

**ESTABILIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL DE LA PULPA DE CAFÉ  
MEDIANTE PROCESOS BIOQUÍMICOS: VERMICOMPOSTAJE Y DIGESTIÓN  
ANAEROBIA**

**SANDRA LILIANA QUINTERO DÍAZ**

Bióloga

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2016**

**ESTABILIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL DE LA PULPA DE CAFÉ  
MEDIANTE PROCESOS BIOQUÍMICOS: VERMICOMPOSTAJE Y DIGESTIÓN  
ANAEROBIA**

**SANDRA LILIANA QUINTERO DÍAZ**

Bióloga

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
**MAGISTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

Directoras

**Liliana del Pilar Castro Molano**

Ph.D. en Ingeniería Química

**Mabel Juliana Quintero Silva**

M.Sc. en Ciencias Básicas Biomédicas

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2016**

## **DEDICATORIA**

A:

***DIOS** quién supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento*

***MIS PADRES** Ernesto y Elena Con todo mi cariño y mi amor Hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.*

***MIS HERMANOS** Oscar Gonzalo, Mario Augusto y Juan Carlos Por estar siempre presentes acompañándome, asesorándome y ayudarme siempre Con todo mi cariño.*

***MI ESPOSO** Juan Alexander Por sus palabras y confianza, por su amor y brindarme el tiempo necesario para desarrollarme profesionalmente.*

***MIS HIJAS** Andrea Valentina y Valerie Juliana Mis hermosos ángeles, por quienes vale la pena el esfuerzo, para que un día alcancen también sus sueños profesionales.*

***MI FAMILIA** por su colaboración y apoyo en este camino. Por siempre allí.*

*Sandra Lílana*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la profesora Liliana Castro, por su dirección, aportes y acompañamiento en el desarrollo de este trabajo, por su paciencia, tiempo y dedicación.

A la profesora Mabel Juliana por su ayuda en el transcurso de todo el proyecto, por su apoyo y sus sugerencias, por animarme a continuar con esta tarea.

A mi familia por todo su amor, confianza y paciencia.

A mi hija Andrea Valentina por estar conmigo siempre en las buenas y en las malas, por las largas noches juntas, ser mi mano “izquierda” y mi apoyo incondicional. Te amo hija.

A José, Luis y Luis Alberto por su colaboración, por transmitirme sus conocimientos en el manejo del laboratorio y su ayuda oportuna e incondicional.

A cada uno de los miembros del grupo de biotecnología por su ayuda, sus palabras, su compañía, especialmente a Dianita que siempre estuvo allí apoyándome y ayudándome.

A mis compañeros de trabajo que siempre me daban aliento para continuar y me apoyaron siempre.

A mis compañeros y amigos que formaron parte de esta etapa de mi vida, quienes sin esperar nada a cambio compartieron sus conocimientos, alegrías y a todas aquellas personas que durante este tiempo estuvieron a mi lado apoyándome y lograron que este sueño se haga realidad.

A todos gracias...

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	21
1.1 OBJETIVO GENERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	22
2.1 BENEFICIO DEL CAFÉ	23
2.2 PULPA DE CAFÉ	25
2.3 DIGESTIÓN ANAEROBIA (DA)	27
2.3.1 Etapas de la digestión anaerobia	27
2.3.1.1 Hidrólisis	27
2.3.1.2 Acidogénesis	27
2.3.1.3 Acetogénesis	28
2.3.1.4 Metanogénesis	28
2.3.2 Variables del proceso de digestión anaerobia	29
2.3.2.1 Parámetros ambientales	29
2.3.2.2 Parámetros operacionales	30
2.3.3 Beneficios de la digestión Anaerobia	30
2.3.4 Estado del arte	31
2.4 VERMICOMPOSTAJE	33
2.4.1 Lombrices	34
2.4.1.1 Lombriz roja ( <i>Eisenia foetida</i> )	35
2.4.2 Condiciones para el proceso de vermicompostaje	36
2.4.3 Ventajas del proceso de vermicompostaje	37
2.4.4 Estado del arte	38

3. METODOLOGÍA	41
3.1 ETAPA 1. CARACTERIZACIÓN DE LA PULPA DE CAFÉ	41
3.2 ETAPA 2. CARACTERIZACIÓN DEL INOCULO	43
3.3 ETAPA 3 DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA PULPA DE CAFÉ OPERACIÓN DISCONTINUA	45
3.4 ETAPA 4. ELABORACIÓN DE VERMICOMPOST A PARTIR DE PULPA DE CAFÉ	47
3.5 ETAPA 5. CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA Y VERMICOMPOSTAJE	50
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
4.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA PULPA DE CAFÉ (PC)	52
4.1.1 Evaluación de la cinética de consumo de azúcares y ácidos grasos del proceso de DA con PC	52
4.1.2 Relación entre sólidos volátiles y sólidos totales	55
4.1.3 Cinética de producción de metano y porcentaje de biometanización	57
4.2 VERMICOMPOSTAJE DE LA PULPA DE CAFÉ	62
4.2.1 pH	62
4.2.2 Temperatura	63
4.2.3 Humedad	64
4.2.4 Porcentaje de Descomposición	66
4.2.5 Densidad poblacional	68
4.2.6 Degradación del Sustrato	69
4.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS DE LA DEGRADACIÓN BIOQUÍMICA DE LA PULPA DE CAFÉ: DIGERIDO Y VERMICOMPOST	71
4.3.1 Evaluación del digerido producto de la digestión anaerobia de la pulpa de café	71
4.3.2 Evaluación del Proceso del Vermicompostaje de la Pulpa de Café	74

5. CONCLUSIONES	79
BIBLIOGRAFÍA	81
ANEXOS	86

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fruto del café (cereza o drupa)	23
Figura 2. Proceso del beneficio húmedo del café	24
Figura 3. Representación esquemática de la digestión anaerobia	29
Figura 4. Finca La Esperanza. Municipio de Aratoca Santander	41
Figura 5. Cama de madera para vermicompostaje	48
Figura 6. Sustrato maduro con lombrices californianas ( <i>Eisenia foetida</i> )	49
Figura 7. Cinética del consumo de ART a RIS 2 T= 39° C	52
Figura 8. Producción de AGV a RIS 2 T= 39° C de la PC	53
Figura 9. Capacidad buffer para la DA de la pulpa de café	54
Figura 10. pH para la DA de la pulpa de café	55
Figura 11. Relación entre sólidos volátiles y sólidos totales en la DA de la pulpa del café	56
Figura 12. Producción de metano en el proceso de la DA de la pulpa del café	57
Figura 13. Potencial de biometanización de la DA pulpa del café	59
Figura 14. Variación del pH durante el vermicompostaje	63
Figura 15. Variación de la temperatura durante el proceso de vermicompostaje	64
Figura 16. Variación de la humedad durante el vermicompostaje	65
Figura 16. Proceso de degradación de la pulpa de café	67
Figura 17. Densidad poblacional de la lombriz <i>Eisenia foetida</i> en la pulpa de café	69
Figura 18. Perdida de sustrato en el proceso de vermicompostaje de la PC	70
Figura 18. Esquema de utilización de los fertilizantes procedentes de la digestión anaerobia en las plantas	71

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Ventajas de la digestión anaerobia	31
Tabla 2. Caracterización físico-química de la pulpa de café	42
Tabla 3. Caracterización Físicoquímica del EBE	43
Tabla 5. Resultados de análisis de microorganismos patógenos en EB	44
Tabla 6. Variables respuesta de la digestión anaerobia	46
Tabla 7. Métodos y normas utilizados para la caracterización de los productos de digestión anaerobia y vermicompostaje	50
Tabla 7. Descomposición de la pulpa de café durante el proceso de vermicompostaje	66
Tabla 8. Requerimiento nutricional del cultivo de café y análisis físicoquímico del suelo y efluente	72
Tabla 9. Requerimiento nutricional del cultivo de café y análisis físicoquímico del vermicompostaje	75

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Método de desplazamiento alcalino	86
Anexo B. Determinación de la concentración de azúcares reductores totales (ART)	88
Anexo C. Determinación de la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), y alcalinidad total (AT)	90
Anexo D. Determinación de sólidos totales fijos y volátiles en muestras sólidas y semisólidas	92

## ABREVIATURAS

<b>AA</b>	Actividad acidogénica
<b>AAc</b>	Actividad acetogénica
<b>AGV</b>	Ácidos grasos volátiles
<b>AH</b>	Actividad hidrolítica
<b>ART</b>	Azúcares reductores totales
<b>AT</b>	Alcalinidad total
<b>BAB</b>	Bacterias acetogénicas del butirato
<b>BAE</b>	Bacterias anaerobias estrictas
<b>BAP</b>	Bacterias acetogénicas del propionato
<b>BFG</b>	Bacterias fermentadoras de glucosa
<b>BFL</b>	Bacterias fermentadoras de lactosa
<b>BSRA</b>	Bacterias sulfatorreductoras del acetato
<b>BSRL</b>	Bacterias sulfatorreductoras del lactato
<b>DA</b>	Digestión anaerobia
<b>DNS</b>	Dinitrosalicílico
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>EBE</b>	Estiércol bovino estabilizado.
<b>MoS</b>	Materia orgánica seca
<b>PC</b>	Pulpa de café
<b>PBM</b>	Potencial de biometanización
<b>RIS</b>	Relación inóculo – sustrato
<b>ST</b>	Sólidos totales (mg/L); [g/Kg].
<b>SV</b>	Sólidos volátiles (mg/L); [g/Kg].
<b>SST</b>	Sólidos suspendidos totales
<b>SV</b>	Sólidos suspendidos volátiles
<b>VNTP</b>	Volumen a condiciones estándar.
<b>YPS</b>	Rendimiento de producción de biogás (m <sup>3</sup> biogás/ Kg SV)

## GLOSARIO

**Actividad Hidrolítica (AH):** También llamada actividad acidogénica o fermentativa, representa la capacidad de formar compuestos orgánicos solubles y ácidos orgánicos de cadena corta a partir de la degradación de la materia orgánica.

**Actividad Metanogénica (AME):** Representa la capacidad de los consorcios microbianos de convertir los ácidos orgánicos en metano y dióxido de carbono.

**Biosólidos:** Son materiales orgánicos que se producen principalmente durante el tratamiento de aguas residuales y se caracterizan por la posibilidad de tener un uso benéfico, determinado por el cumplimiento de los requerimientos de US EPA Norma CFR 40 Parte 503 (US EPA, 2000). Puede obtenerse por filtración o evaporación al sol hasta llegar a contenidos en sólidos del orden del 30% o superiores.

**Estiércol bovino potencializado (EBP):** EB biodegradado en tanque de potencialización, según protocolo del laboratorio de biotecnología de la Escuela de Ingeniería Química de la UIS. La potencialización se realiza con el fin de agotar su materia orgánica, y favorecer su utilización en el proceso de digestión anaerobia.

**Inóculo:** Suspensión de microorganismos que se transfieren a un medio de cultivo para facilitar su colonización.

**Pulpa de café:** Material fibroso mucilaginoso y se genera durante el procesamiento del café por vía humedad (beneficio húmedo) y en este caso se conoce como pulpa de café y constituye cerca del 40 % del peso fresco de la cereza de café.

## RESUMEN

**TITULO:** ESTABILIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL DE LA PULPA DE CAFÉ MEDIANTE PROCESOS BIOQUÍMICOS: VERMICOMPOSTAJE Y DIGESTIÓN ANAEROBIA\*

**AUTOR:** SANDRA LILIANA QUINTERO DÍAZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** PULPA DE CAFÉ, DIGESTIÓN ANAEROBIA, VERMICOMPOSTAJE

Durante el proceso de beneficio húmedo del café se generan subproductos como la pulpa siendo esta más abundante. La disposición actual de este subproducto se realiza mediante vertimientos no controlados en suelos y fuentes de agua, generando problemas ambientales.

Los procesos de digestión anaerobia y vermicompostaje son estrategias que se usan para transformar este residuo en productos de valor agregado que mejoran la economía del proceso de beneficio del café y mitigan los problemas ambientales que genera la mala disposición de este residuo, a través de la estabilización que ambos procesos permiten realizar.

Este trabajo evalúa estas dos estrategias tecnológicas con el fin de cuantificar la cantidad y calidad de estos productos y mostrar la metodología a seguir para obtenerlos.

Se emplearon reactores de 50 ml en donde 5 gr de pulpa fueron tratadas en el proceso de digestión anaerobia empleando una relación estiércol bovino (inóculo) a sustrato de (2:1). Pasados treinta días de proceso se obtuvo una cantidad de 279,75 ml CH<sub>4</sub> (STP)/kg SV de pulpa y un efluente líquido con un importante valor nutricional rico en hierro, manganeso y calcio y una relación NPK de 2/5/10.

En el proceso de vermicompostaje se trataron 40 kg de pulpa, precompostada por 30 días en contenedor de madera, a la cual se le adicionaron 600 lombrices tipo Roja californiana. Después de 96 días se obtuvieron 21,1 kg de vermicompostaje y 1390 lombrices. Este abono contiene un alto contenido de materia orgánica y otros nutrientes como zinc, manganeso, cobre y azufre y una relación de NPK de 10/5/10.

Los procesos de digestión anaerobia y vermicompostaje son adecuados para la estabilización de la pulpa de café eliminado con ello un problema ambiental obteniendo efluentes de valor agregado los cuales pueden ser empleados como fuente de energía y enmiendas para el cultivo de café.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Liliana Castro y Mabel Quintero

## ABSTRACT

**TITLE:** STABILIZATION OF RESIDUAL BIOMASS OF COFFEE PULP BY BIOCHEMICAL PROCESSES: VERMICOMPOSTING AND ANAEROBIC DIGESTION\*

**AUTHOR:** SANDRA DIAZ LILIANA QUINTERO\*\*

**KEYWORDS:** COFFEE PULP, ANAEROBIC DIGESTION, VERMICOMPOSTING

During wet processing of coffee, some by-products are generated as the coffee pulp, the most abundant. The current provision of this pulp is done by uncontrolled dumping in the ground and water sources, generating environmental problems.

The process of anaerobic digestion and vermicomposting are technological strategies that are used to transform this waste into value-added products that improve the economics of coffee's beneficiation process and mitigate environmental problems caused by poor disposal of this waste, through the stabilization that both processes allow to do.

This work evaluates these two technological strategies in order to quantify the amount and quality of these products and demonstrate a methodology to obtain them.

50 ml reactors were used, there 5 grams of pulp were treated in the anaerobic digestion process using a bovine manure ratio (inoculum) to substrate (2: 1). After thirty days of processing an amount of 279,75 CH<sub>4</sub> ml (STP) /kg SV treated pulp was obtain. Additionally, an effluent liquid with an important nutritional value rich in iron, manganese and calcium and NPK ratio of 2/5/10 was obtained too.

In the process of vermicomposting 40 kg of coffee pulp were treated, it was pre-composted during 30 days; 600 worms of Californian red type were added. After 96 days, 21.1 kg of vermicomposting and 1390 worms were obtained. This fertilizer contains a high content of organic material and other nutrients such as zinc, manganese, copper and sulfur and a ratio of NPK of 10/5/10.

The process of anaerobic digestion and vermicomposting are suitable for stabilizing coffee pulp removing an environmental problem and getting effluents with higher added value which can be used as an energy source and as amendments to the coffee cultivation.

---

\* Degree Work.Research Mode.

\*\* Physical-Chemical Engineering Faculty.Chemical Engineering School. Director: Dr. Liliana Castro y Mabel Quintero

## INTRODUCCIÓN

Colombia es el tercer país cafetero a nivel mundial después de Brasil y Vietnam, con una producción para el año 2014 de 12140000 sacos de 60 kg de café, con una productividad promedio de 915,6 kg por hectárea, para ello requiere un promedio de 948 530 hectáreas cultivadas, siendo esta una de las más altas producciones en el transcurso de los últimos 15 años. Los departamentos con mayor número de hectáreas cultivadas son Huila con 154980 ha y Tolima con 117180 ha; el departamento de Santander se encuentra en el octavo lugar con un promedio de 50320 ha (FEDECAFE, 2015).

Dos métodos distintos se emplean en el beneficio del café, la vía húmeda y la vía seca, a nivel nacional el método de beneficio húmedo del café es el más utilizado ya que se obtiene un café de alta calidad sensorial de la bebida. Este proceso es fundamental para que el grano presente una buena apariencia y una calidad adecuada para su exportación. Este método se emplea en cafetales extensos. Su empleo requiere grandes cantidades de agua aproximadamente 40 litros/kg de café pergamino (Cenicafé 1993) y los consiguientes equipos de bombeo. Las principales etapas son la recolección selección, despulpado, clasificación, remoción de mucílago, lavado y secado.

Una parte importante del beneficio de café es el secado, se debe llevar al grano entre un 10% y 12% de humedad, este proceso se realiza de forma natural utilizando la energía solar, o por medio de maquinaria especializada para este proceso; en Colombia el secado al sol es el más usado por los pequeños caficultores donde los costos de inversión y operación son razonablemente bajos, pero requirieren de grandes extensiones de tierra para realizarlo 1 m<sup>2</sup> patio para secar 70 libras de café al 55% de humedad (Anacafé 2011); mientras que aquellos que poseen terrenos amplios de cultivo utilizan tecnologías más eficientes buscando que este proceso se efectúe en una forma rápida y continúa

aunque requieren un suministro de energía para su funcionamiento tales como gas, gasolina o ACPM.

Por cada 100 kg de frutos de café maduros se generan 20% de café trillado (oro) y el 80% restante está formado por subproductos, la pulpa de café es uno de los principales de este proceso (40%), mucílago (20%), agua (17%) y pergamino y película plateada (3%). (Rodríguez, 2010).

El principal residuo del beneficio del café en húmedo es su pulpa, cuya caracterización fisicoquímica indica que posee materia orgánica, 90,88%, proteína cruda, 3,86%, taninos, 0,06% y cenizas, que indica que este residuo puede ser estabilizado mediante procesos bioquímicos, vermicompostaje digestión anaerobia (Noriega, 2009).

