

**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO HENRÍQUEZ UREÑA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**ESCUELA DE QUÍMICA**



**“Propuesta para el diseño de un sistema de tratamiento anaerobio para la obtención de biogás a partir de aguas mieles del procesado del café”**

**Trabajo de grado  
presentado por:**

José Manuel Martínez Batista  
Lisbeth Mariel Polanco González

**Para optar por el título de:**

Ingeniero Químico

**Santo Domingo, D.N.  
República Dominicana  
2023**

# **AGRADECIMIENTOS**

## **AGRADECIMIENTOS**

***Lisbeth M Polanco González***

*De entrada, quiero expresar mi gratitud hacia Dios por brindarme, fuerzas, salud y voluntad en todo este transcurso, bendiciéndome con perseverancia para no desistir en todo este proceso.*

*A mi madre Maria González por ser una fuente de inspiración, de perseverancia y superación, mi mayor muestra de apoyo y conocimiento que me ha ayudado a superar los obstáculos que se han podido presentar en mi vida a través del tiempo, mi primera y más grande maestra en materia educativa y de vida, la que ha luchado día a día para que hoy yo sea quien soy.*

*A mi pareja Jose Manuel De los Santos por el apoyo moral, la comprensión y por nunca soltarme de la mano y darme ánimos de seguir hacia adelante. A mis hermanos Ángel y Osvaldo, en especial a Ángel por el apoyo moral y económico que me brindó.*

*A mis tías, en especial a Maria Teresa González, Carmen Rosa González, Margarita Polanco y Judid Polanco por siempre creer en mi potencial como ser humano y como profesional e inspirarme cada día a ser mejor persona, trabajadora y luchadora al igual que ellas y por el apoyo que me han brindado. A mis primas, Carol Peña y Shyanny Martínez por todo el apoyo que me brindaron durante la carrera a través de consejos y enseñanzas y por motivarme a nunca darme por vencido.*

*A mis maestros que han ayudado a la formación de la profesional que hoy soy, en especial a la Ing. Doris Peña, mi asesora la Ing. Milagros López y a mi maestro Ing. Ramón Alonso.*

*A mis compañeros de clase y amigos con los cuales he recorrido este proceso apoyándonos mutuamente y sin descanso para lograr nuestros objetivos, entre ellos mi compañero de tesis Jose Martínez, mis amigos Jhon Scott, Elyanny Tejeda, Eddyth Evangelista, Gregory Rincón y Miguel Bello.*

*En primer lugar, quiero agradecerle a Dios por haberme dado las fuerzas y consistencia para seguir hacia adelante y no desistir en esta carrera.*

*A mi madre Claudia Batista, que siempre fue un soporte para mí en mis estudios, sin su apoyo incondicional hubiese sido muy difícil continuar con este sueño.*

*A mi padre Julio Martínez, que siempre estuvo pendiente en mis inicios en la universidad de que no me falte nada para poder culminar la meta.*

*A mis hermanos, que siempre me han brindado el apoyo en los momentos que los he necesitado.*

*A mis profesores de la Universidad en especial a mi decana de la carrera, la Ingeniera Doris Peña que sin sus sabios consejos y conocimientos me ayudaron a amar esta carrera y seguir adelante.*

*A mis compañeros de clase que se han convertido en más que compañeros, en la cual nos hemos apoyado en una gran parte de este trayecto y poder culminar esta meta, en especial mi compañera de tesis Lisbeth Polanco y mis amigos Jhon Scott, Elyanny Tejada, Gregorio Rincón y Miguel Bello.*

*Y por último y no menos importante, quisiera agradecer a mi amada esposa la cual pasó noches en vela junto a mí dándome la fuerza para seguir, su gran apoyo fue fundamental para culminar todo este arduo proceso.*

# **ÍNDICE**

# ÍNDICE

<i>Agradecimientos</i> .....	ii
<i>Introducción</i> .....	10
<i>Planteamiento del problema</i> .....	12
<i>Objetivos</i> .....	14
<i>Objetivo general</i> .....	15
<i>Objetivos específicos</i> .....	15
<i>Justificación</i> .....	16
<i>Alcance</i> .....	18
<i>Primera parte</i> .....	19
<i>Marco Teórico</i> .....	19
<i>Capítulo I</i> .....	20
<i>I.1 Antecedentes</i> .....	20
<i>I.2 Marco Conceptual</i> .....	22
<i>I.2.1 El Café</i> .....	22
<i>I.2.2 Beneficio húmedo del café</i> .....	22
<i>I.2.3 Cosecha o recolección del fruto</i> .....	23
<i>I.2.4 El despulpado</i> .....	24
<i>I.2.5 Eliminación del mucilago y fermentación</i> .....	25
<i>I.2.6 Lavado y clasificación</i> .....	25
<i>I.2.6.1 Lavado manual</i> .....	26
<i>I.2.6.2 Lavado mecánico</i> .....	27
<i>I.2.7 Aguas mieles</i> .....	27
<i>I.2.8 Secado del café</i> .....	29
<i>I.3 Diagrama del proceso beneficio húmedo del café</i> .....	29
<i>I.4 Energías alternativas</i> .....	29
<i>I.4.1 Energía a partir de biomasa</i> .....	30
<i>I.4.2 Tipos de biomasa</i> .....	31
<i>I.5 Procesos de biodigestión</i> .....	31
<i>I.5.1 Digestión aerobia</i> .....	31
<i>I.5.2 Digestión anaerobia</i> .....	32
<i>I.5.3 Proceso de descomposición anaeróbica</i> .....	35
<i>I.5.3.1 Hidrólisis</i> .....	35
<i>I.5.3.2 Etapa acidogénesis</i> .....	36
<i>I.5.3.3 Etapa acetogénesis</i> .....	36

I.5.3.4 Etapa Metanogénesis.....	36
I.5.4 Factores que inciden en la inhibición de la digestión anaerobia.....	36
I.5.6 Beneficios de la digestión anaerobia .....	37
<b>I.6 Biogás.....</b>	<b>37</b>
<b>I.7 Biodigestor.....</b>	<b>38</b>
I.7.1 Estructura de un biodigestor.....	38
I.7.2 Factores influyentes en el funcionamiento de un biodigestor .....	39
I.7.3 Clasificación de los biodigestores.....	40
<b>I.8 Tipos de fuentes contaminantes establecidos por la norma ambiental sobre calidad de aguas subterráneas y descargas al subsuelo.....</b>	<b>43</b>
<b>I.9 Principales impactos ambientales generados por el beneficio húmedo del café.....</b>	<b>43</b>
I.9.1 Residuos líquidos.....	43
I.9.2 Residuos sólidos.....	43
<b>Segunda parte.....</b>	<b>46</b>
<b>Marco metodológico.....</b>	<b>46</b>
<b>Capítulo II.....</b>	<b>47</b>
<b>II.1 Investigación de campo.....</b>	<b>47</b>
<b>II.1.1 Proceso de beneficio realizado en el centro de procesamiento de CEPCAFEN.....</b>	<b>47</b>
II.1.1.1 Recepción del café.....	47
II.1.1.2 Medición.....	47
II.1.1.3 Despulpado.....	47
II.1.1.4 Fermentación.....	47
II.1.1.5 Lavado.....	48
II.1.1.6 Secado.....	48
II.1.1.7 Empacado y almacenamiento.....	48
<b>II.1.2 Diagrama de proceso beneficio húmedo CEPCAFEN.....</b>	<b>48</b>
<b>II.1.3 Informe de análisis de la caracterización de las aguas pertenecientes al proceso de beneficio realizado en el centro de procesamiento CEPCAFEN para medir límites de vulnerabilidad media para la descarga a subsuelo.....</b>	<b>49</b>
II.1.4 Límites de descarga para fuentes contaminantes según la norma ambiental sobre la calidad de aguas subterráneas y descargas al subsuelo.....	50
<b>II.2 Encuesta a los productores.....</b>	<b>51</b>
<b>Capítulo III .....</b>	<b>53</b>
<b>III.1 Propuesta para el diseño del proceso.....</b>	<b>53</b>
III.1.1 Caracterización de las aguas mieles.....	53
III.1.2 Determinación de producción diaria de aguas mieles .....	55

III.1.3 Volumen de aguas mieles generados por corte.....	56
III.2 Balance de masa del beneficio húmedo del café.....	57
III.3 Estimación de volumen diario de aguas mieles para el digestor.....	61
III.4 Proceso de selección del modelo de biodigestor.....	62
III.4.1 Selección y dimensionamiento del biodigestor.....	63
III.4.2 Criterios de elección.....	66
III.4.3 Propuesta de parámetros para el diseño del digestor de cúpula fija.....	66
III.4.4 Elementos del sistema de biodigestión.....	67
III.4.5 Descripción del sistema.....	67
III.4.6 Dimensionamiento del biodigestor de cúpula fija.....	68
III.5 Etapa de arranque del digestor.....	74
III.5.1 Etapa de operación.....	75
III.5.2 Mantenimiento del equipo.....	76
III.6 Diagrama de proceso.....	77
<b>Capítulo IV.....</b>	<b>79</b>
IV.1 Análisis de costos.....	79
IV.2 Aplicaciones del biogás.....	80
IV.2.1 Construcción de biodigestor casero.....	81
<b>Tercera parte.....</b>	<b>85</b>
<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>85</b>
Conclusiones.....	86
Recomendaciones.....	87
<b>Cuarta parte.....</b>	<b>88</b>
<b>Referencias y anexos.....</b>	<b>88</b>
Referencias bibliográficas.....	89



# **INTRODUCCIÓN**

## INTRODUCCIÓN

El café es el producto del tipo mercancía más demandado en el mundo, seguido de los aceites comestibles y el té. Aproximadamente el 30 % de la población mundial consume una vez al día una taza de café (Torres *et al.*, 2019).

En el proceso de producción de café solo aproximadamente el 5 % del fruto fresco es aprovechado como café pergamino, mientras que el 95 % restante son considerados subproductos, estos subproductos son las aguas residuales conocidas como aguas mieles y la pulpa de café.

Para la obtención del café, es necesario un proceso conocido como "beneficiado del café" este proceso se puede efectuar por dos vías, que son la húmeda y la seca, siendo la primera la forma en la que se procesa en República Dominicana, Centroamérica y otros países cafetaleros.

