para las 16 y las 40 horas de recuento de colonias se obtuvo un crecimiento máximo de 7,61 logUFC/ml que se presentó a los 3 días para las 16 horas y de 8,18 logUFC/ml para las 40 horas, siendo curvas similares. Tal como describen Blandon *et al.* (1999), se identifican microorganismos unicelulares (levaduras) como son *Torulopsis* y *Rhodotorula*.

Determinación de la concentración de etanol

1. Concentración de etanol en el ensayo fase preliminar

Una vez finalizada la etapa de fermentación en cada ensayo con pulpa y pulpa triturada de café, las muestras obtenidas fueron procesadas mediante el método de destilación simple usando como base un volumen de 250 ml. En el ensayo preliminar los resultados no fueron significativos debido a que este proceso no estaba ajustado aún y la idea era establecer un protocolo para el resto de ensayos. En este sentido la destilación realizada en estos ensayos no fue favorable, es decir, no se obtuvo un volumen de bioetanol representativo debido al tiempo prolongado de la fermentación; es probable que el etanol formado se haya convertido en ácidos y compuestos gaseosos según lo reportado por Puerta (2012).

2. Concentración de etanol en el ensayo a mayor escala

La destilación para este proceso se llevó a cabo mediante el método de destilación simple. Las muestras con

Tabla 4. Bioetanol obtenido de la biomasa de pulpa y pulpa triturada de café, pulpa y pulpa triturada de café con levadura y resultado del cálculo de biogás teórico.

Parámetros	Pulpa de café	Pulpa triturada de café	Pulpa de café	Pulpa triturada con levadura
Densidad (g/cm ³)	0,9936	0,9945	0,9929	0,9886
Peso del etanol %	3,46	2,97	3,85	6,60
Q biogás inicial (m ³ /d)	-	-	13,90	77,12
Q biogás vinazas (m ³ /d)	-	-	197,88	160,42

pulpa de café y pulpa triturada con levadura revelaron valores de etanol importantes. Se obtuvo una cantidad de bioetanol superior al reportado por Villa *et al.* (2019), que fue de 1,84 ml de bioetanol hidratado a partir de 500 g de la mezcla pulpa-agua.

Se obtuvo como resultado un mejor rendimiento en la producción de bioetanol con la adición de la levadura ya que hay una mayor eficiencia en la conversión de azúcares (Puerta, 2012). Al analizar los datos del peso del etanol (%) para la pulpa de café se obtuvo un 3,85 %. Se destaca el aumento de casi el 50 % con pulpa triturada más levadura que llegó a 6,6 % ya que la pulpa de café demora 45 días en la descomposición en condiciones de anaeróbicas (Balseca y Cabrera, 2011).

Determinación del potencial teórico de producción de biogás

La cantidad de biogás que potencialmente puede producirse se determinó teniendo en cuenta la DQO total y soluble de la pulpa y las vinazas producidas. Partiendo de que teóricamente es posible obtener 350 ml de biogás por gramo de DQO eliminada anaeróticamente (Del Real Olvera *et al.*, 2007), se observó que en el caso de la pulpa fresca la cantidad de biogás obtenida fue de 13,90 m³/d (tabla 4). Una vez finalizado el proceso de fermentación se obtuvieron unos residuos llamados vinazas los cuales deben ser tratados posteriormente. El volumen aproximado de las vinazas tras la fermentación fue de 91,8 ml. Estas vinazas presentaron una DQO elevada y en torno a 750 000 mg/L para la pulpa. Si estas son tratadas anaeróticamente en un digestor podría producirse hasta 197,88 m³ biogás/día.

En la producción de biogás se obtuvo una degradación de la materia orgánica en un 56 % para la pulpa. Se observó que al final de la fermentación, el biogás producido teóricamente es un 42,7% superior, como reportaron Rodríguez y Zambrano (2010). Por cada kilogramo de pulpa fresca genera 25 L de biogás y por cada kilogramo de DQO genera 287 L de metano, siendo el biogás una mezcla gaseosa constituida por metano que oscila

entre el 50 % y el 80 % y gas carbónico con pequeñas trazas de vapor de agua, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, amoníaco, monóxido de carbono, nitrógeno, oxígeno y trazas de compuesto orgánicos (Kumar *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES

Esta investigación confirma que el residuo generado en el proceso de beneficio húmedo del café (pulpa), dependiendo del estado de maduración, es un excelente reservorio de azúcares que pueden ser metabolizados en bioetanol.