La digestión anaeróbica se ha constituido en una tecnología de fácil implementación que permite la estabilización y valoración de la biomasa. Esta se define como la degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno para producir biogás (metano, dióxido de carbono etc.) y digestato que contiene nutrientes, que pueden utilizarse como fertilizante orgánico o mejorador de suelos.

Esta tecnología utiliza reactores (digestores) cerrados donde se controlan los parámetros para favorecer el proceso de fermentación anaerobia, un proceso muy conocido ya que también se produce de un modo natural y espontáneo en diversos ámbitos, como por ejemplo en pantanos, yacimientos subterráneos o incluso en el estómago de los animales.

El vermicompostaje, es una tecnología de bajo costo que permite transformar residuos y subproductos orgánicos en materiales biológicamente estables, que pueden utilizarse como enmiendas, abonos para el suelo y como sustratos para cultivos sin suelo, disminuyendo el impacto ambiental de los mismos y

posibilitando el aprovechamiento de los recursos que contienen. El vermicompostaje es un proceso oxidativo controlado, el cual se desarrolla sobre sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido, y mediado por la actividad secuencial de diversos microorganismos y macroorganismos.

El vermicompostaje, implica el desarrollo de una fase termofílica que genera temporalmente fitotóxicas, siendo productos de la biodegradación el dióxido de carbono, agua, minerales y una materia orgánica estabilizada denominada vermicompost con ciertas características húmicas y libre de compuestos fitotóxicos y agentes patógenos (Zucconi y de Bertoldi, 1987).

En el municipio de Aratoca, departamento de Santander, lugar en el que se desarrolló la presente investigación, el cultivo del café constituye una de las principales actividades agrícolas, con una producción de 557 toneladas anuales, las cuales generan aproximadamente 300 toneladas de pulpa de café. Esta biomasa residual es dispuesta en los suelos sin ningún tratamiento ni control generando problemas ambientales como el aumento en el número de insectos debido al estado de putrefacción de los residuos, esto a su vez genera malos olores exponiendo la población a la generación de enfermedades, la contaminación de las aguas por incremento en la DQO entre otros. Las variedades de café cultivadas en el municipio de Aratoca son la caturra, típica y variedad Colombia, que se ubican especialmente en las veredas Clavellinas (sectores La Mesa, Corregidor, Manchego, La Laja – San Ignacio), Vereda Cantabara (sector Barinas) y Vereda San Pedro (sector Totumos, Pantano, La Palmita).

Por lo anterior, se ha considerado como alternativa de tratamiento de la pulpa de café el proceso de digestión anaerobia del cual se obtiene gas metano como potencial fuente de energía y un digerido que puede utilizarse como enmienda para suelos y el vermicompostaje que podrá ser utilizada como abono en los

cultivos cafeteros y como tecnologías potenciales para satisfacer las necesidades de unos u otros caficultores, mitigando además los problemas ambientales que se vienen presentando.

Este trabajo evaluó los procesos de digestión anaerobia y vermicompostaje como estrategias para la estabilización de la materia orgánica de la pulpa de café y su valorización como mejorador de suelos y generación de energía. La pulpa de café tomada como material de estudio fue colectada de la finca La Esperanza, vereda Cantabara Sector La Palma en el municipio de Aratoca (Santander).

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Estabilizar la pulpa de café producida en el municipio de Aratoca, mediante procesos bioquímicos de compostaje y digestión anaerobia.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar la digestión anaerobia de la pulpa de café a escala de laboratorio.
- Evaluar el vermicompostaje de la pulpa de café a escala de laboratorio.
- Comparar los procesos de compostaje y digestión anaerobia como alternativa de estabilización de la biomasa residual de la pulpa del café.

## 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Se conocen como café los granos obtenidos de unas plantas perennes tropicales (cafetos), morfológicamente muy variables, los cuales, tostados y molidos, son usados principalmente para preparar y tomar como una infusión. Taxonómicamente, todas estas plantas se clasifican como del género *Coffea*, este género pertenece a la familia de las Rubiáceas (*Rubiaceae*) nativo de Etiopía, que tiene más de 6000 especies, la mayoría árboles y arbustos. Son principalmente de origen tropical, y de una amplia distribución.

En Colombia únicamente se cultiva café 100% de la especie Arábica, el cual produce una bebida más suave. Diferentes variedades vegetales de dicha especie que se adaptan a los entornos específicos de la geografía colombiana, o una mezcla de ellas, constituyen la materia prima del café colombiano. Las principales variedades de café arábigo que se siembran en Colombia son: Típica, Borbón, Maragogipe, Tabi, Caturra y la Variedad Castillo, antes conocida como Variedad Colombia. (Fedecafé 2010).

El café llegó a Santander a finales del siglo XVIII difundándose a los departamentos de Antioquía, Tolima, Caldas, Valle del Cauca, Risaralda, Quindío, Cundinamarca, Nariño entre otros (Charlarca 1998). Para el año 2014, en Colombia los cultivos de café ocuparon una extensión de tierra equivalente a 948.530 hectáreas cultivadas.

El fruto del café (figura 1) está compuesto por la pulpa, formada por una superficie lisa o pericarpio la cual es rica en carbohidratos, proteínas, minerales y contiene cantidades apreciables de potasio, taninos, cafeína y polifenoles. (Porres et al., 1993; Roussos et al., 1995; Salmone et al., 2005). Envuelto por el pericarpio se encuentra el mucílago mesocarpio, constituido por una capa gruesa de tejido esponjoso de aproximadamente 0,5 mm de espesor, rico en azúcares y pectinas.

Los granos o almendras se encuentran revestidos por una doble membrana: la primera llamada comúnmente pergamino (endocarpio), de color amarillo pálido y de consistencia dura y frágil; la segunda, llamada plateada (tegumento seminal) más fina que la anterior y adherida al grano (albumen) (Esquivel y Jiménez 2011)

Figura 1. Fruto del café (cereza o drupa)



## 2.1 BENEFICIO DEL CAFÉ

El beneficiado de café es el proceso agro industrial que permite separar del fruto las coberturas que envuelven al grano y efectuar el secado de éste, con el fin de preservarlo para su posterior exportación o venta local para su torrefacción y molido, o efectuar otros procesos que permitan ofrecer a los consumidores distintas presentaciones de café (liofilizado, descafeinado, granulado, en bebida gaseosa y otros).

El beneficio del fruto puede realizarse de dos maneras, la primera de ellas es la vía húmeda, o beneficio natural del café, es la etapa de eliminación del mucílago por vía fermentativa y es una de las etapas más importantes dentro del proceso de beneficio ya que la calidad final del grano dependerá en gran medida de la bondad

de la fermentación practicada. El proceso incluye la acción microbiana y es adoptado para producir un café de alta calidad, particularmente de granos de la especie *Coffea arabica*. Este método comprende dos series de operaciones básicas que se pueden incluir en las dos etapas de despulpado y lavado-secado, incluyéndose en el lavado la eliminación del mucílago. (Figura 2)

La segunda vía o beneficio por vía seca es un proceso no microbiano. En este método los frutos maduros se mantienen en el árbol mientras experimentan una deshidratación parcial. Entonces se recolectan, secándose al sol hasta que se alcanza un contenido en humedad de 10 - 11 %. A continuación se descascaran. Este procedimiento resulta más económico que el método húmedo y se usa principalmente para la variedad de café robusta, que presenta una pulpa fina que permite el secado directo. (Braham y Bressani, 1978).

Figura 2. Proceso del beneficio húmedo del café



Fuente. Autor

La vía húmeda es la más utilizada en Colombia ya que se obtiene un café de alta calidad sensorial en la bebida. Este proceso es fundamental para que el grano presente una buena apariencia y una calidad adecuada para su exportación. En el procesamiento de 100 kg de frutos de café maduros generan 20% de café trillado (oro) y el 80% restante está formado por subproductos, como pulpa fresca (40%), mucílago (20%), agua (17%) y pergamino y película plateada (3%) (Amaya et al., 1988).

El proceso de secado busca disminuir el agua del grano de café, previamente lavado y escurrido de una forma natural o mecánica. Después del proceso el café debe quedar en un punto comercialmente aceptado, que reúna las características para almacenarlo, venderlo o trillarlo posteriormente. Secado natural al sol es la práctica más común, en lugares donde puede aprovecharse la energía solar y la energía propia del aire, además los costos de inversión en equipos y los costos de operación son razonablemente más bajos, aunque necesita de grandes extensiones de tierra para este procedimiento por cada 100 arrobas de café se necesitan aproximadamente 30 m<sup>2</sup> para su secado (Cenicafé 2011), es el más usado por los pequeños productores en Colombia, quienes producen cerca del 70% de la cosecha nacional.

El secado mecánico se hace en cámaras en la cuales se introduce aire caliente a máximo 50° C, impulsado por un ventilador, el cual atraviesa la masa de café. El aire puede calentarse con estufas y quemadores, entre otros, que funcionan con ACPM, carbón mineral y energía eléctrica.

## **2.2 PULPA DE CAFÉ**

La pulpa de café es un material fibroso mucilaginoso y se genera durante el procesamiento del café por vía húmeda (beneficio húmedo) y en este caso se conoce como pulpa de café y constituye cerca del 40 % del peso fresco de la

cereza de café. Por cada tonelada de café cereza procesada por esta vía se genera cerca de media tonelada de pulpa. Cuando el procesamiento del café se realiza por vía seca (beneficio seco), la pulpa se denomina como cáscara de café y solo se generan 90 kilogramos (Pandey et al., 2000).

La pulpa de café es uno de los principales subproductos de este proceso de beneficio húmedo del café, tanto por el volumen que se genera como por el alto contenido en componentes biodegradables que posee. Tiene una elevada humedad (80- 82 %). Es rica en carbohidratos, proteínas, minerales y contiene cantidades apreciables de potasio, taninos, cafeína y polifenoles. (Porres et al., 1993; Roussos et al., 1995; Salmone et al., 2005).

De acuerdo a Zuluaga (1989) la pulpa de café contiene alrededor de 23-27 % sobre materia seca de azúcares fermentables, principalmente fructosa (10-15 %), sacarosa (2,8- 3,2 %) y galactosa (1,9- 2,4 %). Urbaneja et al. (1996) en un trabajo sobre la hidrólisis ácida de la pulpa de café de Venezuela, registran valores de azúcares reductores totales del 67 % (ms.) y de glucosa del 9,43 % (ms.).

Bresanni (1979) determinan valores del 12,8 % (ms.) de proteínas y un contenido de azúcares totales del 50,8 %. Otros trabajos señalan que la pulpa seca contiene cerca del 12 % de proteína cruda, 21 % de fibra cruda, 1,25 % de cafeína, 1 % de polifenoles (Mijares-Carranco et al., 1997; Pandey et al., 2000c; Porres et al., 1993; Pulgarin et al., 1991), Además de esto se ha señalado también que la pulpa contiene alrededor de 6,5 % de pectina (ms.) (Pulgarin et al., 1991). Otros autores señalan que el contenido de sustancias pécticas de la pulpa es 1,9 veces superior al contenido de pectina en el mucilago, para la variedad de *Coffea arabica* (García et al., 1991).

Son pocas las aplicaciones que se le han dado a la pulpa de café; entre éstas se encuentran su empleo como combustible y fertilizante, como alimento para ganado

o en la formación de composta. Sin embargo, para la elaboración de estos productos se utiliza sólo una fracción de la cantidad disponible de los residuos, y no son técnicamente muy eficientes (Pandey et al., 2000).

## **2.3 DIGESTIÓN ANAEROBIA (DA)**

La DA es un proceso biológico natural en ausencia de oxígeno donde una comunidad de bacterias descompone la materia orgánica en biogás que contiene principalmente, metano y dióxido de carbono. El proceso no solo reduce la contaminación orgánica, sino también proporciona una nueva fuente de energía. (Zeng et al., 2010)

Los residuos sólidos orgánicos tales como residuos biológicos, lodos, estiércol de ganado vacuno y porcino son ampliamente utilizados como inóculos en el proceso de DA para la producción de energía, teniendo en cuenta una concentración correcta para evitar una limitación de biomasa y una sobrecarga de materia orgánica en el bioreactor (Angelidaki et al., 2009; González y García, 2009)

**2.3.1 Etapas de la digestión anaerobia.** Este proceso se lleva a cabo en cuatro etapas que son:

**2.3.1.1 Hidrólisis.** La hidrólisis consiste en la transformación enzimática de macromoléculas complejas y de mayor peso molecular como polisacáridos, lípidos, proteínas y grasas en compuestos simples y solubles, tales como aminoácidos, azúcares, ácidos grasos en cadena larga y glicerina, por acción de enzimas extracelulares como bacteroides, clostridium, y bacterias facultativas como estreptococos (Yadvika et al., 2004).

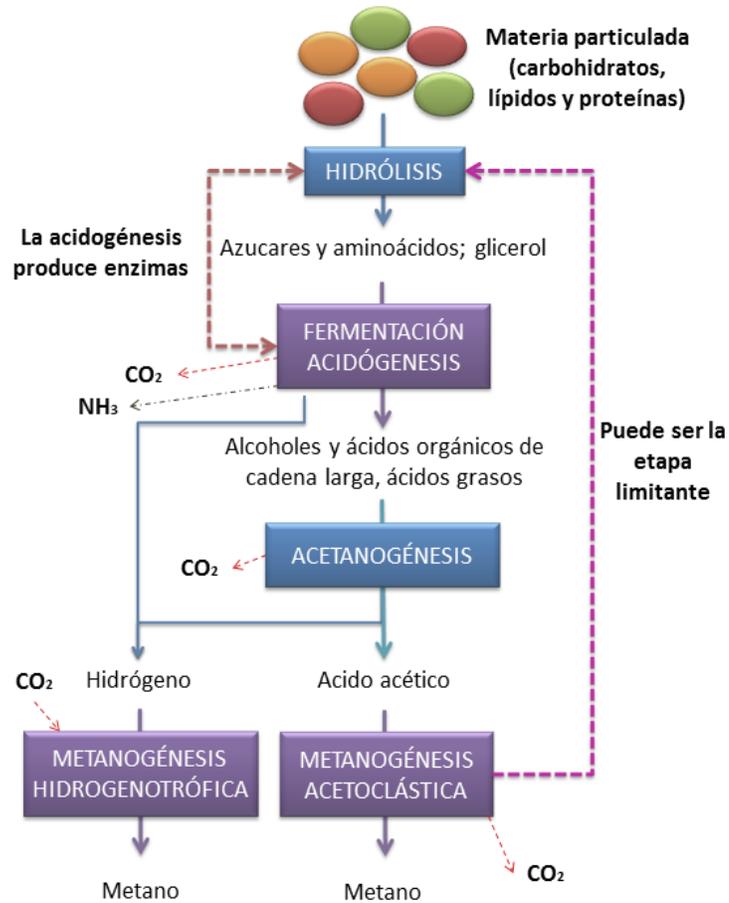
**2.3.1.2 Acidogénesis.** En la acidogénesis la materia orgánica disuelta durante la hidrólisis es biodegradada a ácidos grasos volátiles (ácido acético, propiónico,

butírico) hidrógeno, dióxido de carbono, y alcoholes por bacterias acidogénicas. (Pandey et al., 2011).

**2.3.1.3 Acetogénesis.** Durante el proceso de acetogénesis, los ácidos grasos volátiles (AGV) junto con el etanol se convierten en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono por acción de un grupo denominado organismos acetogénicos productores de hidrógeno (Poh y Chong, 2009).

**2.3.1.4 Metanogénesis.** Existen dos tipos de bacterias metanogénicas, las que utilizan el ácido acético (acetoclásticas) y las que utilizan hidrógeno (hidrogenofílicas). Las bacterias acetoclásticas convierten el ácido acetático en dióxido de carbono y metano, se desarrollan muy lentamente e influyen apreciablemente en el pH del sistema por la eliminación de ácido acético y la formación de dióxido de carbono; además son las responsables de la mayoría de metano producido. Las bacterias hidrogenofílicas convierten hidrógeno y dióxido de carbono a metano y controlan el potencial redox del proceso.

Figura 3. Representación esquemática de la digestión anaerobia



Fuente: Angelidaki et al, 2011

**2.3.2 Variables del proceso de digestión anaerobia.** Para que pueda desarrollarse el proceso se debe mantener unas condiciones ambientales y operacionales adecuadas, para ello se controlan diversos parámetros ambientales

**2.3.2.1 Parámetros ambientales.** Son aquellos que hay que controlar hacen referencia a condiciones que deben mantenerse o asegurarse para el desarrollo del proceso. Estos son:

- **pH**, que debe mantenerse cercano a la neutralidad.

- **Alcalinidad**, para asegurar la capacidad tampón y evitar la acidificación. Es recomendable una alcalinidad superior a 1,5 g/l CaCO<sub>3</sub>.
- **Potencial redox**, con valores recomendables inferiores a -350 mV.
- **Nutrientes**, con valores que aseguren el crecimiento de los microorganismos.
- **Tóxicos e inhibidores**, cuya concentración ha de ser la mínima posible.

**2.3.2.2 Parámetros operacionales.** Hacen referencia a las condiciones de trabajo de los reactores:

- **Temperatura.** Podrá operarse en los rangos psicrófilico (temperatura ambiente), mesófilico (temperaturas en torno a los 35° C) o termófilico (temperaturas en torno a los 55 ° C). Las tasas de crecimiento y reacción aumentan conforme lo hace el rango de temperatura, pero también la sensibilidad a algunos inhibidores, como el amoníaco. En el rango termófilico se aseguran tasas superiores de destrucción de patógenos.
- **Agitación.** En función de la tipología de reactor debe transferirse al sistema el nivel de energía necesario para favorecer la transferencia de sustrato a cada población o agregados de bacterias, así como homogeneizar para mantener concentraciones medias bajas de inhibidores.
- **Relación inóculo sustrato (RIS).** Estudios demuestran que la producción de metano es inversamente proporcional a la carga de sólidos volátiles de sustrato adicionada, ya que al aumentar la carga orgánica en el proceso se evidencia un nivel de saturación inicial en la DA. Esta saturación puede generar que los niveles de ácidos grasos volátiles se eleven, provocando un efecto de inhibición en los organismos anaerobios. Un valor óptimo de RIS en el procesos de DA asegura la presencia de los tres grupos de bacterias.