El beneficiado húmedo del café consta de distintas etapas como son: el despulpado, fermentación, lavado, secado, descascarado, clasificación y trillado.

Generalmente los pequeños caficultores que realizan el beneficio húmedo tradicional de café lo realizan en sus propias parcelas de manera independiente y familiar, sin instalaciones sofisticadas, debido al alto consumo de agua y los gastos económicos que implica para el producto individual y minorista de café en algunos poblados, los productores optan por el beneficio colectivo del café.

En la provincia Azua se encuentra El Naranjal, formada por un grupo de comunidades donde una parte de la población se dedica al cultivo y procesamiento de café por vía húmeda sin tratar las aguas residuales generadas. Esto implica formación de una gran carga contaminante que termina en los ríos, suelos y subsuelos, traduciéndose como la contaminación de las aguas consumidas por las comunidades y los suelos utilizados para el cultivo.

El proyecto pretende evaluar los aspectos medio ambientales del proceso y plantear la propuesta del diseño de un digestor anaerobio con el fin de descontaminar las aguas residuales producidas, estudiando los beneficios sociales y económicos que generaría la aplicación de este proyecto para las comunidades de El Naranjal.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

## **Planteamiento del problema**

En el proceso de lavado del café se producen las denominadas aguas mieles, estas al no ser tratadas y ser vertidas generan un gran impacto negativo; debido al alto grado de contaminación de estas aguas, un litro de aguas mieles cuenta con una DQO 7,000 mg/L, estas aguas al ser vertidas a los suelos, subsuelos y ríos, traspasan las diferentes capas que componen la tierra, dejándolas completamente contaminadas, porque poseen de condiciones aerobias que van disminuyendo la vida silvestre y acuífera de esta zona y trayendo consigo entonces la muerte de la micro fauna, la vegetación de los ríos y en ocasiones la muerte de la fauna silvestre . (Torres Valenzuela, 2019)

Debido al compromiso que tenemos con el medio ambiente y los objetivos de desarrollo sostenible como lo es aguas limpias y saneamiento, se ve la necesidad de tratar estas aguas con el fin de mitigar o eliminar el daño generado, creando una propuesta para diseñar un sistema de tratamiento con el objetivo de que las aguas mieles proveniente de este proceso cumplan con las normas ambientales vigentes en la República Dominicana y no afecten a las comunidades cercanas a las fincas de tratamiento del café.

## **OBJETIVOS**

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Diseñar un sistema de tratamiento anaerobio con el fin de procesar las aguas mieles provenientes del beneficiado húmedo del café, para la obtención de biogás.

### **Objetivos específicos**

1. Identificar los elementos necesarios para el arranque y puesta en marcha del biodigestor para la obtención de biogás.
2. Calcular el rendimiento de biogás que supondría el biodigestor con el fin de verificar su uso como combustible para la maquina despulpadora de café.
3. Realizar el análisis de costos que tendría la puesta en marcha del proyecto.

## **JUSTIFICACIÓN**

## Justificación

Menos de la mitad del peso de una cereza fresca de café lo constituye la semilla o el grano. Las cerezas se despulpan, luego se fermentan y el mucílago se elimina con agua agitada antes de secarse durante el proceso de lavado. Más del 80% del volumen de la cosecha se desperdicia como residuos orgánicos durante este proceso.

Los azúcares de la fermentación de la pulpa de la cereza, el mucílago y las pectinas son los principales componentes de las aguas residuales que se producen. El mucílago no digerido y los materiales pépticos en agua le dan una textura gelatinosa.

La necesidad de grandes cantidades de oxígeno para descomponer los desechos orgánicos presentes crea condiciones anaeróbicas que acaban con la vida animal y vegetal, que es el principal impacto ambiental que se genera cuando estas aguas residuales ingresan a otras fuentes de agua.

Aunque no se han realizado estudios extensos sobre los efectos de las aguas residuales del café en la salud humana, la investigación sugiere que puede ser problemático cuando contamina las fuentes de agua potable. En un estudio de 2008 que evaluó el impacto de las aguas residuales en una planta procesadora de café en la región de Zimma en Etiopía, se descubrió que quienes residían cerca de la planta y bebían el agua contaminada experimentaban náuseas, irritación de los ojos y la piel, problemas respiratorios y dolor de estómago. (Romero & Camilo, 2019)

Las aguas residuales se pueden eliminar de manera fácil y económica vertiéndolas en el suelo, pero este método aún deja residuos y contaminantes que pueden filtrarse y escurrirse hacia las aguas superficiales y subterráneas. Además de emitir gases de efecto invernadero, el proceso es menos respetuoso con el medio ambiente.

Debido a que puede eliminar la mayor parte de la carga orgánica y los sólidos en suspensión de las aguas residuales, la digestión anaeróbica es una alternativa sostenible para el tratamiento de las aguas residuales del procesamiento del café. Este procedimiento implica la alimentación de aguas residuales en una máquina diseñada para funcionar sin oxígeno. Luego se calienta y, con el tiempo, las bacterias descomponen la masa en azúcares y ácidos orgánicos, el resultado es la transformación a biogás.

La implementación de un proceso donde se tratarán estos subproductos con el fin de reducir el impacto negativo que generan en el medio ambiente y además añadir un valor agregado a estos subproductos, implicaría un aspecto importante para ayudar a cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible al no permitir que estas aguas residuales contaminen las aguas de los ríos cercanos a la zona cafetalera que al mismo tiempo afectan a las comunidades cercanas y llevaría con ella una ganancia económica para el beneficiado húmedo, tales como el uso del biogás generado en la máquina despulpadora.

### **Alcance**

Este proyecto abarca la elección y dimensionamiento de un sistema de tratamiento anaerobio con el fin de manejar residuos líquidos (aguas mieles) provenientes del beneficio húmedo del café, en el centro de procesamiento ubicado en Peralta, provincia Azua, República Dominicana.

**PRIMERA PARTE**  
**MARCO TEÓRICO**

# CAPÍTULO I

## **I.1 Antecedentes**

(Olano Requelme, 2018)

En el año 2018 en las amazonas de Perú se desarrolló un proyecto que se basó en la implementación de biodigestores contruidos a base de envases plásticos para procesar las aguas mieles de café, Se partió de una investigación inicial donde analizaron los compuestos químicos dañinos que contienen las aguas mieles de café para así poder determinar qué cantidad de biogás se podía generar a partir de un sistema de digestión anaerobia.

En sus resultados expresaron que el tratamiento cuatro generó 1 320 L de biogás a partir de 840 g de pulpa de café, 840 g de estiércol de ganado vacuno y 420 mL de agua miel de café. Estos resultados permiten tratar los efluentes del BHC con un rendimiento de producción de 63,634 L de biogás por L de pulpa de café.

(Torres Valenzuela, 2019)

En el año 2019 en la india se desarrolló un sistema de tratamiento integrado para el procesamiento de aguas residuales del café designado coffe processing waste water (CPWW) a través de la combinación de biometanización con aireación y tratamiento de plantas de humedales.

La reducción máxima de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos totales fueron 66.0 %, 61.0 % y 58.0 %, respectivamente, con una tasa de carga orgánica de 9.55 kg m<sup>3</sup> x 3 días.

La reducción de la carga de contaminación de las aguas residuales por acción microbiana aumentada por aireación resultó en la reducción de la conductividad eléctrica (CE), DBO, DQO y (ST). La aireación continua de las aguas residuales resultó en una reducción máxima de DBO (74.6 %), DQO (68.6 %) y ST (49.3 %). La planta de humedal, *Typha latifolia*, redujo 85.4 % y 78.0 % de DBO y DQO, respectivamente en el proceso.

(ACARLEY GARCÍA, 2018)

Centro Nacional del café (Cenicafe) en Colombia en el año 2018, desarrolló una investigación con el fin de encontrar diferentes tecnologías para el tratamiento de aguas residuales producidas en el beneficio húmedo del café, con el fin de que se descubra la solución más económica para descontaminar las aguas residuales de este tipo, entre las tecnologías aplicadas se encuentran: Los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) y mantos anaerobios de lodo de flujo ascendente (UASB).

Los resultados generados lograron plantear lo que es el Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA) que va seguido de un filtro optativo de postratamiento el cual es conformado de gravilla y piedra caliza, sembrado con especies vegetales. El funcionamiento del sistema global elimina en términos de DQO y DBO5 desde el 90 % hasta el 99.6 %, aplicando este tipo de tecnologías se remueve los contaminantes presentes en las aguas residuales producidas por el mucílago del café.

(García Cabrera & Córdova Mosquera, 2021)

En el año 2021 en Ecuador se desarrolló un proyecto con el objetivo implementar la producción de biogás generado a partir de una digestión anaerobia de las aguas residuales producidas por la industria procesadora de café instantáneo. Para llevar a cabo el objetivo de su investigación se basaron en el sistema de lodos activos, este es un reactor aerobio de varias cámaras que degrada la materia orgánica en dióxido de carbono, agua y nueva biomasa, principalmente porque este no requiere de un consumo de energía alto es uno de los métodos más adecuados según su investigación para tratar las aguas mieles.

(Becerril Rivera, 2022)

En el año 2022 en Lima Perú realizaron una investigación con el objetivo de biogás a partir de residuos del beneficio del café (aguas mieles y pulpa). Para la obtención de biogás se utilizó biodigestores de sistema discontinuo (tipo batch) empleando envases de polipropileno de 10 L de capacidad. Se realizaron tres tratamientos de acuerdo al porcentaje de agua, excretas de ganado y sustratos (agua miel y pulpa de café); realizando por cada tratamiento cuatro repeticiones, fabricándose en total doce biodigestores a nivel de laboratorio.

Para la cuantificación de la producción de biogás se empleó el método de desplazamiento de líquido que consiste en conducir el biogás a través de una manguera hacia un recipiente con líquido y que debido a la presión del biogás generado sobre la superficie del líquido este se desplaza a otro recipiente permitiendo medir su volumen.