El aprovechamiento de estos recursos renovables impactaría positivamente en los aspectos económicos y ambientales de la región cafetera y sería una alternativa para disminuir la contaminación ambiental.

Esta investigación sirve como punta de partida para las investigaciones que se desarrollen en este tema, además de avanzar hacia un proceso sustentable y amigable con el medio ambiente, producir alternativas de desarrollo y promover el uso de energías limpias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida por parte de la Universidad Surcolombiana y el Centro Surcolombiano de Investigación en Café (Cesurcafé), Huila-Colombia. También al doctor Nelson Gutiérrez por su apoyo y comentarios en este trabajo.

REFERENCIAS

- Acosta, C. (2012). *Evaluación de la fermentación alcohólica para la producción de Hidromiel* (tesis de maestría). Universidad Nacional De Colombia, Bogotá. Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/12251>
- AOAC International. (1995). *Official Methods of Analysis of AOAC International*. AOAC International.

- APHA (2005) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association.
- Ayodele, B., Alsaffar, M. y Mustapa, S. (2020). An overview of integration opportunities for sustainable bioethanol production from first- and second-generation sugar-based feedstocks. *Journal of Cleaner Production*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118857>.
- Balseca, D. y Cabrera, J. (2011). *Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café* (tesis de pregrado). Universidad de Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/454/1/IAD-2011-T004.pdf>.
- Blandon, G., Dávila, M y Rodríguez, N. (1999). Caracterización Microbiológica y físico-química de la pulpa de café sola y con mucílago en proceso de lombricompostaje. *Cenicafé*, 50(1), 5-23.
- Chiralt, A., Martínez, N, González, C., Talens, P y Moraga, G. (2007). *Propiedades físicas de los alimentos*. Universitat Politècnica de València.
- Del Real Olvera, J, Prieto García, F, Santos López, E.M, Román Gutiérrez, A.D, & Gordillo Martínez, A.J. (2007). Factibility of treat winery wastewater through anaerobic biodigestion with a from cow's waste. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 30(2), 128-135. Recuperado en 15 de septiembre de 2021, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702007000200003&lng=es&tlng=en.
- Echeverri, D., Buitrago, L., Montes, F., Mejía, I. y Gonzáles, M. (2005). Coffee for cardiologists. *Revista Colombiana de Cardiología*, 11(7), 375-365.
- Fernández, Y., Sotto, K. y Vargas, L. (2020). Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Producción y Limpia*, 15(1), 93-110. <https://doi.org/10.22507/PML.V15N1A7>.
- Figueroa, E., Pérez, F. y Godínez, L. (2012). La producción y el consumo del café. *Ecorfan*. www.ecorfan.org/spain.
- FNBC. (2019). Información Estadística Sector Biocombustibles. *Federación Nacional De Biocombustibles De Colombia*. [http://www.fedebiocombustibles.com/v3/estadistica-mostrar_info-titulo-Alcohol_Carburante_\(Etanol\).htm](http://www.fedebiocombustibles.com/v3/estadistica-mostrar_info-titulo-Alcohol_Carburante_(Etanol).htm).
- FNC. (2014). *Ensayos sobre Economía Cafetera*. FNC.
- FNC. (2016). Colombia produjo 14,2 millones de sacos de café en el año 2016. *Federación Nacional de Cafeteros de Colombia*. <https://www.federaciondefeteros.org>
- FNC. (2019). Producción de café de Colombia cerró el 2019 en 14,8 millones de sacos. *Federación Nacional De Cafeteros De Colombia*. <https://federaciondefeteros.org/wp/listado-noticias/produccion-de-cafe-de-colombia-cerro-el-2019-en-148-millones-de-sacos/#:~:text=Exportaciones crecieron 7 por ciento, en el exterior en 2018>.
- Garduño, A., López, I., Ruíz, A. y Martínez-Romero, S. (2014). Simulación del proceso de fermentación de cerveza artesanal. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(2), 221-232. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(14\)72212-7](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(14)72212-7)
- Guevara, C., Arenas, H., Mejía, A. y Peláez, C. (2012). Obtención de etanol y biogás a partir de banana de rechazo. *Información Tecnológica*, 23(2), 19-30. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000200004>.
- Hurtado, G. (2012). *Análisis del comportamiento promedio y tendencias de largo plazo de la temperatura máxima media para las regiones hidroclimáticas de Colombia*. IDEAM Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- Kumar, V., Kumar, P., Kumar, P. y Singh, J. (2020). Anaerobic digestion of Azolla pinnata biomass grown in integrated industrial effluent for enhanced biogas production and COD reduction: Optimization and kinetics studies. *Environmental Technology & Innovation*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100627>.
- Londoño, L., Ruiz, H., Ramírez, T., Ascacio, J., Rodríguez, R. y Aguilar, C. (2020). Fungal detoxification of coffee pulp by solid-state fermentation. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101467>.
- Madigan, M., Martinko, J., Dunlap, P. y Clark, D. (2009). *Brock. Biología de Los microorganismos*. Pearson Educación.
- Marín, S., Arcila, J., Montoya, E. y Oliveros, C. (2003). Cambios físicos y químicos durante la maduración del fruto de café (*Coffea arabica* L. var. Colombia). *Cenicafé*, 54(3), 208-225.
- Noriega, A., Silva, R. y García, M. (2009). Composición química de la pulpa de café a diferentes tiempos de ensilaje para su uso potencial en la alimentación animal. *Zootecnia Tropical*, 27(2), 135-141.
- Puerta, G. (2012). Factores, procesos y controles en la fermentación del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, (422), 1-12.
- Puerta, G. (2010). Fundamentos del proceso de fermentación en el beneficio del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, (402), 1-12.