**2.3.3 Beneficios de la digestión Anaerobia.** En la tabla 1 se presentan algunas ventajas que tiene el proceso de DA

Tabla 1. Ventajas de la digestión anaerobia

FACTOR	VENTAJAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA
Variabilidad en la composición orgánica	Homogenización de la composición, más intensa cuanto mayor es el tiempo de retención.
Malos olores y compuestos orgánicos volátiles	Eliminación de ácidos grasos volátiles (AGV) y otros compuestos fácilmente degradables. La materia orgánica resultante es lenta y difícilmente degradable; los productos digeridos no presentan olor desagradable y son un producto más estable. En procesos térmicos posteriores se evitan problemas de volatilización de compuestos orgánicos.
Reducción de materia orgánica y total mineralización	Reducción de sólidos volátiles y totales. Reducción de materia orgánica desagradable y mantenimiento de las concentraciones de nutrientes. Transformación de nitrógeno orgánico a amoniacal. En caso de separar la fase acuosa, el producto resultante presentará menor volumen, manteniendo la misma riqueza fertilizante
Distribución de partículas y fracción soluble	Homogenización en la distribución de partículas, lo cual favorece el diseño y aplicación de procesos anteriores de secado. Hidrólisis de partículas de pequeño tamaño y coloidales, y reducción de orgánicos solubles, con lo cual se facilita la separación entre fases solubles y en suspensión.
Consistencia	Consistencia pastosa de la relación sólida de los purines digeridos, lo cual favorece su manipulación y paletización.
Alcalinidad	Disminución muy significativa de la relación de alcalinidad. Aporte de alcalinidad para favorecer un proceso posterior de nitrificación total o parcial. A su vez y debido a la reducción de materia orgánica el consumo energético de este proceso será inferior al de la nitrificación de la fracción líquida de los productos.

Fuente: (Moncayo; G. 2011)

**2.3.4 Estado del arte.** Estudios realizados en el proceso de digestión anaerobia de pulpa de café reporta una producción de 25 L de biogás/kilo de pulpa fresca

alimentada a los biodigestores, con un poder calorífico de 21,46 kJ/L y un contenido de metano del 60% (Calle, 1974; Arcila, 1979).

La pulpa de café con estiércol bovino, adicionando cal y urea, para la neutralización de la acidez en un sistema de batch, no tuvo resultados favorables por razones económicas y organizativas. (Wasse 1991).

En un fermentador de 1200 litros usado para el tratamiento anaeróbico de la pulpa de café como única fuente de carbono, se determinó una moderada inhibición de esta al incrementar la concentración de pulpa, y que el biogás producto de la biodigestión constituye un ahorro energético importante para la labor de secado del grano, disminuyendo la quema de combustibles fósiles, además de la posibilidad de incorporar el efluente tratado al sistema (Chinappi et al., 2003).

Brown (2004) utilizó estiércol vacuno, lodo y fango provenientes de despulpadoras, en biorreactores discontinuos de 1 L, obteniendo como resultado que en el estiércol se obtuvo el mayor valor de producción acumulada de metano (10,29 L), la mayor actividad metanogénica relativa (0,004 mL CH<sub>4</sub>/g SV \* d), así como la mayor actividad enzimática de la celulosa total (0,263 7 moles/min.mL).

En los últimos años se han realizado investigaciones para comparar en el proceso de digestión anaerobia multietapa (MAD) y mono etapa, para probar la eficiencia de estos procesos en cuanto a la producción de energía (cantidad de hidrógeno y metano) mediante el parámetro de eficiencia ( $\eta$ ), utilizando dos fuentes de carbono: glucosa, como la fuente de carbono más fácilmente biodegradables y pulpa de la semilla de café rica en lignocelulosa, obteniendo los siguientes resultados: La digestión multi etapas MAD mostraron una eficiencia ( $\eta = 74,5\%$ ), superior al de un solo paso AD (50,4%); con respecto a la fuente de carbono utilizando glucosa se obtuvo una eficiencia del 48% mientras que la eficiencia de

MAD usando el material lignocelulosas fue 28,5% (2,4 veces mayor que la de un solo paso AD).

La producción específica de metano en el proceso MAD alcanzó 0,15 NL CH<sub>4</sub>/gSV usando piel de la semilla de café, que es aproximadamente 3 veces superior al de un solo paso AD (0,05 NL CH<sub>4</sub>/gSV). Este estudio confirma que el proceso MAD ofrece una oportunidad para extraer más energía de orgánicos como en el caso de la pulpa de café. (Luongo et al. 2015)

La aplicación de la digestión anaerobia para la transformación de residuos orgánicos complejos ha demostrado ser un método de bajo costo, de menor necesidad de terreno, de alta eficiencia en la remoción orgánica, de reducción de la carga orgánica contaminante, de baja producción de lodos, y de producción de energía neta a través de la producción de biogás.

## **2.4 VERMICOMPOSTAJE**

La influencia de las lombrices en los suelos agrícolas era bien conocida en el Antiguo Egipto. Los faraones las consideraban un “animal sagrado” y preveían castigos muy severos para quienes las dañaran. El filósofo griego Aristóteles las definió como “los intestinos de la tierra”. Los romanos también apreciaron a las lombrices, pero no fue hasta el siglo XIX cuando Darwin, en su libro “La formación de la tierra vegetal por la acción de las lombrices” publicado en 1881, explica la verdadera función de estos invertebrados en el suelo. Esta obra sería el inicio de una serie de investigaciones que hoy en día tienen transformado el vermicompostaje, vermiestabilización, o compostaje con lombrices de tierra y la lombricultura en una actividad zootécnica de importancia que permite mejorar la producción agrícola (Martínez *et al.* 2003).

El vermicompostaje se define como un proceso de biooxidación, degradación y estabilización de la materia orgánica, a través de la acción conjunta de algunas lombrices de tierra y microorganismos, mediante el que se obtiene un material final estabilizado, homogéneo, rico en nutrientes y de granulometría fina denominado vermicompost (Domínguez 2004). Las lombrices participan en el proceso realizando diferentes acciones a diferentes niveles espaciales y temporales; entre sus roles más importantes cabe destacar: a) la fragmentación física del sustrato orgánico que aumenta la superficie de ataque para los microorganismos al fragmentarlo; b) la modificación, transporte e inóculo de la microflora presente en el residuo (Lores et al. 2006, Aira et al. 2007); y c) la aireación del sustrato a través de sus actividades de excavación y deyección. De hecho, las transformaciones de las propiedades físico-químicas y bioquímicas de los sustratos orgánicos (Domínguez 2004) y la rapidez con que estas transformaciones ocurren (Aira et al. 2002) hacen del proceso de vermicompostaje un buen sistema para estudiar las relaciones entre las lombrices de tierra epigeas y los microorganismos (Aira et al. 2006, 2007 ab).

El proceso de vermicompostaje está considerado como una ecotecnología limpia, sin impacto ambiental y cuyos costes de inversión, energéticos, y de mantenimiento son moderadamente bajos. Su empleo aporta los siguientes beneficios: a) eliminación de residuos orgánicos nocivos; b) generación de un producto final útil (vermicompost) de gran valor como enmienda orgánica del suelo de alta calidad, y que puede funcionar como un abono químico; c) producción de una gran biomasa de lombrices, de alto contenido proteico y alta calidad para alimentación animal (avícola, porcino y piscícola, fundamentalmente).

**2.4.1 Lombrices.** Las lombrices de tierra se pueden definir como invertebrados segmentados y con simetría bilateral que disponen de una glándula externa (clitelo) que produce una cápsula para los huevos (capullo), un lóbulo sensorial en la parte delantera (prostomio), el ano en el extremo posterior del animal, y sin

miembros, pero con un pequeño número de cerdas (quetas) en cada segmento. Son hermafroditas, y la reproducción tiene lugar, habitualmente, a través de cópula y fertilización cruzada, tras la cual cada uno de los individuos puede producir capullos (ootecas) que contendrán entre 1 y 20 huevos fertilizados (a pesar de que la partenogénesis es posible). Los capullos son resistentes, pudiendo permanecer viables durante años, pequeños y con forma de limón. Después de un periodo de incubación, que varía según la especie y las condiciones ambientales, los capullos eclosionan. Las crías de lombriz son blancas y de unos milímetros de longitud después de emerger del capullo, adquiriendo su pigmentación específica en las siguientes 24 horas. En condiciones favorables, muchas especies pueden alcanzar la madurez sexual en semanas después de emerger del capullo, a pesar de que algunas especies que viven predominantemente en el suelo precisan de más tiempo. Los individuos maduros pueden ser diferenciados claramente por la presencia del clitelo, que es una banda clara u oscura localizada tras los poros genitales. (Domínguez 2005)

**2.4.1.1 Lombriz roja (*Eisenia foetida*).** La lombriz más adecuada para la práctica de la lombricultura, es la Lombriz Roja (*Eisenia foetida*) perteneciente al género de las Epigeas. Esta lombriz no proviene de California, aunque fue en este estado norteamericano donde se inició el cultivo intensivo de las mismas en la década de los cuarenta. Su verdadero origen es Euroasiático extendiéndose de forma natural en gran parte de ambos continentes.

La lombriz roja californiana es de color rojo, respira por medio de su piel. Mide de 6 a 8 cm de largo, de 3 a 5 milímetros de diámetro y pesa aproximadamente 1 gramo. Está dotada de 5 corazones y 6 pares de riñones, presenta entre sus segmentos bandas de color amarillento o pálido, y no suele sobrepasar los siete centímetros de longitud en su fase adulta.

No soporta la luz solar, una lombriz expuesta a los rayos del sol muere en unos pocos minutos. Vive aproximadamente unos 15 años y puede llegar a producir, bajo ciertas condiciones, hasta 1 300 lombrices al año.

Se utiliza esta especie por su rusticidad, capacidad de apiñamiento y confinación, además tolera amplios rangos de pH, humedad y temperatura. A diferencia de la lombriz de tierra come, con mucha voracidad, todo tipo de materia orgánica bien de origen doméstico o agropecuario (estiércoles, rastrojos de cultivos, residuos de hortalizas y frutas, malezas, etc.). Como la mayoría de las lombrices Epigeas se alimentan de bacterias, hongos, actinomicetos, algas microscópicas y protozoos, que se producen de forma natural en los procesos de descomposición de la materia orgánica. Es capaz de digerir diariamente su propio peso y excretar un 60% de excelente abono, el humus de lombriz o lombricompost

**2.4.2 Condiciones para el proceso de vermicompostaje.** Para mantener en condiciones óptimas las lombrices y conseguir un buen vermicompost deben cumplirse una serie de requisitos:

- **Ausencia de luz:** las lombrices viven debajo de la superficie del suelo, no toleran bien la luz, por lo que aparte deben estar en un recipiente tapado.
- **Humedad:** la presencia de cutícula permeable hace que pierda agua fácilmente, no les conviene que baje drásticamente la humedad, porque no sólo paraliza la actividad sino que puede reducir la población.
- **Temperatura:** el óptimo debe oscilar entre los 20° C, aunque resisten temperaturas entre los 4-30° C. Así cuando la temperatura es inferior a 7° C, las lombrices no se reproducen, pero siguen produciendo abono, aunque en menor cantidad.
- **pH:** no soportan valores inferiores a 4,5, la acidez les resulta desagradable, aunque algo leve pueden tolerarla.

- **Alimentación:** prefieren los restos vegetales algo descompuestos con una relación C/N relativamente baja, esto hace que presenten una fuerte selectividad con respecto a la vegetación que existe sobre el suelo. Los restos de verduras y frutas de cocina son de su agrado en cuanto a la relación C/N.

### 2.4.3 Ventajas del proceso de vermicompostaje

- Tiende a necesitar algo menos de mano de obra – no es necesario el volteo para aireación. (la actividad de las lombrices ayuda a mezclar, airear y fragmentar los materiales)
- Como trabajan en temperaturas más frías ayudan a conservar el nitrógeno.
- El contenido de humedad superior no constituye un problema (en realidad es preferible)
- los materiales pueden añadirse constantemente (sin necesidad de un “prealmacenaje” a la espera de la creación de una nueva pila de compostaje)
- El tamaño del sistema carece de importancia, es ideal tanto para interiores como al aire libre.
- Importantes estudios demuestran que el vermicompost tiene propiedades beneficiosas que no se encuentran en los compuestos obtenidos por procesos térmicos.
- Incrementa la disponibilidad de nitrógeno, fósforo, potasio, hierro y azufre.
- Incrementa la eficiencia de la fertilización, particularmente nitrógeno.
- Estabiliza la reacción del suelo, debido a su alto poder de tampón.
- Inactiva residuos de plaguicidas debido a su capacidad de absorción.
- Inhibe el crecimiento de hongos y bacterias que afectan a las plantas.
- Mejora la estructura, dando soltura a los suelos pesados y compactos y ligando los suelos sueltos y arenosos.
- Mejora la porosidad y, por consiguiente, permeabilidad y ventilación.
- Reduce la erosión del suelo.

- Incrementa la capacidad de retención de humedad.
- Confiere un color oscuro en el suelo, ayudando a la retención de energía calorífica.
- Es fuente de energía, la cual incentiva la actividad microbiana.
- En condiciones ideales, los desechos se pueden procesar muy rápidamente. (Pasco. 2015)

**2.4.4 Estado del arte.** La pulpa del café es apropiada como sustrato para el compostaje por cuanto contiene alto contenido de azúcares (azúcares reductores totales del 67 % (ms.) y de glucosa del 9,43 % (ms.) (Urbaneja 1996), buena relación carbono: hidrógeno (25-30:1) y un tamaño de partícula adecuado. Su reutilización como enmienda orgánica ha producido incrementos en los rendimientos del cultivo de café (García, 2001; OIC, 2005).

Entre las experiencias exitosas de la utilización de abono a partir de pulpa de café se destaca la cubana, en la que durante un año, de 139 toneladas de pulpa fresca de café, se generaron 34 toneladas de abono orgánico de primera calidad, las cuales fueron aplicadas a los suelos en relación de 2,5 Ton/ha, logrando un incremento en el rendimiento en grano de 5,7 quintales/ha (Pierre, 2009).

Pierre *et al* (2009) caracterizaron química y biológicamente compost a base de pulpa de café y probaron que las mezclas de pulpa y estiércol de caprino en proporciones: 1:1 y 1:0,5 presentaron los mejores resultados. Vásquez *et al.* (2010) disminuyeron el tiempo de compostaje de residuos de postcosecha de café (pulpa), de 150 a 40 días, utilizando consorcios de microorganismos nativos de compostaje, aplicando la técnica de bioaugmentación (*Pseudomonas spp.*-*Stenotrophomona maltophilia*, *Citrobacter koseri* y *Pseudomonas aeruginosa*), con relaciones C/N entre 9,5 y 10%.

Orozco & Cegarra (1996) estudiaron el vermicompostaje de pulpa de café, como método alternativo de transformación de estos desechos en un fertilizante orgánico, y evaluaron el efecto de la lombriz de tierra *Eisenia foetida*, las concentraciones de carbono-nitrógeno (C/N) y la disponibilidad de nutrientes. Detectaron un aumento del fósforo disponible, del calcio (Ca) y del magnesio (Mg), pero una disminución del potasio (K).

Mendoza (2010) comparó el vermicompostaje, el compostaje normal, y el precompostaje seguido de un vermicompostaje; demostró que el vermicompostaje fue el proceso que presentó menor impacto global según el análisis del ciclo vida.

El vermicompostaje también se ha utilizado para la estabilización de vinazas y lodos de depuradora tras un proceso de vermicompostaje con estiércol de conejo en condiciones de laboratorio (Soriano, 2008), de desechos orgánicos cítricos y forestales (Huber, 2002), de estiércol compostado y fresco de bovino y ovino (Gutiérrez, 2007), de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (Cárdenas 2013), de mezclas de cáscara de café con estiércol de vaca, con desechos de frutas y vegetales y de solo cáscara de café, siendo las dos primeras las que tuvieron las pérdidas más altas en carbono (Shemekite 2013).

La especie de lombriz más eficiente en el proceso de vermicompostaje y por ende la más utilizada es la roja californiana (*Eisenia foetida*) (Pandey et al 2000). En cuanto a la densidad de siembra para realizar el proceso de vermicompostaje investigadores como Arango y Dávila (1991), Tineo (1994), mencionan que una buena densidad debe ser de 2500/m<sup>2</sup> para la especie *E. foetida* y que con ésta, se pueden obtener hasta 27 650 cápsulas, de las cuales eclosionan aproximadamente 18 200 cápsulas con 312 lombrices/cápsula, en un período de dos meses, por lo cual recomiendan esta densidad de 2 500/m<sup>2</sup>. Al utilizar 5 a 10 kg de lombrices (1 kg = 1200 a 1 750 lombrices/m<sup>3</sup> aproximadamente) se obtiene humus a los 2 ó 2,5 meses.

Las investigaciones anteriormente citadas designan al vermicompostaje como método alternativo de transformación de pulpa de café en fertilizante orgánico útil, a través de lombriz de tierra *Eisenia foetida*.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 ETAPA 1. CARACTERIZACIÓN DE LA PULPA DE CAFÉ

La pulpa de café que se utilizó como sustrato para los procesos de digestión anaerobia y vermicompostaje pertenece a la especie (*Coffea arabica*) variedad Colombia, fue obtenida de la Finca La Esperanza (figura 4), ubicada en la Vereda Cantabara sector La Palma Municipio de Aratoca, Santander, situada a una altura de 1 490 msnm., y una distancia a la cabecera municipal de aproximadamente 6 km. Esta finca tiene una extensión de diez hectáreas de las cuales ocho se encuentran sembradas con café.