## **I.2 Marco Conceptual**

### **I.2.1 El café**

El café es un fruto conocido también como café arábico y científicamente como (*Coffea arabica*) este arbusto de la familia rubiáceas nativo de Etiopia y/o Yemen (África y Arabia) por lo regular prefiere suelos ácidos con pH en torno a 6.5, profundos y correctamente aireados, que retengan suficiente agua, es un arbusto que se desarrolla mejor a semisombras ya que el sol de manera directa podría quemar sus hojas.

La calidad del café viene desde su plantación, pues está determinada por la variedad, altura de la zona, suelos, clima, manejo de cultivo y plagas, entre otras condiciones.

La producción y comercialización del café es una de las actividades agrícolas más importantes de la República Dominicana por su aporte económico y social, y la sostenibilidad de sus recursos naturales renovables. Esta actividad productiva incluye aproximadamente 1,6 millones de tareas y genera más de 300.000 empleos anuales en manejo de plantaciones y cosecha de café (Romero & Camilo, 2019).

### **I.2.2 Beneficio húmedo del café**

El beneficiado húmedo del café se define como el proceso mediante el cual, a partir del café uva, se obtiene el café oro o pergamino, este se ejecuta por medio de dos vías, la húmeda y la seca.

En la primera vía mencionada el café pasa por distintas etapas, desde su recolección, pasando por el despulpado, fermentación, lavado, secado, descascarado, clasificación y trillado.

Los cafés que se procesan por la vía húmeda son conocidos en el mercado como lavados o suaves, denominación a la que pertenece el café producido en la República Dominicana, Centroamérica, y otros países cafetaleros.

En la vía húmeda, el proceso consta de dos fases, una fase húmeda la cual comprende desde la recepción del café hasta el secado al sol, esta fase casi siempre se realiza en la finca y una fase seca que comprende desde el descascarado hasta el trillado, estas se suelen realizar en factorías o grandes beneficios.

En el país no hay suficientes datos sobre la utilización de agua en el proceso de beneficiado húmedo del café, pero, en términos generales, con el sistema tradicional se estima que sobrepasa los 2,000 litros de agua por quintal de café procesado, cantidad considerada excesiva si se toma en cuenta, principalmente, lo relativo a la protección del medio ambiente. En trabajos locales que se realizan con auspicios de la comisión del café, en la evaluación de unidades compactas de beneficiado ecológico (UCBEs) se ha determinado el consumo promedio de 75 litros de agua por quintal de café procesado. Se debe insistir en la evaluación de estos equipos y la utilización de aguas, de manera que se haga el beneficiado del café en armonía con la naturaleza, pero manteniendo la calidad física y organoléptica del grano. (Romero & Camilo, 2019)

En cambio, no es posible hablar de una serie de operaciones universales puesto que cada beneficio adecua las operaciones a sus realidades y condiciones.

### **I.2.3 Cosecha o recolección del fruto**

Esta es la actividad más costosa en la producción de café, aunque no es parte propiamente dicha del beneficiado, está directamente relacionada con él.

El grano de café debe recolectarse cuando alcance su perfecta maduración, este momento llega de 28 a 35 semanas después de la floración, dependiendo de la zona.

El grano no debe cosecharse verde, ni pintón, pero tampoco debe dejarse sobre madurar en la planta. Los primeros frutos (verdes y pintones) pueden ser mordidos por la despulpadora, mientras que los frutos ya maduros se fermentan dentro de la pulpa; alternándose en ambos casos la calidad de la bebida. (Salazar, 2016).

Algunos trabajos revelan pérdida de más de un 2 % del peso en la elaboración de café verde y sobre madurado, comparado con el de la perfecta maduración.

En caso de granos maduros afectados por sequía y/o plagas, es conveniente seleccionarlos antes del despulpado para darles un tratamiento aparte, como café de otra calidad. Esta clasificación puede hacerse al momento de la recepción del café, antes de que llegue a la despulpadora.

Existen unidades de medida de volumen oficiales que son utilizadas para medir el café a la hora de la recepción en la recolección y para comercializarlo en estado de uva y/o pergamino.

#### **I.2.4 El despulpado**

Es un proceso mecánico, donde se aprovecha la cualidad lubricante del mucílago o baba del café para que al ser presionado por la máquina suelte el grano.

Esta actividad debe realizarse el mismo día de la recolección con no más de 24 horas después, ya que luego de este tiempo en zonas de altas temperaturas se inicia la fermentación del grano. Si por alguna razón no fuera posible despulpar el café en el tiempo indicado, se recomienda sumergirlo en agua preferiblemente en circulación, para evitar el calentamiento y retrasar el proceso de fermentación, evitando así el sabor característico de "vinoso" (del Real Olvera, 2010).

El proceso de despulpado se realiza mediante el uso de la máquina despulpadora. El despulpado del café es un proceso mecánico, por lo que es imposible despulpar totalmente frutos de distintos tamaños.

Se insiste en la recolección en perfecto estado de maduración y clasificación de los frutos sin llevar hasta la máquina hojas, palos, piedras entre otros que puedan causar el deterioro del equipo y la calidad del grano. Una práctica recomendable para un buen despulpado es la graduación de la máquina a medida que avanza la cosecha o si el café es de diferentes variedades y altura.

En el despulpado no es necesario ni recomendable el uso del agua si el café ha sido recolectado en perfecta maduración, debido a que el fruto tiene su lubricante. El agua retarda el tiempo de fermentación, pero aumenta la contaminación ambiental.

En el proceso de beneficiado húmedo, la eliminación de la pulpa con agua es el desecho de mayor poder contaminante, pues representa más del 40 % de la carga orgánica.

### **I.2.5 Eliminación del mucílago y fermentación**

La fermentación es el proceso mediante el cual se elimina el mucílago del grano, que es una capa gelatinosa que está debajo del pergamino. Representa aproximadamente el 20 % del peso del fruto y por tratarse de un material gelatinoso, insoluble en el agua, es necesario solubilizar mediante la fermentación natural para convertirlo en material de fácil desprendimiento o remoción en el lavado.

El proceso de fermentación se realiza en tinajas de cemento, madera o fibra de vidrio construidas para tales fines. Este proceso tarda de 6 a 36 horas dependiendo de la temperatura de la zona, estado de madurez del fruto, calidad del agua utilizada en el despulpado, y de la masa o cantidad de café procesado. Este es el sistema tradicional o natural utilizado por mucho tiempo.

Después de alcanzar la fermentación completa se procede a la remoción o eliminación total del mucílago mediante el lavado o fricción del grano. (Romero & Camilo, 2019)

Una forma práctica de determinar si el café está completamente fermentado o en un punto de lavado, es introducir un palo o trozo de madera en la pila de café. Si al retirar o sacar el palo queda el hueco, sin derrumbarse el café, esto indica que está a punto de lavado.

Se conocen varios sistemas utilizados para la eliminación del mucílago del café o la aceleración del proceso de fermentación, como son:

- Los métodos enzimáticos, con el uso de enzimas y levaduras.
- El método químico, dentro del cual se pueden mencionar el uso de la soda cáustica.
- El método bioquímico o fermentación natural.
- El método mecánico.

### **I.2.6 Lavado y clasificación**

El lavado es la operación mediante la cual se elimina el mucílago adherido al pergamino o el residuo que queda de este en la hendidura del grano. Para que el café quede perfectamente limpio, libre de mucílago y con buena apariencia, se lava después de haber alcanzado el punto de fermentación. En esta etapa del proceso es donde se producirán las aguas mieles. (Salazar, 2016).



*Ilustración 1 Lavado del café*

El proceso de lavado puede realizarse de dos formas: manual y mecánica.

### **I.2.6.1 Lavado manual**

La utilización de tinas para el lavado es la forma más usada en el país, aunque requiere mucho consumo de agua y mano de obra ya que es mediante el empleo de palas, casi siempre de madera con las que se remueve el café, cambiándole el agua varias veces a las tinas, se pasa de una a otra para seguir fermentando una partida y lavando otra.

Este sistema se hace eficiente con el uso de bombas centrífugas o de impulso abierto con las cuales se recircula o reutiliza el agua para disminuir su consumo. Este sistema hidráulico es utilizado en grandes beneficiados (Romero & Camilo, 2019).

El uso de canales de correteo es otro sistema manual muy eficiente, porque permite lavar, clasificar y transportar el café; pero no es un proceso continuo, ya que se hace en partidas fermentadas. Es lento, requiere un alto consumo de agua y mucho espacio, encareciendo su costo inicial, razones que han motivado su sustitución por otros sistemas que requieren menos agua y mano de obra.

### **I.2.6.2 Lavado mecánico**

Es la forma de lavado en la que se utiliza una especie de la paleta en lavadoras cilíndricas que, al poner el café en movimiento o remoción produce una fricción que realiza el lavado. Con la utilización de bombas centrífugas o de impulsor abierto, que sirven también para transportar el café, la fricción que se produce elimina el mucílago del pergamino y permite reducir el consumo de agua debido a la recirculación. Estas bombas son utilizadas en grandes beneficiados o plantas agroindustriales.

### **I.2.7 Aguas mieles**

En el proceso de obtener el producto final del café, solo el 5% del producto fresco se utiliza en el procesamiento del café y se generan residuos como el agua miel, que puede llegar hasta los 40L/kg de café pergamino seco, y que tiene un grave impacto en el medio ambiente si se derrama.

El agua así producida se llama agua miel porque contiene varios azúcares, un pH ácido (4-4,5) y mucha materia orgánica (Torres Valenzuela, 2019).



*Ilustración 2 Aguas Mielles de café*

## **I.2.8 Secado del café**

El fruto del café es uno de los granos con más alto contenido de humedad al momento de la cosecha; al salir del proceso de lavado, tiene aproximadamente 55 % de humedad.

El secado consiste en bajar el grado de humedad después de lavado hasta un 10 - 12 % de humedad requerida para descascarar o para su almacenamiento. Este secado puede ser por la vía natural (al sol) o por vía mecánica (en secadoras), (Olano Requielme, 2018).