- Puerta, G. (2013). Cinética química de la fermentación del mucílago de café a temperatura ambiente. *Cenicafé*, 64(1), 42-59. <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/525/1/arc064%2801%2942-59.pdf>.
- Ramírez, C., Oliveros, C. y Sanz, J. (2015). Manejo de lixiviados y aguas de lavado en el proceso de beneficio húmedo del café. *Cenicafé*, 66(1), 46-60. <https://www.cenicafe.org/es/publications/5.Manejo.pdf>.
- Ravindran, R., Jaiswal, S., Abu-Ghannam, N. y Jaiswal, A. (2017). Two-step sequential pretreatment for the enhanced enzymatic hydrolysis of coffee spent waste. *Bioresource Technology*, 239, 276-284. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.049>.
- Rodríguez, N. (2009). *Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas* (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/4342/tesisUPV3023.pdf>.
- Rodríguez, N. (2013). Producción de alcohol a partir de la pulpa de café. *Cenicafé*, 64(2), 78-93. [http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/541/1/arc064\(02\)78-93.pdf](http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/541/1/arc064(02)78-93.pdf).
- Rodríguez, N. y Zambrano, D. (2010). Los subproductos del café: fuente de energía renovable. *Avances Técnicos Cenicafé*, (393), 1-8. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/351/1/avt0393.pdf>.
- Soomro, A., Abbasi, I., Ni, Z., Ying, L. y Liu, J. (2020). Influence of temperature on enhancement of volatile fatty acids fermentation from organic fraction of municipal solid waste: Synergism between food and paper components. *Biore-source Technology*, 304. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122980>.
- Suárez, V., López, I. y Álvarez, M. (2019). Estimación de la producción de biogás a partir de un modelo de simulación de procesos. *Centro Azúcar*, 46(1), 73-85.
- Suarez, J. (2012). *Aprovechamiento de los residuos sólidos provenientes del beneficio del café, en el municipio de Betania Antioquia: usos y aplicaciones* (tesis de posgrado). Corporación Universitaria Lasallista, Caldas, Colombia. http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/627/1/APROVECHAMIENTO_RESIDUOS_SOLIDOS_BENEFICIO_CAFE.pdf.
- Vegro, C. y Florêncio, L. (2020). Global coffee market: Socio-economic and cultural dynamics. *Coffee Consumption and Industry Strategies in Brazil*, 3-19. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814721-4.00001-9>.
- Villa, A., Da Silva, R., Palladino, D., Borin, V., De Oliveira, V., Silva, E. y Amâncio, M. (2019). Optimization of key factors affecting hydrogen production from coffee waste using factorial design and metagenomic analysis of the microbial community. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 4205-4222. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.062>.
- Vogt, E. (1972). *Fabricación de vinos*. Acibia.