Figura 4. Finca La Esperanza. Municipio de Aratoca Santander



La zona se caracteriza por tener precipitaciones medias anuales entre 800 y 1200 mm/año, una temperatura entre 16° C y 26° C con promedio anual de 19° C, la radiación solar entre 1400 y 1800 isohelias/año  $\text{cal/cm}^2$  y pertenece al tipo bosque húmedo premontano (bh-PM) con una humedad relativa del entre el 60% y 70% Holdridge (1987)

La caracterización físico-química de la pulpa de café se tomó de Blandón et al., (cenicafé 2011) Tabla 2 teniendo encuentra parámetros como: pH, humedad, porcentaje de ceniza, grasa, fibra, proteína, CHO solubles, materia orgánica, relación C/N, porcentaje de potasio , fósforo total, calcio, nitrógeno total, magnesio y ppm de Fe, Mn, Zn y Cu.

A continuación se describe el análisis físico-químico propio de la pulpa de café:

Tabla 2. Caracterización físico-química de la pulpa de café

<b>DETERMINACIÓN</b>	<b>PULPA FRESCA</b>
Humedad %	74,83
pH	4,40
Cenizas (%)	6,66
Grasas (%)	1,60
Proteína (%)	11,00
Fibra (%)	11,43
CHO solubles (%)	69,31
MO%	93,34
C/N	30,72
N (%)	1,76
P (%)	0,13
K (%)	2,82
Ca (%)	0,32
Mg (%)	0,08
Fe (ppm)	158,75
Mn (ppm)	69,00
Zn (ppm)	8,25
Cu (ppm)	9,75
B (ppm)	21,75

Fuente: Cenicafe 2011

### 3.2 ETAPA 2. CARACTERIZACIÓN DEL INOCULO

El estiércol bovino usado (EBE) como inóculo fue suministrado por el Frigorífico Vijagual ubicada en el km 8 de la vía Bucaramanga - Rionegro, en Santander. Su recolección se hizo en recipientes herméticos los cuales posteriormente fueron transportados al laboratorio. Las muestras fueron pre-incubadas en un bioreactor de 21 L a temperatura controlada, con atmósfera reducida por desplazamiento del oxígeno con nitrógeno; esto permitió su estabilización por consumo de la materia orgánica residual, hasta realizar los ensayos (Angelidaki et al., 2009)

La caracterización fisicoquímica del inóculo presentada en la Tabla 3, corresponde a resultados históricos obtenidos en el laboratorio de Biotecnología de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, para los siguientes parámetros: Humedad, pH inicial, Densidad, ST iniciales, SV iniciales, SV/ST %, AGV inicial, Alcalinidad inicial, ART inicial.

Tabla 3. Caracterización Fisicoquímica del EBE

Parámetros	Unidades	EBE
Humedad	%	96,2%
pH inicial	Unidades de pH	8,2
Densidad	g/mL	1,028
ST iniciales	[g/kg]	38
SV iniciales	[g/kg]	20
SV/ST %	%	52,26
AGV inicial	mg/L	1206
Alcalinidad inicial	mgCaCO <sup>3</sup> /L	1400
ART inicial	mg/mL	0,65

El inóculo presenta una humedad que garantiza una operación en medio fluido, favoreciendo la actividad microbiana (Kumar, 2008), su pH es propicio para un arranque dinámico y favorece el crecimiento microbiano (Raposo *et al.*, 2006). Sus SV son adecuados para DA (Gray, 2008). La concentración de azúcares se encuentra dentro de los valores que garantizan el arranque de la fase hidrolítica del bioproceso. La cantidad de AGV es elevada, no obstante, la alcalinidad inicial también es elevada por lo cual se regulan los valores permitiendo un correcto desarrollo de las distintas actividades enzimáticas del proceso (Zhang, 2007).

Tabla 5. Resultados de análisis de microorganismos patógenos en EB

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADO
Coliformes totales	UFC/g	0
E. coli	UFC/g	0
Salmonella spp.	UFC/g	0
Huevos de helmintos	Unidades/g	0

Fuente: (Moncada 2.015)

Teniendo en cuenta la tabla, el inóculo estabilizado no presenta ninguno de los microorganismos patógenos, estos resultados favorecen la DA en relación con la eliminación o por lo menos reducción de la microbiota patógena (Alzate 2015).

Por lo anterior el inóculo usado es óptimo para el arranque de los reactores ya que cuenta con adecuadas características tanto fisicoquímicas como microbiológicas.

### **3.3 ETAPA 3 DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA PULPA DE CAFÉ OPERACIÓN DISCONTINUA**

#### **Actividad 1 Ensayo de biometanización de pulpa de café**

La DA de la pulpa de café se realizó bajo condiciones de operación en *batch* en reactores de 50 ml con un volumen de operación de 40 ml, la cantidad de inóculo que se agregó se determinó teniendo en cuenta la concentración de sólidos volátiles SV, utilizando una RIS de 2 [g SV Inóculo/g SV Sustrato] para lo cual se usaron 33 ml de EBE, 5 gr de sustrato y 4 ml de agua. La temperatura se mantuvo constante en un rango mesófilo de 39° C, con un tiempo de operación de treinta días. Todos los ensayos fueron realizados por triplicado.

Como experimento control se utilizaron reactores de 50 ml con un volumen de operación de 40 ml, la cual contenía 32 ml de EBE y 8 ml de agua y las mismas condiciones de operación.

Todos los biorreactores fueron sellados con tapones de butilo y agrafes de aluminio, para garantizar la anaerobiosis.

El proceso fue controlado mediante la medición de las variables de salida cada 5 días tales como Azúcares Reductores Totales (ART), ácidos grasos volátiles totales (AGVT), pH, Alcalinidad total AT y relación AGVT/AT. La producción de biogás se evaluó usando el método de desplazamiento alcalino de metano todos los días durante un periodo de 30 días (tabla 6)

Tabla 6. Variables respuesta de la digestión anaerobia

Variable de respuesta	Unidad	Frecuencia	Método
ART	mg/mL	Cada 5 días	Colorimétrico usando ácido 3-5 dinitrosalicílico (DNS) Anexo B
AT	mg CaCO <sub>3</sub> /L	Cada 5 días	Titulación Anexo D
SV	g/L	Cada 5 días	Gravimétrico Anexo C
pH	----		Potenciométrico/ NTC 5167
CH <sub>4</sub>	ml	Diaria	Desplazamiento por trampa alcalina Anexo A
YPS	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg SV	Al final del experimento	Cálculo de YPS
PBM	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg SV	Al final del experimento	Cálculo PBM

Fuente: (Álvarez & Calderón 2014)

### Actividad 2 Obtención del digestato

La obtención del digestato se realizó bajo condiciones de operación en *batch* en reactores de 500 ml con un volumen de operación de 400 ml, utilizando una RIS de 2 [g SV Inóculo/g SV Sustrato], para lo cual se usaron 320 ml de EBE, 50 gr de sustrato y 40 ml de agua. La temperatura se mantuvo constante en un rango mesófilo de 39° C, con un tiempo de operación de treinta días. Todos los ensayos fueron realizados por triplicado.

### **3.4 ETAPA 4. ELABORACIÓN DE VERMICOMPOST A PARTIR DE PULPA DE CAFÉ**

#### **Actividad 1 Preparación del sustrato**

Como sustrato inicial para el proceso de vermicompostaje se tomaron 40 kilogramos de pulpa de café. Antes de adicionar las lombrices a la pulpa de café, a este sustrato se le realizó un proceso de "pre-descomposición" el cual duró 30 días, tiempo en el cual el sustrato estuvo maduro, es decir, cuando tomó una coloración café oscuro, sin mal olor y semipastoso al tacto, estas características organolépticas indicaron que el pH, humedad y temperatura eran óptimos para iniciar el proceso. Durante este periodo de tiempo la pulpa se mantuvo seca y fresca, a condiciones ambientales y mezclándola 1 ó 2 veces al día; este volteo facilitó el escape de gases y permitió la alcalinización del medio.

Antes de añadir las lombrices, y con el objetivo de comprobar la adecuación del sustrato al crecimiento de las lombrices, se realizó una prueba de migración, descrita por Ferruzi (1987), la cual consistió en colocar 50 lombrices en 1 kg del sustrato semidescompuesto y realizar observación a cada momento desde el inicio hasta uno o dos días y determinar si mueren o escapan. Como no escaparon ni murieron las lombrices al cabo de este tiempo, se dedujo que el material estaba listo como alimento.

#### **Actividad 2 Preparación del lecho y siembra**

Los lechos constituyen los albergues donde se alojan las lombrices. Para el proyecto, estos se construyeron con madera, teniendo en cuenta las siguientes dimensiones: 0,4 m de ancho por 0,3 m de alto y 0,5 m de largo, con una capacidad de 0,06 m<sup>3</sup> (Figura 5). Para la ubicación de los lechos se tuvo en cuenta

que estuvieran cerca de una fuente de agua, bajo techo, protegidas de la acción directa del sol y de la lluvia, y con buena ventilación natural.

Figura 5. Cama de madera para vermicompostaje



Fuente: Autor

Para la siembra se utilizaron 600 lombrices californianas (*Eisenia foetida*), mayores de tres meses de vida (90-100 días), clitelada en un sustrato maduro, proporcionadas por la Finca Ensellada (figura 6), la cual se encuentra ubicada en el municipio de Aratoca, Santander. Las lombrices fueron colocadas al fondo del cajón y posteriormente introducida la pulpa de café, se extendió de manera homogénea y se cubrió con una malla de sombra para reducir la evaporación de agua y mantener una humedad óptima para la supervivencia de las lombrices.

Figura 6. Sustrato maduro con lombrices californianas (*Eisenia foetida*)



Los registros del pH, temperatura, humedad se hicieron diariamente, con el fin de mantener las condiciones apropiadas para la lombriz y de este modo mantener activo el proceso de biodegradación.

La temperatura se midió introduciendo un termómetro que va de 20 a 110 grados centígrados, el cual se introdujo en el centro, la cara norte y sur de cada unidad experimental, la humedad por prueba de puño la cual consistió en agarrar una cantidad del sustrato con el puño de una mano, posteriormente se le aplica fuerza, lo normal de un brazo, y si salen de 8 a 10 gotas es que la humedad está en un 80% aproximadamente.

### **Actividad 3. Recolección, cosecha de lombrices y humus**

La recolección del vermicompost se realizó cuando la fase de maduración culminó es decir, cuando el vermicompostaje presentaba las siguientes características: temperatura ambiente, olor a tierra, color negro, estructura suelta y granulosa. A los 60 días.

Las lombrices fueron separadas mediante el método trampeo que consistió en colocar una malla milimetrada (2x2 mm) en la parte superior de la cama con nuevo sustrato. Para la cosecha del vermicompost se disminuyó la humedad del sustrato hasta 50%, luego se tamizó separando las impurezas del vermicompost. Al final de este proceso se contabilizaron la cantidad de lombrices y el peso del vermicompostaje.

### 3.5 ETAPA 5. CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA Y VERMICOMPOSTAJE

Una vez terminado los procesos de digestión anaeróbica y vermicompostaje de la pulpa de café se realizó la caracterización de cada uno de los productos con los siguientes parámetros: Temperatura, pH, Nitrógeno total y Carbono orgánico, concentraciones de macro y microelementos como Na, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu y Mn. Las determinaciones llevadas a cabo para este tipo de muestra las sugiere la NTC 5167. Los métodos usados se describen en la siguiente tabla:

Tabla 7. Métodos y normas utilizados para la caracterización de los productos de digestión anaerobia y vermicompostaje

PARÁMETRO	MÉTODO/ NORMA
Nitrógeno total (mg N/L)	Destilación trimétrico/ NTC5167
Potasio total (mg K/L)	Absorción atómica / NTC5167
Fósforo total (mg P/L)	Espectrofotométrico/ NTC5167
Calcio total (mg Ca/L)	Absorción atómica / NTC5167
Magnesio total (mg Mg/L)	Absorción atómica / NTC5167
Carbono orgánico (mg C/L)	Titrimétrico/ NTC5167
Azufre (mg S/L)	Turbidimétrico/ NTC5167
Cobre (mg Cu/L)	Absorción atómica / NTC5167
Manganesio (mg Mn/L)	Absorción atómica / NTC5167

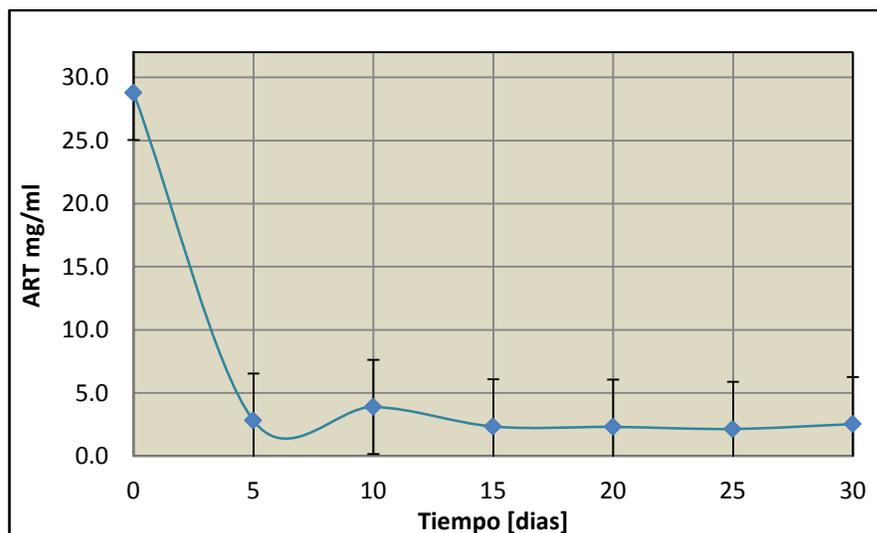
<b>PARÁMETRO</b>	<b>MÉTODO/ NORMA</b>
Hierro (mg Fe/L)	Absorción atómica / NTC5167
Zinc (mg Zn/L)	Absorción atómica / NTC5167
Sodio (mg Na/L)	Absorción atómica / NTC5167

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA PULPA DE CAFÉ (PC)

**4.1.1 Evaluación de la cinética de consumo de azúcares y ácidos grasos del proceso de DA con PC.** En la figura 7 se muestra la cinética de consumo de azúcares reductores totales (ART) para el experimento utilizando pulpa de café con EBE. Para una RIS 2,  $T= 39^{\circ} C$

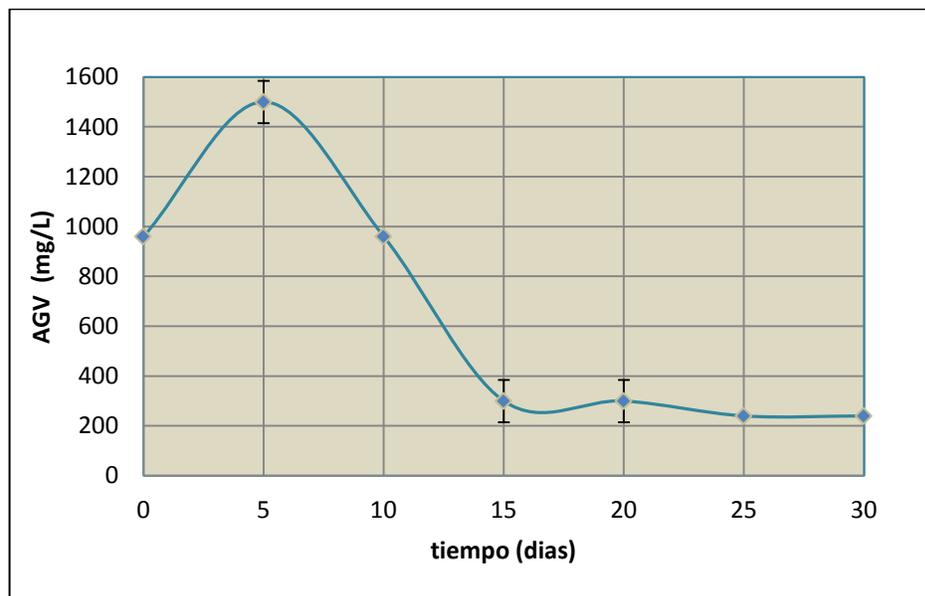
Figura 7 Cinética del consumo de ART a RIS 2  $T= 39^{\circ} C$



La cinética del consumo de ART para el experimento presenta inicialmente una alta concentración de ART (28,8 mg/ml) con un rápido consumo lo cual favorece el arranque del reactor alcanzando un alto rendimiento de la hidrólisis. Este comportamiento es consecuente con el metabolismo de las bacterias facultativas encargadas de llevar a cabo las etapas de hidrólisis y acidogénesis (Angelidaki et al., 2011). A partir del día 5 la concentración de ART se mantuvo constante, lo que muestra el comienzo de la acidogénesis y la estabilidad dentro del bioreactor.

En la figura 8 se presenta el comportamiento de la concentración de AGV. La concentración de AGV inicia con un crecimiento durante los primeros 5 días, luego se evidencia un consumo durante el proceso de DA. Este consumo en la concentración de AGV propicia la etapa acetogénica, la cual se encarga de la producción de acetato, hidrógeno y dióxido de carbono y seguidamente la producción de metano (Wang et al. 1999). Los AGV presentaron valores en un intervalo de 240 mg/L a 1500 mg/L. Concentraciones de AGV superiores a los 6000 mg/L pueden causar inhibición del proceso (Castillo et al., 2007). Para este estudio la mayor concentración de AGV fue de 1500 lo que indica que no se presentó inhibición por acumulación ácidos grasos volátiles.