### **• Secado al sol**

Es la forma más común en República Dominicana. Se pueden utilizar las corrientes de aire, ya que en zonas óptimas para el cultivo se dificulta esta labor por las reducidas horas de sol durante el día. El secado al sol se puede hacer en secaderos, tendales o patios, los cuales se construyen de cemento o en bandejas de plásticos o tela metálica, aunque la forma más utilizada es el secadero de cemento. Algunas recomendaciones para el secado son:

- El secadero de cemento debe tener una pendiente de por lo menos 2 % longitudinalmente para evitar el encharcamiento.
- Al regar el café la copa o lamina no debe ser mayor de 2 pulgadas de espesor.
- Se debe remover con pala o rastrillo de madera 3 o 4 veces en el día para que el secado sea uniforme.
- Con una copa no mayor de 2 pulgadas de espesor, se necesita 1 m<sup>2</sup> de secadero por caja de café recién lavada.

### **• Secado mecánico**

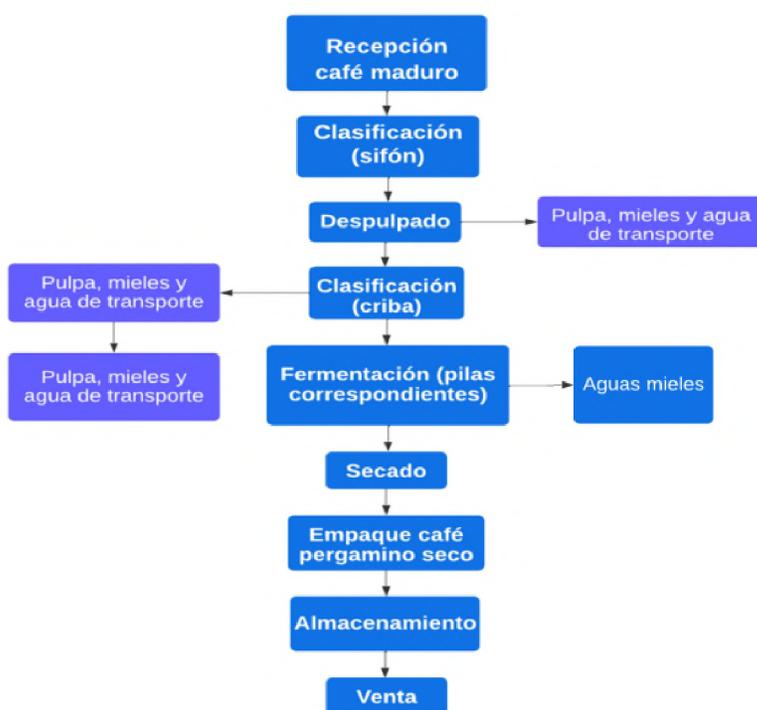
El secado mecánico consiste en la aplicación de aire caliente, de forma directa o indirecta, forzado a través de la masa de café que preferiblemente debe estar en movimiento. Este secado se realiza utilizando las secadoras verticales de torres o guardiolas o bombos.

### **• Determinación del punto de secado**

Para determinar el grado de humedad o punto de secamiento del café se utilizan equipos eléctricos, los que son utilizados principalmente a nivel de factorías y cuando se usan las secadoras.

La forma más utilizada es la manual visual. Consiste en tomar el grano de café y se pone en una superficie de cemento con la parte plana hacia abajo y se golpea con un objeto fuerte o se aprieta con el diente. Si se aplasta al golpearlo o se siente suave cuando se aprieta con el diente, esto indica que le falta secado y el grano presenta un color oscuro. En cambio, si al golpearlo o apretarlo con el diente solo queda marcado en ese lugar, es un indicador que está en punto de secado, teniendo un color grisáceo o verde azulado. Cuando el grano se rompe con el diente o salta al golpearlo quiere decir que está seco, con humedad inferior al 10 % (Paredes, 2018).

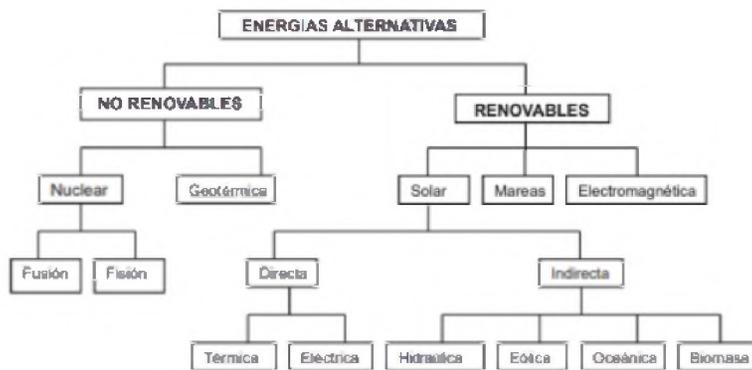
### I.3 Diagrama de proceso beneficio húmedo de café



Fuente: (Olano Requelme, 2018)

### I.4 Energías alternativas

Contempla todas aquellas energías que no son de origen fósil y que no han participado de manera sustancial en el mercado mundial de la energía.



*Ilustración 3 Energías alternativas*

Fuente: (BRIDGEWATER,2009)

### **I.4.1 Energía a partir de biomasa**

En términos general biomasa se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que se originó de manera inmediata mediante un proceso biológico siendo entonces, en última instancia, energía solar transformada por fotosíntesis. La madera, los desechos de agricultura y el estiércol animal se encuentran ubicados en esta categoría. A partir de los años sesenta se ha logrado percibir un progreso tecnológico excepcional en el uso de esta fuente energética (Posso, 2000).

La biomasa tiene dos vías principales para transformarse en energía las cuales son:

- **Producción bioquímica:** los procesos asociados se basan en la descomposición de la biomasa mediante microorganismos en presencia o ausencia de oxígeno, y comprende principalmente la producción de combustibles líquidos (etanol) por fermentación. Los combustibles gaseosos son generados por medio de la digestión anaeróbica, siendo el producto principal obtenido el metano, se obtienen además lodos residuales que mejoran los suelos o fertilizantes. Un tradicional digestor artesanal aparte de ser sencillo, puede producir un volumen de gas aproximadamente igual al volumen del digestor, típicamente de 50 m<sup>3</sup> de manera diaria, puede también abastecer las necesidades de una familia de tamaño medio.
- **Producción termoquímica:** sus procesos se basan en la descomposición de la biomasa mediante calor e incluyen la combustión directa, la pirolisis y la gasificación. Se pueden obtener diversas proporciones de producto sólido, líquido o gaseoso, según las condiciones operacional que se encuentre.

## **I.4.2 Tipos de biomasa**

- **Biomasa natural:** es aquella que es producida de manera espontánea en la naturaleza, así como son los bosques, matorrales, herbazales, etc. Debido a que puede causar una degradación rápida de los ecosistemas naturales, no es la más adecuada para un aprovechamiento energético (Posso, 2000).
- **Biomasa residual:** es aquella que tiene procedencia de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales. Su utilidad brinda al inicio perspectivas atractivas, aunque también limitadas, de manera general es más importante la descontaminación producida a la eliminación de estos residuos que la energía generada (Posso, 2000).
- **Biomasa de plantaciones energéticas:** En los países como Brasil y USA, son en la actualidad una realidad los cuales enfocan la producción de caña de azúcar y maíz, respectivamente, a la obtención de etanol (Posso, 2000).

## **I.5 Procesos de biodigestión**

La correcta gestión de residuos orgánicos se puede lograr por medio de diversos tratamientos, que implican el reciclaje de los mismos, transformándolos en productos con valor agregado. El reciclaje de materia orgánica ha recibido un gran impulso debido a los altos costos de los fertilizantes químicos, con el fin de encontrar una alternativa no tradicional de energías, así como también, con la necesidad de vías de descontaminación y eliminación de residuos.

En las transformaciones de estos residuos orgánicos, la población microbiana representa un activo importante especialmente si se consideran que disponen de un extenso rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno, componente universal de las células. Lo que nos permite instaurar bioprocesos en función de la presencia o ausencia de oxígeno, con el fin de tratar de manera adecuada los diferentes residuos orgánicos (Moreno, 2011).

### **I.5.1 Digestión aerobia**

La digestión aeróbica se basa en procesos realizados por diversos grupos de microorganismos, en especial bacterias y protozoos que, en presencia de oxígeno actúan sobre la materia orgánica disuelta, transformándola en productos finales inocuos y materia celular. La digestión aeróbica es un proceso mediante el cual los lodos son sometidos a una aireación prolongada en un tanque separado y descubierto.

El proceso implica la oxidación directa de la materia orgánica biodegradable y a su vez la auto oxidación de la materia celular (Moreno, 2011).

### **I.5.2 Digestión anaerobia**

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacteria orgánicas específicas, se descompone en productos gaseosos o "biogás" ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc.) y en digestos, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2007, p. 5).

La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como "biogás" y a una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica. La materia prima preferentemente utilizada para ser sometida a este tratamiento es cualquier biomasa residual que posea un alto contenido en humedad, como restos de comida, restos de hojas y hierbas al limpiar un jardín o un huerto, residuos ganaderos, lodos de plantas depuradoras de aguas residuales urbanas y aguas residuales domésticas e industriales.

El producto principal de la digestión anaerobia es el biogás, mezcla gaseosa de metano (50 a 70 %) y dióxido de carbono (30 a 50 %), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno), cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso en sí (Lorenzo y Obaya, 2005).

Los tratamientos aerobios y anaerobios constituyen las dos grandes alternativas de depuración biológica de aguas residuales y residuos orgánicos fermentables.

Sin embargo, el hecho de no necesitar aireación y la generación de biogás, que se puede utilizar en la misma planta con finalidades energéticas, hacen que la digestión anaerobia resulte mucho más favorable económicamente, permitiendo en muchos casos la autonomía o autosuficiencia de las plantas de tratamiento (Lorenzo y Obaya, 2005).

La digestión anaerobia está caracterizada por la existencia de varias fases consecutivas diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato (término genérico para designar, en general, el alimento de los microorganismos), interviniendo 5 grandes poblaciones de microorganismos. Estas poblaciones se caracterizan por estar compuestas por seres de diferentes velocidades de crecimiento y diferente sensibilidad a cada compuesto intermedio como inhibidor (por ejemplo, H<sub>2</sub>, ácido acético o amoníaco producido de la acidogénesis de aminoácidos).

Esto implica que cada etapa presentará diferentes velocidades de reacción según la composición del sustrato y que el desarrollo estable del proceso global requerirá de un equilibrio que evite la acumulación de compuestos intermedios inhibidores o la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), que podría producir una bajada del pH. Para la estabilidad del pH es importante el equilibrio CO<sub>2</sub>-bicarbonato (IDAE, 2007, p. 11).

En general, la velocidad del proceso está limitada por la velocidad de la etapa más lenta, la cual depende de la composición de cada residuo. Para sustratos solubles, la fase limitante acostumbra a ser la metanogénesis, y para aumentar la velocidad la estrategia consiste en adoptar propuestas de diseños que permitan una elevada concentración de microorganismos acetogénicos y metanogénicos en el reactor. Con esto se pueden conseguir sistemas con tiempo de proceso del orden de días. Para residuos en los que la materia orgánica esté en forma de partículas, la fase limitante es la hidrólisis, proceso enzimático cuya velocidad depende de la superficie de las partículas.

Usualmente, esta limitación hace que los tiempos de proceso sean del orden de semanas, de dos a tres. Para aumentar la velocidad, una de las estrategias es el pretratamiento para disminuir el tamaño de partículas o ayudar a la solubilización (maceración, ultrasonidos, tratamiento térmico, alta presión, o combinación de altas presiones y temperaturas) (IDAE, 2007, p. 12).

El proceso de descomposición anaeróbica se lleva a cabo de la siguiente manera:

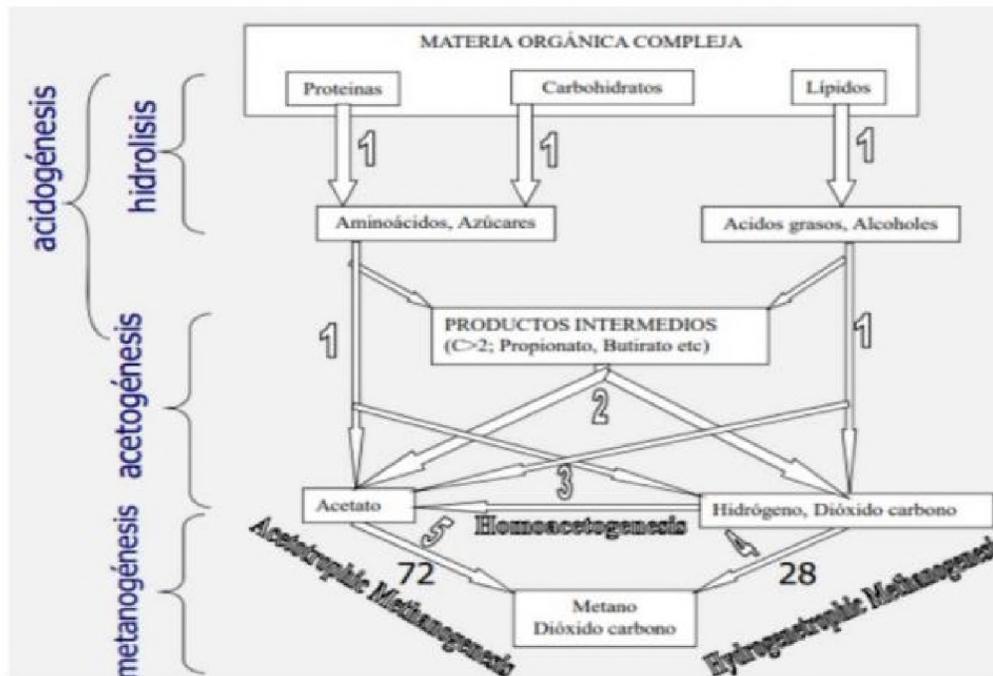


Ilustración 4 Proceso de descomposición anaeróbica

Fuente: (IDAE, 2007, p. 12).

Los números son indicadores de las poblaciones bacterianas que intervienen en el proceso.

**NO.1 las bacterias fermentativas:** gracias a estas se da la primera etapa de la digestión anaerobia denominada fermentativa o acidogénica. Estas bacterias, utilizan rutas catabólicas de polisacáridos, aminoácidos y glicerol para de este modo producir la glucosa, la cual puede ser empleada en las rutas de fermentación alcohólica, láctica y acética. Los efectos generados de esta fermentación resultan de los ácidos grasos y alcoholes. Estas bacterias pueden ser facultativas o anaerobias estrictas (no se necesita potenciales redox bajos).

**NO.2 bacterias acetogénicas:** Son aquellas bacterias productoras de hidrógeno, este grupo de bacterias se encarga de metabolizar los ácidos propiónicos, algunos otros ácidos orgánicos, alcoholes, entre otros compuestos aromáticos en acetato y CO<sub>2</sub>.

**NO.3 bacterias homoacetogénicas:** Estas bacterias son las que se encargan de la producción de acetato, que principal precursor del metano. (*Clostridium aceticum* y *Acetobacterium Woodii*). Estas tienen eficiencia alta termodinámica, por lo tanto, no se presenta la acumulación de  $H_2$  y  $CO_2$ , estas bacterias juegan un papel importante debido a que aparte de producir acetato se encargan de evitar la acumulación de hidrógeno. El hidrógeno puede inhibir todo el proceso.

Por último, tenemos las metanogénicas las cuales se encargan de generar metano a través de dos vías distintas:

**NO.4 bacterias metanogénicas hidrogenotróficas:** Estas son aquellas que mantienen el equilibrio del hidrógeno ( $H_2$ ) en el medio, utilizándolo para reducir el  $CO_2$  a  $CH_4$ .

**NO.5 bacterias metanogénicas acetoclásticas:** Aquellas que utilizan principalmente el acetato como sustrato produciendo metano y  $CO_2$ . La otra vía es producida por las arqueobacterias.

Las 4 y 5, Las bacterias metanogénicas son consideradas como anaerobias estrictas y como especies con velocidad limitante.

Dos clases de metanogénicas: *Methanosaeta* (forma de filamento,  $K_s$  bajo y afinidad alta) y *Methanosarcina* (Forma esférica,  $K_s$  alto y afinidad baja, crecen con mucho sustrato).

## **I.5.3 Proceso de descomposición anaeróbica**

### **I.5.3.1 Hidrólisis**

Este es el primer paso en el proceso anaeróbico digestivo, la materia orgánica polimérica no puede ser empleada de manera directa por los organismos al menos que estos sean hidrolizados en compuestos solubles, que puedan atravesar por la pared celular. Esta etapa es la que proporciona los sustratos orgánicos para el proceso de digestión anaeróbica.

### **I.5.3.2 Etapa acidogénesis**

Aquí se genera la fermentación de las moléculas orgánicas las cuales son solubles en aquellos compuestos que podrían ser empleados de manera directa por las bacterias metanogénicas. El interés de estas radica en que aparte de producir los alimentos para la siguiente fase, además eliminan cualquier rastro de oxígeno presente en el proceso.

### **I.5.3.3 Etapa acetogénesis**

Mientras que algunos, productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos ( $H_2$  y ácido acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos), deben ser convertidos en productos más sencillos (acetato e hidrógeno), a través de las bacterias acetogénicas. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos mono carbonados (como mezcla  $H_2/CO_2$ ) produciendo como único producto acetato. Diferenciadas de las bacterias acetogénicas, éstas no generan hidrógeno como consecuencia de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato (Becerril Rivera, 2022).

### **I.5.3.4 Etapa de metanogénesis**

Acá un amplio grupo de bacterias anaerobias estrictas, trabajan en los productos generados en las etapas anteriores. Estos pueden ser considerados como lo más importantes en la comunidad microbiana metanogénica anaeróbica, ya que son los encargados de la generación de metano y suprimir los medios procesos anteriores, generan el nombre al proceso general de biometización.

## **I.5.4 Factores que inciden en la inhibición de la digestión anaerobia**

Existen sustancias que en cualquier concentración son inhibitorias de la metanogénesis como hidrocarburos clorados, cianuros, detergentes, antibióticos, formaldehídos y ácidos como el fluoracético.

Los efectos de algunos cationes, como Na, K, Ca y Mg, en la degradación anaerobia son de gran importancia en el arranque de un reactor anaerobio, al igual que los efectos producidos por el ácido sulfhídrico a 30°C.

Investigaciones realizadas indican que la producción de gas no es una función lineal de la concentración de ácido sulfhídrico y que a concentraciones mayores de 200 mg/L producen severos efectos de inhibición y la producción de gas se detiene por completo. El factor más importante en la inhibición de la metanogénesis por azufre es la habilidad de las bacterias sulfato-reductoras por competir con las bacterias metanogénicas por el hidrógeno libre y otros donadores de electrones tales como el metanol, acetato y propionato (Caicedo, 2006).

Los parámetros comúnmente usados para determinar los indicadores de inhibición son:

- Reducción en la producción de metano.
- Incremento en la concentración de AGV.
- Fallas en la Remoción de DQO.
- Problemas con el pH.
- Pobre estabilidad al someterlo a sobrecargas.
- Respuesta lenta a condiciones de parada y arranque del sistema (Caicedo, 2006)

### **I.5.6 Beneficios de la digestión anaerobia**

- Reducción significativa de malos olores.
- Mineralización.
- Producción de energía renovable si el gas se aprovecha energéticamente y sustituye a una fuente de energía fósil.
- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la reducción de emisiones incontroladas de CH<sub>4</sub>, (que produce un efecto invernadero 20 veces superior al CO<sub>2</sub>), y reducción del CO<sub>2</sub> a horrado por sustitución de energía fósil, (IDAE, 2007, p. 5).

### **I.6 Biogás**

El biogás es el producto gaseoso de la digestión anaerobia de compuestos orgánicos. Su composición, que depende del sustrato digerido y del tipo de tecnología utilizada, puede ser la siguiente: 50 – 70 % de metano (CH<sub>4</sub>); 30 – 40 % de anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>); ≤ 5 % de hidrógeno (H<sub>2</sub>), ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), y otros gases.

Debido a su alto contenido en metano, tiene un poder calorífico algo mayor que la mitad del poder calorífico del gas natural. Un biogás con un contenido en metano del 60 % tiene un poder calorífico de unas 5.500 kcal/Nm<sup>3</sup> (6,4 kWh/Nm<sup>3</sup>), (IDAE, 2007, p. 7).