Figura 8. Producción de AGV a RIS 2 T= 39° C de la PC



Fuente: Autor

La estabilidad del proceso fue evaluada en función de la relación AGV/AT y pH (Figura 9). La relación entre AGV/AT presentó valores dentro del rango apropiado para DA, según lo reportados en la literatura se encuentran entre 0,1 y 0,6 sin riesgo de acidificación en el reactor (Raposo et al, 2011), y dado que la AT es alta,

se infiere que ella ejerce un efecto tampón sobre el bioproceso, soportando y amortiguando la presencia de ácidos, favoreciendo el desarrollo de los microorganismos metanógenicos (Charles et al 2009).

El pH (figura 10) presenta valores cercanos a 7,8, los cuales descartan la inhibición de la fermentación en el biodigestor; no obstante, valores cercanos a la neutralidad, permiten lograr mejores resultados en cuanto a la producción de metano.

Figura 9. Capacidad buffer para la DA de la pulpa de café

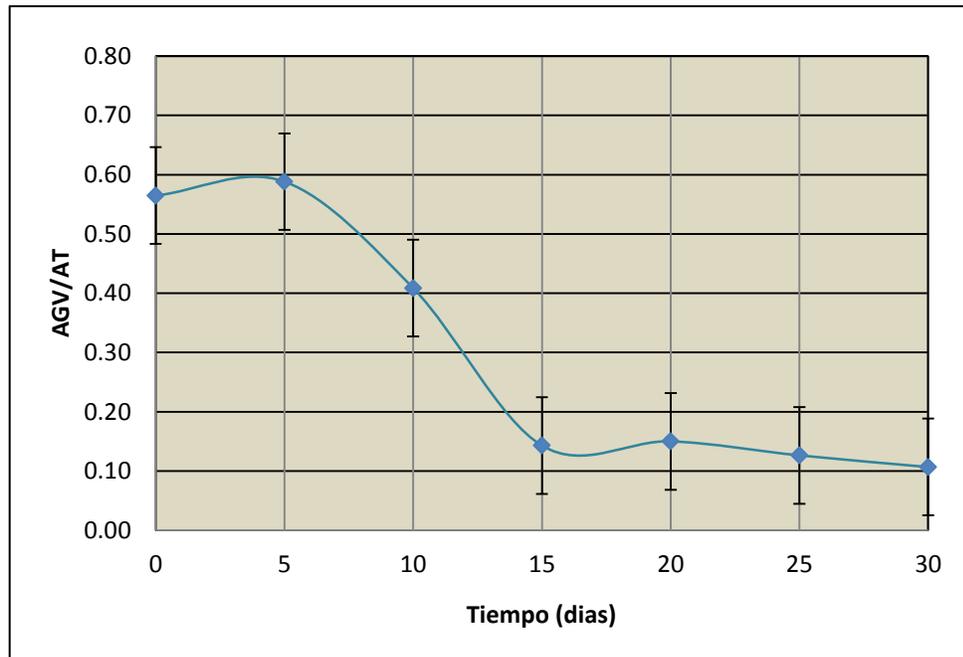
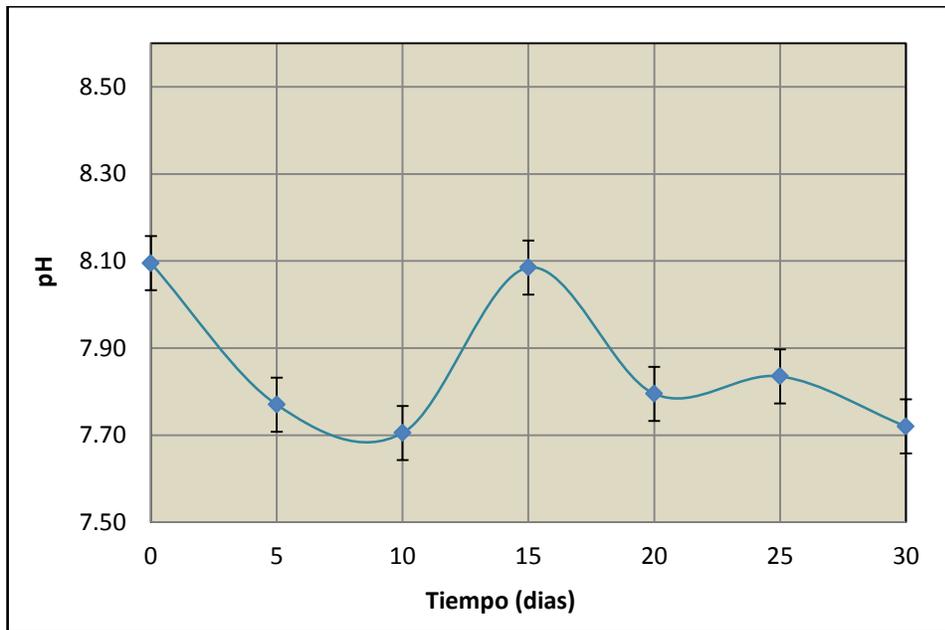
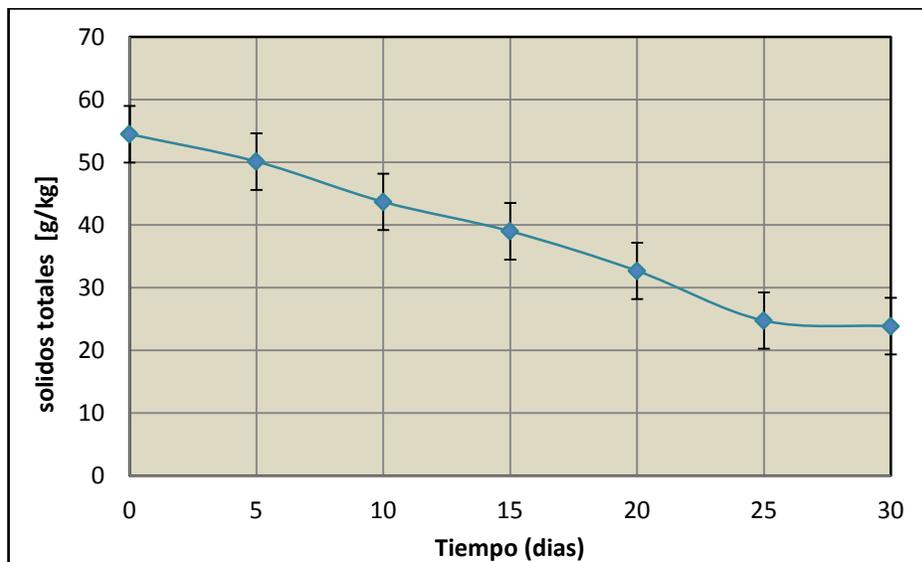
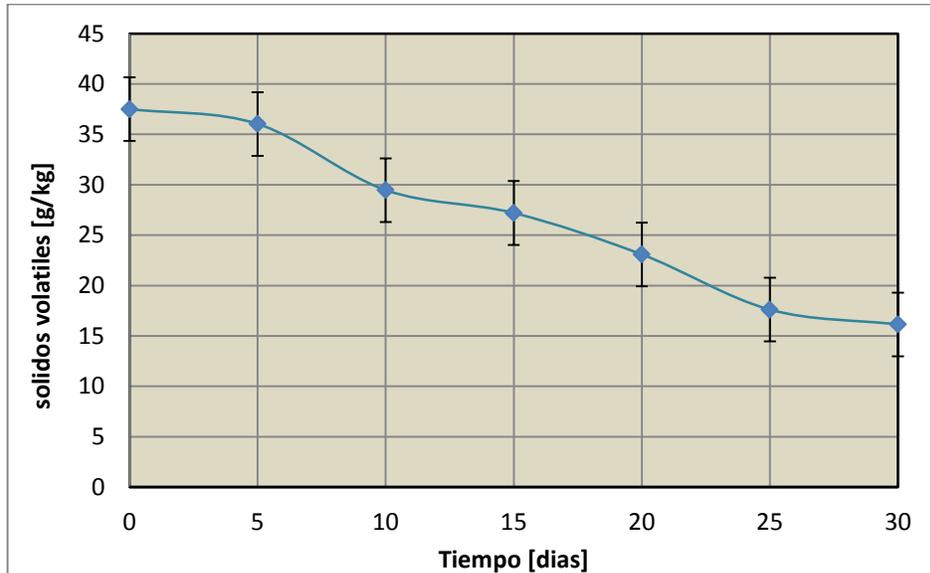


Figura 10. pH para la DA de la pulpa de café



**4.1.2 Relación entre sólidos volátiles y sólidos totales.** La carga orgánica puede ser expresada en términos de sólidos volátiles. Estos valores representan la materia orgánica disponible para ser degradada y convertida posteriormente a metano. En la figura 11 se observa la evolución de los sólidos totales y los sólidos volátiles en el transcurso del proceso.

Figura 11. Relación entre sólidos volátiles y sólidos totales en la DA de la pulpa del café



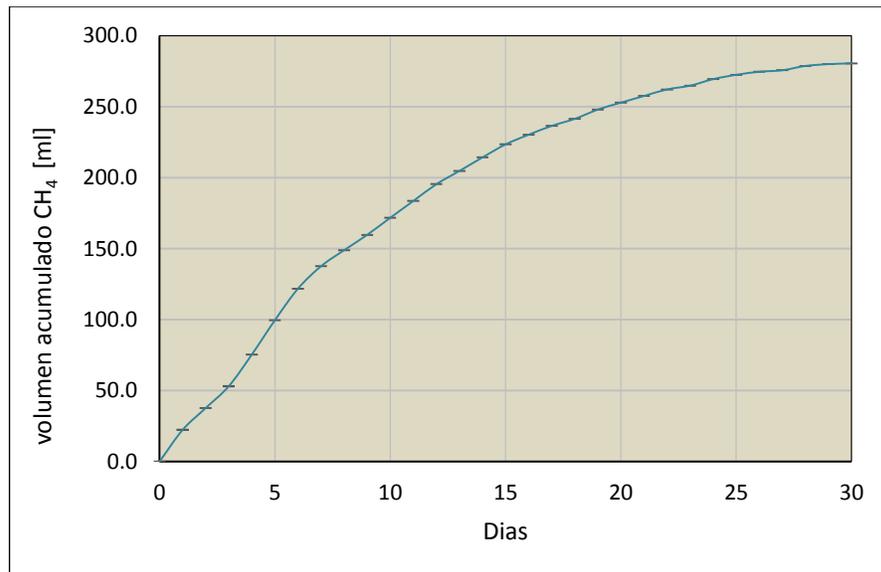
Los sólidos totales experimentaron una disminución del 43,8 %, asociada al consumo de materia orgánica del proceso. En relación con los sólidos volátiles, su remoción fue del 58%, la explicación de este comportamiento se debe al hecho de que el inóculo posee una gran variedad de microorganismos habitantes del

suelo, que expresan una batería enzimática capaz de degradar con alta eficiencia residuos que contienen lignina y celulosa., asegurando la producción de metano (Murillo, 2005).

**4.1.3 Cinética de producción de metano y porcentaje de biometanización.** En la Figura 12 se presentan la cinética de producción de metano, utilizando como inóculo EBE y como sustrato pulpa de café empleando una RIS de 2, por un periodo de 30 días.

La máxima producción de metano fue de 279,75 mlCH<sub>4</sub>(STP)/g SV de pulpa de café, la cual es comparable con valores de producción utilizando otro tipo de sustratos como aguas residuales provenientes de la industria palmera y el bagazo de fique, con volúmenes de 274 mlCH<sub>4</sub>(STP)/g SV y 228,5 mlCH<sub>4</sub>(STP)/g SV de metano, respectivamente (Castro 2011, Herrera y Niño 2012).

Figura 12. Producción de metano en el proceso de la DA de la pulpa del café



Estudios realizados con tres plantas de beneficio (CoopeLibertad, CoopeVictoria y La Eva S.A.), las cuales procesan café (*Coffea arabica*) de la variedad “Caturra”, utilizando colocar sustrato pulpa de café mezclado con un lodo anaeróbico (como inóculo), con buena actividad metanogénica en una proporción 2:1 (Lodo: Sustrato) en términos de MoS, que consiste en la porción de la MS (Materia Seca) que se volatiliza a 550° C, reportan para la planta de beneficio Eva un máximo rendimiento de metano, con  $252,6 \pm 81,4$  STP CH<sub>4</sub>/g MoS, seguido de CoopeLibertad con  $199,3 \pm 86,5$  STP CH<sub>4</sub>/g MoS y finalmente CoopeVictoria con  $143,8 \pm 14,8$  STP CH<sub>4</sub>/g MoS, todos con una diferencia estadísticamente significativa. El rendimiento del proceso de DA realizado en el laboratorio es un 10% superior al reportado para la planta de beneficio Eva.

Esta diferencia en rendimiento de metano, entre un beneficio de café y otro, puede deberse a muchos factores, como por ejemplo: grado de madurez del fruto, manejo de la plantación y otros. Aunque difícil de determinar los factores ambientales o edafoclimáticos, que influyen en esta variación, lo importante es conocer que efectivamente sí existe diferenciación entre estos beneficios y que toda pulpa no es igual para efectos de producción de metano.

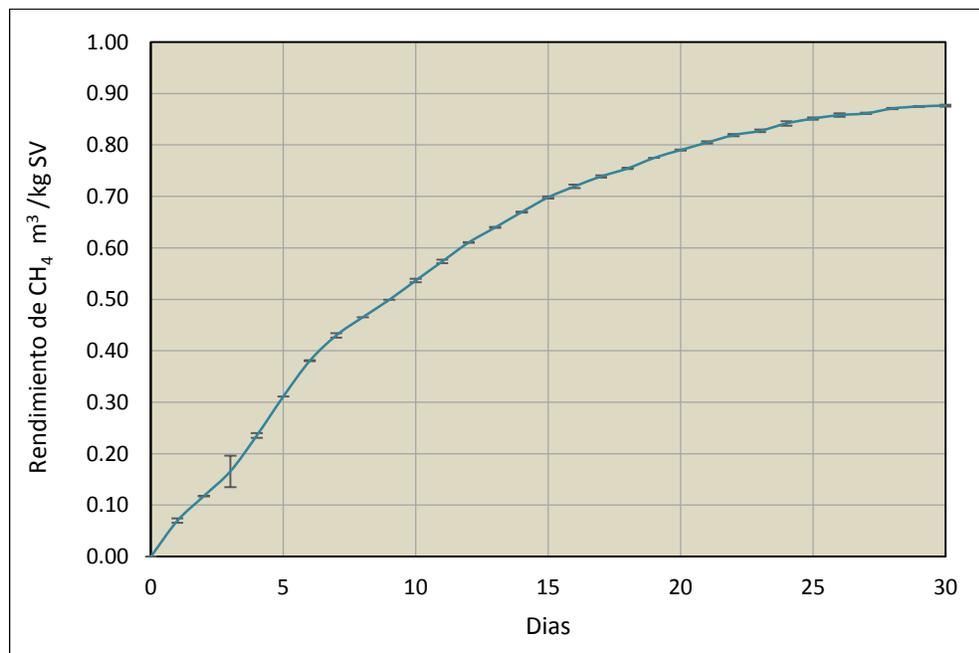
Otros autores han realizado pruebas de rendimiento de biogás de la pulpa y aunque no está clara la metodología utilizada, o si los valores fueron normalizados, se ofrecen algunos datos encontrados en la literatura: (1) (Chacón y otros, 1984), mostró rendimientos de 150 a 196 ml de biogás por kg de MoS, (2) (Stainer, 2011) encontró un rendimiento de 380 ml de biogás (≈60% de metano) por kg de MoS, (3) la Oficina Federal Suiza de Energía (BFE, s.f.) en un documento sin publicar, presentó valores de 380 ml de biogás, por cada kg de MoS.

A partir de los resultados presentados en la figura 13 se determinó el rendimiento acumulado de producto en sustrato. El máximo rendimiento alcanzado fue de 0,87

$\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$ , para RIS de 2. De acuerdo a Dinsdale (1996), el contenido de metano que puede generar la pulpa de café varía entre los valores de 61 a 70 %, mientras que Botero (1987) y Ntengwe et al. (2010) reportan un valor de 50 % - 70% de contenido de metano para el estiércol de ganado vacuno. Estos valores nos indican que la producción de biogás obtenida es superior a la reportada en otros estudios, siendo adecuado este proceso para la utilización de este residuo

Por tanto es viable incluir en procesos de digestión anaerobia este tipo de residuos, en donde además de darle un valor agregado al mismo, se reducen los impactos ambientales que este puede generar a causa de su acumulación.

Figura 13. Potencial de biometanización de la DA pulpa del café



La finca la Esperanza posee un área de 10 hectáreas de las cuales 8 se encuentran cultivadas con café (*Coffea arabica*) Variedad Colombia, se producen en promedio anual por ha. 30 Cargas de café pergamino (3750 kg/ha) lo que

equivale un total de 30 000 kilogramos en las 8 hectáreas cultivadas, produciendo por beneficio húmedo aproximadamente 60.000 kg de pulpa de café.

Realizando la conversión de kilogramos de sólidos volátiles de pulpa de café a kilogramos de pulpa de café, si los 60.000 kg de pulpa se utilizaran para el proceso de DA produciría 8130,6 m<sup>3</sup> de metano y 480 m<sup>3</sup> de efluente. El poder calorífico del biogás para la pulpa fresca es de 0,54 MJ/kg. (Rodríguez 2010)

Así, el biogás generado en la fermentación de pulpa de café se puede utilizar de tres formas:

- Aplicación directa como fuente de calor (cocina, alumbrado).
- Combustión en calderas de vapor convencionales aprovechando el calor para calentar el digestor y para calefacción en general (secadores de café)
- Utilización como combustible en motores de combustión interna acoplados a generadores de electricidad.

Cuando el biogás se usa únicamente como fuente de calor, se quema en su estado original. Si se dispone de una instalación previa de gas natural o butano, basta con adaptar los quemadores a las características del biogás.