### **Posibles usos del biogás**

El biogás producido en procesos de digestión anaerobia puede tener diferentes usos:

- En calderas para generación de calor o electricidad.
- En motores o turbinas para generar electricidad.
- En pilas de combustible, previa realización de una limpieza de H<sub>2</sub>S y otros contaminantes de las membranas.
- Purificarlo y añadir los aditivos necesarios para introducirlo en una red de transporte de gas natural.
- Uso como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como es el metanol o el gas natural licuado.
- Combustible de automoción.

## **I.7 Biodigestor**

Un biodigestor es un contenedor hermético que permite la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas y facilita la extracción del gas resultante para su uso como energía.

El biodigestor cuenta con una entrada para el material orgánico, un espacio para su descomposición, una salida con válvula de control para el gas (biogás), y una salida para el material ya procesado (bioabono) (Ecocontenedores, s.f).

### **I.7.1 Estructura de un biodigestor:**

Existen muchas variaciones en el diseño del biodigestor. Algunos elementos que comúnmente se incorporan son:

- Cámara de fermentación: El espacio donde se almacena la biomasa durante el proceso de descomposición.
- Cámara de almacén de gas: El espacio donde se acumula el biogás antes de ser extraído.
- Pila de carga: La entrada donde se coloca la biomasa.
- Pila de descarga: La salida, sirve para retirar los residuos que están gastados y ya no son útiles para el biogás, pero que se pueden utilizar como abono (bioabono).

- Agitador: Desplaza los residuos que están en el fondo hacia arriba del biodigestor para aprovechar toda la biomasa.
- Tubería de gas: La salida del biogás. Se puede conectar directamente a una estufa o se puede transportar por medio de la misma tubería a su lugar de aprovechamiento.

### **I.7.2 Factores Influyentes en el funcionamiento de un biodigestor**

- La temperatura es muy importante para la producción de biogás, ya que los microorganismos que realizan la biodigestión disminuyen su actividad fuera de estas temperaturas. La temperatura en la cámara digestiva debe ser entre los 20° C y 60° C; para optimizar el tiempo de producción es deseable mantener una temperatura entre los 30° C y 35° C.
- El nivel de acidez determina como se desenvuelve la fermentación del material orgánico. El pH del material debe tener un valor entre 6.5 y 7.5. Al estar fuera de este rango neutro la materia orgánica corre el riesgo de pudrirse, ya que se aumenta la actividad relativa de los microorganismos equivocados; esto normalmente produce un olor muy desagradable.
- El contenedor debe de estar perfectamente sellado para evitar que entre el oxígeno y de esta manera tener un procedimiento anaeróbico adecuado; también evita fugas del biogás.
- Debe de contener entre el 80 % y 90 % de humedad.
- Los materiales más comúnmente utilizados para producir biogás son el estiércol de vaca, caballo, puerco y humana, sin embargo, también se pueden otros materiales orgánicos.
- Para lograr una descomposición eficiente, la materia orgánica debe de ser en tamaños digeribles pues entre más chica más rápida la producción del biogás.
- Se deberá tener un equilibrio del carbono y el nitrógeno (Ecocontenedores, s.f.).

### **I.7.3 Clasificación de los biodigestores**

#### **Reactor mezcla completa sin recirculación:**

Consiste en un reactor en el que se mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de substrato como de microorganismos. Esto se consigue mediante un sistema de agitación. Ésta puede ser mecánica (agitador de hélice o palas, de eje vertical u horizontal) o neumática (recirculación de biogás a presión), y nunca violenta. Comparativamente a otros reactores, el tiempo de retención necesario es alto, debido a que la concentración, de cualquier especie, que se mantiene en el reactor en régimen estacionario es la misma que la que se pretende en el efluente. Si la velocidad de reacción depende de la concentración, como es el caso de los procesos biológicos, la velocidad será baja, y la forma de compensarla es aumentando el tiempo de reacción (Campos y Flotats, 2004).

#### **Reactor mezcla completa con recirculación:**

Este sistema tiene el nombre de reactor anaerobio de contacto y sería equivalente al sistema de fangos activos aerobios para el tratamiento de aguas residuales. Se comprueba que regulando la recirculación es posible conseguir tiempos de retención hidráulica más bajos que en un reactor simple de mezcla completa. Esto es a costa de aumentar el tiempo de retención de los microorganismos, gracias a su confinamiento en el sistema mediante la separación en el decantador y recirculación.

Debido a la necesaria separación de microorganismos en el decantador, este sistema sólo es aplicable a aguas residuales de alta carga orgánica (aguas residuales de azucareras, cerveceras, etc.), para las que sea posible una separación de fases líquido-sólido, con la fracción sólida consistente básicamente en flóculos biológicos. Antes del decantador se debe disponer de un sistema de desgasificación, sin el cual la decantación se puede ver impedida, (IDAE, 2007, p. 25).

#### **Reactor con retención de biomasa, sin recirculación:**

Si se consigue retener bacterias en el interior del reactor, evitando la configuración de reactor de mezcla completa, es posible reducir el tiempo de retención por debajo del reactor RMC tomado como referencia.

Los métodos de retención de biomasa son básicamente dos:

- a) Inmovilización sobre un soporte (filtros anaerobios y lechos fluidizados).
- b) Agregación o floculación de biomasa y su retención por gravedad (reactor de lechos de lodos).

Filtro anaerobio: En este sistema las bacterias anaerobias están fijadas a la superficie de un soporte inerte -formando biopelículas-, columna de relleno, o atrapadas en los intersticios de éste, con flujo vertical. El soporte puede ser de material cerámico o plástico. Su distribución puede ser irregular (filtro anaerobio propiamente dicho, con flujo ascendente), y en este caso las bacterias se encuentran mayoritariamente atrapadas en los intersticios, o regular y orientado verticalmente, y en este caso la actividad es debida básicamente a las bacterias fijadas, recibiendo el nombre de lecho fijo con flujo descendente. En caso de utilizar un soporte orientado verticalmente con flujo ascendente y un sustrato lentamente degradable, con elevado tiempo de retención, la retención por sedimentación de los fragmentos de biopelícula desprendidos adquiere un efecto de importancia en la actividad del reactor.

Reactor anaerobio de lecho fluidizado: En este sistema las bacterias se encuentran fijadas, formando una biopelícula, sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidizadas mediante el flujo asciende adecuado del fluido. Para mantener el caudal adecuado, que permita la expansión y fluidización del lecho, se recurre a la recirculación. Igual que el filtro, puede ser aplicado a aguas residuales, especialmente de la industria agroalimentaria, y a fracciones líquidas o sobrenadante de residuos ganaderos, aunque las experiencias en este ámbito son muy limitadas.

Reactor de lecho de lodos: En este sistema se favorece la floculación o agregación de bacterias entre ellas, formando gránulos o consorcios, de forma que por sedimentación se mantienen en el interior del reactor, con la velocidad ascendente adecuada del fluido, siempre que en la parte superior exista un buen separador sólido(biomasa)/líquido/gas. El diseño más común es el Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), el cual está siendo extensamente aplicado al tratamiento de aguas residuales de la industria agroalimentaria (Campos y Flotats, 2004).

### **Sistemas discontinuos:**

En un sistema discontinuo, la curva de evolución temporal de la producción de biogás sigue la misma tendencia que la curva típica del crecimiento de microorganismos (latencia, crecimiento exponencial, estacionalidad y decrecimiento).

Aquí el concepto de tiempo de retención no tiene sentido y se hablaría de tiempo de digestión. Para conseguir una producción de biogás cercana a la continuidad deben combinarse varios reactores discontinuos con puestas en marcha intercaladas en el tiempo. Estos reactores han sido aplicados a residuos con una alta concentración de sólidos que dificultan la adopción de sistemas de bombeo, tales como residuos de ganado vacuno con lecho de paja (IDAE, 2007, p. 29).

### **Otros sistemas:**

Los reactores anteriores pueden ser combinados para conseguir sistemas más eficientes, según el tipo de residuo a tratar.

▪ Sistemas de dos etapas: Estos consisten en un primer reactor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, seguido de un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. Si la primera etapa consiste en un reactor discontinuo, el líquido tratado en la segunda es el obtenido por percolación en la primera una vez recirculado el efluente de la segunda. Este sistema permite mantener fácilmente la temperatura en el reactor discontinuo, controlando la temperatura del efluente del segundo reactor. Ha sido aplicado con éxito para tratar residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis: frutas, verduras, residuos sólidos urbanos, de ganado vacuno, etc.

▪ Sistemas de dos fases: A diferencia de los sistemas de dos etapas, la separación de fases se refiere a mantener dos reactores en serie, en los cuales se realizan, respectivamente, las fases de acidogénesis y metanogénesis, y su objetivo es conseguir un tiempo de retención global inferior al correspondiente a un único reactor de mezcla completa. La separación es de tipo cinético, controlando el tiempo de retención de cada reactor, el cual será inferior en el primero, debido a las más altas tasas de crecimiento de las bacterias acidogénicas. Este tipo de sistema ha sido aplicado con éxito a la digestión de residuos con alta concentración de azúcares y bajo contenido en sólidos, pero no para residuos con fibras y, en general, sustratos complejos cuyo limitante es la hidrólisis.

▪ Sistemas híbridos: En general serán sistemas que combinen los conceptos que sustentan los diferentes tipos de reactores descritos. Los dos sistemas anteriores podrían considerarse como tales. También se han realizado diseños de reactores con retención de biomasa híbridos, en los cuales la parte baja de éste se comporta como un UASB y la parte superior como un filtro (IDAE, 2007, p. 29)

## **I.8 Tipos de fuentes contaminantes establecidos por la norma ambiental sobre calidad de aguas subterráneas y descargas al subsuelo.**

Según La Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales en el Art. 40, de la norma ambiental sobre calidad de aguas subterráneas y descargas al subsuelo, se establecen 3 tipos de fuentes contaminantes:

**I.8.1 a) Fuente Tipo I:** son aquellas descargas relacionadas con sustancias de alto riesgo de toxicidad, de persistencia y de bioacumulación. Incluye los compuestos organohalogenados; organofosforados; compuestos orgánicos de estaño; mercurio y compuestos de mercurio; cadmio y compuestos de cadmio; aceites minerales e hidrocarburos; cianuros y sustancias radiactivas.

**I.8.2 b) Fuente Tipo II:** son aquellas descargas provenientes de actividades e industrias que no contienen sustancias consideradas con alto riesgo de toxicidad, de persistencia y de bioacumulación.

**I.8.3 c) Fuente Tipo III:** son las descargas de aguas residuales domésticas, que a su vez se subdividen en: 1) Aquellas cuya producción de aguas residuales es menor o igual a 10 m<sup>3</sup>/día; y 2) Aquellas con producciones residuales mayores de 10 m<sup>3</sup>/día.

**I.8.4 d) Fuente Tipo IV:** son las aguas de drenaje pluvial. (SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE, 2004)

Según lo establecido en el Art.40 los tipos de fuentes de contaminación producida por el centro de procesamiento de CEPDCAFEN son las fuentes tipo I y tipo II basándonos en estos parámetros establecidos por la norma sobre el control descarga al subsuelo, se estarán analizando los resultados obtenidos de la caracterización de las aguas perteneciente del proceso.

## **I.9 Principales impactos ambientales generados por el beneficio húmedo del café.**

### **I.9.1 Residuos líquidos**

Las aguas residuales generadas por el proceso tienen generalmente alta carga orgánica y un pH ácido. En la mayoría de las operaciones del beneficiado húmedo se utiliza agua como medio o agente de transporte y clasificación, provocando su contaminación en menor o mayor grado.

En la siguiente tabla se presentan las operaciones donde se utiliza agua y las principales características contaminantes de los efluentes.

*Tabla 1 operaciones que utilizan agua y las características de sus efluentes*

<b>Operación</b>	<b>Uso del agua</b>	<b>Características de los efluentes</b>
Recibo y clasificación	Como medio de transporte y clasificación de café maduro.	Suciedad de frutos y componentes disueltos de granos maltratados por el transporte.
Despulpado y clasificación	Como agente de transporte y separación de la pulpa del café maduro y clasificación del café despulpado.	Más del 50 % de la carga contaminante generada en todo el proceso. Descarga mínima de 3 kg de DQO por quintal de café oro, dependiendo del proceso.
Lavado y clasificación	Eliminación del mucilago según tipo de remoción (natural, mecánica o química)	Aporta aproximadamente 3.4 kg de DQO por quintal de café oro en forma de sólidos suspendidos y materia disuelta en agua.
Transporte	Transporte de café a secado	Mínima contaminación de las aguas que se utilizan en esta operación.

Fuente: (Campos y Flotats, 2004).

Al descargar inadecuadamente las aguas residuales del beneficio (sin tratamiento adecuado), se contaminan suelos, manto freático o fuentes de aguas naturales. Esto resuelta debido a que las aguas residuales del beneficiado húmedo de café contienen alta carga orgánica, pH ácido, sólidos disueltos, sólidos sedimentables, entre otros.

## **1.9.2 Residuos sólidos**

Los residuos sólidos en el beneficiado húmedo de café se generan principalmente en el despulpado, siendo estos la pulpa. En caso de que el beneficio cuente con un área de beneficiado seco (producción de café oro), se generan residuos en el trillado llamados cascarilla.

*Tabla 2 residuos sólidos del proceso y sus características*

<b>Residuos solidos</b>	<b>Características</b>
Pulpa	Promedio de producción 2.2 kg de pulpa por 1kg de café oro y un promedio en volumen 2 m <sup>3</sup> por T de pulpa.
Cascabillo o cascarilla	Promedio de producción de 0.2 kg de cascabillo por 1 kg de café oro.

Fuente: (Campos y Flotats, 2004).

Existen 2 maneras inadecuadas de eliminar la pulpa resultante del proceso:

- Acumulación en el suelo: esta a su vez, produce malos olores, crecimiento de insectos, lixiviación al suelo de aguas mieles, contaminación visual y riesgo de contraer enfermedades.
- Fuente de agua: se crean condiciones de biodegradación con una alta demanda de consumo de oxígeno en el agua (DBO, DQO), y la producción de compuestos con mal olor.

**SEGUNDA PARTE**  
**MARCO METODOLÓGICO**

## **CAPÍTULO II**

### **II.1 Investigación de campo**

#### **II.1.1 Proceso de beneficio realizado en el centro de procesamiento de CEPDCAFEN**

En las instalaciones pertenecientes a CEPDCAFEN en el naranjal se lleva a cabo el proceso de beneficio por vía húmeda del café la misma se desarrolla de la manera que sigue:

##### **II.1.1.1 Recepción del café**

Se recibe el fruto maduro, los productores transportan el fruto al centro en sacos de cabuya, allí son recibidos por el encargado y se procede a medir las cantidades de fruto recibido.

##### **II.1.1.2 Medición**

El fruto es recibido y se procede a medir las cantidades del mismo que llega, esto se hace mediante una de las unidades de medida utilizada por los productores de café conocida como caja, la misma cuenta con las siguientes dimensiones, 19" x 9.5" x 14" esta medida es equivalente a 55 a 60 libras de café uva.

##### **II.1.1.3 Despulpado**

Luego de medido, el fruto mismo es introducido a una maquina despulpadora donde se retira la pulpa (cascarilla superficial que recubre el grano de café), en esta parte se le agregan pequeñas cantidades de agua para facilitar la separación de la pulpa del grano, el grano pasa a una pila, conocida como pila de fermentación y la pulpa es almacenada en unas pilas de almacenamiento.

##### **II.1.1.4 Fermentación**

El grano se deja reposar en las pilas con el fin de que el mismo se fermente y se desprenda el mucilago del mismo, este proceso lleva un tiempo de 12 a 24 horas, este tiempo depende de la temperatura que se maneje ese día, se debe tener un control sobre este proceso debido a que si se sobrepasa el tiempo de retención se podría fermentar el grano de café y estropear el producto, los productores utilizan un sistema el cual consiste en introducir una vara a la pila de fermentación para notar que el mucilago se está desprendiendo, lo que indica que es hora de lavar.

### II.1.1.5 Lavado

Cuando el mucilago comienza a desprenderse es hora de llenar las tinas con agua y se procede a agitar el agua con el grano de café con el fin de que se retire todo el mucilago. Esto se logra introduciendo grandes cantidades de agua a la tina y agitando, se retira el agua y se introduce agua nueva y esto se repite de 2 a 3 veces hasta que el grano quede totalmente libre de mucilago, en este proceso se utilizan aproximadamente unos 2000 L de agua por quintal de café uva procesado.

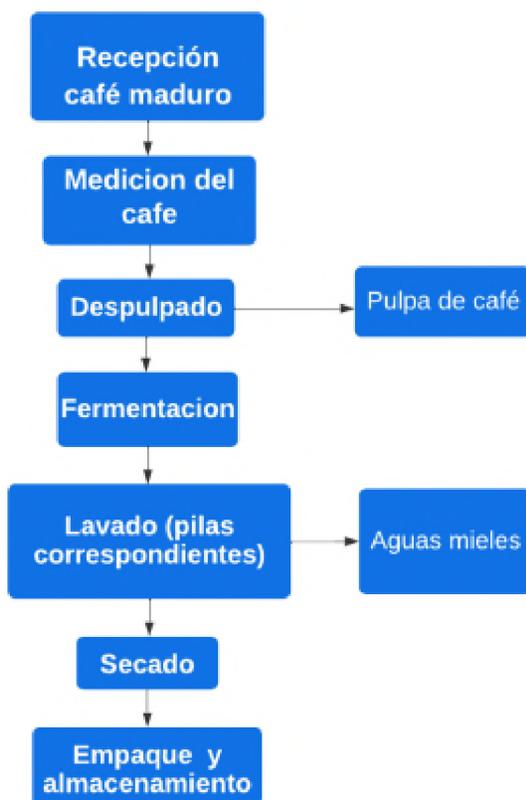
### II.1.1.6 Secado

Al terminar el lavado de los granos de café se procede a retirarlo de las pilas y se extienden los mismos en secaderos al sol con el fin de retirarles el agua. Se procede a mover cada cierto tiempo los granos con el fin de eficientizar el proceso de secado. Con el secado el grano pasa a ser café pergamino.

### II.1.1.7 Empacado y Almacenamiento

Cuando el grano está totalmente seco se procede a empacar en sacos (costales) de cabuya, luego se procede a guardar el producto seco en el almacén, hasta que el producto sea vendido a procesadores de café pergamino.

### II.1.2 Diagrama de proceso beneficio húmedo CEPDCAFEN.



Los principales desechos que se generan del proceso antes descrito son la pulpa y las aguas mieles. Estos dos desechos son un potencial contaminante de los suelos y las aguas superficiales y subterráneas de la zona, por lo que la correcta disposición de los mismos es esencial. Para tener una visión completa de las características que tienen las aguas mieles (aguas residuales) que salen del proceso de beneficio húmedo se le realizó una caracterización a las mismas con el fin de determinar la composición de estas.

### II.1.3 Informe de análisis de la caracterización de las aguas pertenecientes al proceso de beneficio realizado en el centro de procesamiento de CEPDCAFEN para medir los límites de vulnerabilidad media para la descarga a subsuelo.

*Tabla 3 informe de análisis de caracterización de aguas del proceso de CEPDCAFEN*

Parámetro	Método	Resultado	Unidad	Norma (Valor de Referencia)	LMD
(DBO <sub>5</sub> )	SM 5210 B	15,975	mg/L	50	1
(DQO)	SM 5220 D	24,938	mg/L	250	20
Sólidos sedimentables	SM 2540-F	748.0	mL/L	---	0.1
Sólidos totales	SM 2540 C, D	13,166	mg/L	---	1
Nitrogeno total	SM 4500-N-C	132.0	mg/L	30	10
Fósforo total	SM 4500-P-C	97.2	mg/L	3.0	1.0
pH	SM 4500 H+. B	3.73	N/A	6.0 - 8.5	0.01
Alcalinidad total	SM 2320 B	ND	mg/L	--	1
Nitrogeno amoniacal	SM 4500-NH3-C	13.5	mg/L	10	0.01

Leyenda:

-LMD = Limite Mínimo de Detección -N/A= No Aplica -ND= No Detectado

Todos los resultados hacen referencia únicamente a esta muestra.