Cada día cobra mayor importancia el uso del biogás como tal en motores de combustión interna. Ello es debido sobre todo a que, con una utilización conjunta de la potencia y el calor desarrollado por el motor, este tipo de instalaciones permite un aprovechamiento de hasta un 90% de la energía contenida en el biogás.

Existen en el mercado motores que utilizan biogás con potencias comprendidas entre 15 y algunos centenares de kW. La potencia desarrollada se utiliza para accionar diversas máquinas, bien directamente, o previa su transformación en

electricidad. Al mismo tiempo, el calor recuperado de la refrigeración del motor o de los gases de escape se usa para obtener agua o aire calientes, utilizables en calefacción tanto ambiental como del digestor, secado, etc. Por término medio, 1 m<sup>3</sup> de biogás produce de 1,6 a 1,9 kW/h de electricidad y 3,5 kW/h de calor.

Se ha observado que en algunas fincas de beneficio del café se dispone de tecnologías (secadoras de café) más eficientes y que requieren menos espacio que el secado tradicional al sol. Sin embargo en estos casos hay un incremento en los costos en el consumo de energía por el proceso de secado (10474,5 kcal por cada 250 kg de café), en estos casos puede ser recomendable utilizar la pulpa de café en procesos de digestión anaerobia

Técnicamente el proceso de digestión anaerobia utilizando como sustrato pulpa de café es viable, especialmente para caficultores que producen medianas y grandes cantidades de pulpa de café. Ambientalmente, los beneficios son ilimitados e inmejorables. Se resuelve el problema de contaminación de las fuentes hídricas en el momento de dejarlos a la intemperie después del beneficio; se controla la proliferación de vectores de enfermedades que afectan significativamente a las comunidades más vulnerables, se minimiza la presión sobre los bosques por el uso de la leña como única fuente de energía para la cocción de los alimentos, aumentaría la fertilidad de los suelos al obtener un biofertilizante con alto contenido en nitrógeno y otros elementos que requieren las plantas, por la combustión del biogás obtenido se disminuye la emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y se crea un ciclo donde la vegetación aprovecharía de manera eficiente este gas para la elaboración de oxígeno y carbohidratos mediante los procesos fotosintéticos. En pocas palabras se obtendría un cambio significativo en el medio ambiente que se verá reflejado en la sociedad al mejorar sus condiciones de vida. Económicamente se crea una alternativa enérgica que suplan sus labores diarias y además sean amigables con el ambiente.

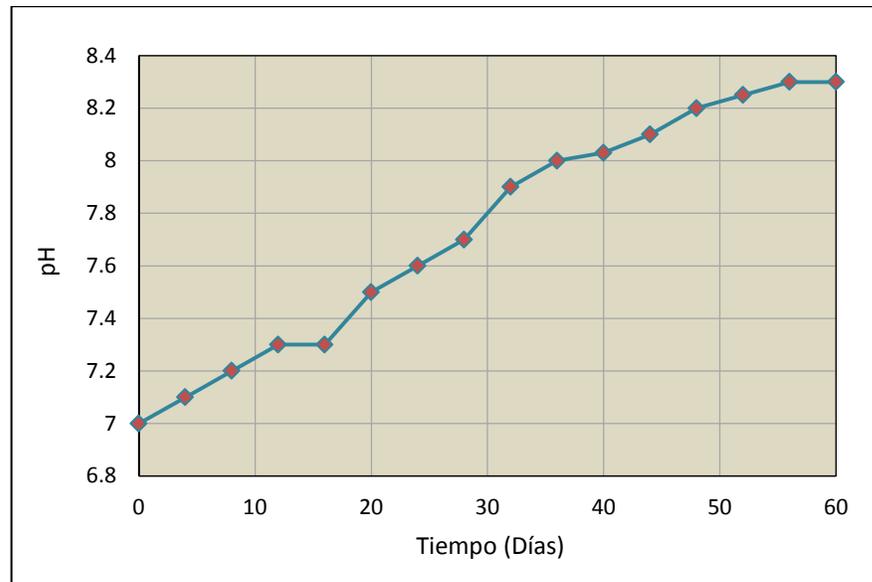
## 4.2 VERMICOMPOSTAJE DE LA PULPA DE CAFÉ

Para el proceso de vermicompostaje la pulpa de café tuvo aproximadamente 30 días de "pre-descomposición", es decir hasta que el sustrato estuvo maduro; una coloración café oscuro, sin mal olor y semipastoso al tacto, esto indica que el pH, humedad y temperatura son óptimos para la adición de la lombriz.

**4.2.1 pH.** El proceso de vermicompostaje inicio con un pH cercano a la neutralidad 7,1, el cual fue aumentando ligeramente durante el transcurso del proceso llegando a un valor de 8,4 al final del proceso, (figura 14) esto debido a la degradación de compuestos de naturaleza ácida y a la mineralización de compuestos nitrogenados hasta la forma de amoníaco, actuando también el proceso de amonificación como un importante sumidero de protones y, por tanto, favoreciendo al aumento del pH. (Delgado *et al* 2004). El pH de la pulpa de café madura no procesada fue inferior al del vermicompost, Aranda (1992) citado por Siles Calvo (1997), menciona que la lombriz coqueta roja al procesar cualquier tipo de materia orgánica, incrementa el pH del vermicompost

Los valores reportados para el pH están dentro de los mencionados para la norma NMX-FF-109-SCFI-2007 para vermicompost que indica como aceptable valores de pH entre 5,5 y 8,5, incluso Flores y Vázquez (2008) mencionan que las lombrices pueden soportar un pH de hasta 8,4. Es decir, que soportan límites de pH ligeramente ácidos y ligeramente alcalinos, sin embargo, mencionan que un pH cercano a 7 es óptimo para el desarrollo de la lombriz

Figura 14. Variación del pH durante el vermicompuesto

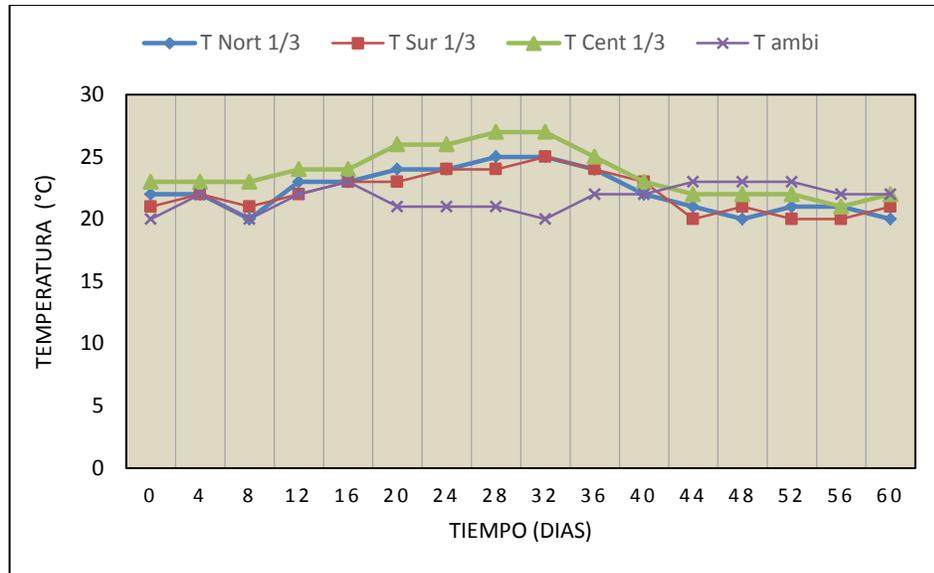


**4.2.2 Temperatura.** Durante los dos meses que duró el experimento la temperatura del sustrato se mantuvo entre los 20 y 24° C. (figura 15), esta temperatura mostró un comportamiento aleatorio dependiendo principalmente de la temperatura ambiental, puesto que la temperatura del sustrato fue en algunas ocasiones más baja que la del ambiente, posiblemente debido a factores como la humedad del sustrato y la sombra de las camas. (León et al); registrándose un ligero aumento en la temperatura en la parte central con respecto a las de la cara norte y sur.

Estas variaciones en la temperatura sin embargo se mantuvieron dentro del rango tolerable por las lombrices autores como Capistrán et al (1999), Singh et al. (2004), Pandit et al., (2012) reportan que las lombrices toleran un amplio rango de temperatura cuya variación alcanza valores menores a 20° C y no mayores de 30° C, e indican que fuera de esto rangos no pueden sobrevivir y reproducirse adecuadamente; sin embargo, Iñiguez (2002) menciona que a 31° C las lombrices se aparean y se reproducen favorablemente más en aquellos países cercanos al

trópico y que posean mayor cantidad de meses cálidos. En este estudio se observó la variación de temperatura registrada no afectó el crecimiento y reproducción de las lombrices

Figura 15. Variación de la temperatura durante el proceso de vermicompostaje



**4.2.3 Humedad.** Durante el proceso de vermicompostaje se registró la humedad basándose en las condiciones óptimas para el desarrollo de la lombriz siendo la más adecuada el 80%; se registró 2 cuando las condiciones de humedad eran cercanas al 80%, 1 cuando la humedad era inferior 3 mayor al 80% por prueba de puño.

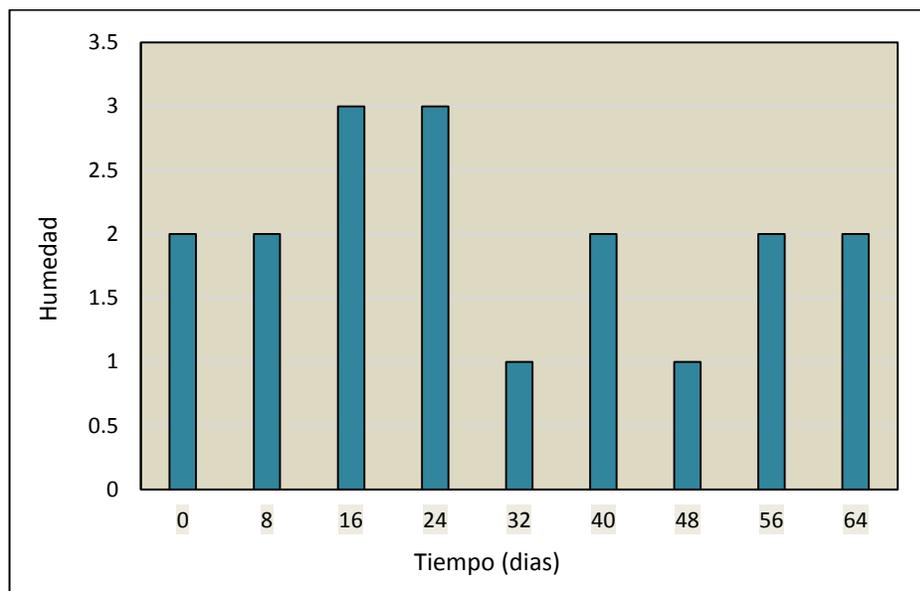
En la mayor parte del proceso la humedad osciló en los rangos adecuados, aunque en las semanas 5 y 7 disminuyó debido al aumento de la temperatura ambiental haciéndose necesario la adición de agua al proceso. Mantener constante la humedad es fundamental porque permite mantener la actividad metabólica de la lombriz, además este factor es importante en la reproducción y fecundidad de los cocones de las lombrices, ya que si la humedad se dispara o

baja bruscamente las lombrices corren el riesgo de morir, pero cuando los cambios se dan de manera lenta entran en un periodo de latencia lo que afecta considerablemente el proceso de biodegradación. (Flores y Vázquez. 2008).

Aunque se registró una variación en el contenido de humedad, el sustrato utilizado en el vermicompuesto tuvo una humedad óptima cercana al 80% (Figura 16).

Jiménez (2008) por su parte, menciona que la humedad en la cama de las lombrices debe oscilar entre el 70 y 80%, sugiriendo un valor óptimo de 80%. Así mismo, Duran y Henríquez (2007), reportan un valor de humedad de 77% como óptimo para el desarrollo de las lombrices.

Figura 16. Variación de la humedad durante el vermicomposteo



Este factor interviene en la reproducción y fecundidad de las cápsulas o cocones, una humedad superior al 85% es perjudicial para las lombrices, haciendo que éstas entren en un período de inactividad en donde se afecta la producción de vermicompost y la reproducción de biomasa. Las condiciones más favorables para

que la lombriz produzca y se reproduzca se presentan a una humedad del 80 %, es aceptable hasta 70 %, debajo de 70 % de humedad es una condición desfavorable, por otro lado niveles de humedad de 55 % son mortales para las lombrices. Es básico recordar que la humedad de 80% controla la plaga, hormigas que se acercan por los azúcares que produce la lombriz al deslizarse por las galerías del substrato

**4.2.4 Porcentaje de Descomposición.** Para determinar la variable porcentaje de descomposición, se toman como parámetros las características organolépticas (temperatura, color, olor y textura), del compostaje según Costa et al. (1991). Los cambios en el olor, color y consistencia de la pulpa de café durante el vermicomposteo se presentan en la tabla 7, de allí se destaca que el olor fue desagradable y ligeramente desagradable hasta el día 20, cambiando a un olor agradable a tierra a partir del día 30 (figura 16).

El color cambio de café a café oscuro a los 40 días y se mantuvo estable a los 50 días. Por su parte, la consistencia inicialmente fue pastosa con mucha humedad y a los 60 días el sustrato presentaba una consistencia menos húmeda

Tabla 7. Descomposición de la pulpa de café durante el proceso de vermicompostaje

Característica	T1 10 días	T2 20 días	T3 30 días	T4 40 días	T5 50 días	T6 60 días
<b>Olor</b>	Desagradable	Ligeramente desagradable	Agradable	Agradable	Agradable	Agradable
<b>Color</b>	Rojizo - anaranjado	Marrón oscuro	Marrón oscuro	Marrón oscuro	Café oscuro	negro
<b>consistencia</b>	pastoso	Semi-pastoso	Semi-pastoso	Semi-seco	Semi-seco	Seco-esponjoso

Figura 16. Proceso de degradación de la pulpa de café



Los indicadores físicos resultado de la estabilidad del material biodegradado confirieron al vermicompost un coloración café oscuro, sin olores desagradables suave y seco, y con agregados que conforman el producto (Capistrán, et al., 1999; NMX-109-SCFI-2007)

Las lombrices, al igual que los microorganismos aerobios, necesitan de oxígeno para realizar sus funciones (Capistrán et al., 1999; Domínguez y Pérez, 2010 c) por lo que la aireación que se aplicó constantemente a la cama de lombriz contribuyó significativamente a la evolución favorable en la obtención de las características físicas de color, olor y consistencia.

Cabe destacar que las variaciones asociadas a los cambios físicos como el color, olor y consistencia cambiaron de acuerdo con las siguientes características: (Domínguez et al., 210b; Leveau y boix, 2000; McLean et al., 2006, Melo, 2006; NMX-109-SCFI-2007)

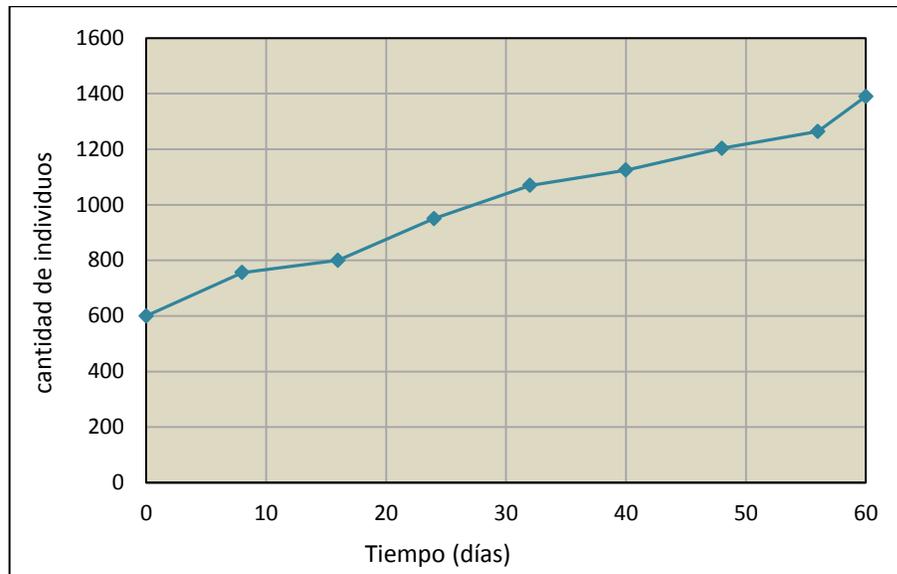
- Degradación química por acción del oxígeno ambiental al generar reacciones de óxido-reducción.
- Consumo de sustratos orgánicos por acción microbiana y generación de sustancias húmicas por acción de la lombriz
- Cambios asociados con la formación de agregados producidos por la lombriz en los cuales existe la presencia de sustancias húmicas.

- Reacciones de intercambio iónico e inactivación de compuestos aromáticos por acción microbiana.
- Maduración del vermicompost por acción de variaciones de coloración por degradación de compuestos cromogénicos generados por la lombriz y la degradación microbiana.

**4.2.5 Densidad poblacional.** La densidad media de la población de lombrices *Eisenia foetida* a lo largo del proceso de vermicompostaje fue de 1390 lombrices para el día 60, (figura 17) partiendo de una población inicial de 600 individuos es decir un aumento del 115% mensual para un total del 231%.

Aranda (1989), en condiciones de laboratorio utilizando pulpa de café con *Lombricus rubellus* en niveles equivalentes de 8.071 kg/m<sup>3</sup> las lombrices se incrementaron en un 273,9% en la cantidad de individuos en 47 días. Teniendo en cuenta esta producción para el caso de *Eisenia foetida* la adición de pie de cría de 600 lombrices iniciales para los 40 kilogramos de sustrato es adecuada para crecimiento y desarrollo de los individuos

Figura 17. Densidad poblacional de la lombriz *Eisenia foetida* en la pulpa de café



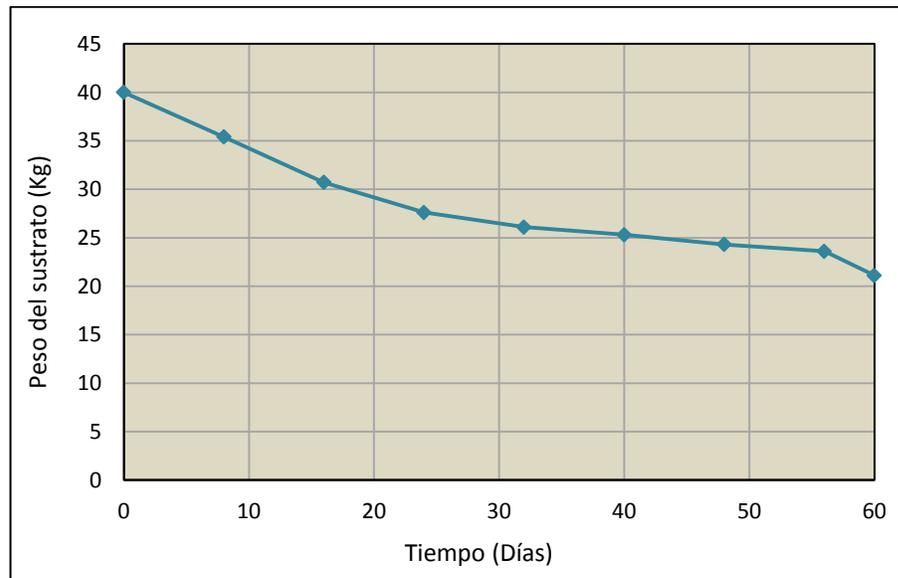
Reinecke & Viljoen (1990), en estudios con *Eisenia foetida* cultivada en estiércol de vaca, y Domínguez & Edwards (1997), que estudiaron el crecimiento y reproducción de *Eisenia andrei* en purín de cerdo, encontraron que cuando el crecimiento es estudiado con diferentes densidades de población, las lombrices de los tratamientos más densamente poblados crecían de una forma más lenta y alcanzaban un peso final también inferior, a pesar de que el peso total de biomasa de lombriz por unidad de residuo era mayor en los tratamientos más poblados.

**4.2.6 Degradación del Sustrato.** El porcentaje de descomposición depende de la cantidad de lombrices, edad, tipo de manejo y alimentación que consumen en un determinado tiempo, ya que del 100% de sustrato consumido el 60% va llegar a ser vermicompost y el 40% es aprovechado como alimento (Barbado 2003, Ferruzzi 1994, Bravo 1996).

En el proceso realizado con pulpa de café de los 40 kilogramos de pulpa en estado de predescomposición se obtuvo un total de 21,1 kg al final del proceso,

con un porcentaje de pérdida de biomasa del 52,75% estando por debajo de lo reportado en la bibliografía

Figura 18. Pérdida de sustrato en el proceso de vermicompostaje de la PC



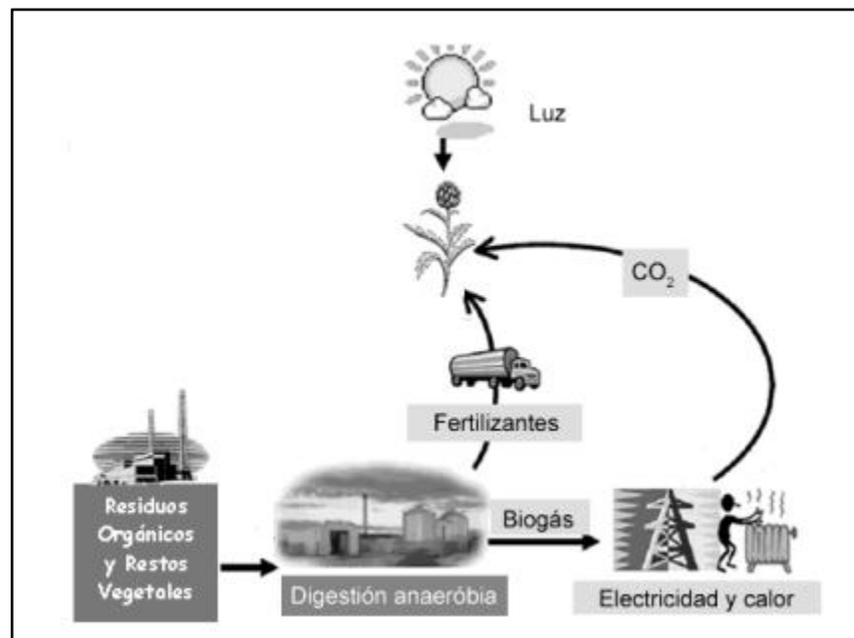
El vermicompostaje de pulpa de café representa una alternativa ecológica para aprovechar este material en la producción de abono orgánico, reducir las dependencias de insumos externos y darle valor agregado a este subproducto del cultivo. La aplicación de este producto al suelo produce múltiples beneficios, aumenta la permeabilidad, la agregación de partículas, de macro y microelementos, la corrección de la acidez, la población de microorganismos y mejora la eficiencia y el uso de nutrimentos por parte de las plantas.

Se debe promover el vermicompostaje como una alternativa tecnológica para el manejo y aprovechamiento de la pulpa de café y sobre todo, como una vía para reducir la contaminación ambiental y la degradación de las cuencas hidrográficas.

### 4.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS DE LA DEGRADACIÓN BIOQUÍMICA DE LA PULPA DE CAFÉ: DIGERIDO Y VERMICOMPOST

**4.3.1 Evaluación del digerido producto de la digestión anaerobia de la pulpa de café.** A partir del digerido se fabrica fertilizantes de acuerdo al esquema que mostramos en la Figura 18, cerrando, así, el ciclo de crecimiento de las plantas, que son las fuentes o materias primas de otras actividades agrícolas e industriales donde se producen los materiales orgánicos desechados que sirven de alimentación al proceso de digestión anaerobia.

Figura 18. Esquema de utilización de los fertilizantes procedentes de la digestión anaerobia en las plantas



Fuente: (Agrowaste 2013)

Estudios realizados por Warnars and Oppenoorth, (2014) indican que el uso del efluente puede tener efectos positivos en los granos de café. Se reduce el impacto de la enfermedad de la roya en los árboles y debido al alto valor nutricional, se

aumenta la resistencia a esta enfermedad, aumentando el rendimiento productivo de las plantas (González y Ponce 2013), el cultivo del grano madura más pronto y en las parcelas de prueba se ha visto un aumento en el ritmo de crecimiento. También han aumentado y/o mejorado el peso, el color, la forma y el aroma.

Igualmente, los requerimientos de riego son bajos ya que los cultivos tratados con este efluente retienen más el agua que las parcelas no tratadas. Finalmente, su uso mantiene alejado al gorgojo (una plaga). Los ingresos adicionales de una familia se pueden incrementar entre 360.000 y 900.000 pesos con el uso de biol debido al ahorro en fertilizantes químicos, el aumento del rendimiento de los cultivos y al control de plagas y enfermedades.

El suelo prototipo del departamento de Santander es franco Arenoso, en la tabla 8 se describe un análisis de suelos correspondiente al prototipo de Santander, los requerimientos nutricionales del cultivo de café en etapa de producción información fue proporcionada por ANACAFE, y el análisis fisicoquímico del digerido producto de la digestión anaerobia de la pulpa del café.

Tabla 8. Requerimiento nutricional del cultivo de café y análisis fisicoquímico del suelo y efluente

<b>PARÁMETRO</b>	<b>REQUERIMIENTO NUTRICIONAL DEL CAFÉ</b>	<b>COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DEL SUELO DE UNA FINCA CAFETERA</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DEL DIGERIDO</b>
Fosforo (P)	10 – 30 ppm	3 meq/100 g suelo	307,11 ppm
Potasio (K)	78 ppm	48 ppm.	1252,7 ppm
Calcio (Ca)	800-4000 ppm	106 ppm.	287,05 ppm
Magnesio (Mg)	121,5 – 1215 ppm	27,9 ppm.	178,99 ppm

PARÁMETRO	REQUERIMIENTO NUTRICIONAL DEL CAFÉ	COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DEL SUELO DE UNA FINCA CAFETERA	CARACTERÍSTICAS DEL DIGERIDO
Hierro (Fe)	10 – 50 ppm	45 meq/100 g suelo	34,172 ppm
Cobre (Cu)	1 – 20 ppm	0,6 meq/100 g suelo	1,68 ppm
Zinc (Zn)	3 – 15 ppm	1,1 meq/100 g suelo	2,9 ppm
Manganeso (Mn)	5 – 15 ppm	4 meq/100 g suelo	20,11 ppm
Nitrógeno	2,5 – 3,5 %	No analizado	288,32 ppm
Carbono		-	23,47 ppm
Sodio		0,54 meq/100 g suelo	539,75 ppm

Al detallar este análisis se puede observar que el contenido nutricional de un suelo adecuado para el cultivo de café es de (6) nitrógeno, (1) fósforo en forma  $P_2O_5$  y (6) de potasio en forma de  $K_2O$  (6/1/6) mostrando que estos suelos requieren una mayor proporción de potasio y nitrógeno y en menor proporción de fósforo.

La enmienda obtenida a partir de la digestión anaerobia es una suspensión acuosa líquida cuyas partículas corresponden a la biomasa microbiana correspondientes al proceso con sólido. Este digerido se puede utilizar principalmente para riego al cultivo de café que adicionalmente aportará nutrientes esenciales que según el análisis de suelos y los requerimientos para el cultivo de café se encuentra dentro de los niveles adecuados en cuanto a microelementos tales como hierro, magnesio, zinc, cobre entre otros con relación N/P/K en una razón de 2/5/10.

**4.3.2 Evaluación del Proceso del Vermicompostaje de la Pulpa de Café.** En la finca la Esperanza como anteriormente se mencionó se producen en promedio anual por ha. 30 Cargas de café pergamino (3750 kg/ha) lo que equivale un total de 30 000 kilogramos en las 8 hectáreas cultivadas, produciendo por beneficio húmedo aproximadamente 60.000 kg de pulpa de café las cuales producirán 31.650 kg de vermicompostaje y una producción de 1 185 000 lombrices equivalentes a una biomasa de aproximadamente 1 000 kg en un periodo de 60 días con previa descomposición de la pulpa.

El vermicompost es un fertilizante orgánico, biorregulador y corrector del suelo cuya característica fundamental es la bioestabilidad, pues no da lugar a fermentación o putrefacción. Posee una riqueza en flora microbiana (1 gr. de vermicompost contiene aproximadamente 2 billones de microorganismos vivos), que al ponerse en contacto con el suelo, aumenta la capacidad biológica de éste y como consecuencia su capacidad de producción vegetal al ser el pH del humus de lombriz cercano a 7. Además, produce hormonas, sustancias producidas por el metabolismo secundario de las bacterias, que estimulan los procesos biológicos de la planta. El humus de lombriz puede almacenarse durante mucho tiempo sin que sus propiedades se vean alteradas, pero es necesario mantenerlas bajo condiciones óptimas de humedad (40%).

En la tabla 9 se registra el análisis fisicoquímico del vermicompostaje relacionado con el análisis de suelos y los requerimientos para el café.

Tabla 9. Requerimiento nutricional del cultivo de café y análisis fisicoquímico del vermicompostaje

PARÁMETRO	REQUERIMIENTO NUTRICIONAL DEL CAFÉ	ANÁLISIS DEL SUELO	CARACTERÍSTICAS DEL VERMICOMPOSTAJE
Fósforo (P)	10 – 30 ppm	3 meq/100 g suelo	0,215%
Potasio (K)	78 ppm	48 ppm	0,95%
Calcio (Ca)	800-4000 ppm	106 ppm	1,09%
Magnesio (Mg)	121,5 – 1215 ppm	27,9 ppm	0,36%
Hierro (Fe)	10 – 50 ppm	45 meq/100 g suelo	0,79 %
Cobre (Cu)	1 – 20 ppm	0,6 meq/100 g suelo	31,44 ppm
Zinc (Zn)	3 – 15 ppm	1,1 meq/100 g suelo	115,25 ppm
Manganeso (Mn)	5 – 15 ppm	4 meq/100 g suelo	286,05 ppm
Nitrógeno	2,5 – 3,5 %	No analizado	1,33%
Carbono		-	16,23%
Sodio		0,54 meq/100 g suelo	0,29%

El vermicompostaje es un abono que podría ser utilizado como enmienda para suelos con una baja capa de material vegetal dado su importante contenido de carbono que alcanza un 16,23%. En su composición están presentes los nutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio en una relación de 10/5/10. El calcio,

magnesio, manganeso, hierro y sodio en cantidad suficiente para garantizar el perfecto desarrollo de las plantas. Al adicionarlo al suelo facilita la absorción de los elementos fertilizantes de manera inmediata, siendo su acción prolongada a lo largo de todo el proceso vegetativo. Tiene capacidad de tamponamiento, por lo que en su presencia los terrenos ligeramente ácidos o básicos, tienden a neutralizarse. Su pH neutro y su equilibrada relación Carbono/Nitrógeno, permite aplicarlo en contacto directo con la raíz o las semillas, de forma que evita el impacto del trasplante y facilita la germinación. Contiene sustancias fitorreguladoras que aumentan la capacidad inmunológica de las plantas, por lo que ayuda a controlar la aparición de plagas.

Adicional al vermicompost se obtiene una biomasa de lombriz producida por el proceso, que constituye una fuente proteica de interés pues alcanza valores de hasta el 70% de proteína en peso seco, que puede ser empleada para la alimentación animal (cerdos, peces entre otros) y para complementar la humana, aunque su riqueza mineral es inferior a las harinas de pescado y su contenido en fibra es muy reducido. Debido a su composición de aminoácidos esenciales (lisina, metionina, valina arginina) y otras sustancias, tienen un amplio uso farmacológico. Al adicionar las lombrices al terreno estas ejercen un control efectivo y económico de los contaminantes sólidos orgánicos, aumentan la porosidad, drenaje y aireación del suelo mediante su sistema de galerías, con su movimiento a través de los diferentes estratos del suelo mezclan las partículas minerales con la materia orgánica de la superficie favoreciendo la formación de complejos coloidales beneficiosas a las plantas.

Tanto el digerido producto de la digestión anaerobia como el vermicompostaje pueden ser utilizados como enmienda para los suelos, evitando así la adición de fertilizantes químicos que son hechos a base del ácido nítrico, ácido sulfúrico y amoníaco. Entre los efectos nocivos de estos fertilizantes químicos están la pérdida de la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C) y la formación de

complejos arcillo-húmicos básicos en la fertilidad de los suelos y la consecuente pérdida de la asimilación de los macro y microelementos aportados y existentes en el suelo, que además de no poder ser asimilados por las plantas, buscaran otros elementos del suelo para formar sales estables que serán las responsables del aumento de salinidad y conductividad del suelo, o sea, del bloqueo de los macro y microelementos y su pérdida de fertilidad (Sociedad española de productos húmicos 2013). Además los excesos de nitrógeno y fosfatos pueden infiltrarse en las aguas subterráneas o ser arrastrados a cursos de agua. Esta sobrecarga de nutrientes provoca la eutrofización de lagos, embalses y estanques y da lugar a una explosión de algas que suprimen otras plantas y animales acuáticos y su peor riesgo es a largo plazo: degradan la vida del suelo y matan a microorganismos útiles para la nutrición de las plantas. Es decir, con el tiempo no sólo no se nutre realmente la tierra, sino que se le vuelve obsoleta rápidamente.

Evaluada las dos alternativas es posible estabilizar la pulpa de café por digestión anaerobia y vermicompostaje. Se recomienda para pequeños productores el proceso de vermicompostaje ya que se produce humus de excelente calidad en elementos menores y mayores, se puede aplicar al cultivo directamente, puede almacenarse por mucho tiempo sin que se alteren sus propiedades; es ideal tanto para interiores como exteriores; la materia prima es de fácil adquisición, además es un proceso muy sencillo que un caficultor sin amplios conocimientos puede hacer correctamente, el costo de producción es relativamente bajo, por lo que no necesita financiamiento. Las cajas se confeccionan con madera y se usan hasta que su estado lo permita; siendo esta una forma viable de crear un fertilizante natural el cual reduce ampliamente el impacto ambiental de la agricultura, protegiendo los suelos y manteniéndolos propicios para el cultivo además de evitar la contaminación de las cuencas hídricas aledañas.

Para medianos y grandes caficultores se recomienda la digestión anaerobia como forma de estabilización de materia orgánica (pulpa de café), ya que de este

proceso se obtiene un biogás que puede utilizado en forma de calor o energía para el mismo proceso de beneficio del café, disminuyendo los impactos económicos y adicionalmente un digerido que puede ser utilizado como enmienda para el cultivo. Este proceso requiere de infraestructura y un aporte monetario mayor, sin embargo la digestión anaerobia sería más fructuosa para un caficultor que posean extensos cultivos de café y por ende sus subproductos ya que es un proceso más rápido y de fácil labor en grandes proporciones.

## 5. CONCLUSIONES

Se evaluó el proceso de digestión anaerobia de la pulpa de café a escala de laboratorio donde se obtuvo una producción de metano 279,75 ml CH<sub>4</sub> (STP) /g SV de pulpa de café , con de rendimientos de 0,87 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> /kg SV de pulpa de café, con una remoción de materia orgánica representada por la concentración de sólidos volátiles de 58 % y 8 litros de efluente, por la tanto se concluye que es posible utilizar el proceso de DA para estabilización de la materia orgánica presente en la pulpa de café.

Se evaluó el proceso de vermicompostaje a partir de la pulpa del café utilizando de *Eisenia foetida* donde se obtuvieron 527,5 g de vermicompost por kilogramo de pulpa al final del proceso, con un porcentaje de pérdida de biomasa del 52.75% y un aumento en la cantidad de biomasa del 273%; obteniéndose un abono orgánico con condiciones fisicoquímicas apropiadas que lo hacen apto para su utilización agrícola, demostrando que este proceso es viable para la estabilización de la materia orgánica presente en la pulpa de café.

El proceso de digestión anaerobia y el de vermicompostaje son adecuados para la estabilización de la pulpa café y al final se obtienen subproductos que pueden ser utilizados como enmienda del mismo cultivo. El caso de la digestión anaerobia se recomienda para grandes y mediamos caficultores debido a la necesidad de una infraestructura para el uso energético y el caso del vermicompostaje para pequeños caficultores ya que no requiere grandes cantidad de materia prima para su implementación.

El uso de cualquiera de los dos proceso en la estabilización de la materia orgánica genera beneficios ambiental por disminución de la contaminación tanto en el agua como del suelo y el aire, reduce la atracción de vectores que atraen enfermedades

para los habitantes de la región y a su vez disminuye el impacto negativo realizado por la utilización de fertilizantes químicos, pesticidas e insecticidas en el suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Adi, A. J., & Noor, Z. M. (2009). Waste recycling: Utilization of coffee grounds and kitchen waste in vermicomposting. *Bioresource Technology*, 100(2), 1027-1030.
- ❖ Aira, M., Monroy, F., Domínguez, J. & Mato, S. (2002). How earthworm density affects microbial biomass and activity in pig manure. *European J. Soil Biol.* 38:7-10.
- ❖ Álvarez E., Calderón D. (2014). Modelamiento del rendimiento de metano de los residuos sobrantes de restaurante UIS. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander
- ❖ Angelidaki I, Alves M, Bolzonella D, Borzacconi L, Campos J. L, Guwy A.J, et al. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Sci. Technol.* (2009);927-934.
- ❖ Angelidaki, I., Karakashev, D., Batstone, D., Plugge, C., Stams, A. J. (2011). Biomethanation and its potential. En: *Methods in Enzymology*, Vol. 494. Editor: Rosenzweig y Ragsdale. Elsevier Academic Press Inc. 327-351.
- ❖ Arcila O. F. 1979. Producción de biogás a base de pulpa de café. En Reunión internacional sobre la utilización integral de los subproductos del café Guatemala. Chinchiná Cenicafé.
- ❖ Barral m., m. Domínguez y f. Díaz-fierros. 2001. Usos del compost y papel de la materia orgánica del suelo. Situación gallega. Depto. Edafología e Química Agrícola. Facultad de Farmacia. Universidad de Santiago de Compostela. Disponible en: [http://ecotono.net/descargas/2005\\_docs/06\\_DOCUMENTO\\_Usos-del-compost-y-supapel-en-Galicia.pdf](http://ecotono.net/descargas/2005_docs/06_DOCUMENTO_Usos-del-compost-y-supapel-en-Galicia.pdf).
- ❖ Blandón C., G.; Dávila A., M. T.; Rodríguez V., 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.

- ❖ Boopathy, R. (1987). Inoculum source for anaerobic fermentation of coffee pulp. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 26(6), 588-594.
- ❖ Boopathy, R., & Mariappan, M. (1986). Anaerobic digestion of coffee pulp. *Asian Environment*, 8(4), 21-23.
- ❖ Bouwman h. Y Reinecke A. J. (1991). A defined medium for the study of growth and reproduction of the earthworm *Eisenia foetida*. *Biol. Fertil. Soils* 10, 285-289.
- ❖ Calle V., H 1974. Como producir gas combustible con pulpa de café. Chinchiná. Cenicafé. 197 12p. Boletín técnico No. 3.
- ❖ Calle V., H 1977. Subproductos de café. Chinchiná. Cenicafé. 84 p. Boletín técnico No. 6.
- ❖ Cárdenas, J. Á. H. (2013, June). Vermicompostaje de Lodos Residuales provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. In *2da Jornada Científica de Estudiantes 2013-Facultad de Ingeniería y Arquitectura*.
- ❖ Chinappi Hiccolella Italia y Héctor Caraballo. Construcción de un biodigestor anaeróbico continuo para el tratamiento de pulpa de café (cofea arábica). *Revista Científica Arbitrada Geoterra Didáctica*. Volumen 1, Número 3. Enero – junio, 2003.
- ❖ Domínguez, J., Velando, A. & Ferreiro, A. (2005). Are *Eisenia fetida* (Savigny, 1826) and *Eisenia andrei* Bouché, 1972 (Oligochaeta, Lumbricidae) different biological species?. *Pedobiol.* 49: 81-87.
- ❖ Drac Noarys Pérez Díaz, Msc. Raisa m. Castillo Ramos, Dra. Leila R. Carballo Abreu, Msc José Angel Veliz Gutiérrez Universidad de Pinar del Río; Departamento de Química noarys@af.upr.edu.cu Pinar del Río, Cuba
- ❖ FEDECAFE. 2015. Producción de café. Disponible en: <http://www.federaciondecafeteros.org>. Consultado junio 01 de 2015.
- ❖ García, S. 2001. Mitigación del impacto ambiental que generan los residuos sólidos del beneficio de café a partir de la producción de abono orgánico. Unidad de control y gestión de conocimiento (CATEDES). La Habana. 16 p.

- ❖ Huber, C. (2002). Vermicompostaje de desechos orgánicos de la producción citrícola y forestal. *Trabajo Final de Graduación. FCA–UNNE (inédito)*.
- ❖ Luongo Malave Andrea Cristina, Bernardi Milena, Fino Debora, Ruggeri Bernardo 2015. Multistep anaerobic digestion (MAD) as a tool to increase energy production via H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> International Journal of Hydrogen Energy (Impact Factor: 2.93). 04/2015; 40(15). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.02.068
- ❖ Martínez, F., Calero, B., Nogales, R. & Rovesti, L. (2003). Lombricultura. Manual práctico. Unidad de producciones gráficas MINREX, Cuba.
- ❖ Mendoza Hernández Daicy de Jesús. Vermicompost y compost de residuos hortícolas como componentes de sustratos para la producción de planta ornamental y aromática. Caracterización de los materiales y respuesta vegetal” Memoria de la Tesis Doctoral. Valencia, septiembre de 2010
- ❖ Moncayo G. “Dimensionamiento diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás” Aqualimpia Beratende Ingenieure. 2011, 53-185.
- ❖ Nogales R., Elvira C., Benítez E. Y Gómez M. (1996). Uso agrícola de compost y vermicompost de basuras urbanas: procesos, madurez y calidad de los productos. Residuos 26, 53-57.
- ❖ Noriega S. Adrianyela<sup>1</sup> \* Silva A. Ramón<sup>2</sup> y García de S. Moraima<sup>1</sup> <sup>2</sup>. 2009. Composición química de la pulpa de café a diferentes tiempos de ensilaje para su uso potencial en la alimentación animal. Departamento de Nutrición Animal y Forrajes. Escuela de Zootecnia. Universidad de Oriente. Maturín, Monagas. Venezuela. Centro de Investigaciones Agrícolas del estado Monagas. 27(2): 135-141. Maturín, Monagas. Venezuela
- ❖ 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 productores. Avances Técnicos Cenicafe No. 261:1-4. 1999.
- ❖ Orozco, F.H.A, Cegarra, J.B, Trujillo, L.M.A, Roig, A.B Vermicomposting of coffee pulp using the earthworm *Eisenia fetida*: Effects on C and N contents and the availability of nutrients (1996) *Biology and Fertility of Soils*, 22 (1-2), pp. 162-166.

- ❖ Pandey, A., Soccol, C. R., Nigam, P., Brand, D., Mohan, R., & Roussos, S. (2000). Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. *Biochemical Engineering Journal*, 6 (2), 153-162.
- ❖ Pierre Francis, Rosell María B. y Quiroz Ana I. 2009 El compostaje de la pulpa del café como alternativa para los caficultores INIA HOY-Lara. ISSN: 1856-9951
- ❖ Puerta Q. G.I. Buenas prácticas agrícolas para el café. 2006, 12 p. (Avances Técnicos N° 349).
- ❖ Quintero M.; Ortiz L, C, diri.; Guzmán L, C, dir.; Estudio de consorcios microbianos para la producción de biogás a partir de resultados de residuos del fique. Universidad Industrial de Santander. Escuela de medicina. Tesis (posgrado) 2011.
- ❖ Rathinavelu Rajkumar Y Giorgio Graziosi. Posibles usos alternativos de los residuos y subproductos del café. Uso de los residuos y subproductos del café. Organización Internacional del Café. Departamento de Biología de la Universidad de Trieste – Italia, 2005.
- ❖ Rodríguez V. N., Zambrano D. A., 2010. Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. Avances técnicos 393. Cenicafé Federación nacional de cafeteros. Colombia
- ❖ Shemekite F, Gómez-Brandón M, Franke-Whittle I, Praehauser B, Insam H, Assefa F. 2014. Coffee husk composting: an investigation of the process using molecular and non-molecular tools. *Waste Manag.* 2014 Mar; 34(3):642-52.
- ❖ Soriano, M. D., & Molina, M. L. J., Pons, V.; Ingelmo, F. (2008) Estabilización de residuos de vinazas y lodos de depuradora tras un proceso de vermicompostaje con estiércol de conejo en condiciones de laboratorio, Universidad Politécnica de Valencia. In *I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos Castellón* (pp. 23-24).
- ❖ Terry Brown Adis Ivonne, Bermúdez Rosa Catalina, Rodríguez Pérez Suyén, Fernández Biozan Maikel. 2004. Selección de un inóculo para la

biodegradación anaerobia de la pulpa de café tecnología química Vol. XXIV, No. 2,

- ❖ Urbaneja, G.; Ferrer, j; Páez, g.; Arenas, L y Colina, g. (1996). Acid Hydrolysis and Carbohydrates Characterization of Coffee Pulp. WREC, 1041-1044.
- ❖ Vásquez De Díaz Mc, López A, Fuentes B, Cote E. 2010. Aceleración del proceso de compostaje de residuos post-cosecha (pulpa) del café con la aplicación de microorganismos nativos. Revista CENIC Ciencias Biológicas, Vol. 41
- ❖ Vásquez de Díaz MC, López A, Fuentes B, Cote E. Aceleración del proceso de compostaje de residuos post-cosecha (pulpa) del café con la aplicación de microorganismos nativos. Revista CENIC Ciencias Biológicas 2010, Vol. 41
- ❖ Wasser, R.; Orozco, C.; Cantero, V.; Mesias, O. 1991 Experiencias sobre el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del café en Matagalpa, Nicaragua. Boletín de Promecafé (Guatemala) Nos. 52-53:6-15.
- ❖ 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.; Rodríguez V., N.; López P., U.; Orozco R., P.A.; Zambrano G., A.J. 2006 Tratamiento anaerobio de las aguas mieles del café. Boletín Técnico Cenicafé No. 29:1-28.

## ANEXOS

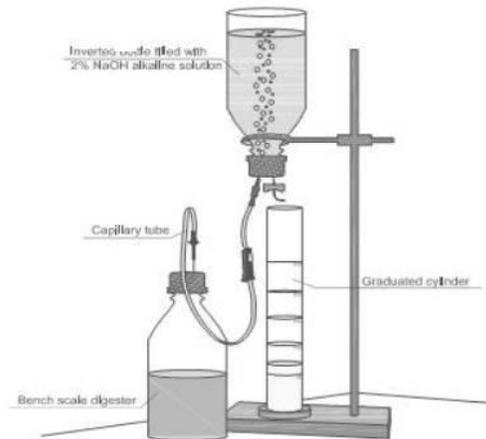
### Anexo A. Método de desplazamiento alcalino

#### **Materiales:**

- Biodigestor anaerobio.
- Solución 0,1 N NaOH.
- Fenolftaleína.
- Mangueras y agujas.
- Recipiente colector de 1L.

#### **Procedimiento:**

Cada reactor se conecta con la botella de desplazamiento alcalino por medio de una red de mangueras de plástico y agujas como se muestra en el esquema. El biogás producido en el reactor se burbujea en la solución alcalina con fenolftaleína como indicador y pH mayor que 12, en la cual el CO<sub>2</sub> es absorbido y el volumen de gas metano desplaza un volumen igual de la solución alcalina. El volumen de la solución desplazada fuera de la botella en el recipiente colector es equivalente al volumen de metano y otros gases en menor proporción generados por el sistema.



Esquema de montaje para la medición de volumen de metano.

Cálculo del volumen de biogás a condiciones normalizadas (VNTP).

Para poder comparar las producciones de biogás y por lo tanto el redimiendo, es necesario llevar el volumen de biogás a condiciones normalizadas.

$V$  = Volumen de gas generado (mL).

$P_{atm}$  = Presión atmosférica.

$T_0$  = Temperatura estándar 273,15 (K).

$P_0$  = Presión estándar 1013.25 (mbar).

$P_V$  = Presión de vapor del agua.

Temperatura al momento de medir (K

## Anexo B. Determinación de la concentración de azúcares reductores totales (ART)

El método DNS o del ácido 3-5 dinitrosalicílico es un método colorimétrico, desarrollado para la cuantificación de azúcares reductores.

### **REACTIVO DNS**

- Mezclar y disolver en 250 ml de agua destilada 8 g de NaOH y 150 g de tartrato sodio potasio.
- Se agregan 5 g de ácido dinitrosalicílico.
- Aforar a 500 mL con agua destilada.
- Almacenar a temperatura ambiente y proteger de la luz.

### **PROCEDIMIENTO**

- Agregar 400  $\mu$  L de reactivo a 200  $\mu$  L de muestra y 200  $\mu$  L de agua destilada usando tubos de ensayo tapa rosca.
- Someter a baño maría durante 5 minutos.
- Detener la reacción con choque térmico en un baño de hielo.
- Agregar 5 mL de agua destilada, y dejar reposando durante 15 minutos.
- Leer densidad óptica a 540 nm contra un blanco obtenido en el procedimiento anterior pero agregando agua destilada en lugar de muestra.

### **CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA ESTÁNDAR DE GLUCOSA**

Se preparan las muestras de glucosa con concentraciones conocidas, se aplica el método DNS y se lee su absorbancia en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 540 nm.

Con los datos obtenidos se traza un gráfico lineal de la concentración de glucosa (azúcar reductor) como una función de absorción, y así se determina la ecuación que relaciona las dos cantidades.

## Anexo C. Determinación de la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), y alcalinidad total (AT)

La determinación de los ácidos grasos volátiles se realiza por medio de una titulación, es un método a través del cual se determina el bicarbonato y los ácidos grasos volátiles en soluciones acuosas. La muestra es centrifugada y se lleva a un pH de 3,0 con ácido clorhídrico (HCL) 0,1N; a este pH el bicarbonato será convertido en dióxido de carbono y los ácidos grasos volátiles estarán presentes en solución en la forma no ionizada. Después la muestra es sometida a calentamiento hasta punto de burbuja con un sistema de condensación para remover el CO<sub>2</sub>, la solución restante se titula con hidróxido de sodio

(NaOH) 0,1N hasta alcanzar un pH de 6,5. Los ácidos grasos volátiles (y quizás otros ácidos) serán convertidos ahora a su forma disociada.

Los equivalentes de bicarbonato y AGV se pueden calcular a partir de los volúmenes de ácido y base utilizados en la titulación (Rojas 1988). Las relaciones utilizadas son las siguientes:

$$\text{Alcalinidad} = (B * N_{\text{HCl}} * 50.000) / V$$

En donde:

B= volumen de HCl usado para disminuir el pH en mL.

V= volumen de muestra tomada para el análisis en mL.

N<sub>HCL</sub>= concentración de ácido clorhídrico (Normalidad). Las unidades de alcalinidad son (mg de CaCO<sub>3</sub>/litro).

$$\text{ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES} = \frac{D \cdot N_{\text{NaOH}} \cdot 60.000}{V}$$

En donde

D= volumen de NaOH en mL requerido para elevar el pH después de haber usado HCL.

V= volumen de muestra tomada para el análisis en mL.

N<sub>NaOH</sub>=concentración de hidróxido de sodio (normalidad).

Las unidades de Ácidos Grasos Volátiles son (mg de Ac. Acético/Litro).

Para la preparación de HCL y NaOH se utilizan los siguientes reactivos.

- Biftalato de potasio
- NaOH
- HCL
- Fenolftaleína.

## Anexo D. Determinación de sólidos totales fijos y volátiles en muestras sólidas y semisólidas

Este método se aplica a la determinación de sólidos totales y fracciones volátiles en muestras sólidas y semisólidas como rumen o lodos aislados en procesos de tratamientos de aguas limpias y residuales entre otros.

### **Instrumentos:**

- Placas de evaporación o cápsulas de cerámica
- Horno de mufla para operar a  $550 \pm 50^\circ \text{C}$
- Horno de secado operar a  $103-105^\circ \pm 1^\circ \text{C}$
- Balanza de análisis

### **Procedimiento:**

#### **Sólidos volátiles**

Ingresar un volumen conocido en una placa de evaporación limpia en un horno de secado a  $105^\circ \text{C}$  durante 24 horas

#### **Análisis de la muestra**

- Sólidos totales
- Caliéntese la placa en un horno a  $103-105^\circ \text{C}$  durante una hora.
- Enfríense en el desecador, pésele y consérvese en el desecador hasta que haya de usarse.

## **Análisis de la muestra**

Muestra líquida: agítese para homogeneizarla, a continuación colóquese de 20 a 50 mL en una placa de evaporación y pésese, séquese a 103-105° C, durante un día, enfríese para equilibrar la temperatura en un desecador individual con desecante activo y pésese. Transfírase la muestra hasta un horno frío y caliéntese hasta 550±50° C e incinérese durante una hora, enfríese en desecador para equilibrar la temperatura y pésese.

### **Cálculos:**

- % de sólidos totales= $(A-B) \times 100 / (C-B)$
- %sólidos volátiles= $(A-D) \times 100 / (A-B)$
- A= peso del residuo seco+ placa, mg
- B= peso de la placa
- C= peso de la muestra húmeda más la placa, mg
- D= peso del residuo + placa después de ignición