**Nota:** análisis realizados en el IBII

## II.1.4 Límites de descarga para fuentes contaminantes según la norma ambiental sobre calidad de aguas subterráneas y descargas al subsuelo.

Límites máximos en las descargas para fuentes contaminantes tipos I, y II (estas últimas sólo para  $Q > 10 \text{ m}^3/\text{día}$ ), del Art.40 de la norma ambiental sobre calidad de aguas subterráneas y descargas al subsuelo en la R.D, según diferentes niveles de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos.

*Tabla 4 límites de descarga para fuentes contaminantes según la norma ambiental de aguas subterráneas y descarga al subsuelo en la R.D.*

Parámetros	Vulnerabilidad alta (mg/L)	Vulnerabilidad media (mg/L)	Vulnerabilidad baja (mg/L)
DBO <sub>5</sub>	35	50.0	100
DQO	130	250.0	400
N <sub>tot</sub>	18.0	30	30
P <sub>tot</sub>	2.0	3.0	3.0
pH	6.0 – 8.5	6.0 – 8.5	6.0 – 8.5
N-NH <sub>4</sub>	10.0	10.0	20.0

Según el Art. 40 de la norma ambiental sobre calidad de aguas subterráneas y descargas al subsuelo en la R.D. el control de descarga a aguas superficiales alcantarillado sanitario y aguas costeras los parámetros que debe tener un agua proveniente del beneficio del café para ser introducida al medio ambiente son:

*Tabla 5 parámetros permitidos por la norma, para el vertimiento en la R.D*

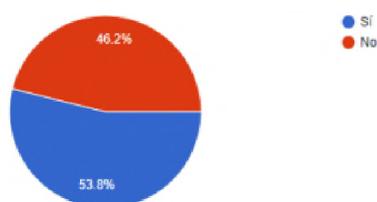
Beneficios del café	pH	6-8.5
	DBO <sub>5</sub>	50
	DQO	250
	OD	4
	Total de sólidos en suspensión (TSS)	50
	Materia flotante	Ausente
	Grasas y aceites	10
	N-NH <sub>4</sub>	10

Analizando los resultados obtenidos en la caracterización y los parámetros de descarga que expresa la norma se hace evidente la necesidad de diseñar un proceso de tratamiento para las aguas mieles, con el fin de que las mismas puedan ser vertidas al medio ambiente sin alterar las condiciones de este.

## II.2 Encuesta a los productores

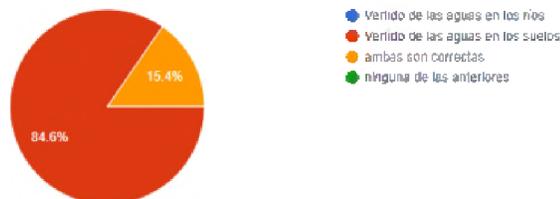
### Encuesta realizada a 15 productores vía correo electrónico.

1. ¿Ha recibido algún tipo de orientación con relación a cómo manejar los desechos generados por el beneficio húmedo del café?



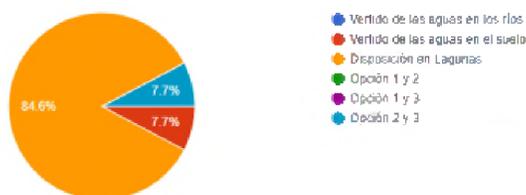
El 53 % de los productores encuestados ha recibido algún tipo de orientación con respecto al manejo de los desechos producidos en el beneficio húmedo del café.

2. ¿Cuál era la disposición de los desechos generados por el beneficio anterior al centro de procesamiento?



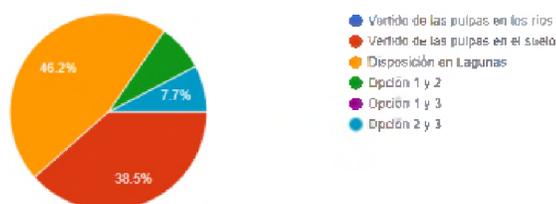
El 84.6 % de los encuestados respondieron que los desechos generados eran vertidos en los ríos.

3. ¿Actualmente cuál es la disposición de las aguas mieles generadas por el beneficio húmedo en CEPDCAFEN?



El 84.6 % de los encuestados respondieron que las aguas mieles son depositadas en una laguna a ciclo abierto.

4. ¿Actualmente cuál es la disposición de las pulpas generadas por el beneficio húmedo en CEPDCAFEN?



El 46.2 % de los productores respondieron que la pulpa es dispuesta en lagunas, mientras que el 38.5 % de estos respondieron que la misma es dispuesta en el suelo.

**5. En su opinión ¿cómo influye la disposición de estos residuos en la calidad del agua y el ambiente?**

Entre las respuestas que se obtuvieron en esta pregunta se encuentran las siguientes respuestas:

- Estos residuos liberan gases que afectan el ambiente, también se afectan las aguas debido a los lixiviados que afectan las aguas subterráneas y la escorrentía de los ríos.
- Afecta la calidad del agua, debido a que la lluvia arrastra hacia la parte baja todos los desechos y cae en los ríos.
- Con la lluvia estos residuos son arrastrados a los ríos y cañadas y contaminan las aguas con sustancias no deseadas.

Todos los entrevistados coincidieron en que el proceso que se lleva a cabo termina contaminando las aguas y los suelos a corto plazo.

**6. ¿Estaría dispuesto a implementar un sistema que ayude a sanear las aguas residuales generadas en el beneficio húmedo del café?**



● Si  
● No

El 100 % de los productores encuestados están dispuestos a implementar un sistema para tratar las aguas residuales.

**7. ¿Utilizaría un abono orgánico procedente del tratamiento de las aguas residuales del beneficio húmedo del café?**



● Si  
● No

El 100 % de los encuestados respondió que si utilizarían un abono producto del procesamiento de las aguas residuales del beneficio del café.

## CAPÍTULO III

### **III.1 Propuesta para el diseño del proceso**

#### **III.1.1 Caracterización de las aguas mieles**

Se debe efectuar un estudio de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas mieles a tratar con el fin de realizar una propuesta de diseño para un proceso efectivo y eficiente de descontaminación de aguas mieles. Los parámetros que se deben tener en cuenta para la construcción y puesta en marcha del digestor son las siguientes:

➤ **Contenido de sólidos (sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, sólidos volátiles):**

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digestor es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente. La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas. Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semicontinuos no debe tener más de un 8% a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40 a 60 % de sólidos totales (Moreno, 2011).

➤ **pH:** Este parámetro es un factor limitante para el desarrollo de las bacterias metanogénicas que son las encargadas de producción del biogás por lo que se proponen un rango de pH entre 6 y 8 siendo el ideal un pH de 7, por debajo de 6 y por encima de 8 se inhiben el crecimiento de las bacterias metanogénicas.

➤ **Temperatura:** Es de vital importancia tener en cuenta la temperatura media de la zona debido a que este parámetro define el tiempo que debe permanecer el efluente en el digestor. Esto se debe a que la velocidad de reacción de los procesos biológicos depende del crecimiento de los microorganismos involucrados y el crecimiento de los mismos a su vez depende de la temperatura. El rango de temperatura más utilizado para la digestión anaerobia es de 25 a 45 ° C.

➤ **Relación carbono/nitrógeno:** El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas, debido a que el carbono es la principal fuente de energía de las mismas y el nitrógeno es necesario para la formación de nuevas células. Debido a esto es necesario que exista un equilibrio entre el carbono y el nitrógeno existente en el influente, el mismo es considerado óptimo en una relación C/N de 25:1, siendo rangos aceptables los de 20:1 y 30:1. Cuando esta relación es más alta (C: N > 30:1), existirá en el sistema una gran concentración de Ácidos Grasos Volátiles (AGV's) que inhibirán las etapas microbiológicas del sistema. En caso contrario (C: N < 20:1), la alta concentración de compuestos nitrogenados también inhibirá la producción de biogás. (Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2010 p.15).

➤ **Demanda química y bioquímica de oxígeno:** La DQO determinara la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, por lo tanto, en los biodigestores la medición de este parámetro representa una herramienta para identificar el funcionamiento del biodigestor debido a que su análisis nos mostrara la eficiencia del digestor en eliminar la materia orgánica. Añadir el rango de DQO y DBO. Se considera que aguas residuales con cargas orgánicas desde 300 mg/L de DQO pueden ser utilizadas en los reactores anaerobios.

➤ **Agentes inhibidores:** Existen ciertos elementos que pueden inhibir la producción de biogás, estas sustancias pueden estar formando parte del efluente a tratar o se pueden formar como subproducto de la actividad metabólica de algunos grupos bacterianos en el proceso de digestión. Entre las sustancias inhibidoras que se pueden encontrar formando parte de las materias primas de biodigestión se encuentran: el amoníaco, los metales pesados, los compuestos halogenados, el cianuro y fenoles. Mientras que como consecuencia de la actividad metabólica de algunas bacterias podemos encontrar inhibidores como: sulfuros, amoníaco y ácidos grasos de cadena larga.

Con el fin de conocer las concentraciones de nuestros efluentes, de los parámetros antes expuesto se realizó un estudio de caracterización de las aguas mieles que arrojó los siguientes resultados:

Tabla 6 Caracterización del agua del proceso de CEPCAFEN

Parámetro	Resultado
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	24,938 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	15,975 mg/L
Solidos Sedimentables	748.0 mg/L
Solidos Totales	13,166 mg/L
Nitrógeno total	132 mg/L
Fosforo total	97.2 mg/L
pH	3.73
Alcalinidad total	No detectada
Nitrógeno amoniacal	13.5 mg/L
Densidad	1.05 g/mL

Fuente: resultados análisis IBII

### III.1.2 Determinación de producción diaria de aguas mieles

Para determinar la cantidad de aguas mieles producidas diariamente es necesario tener en cuenta los siguientes datos:

- La temporada de producción de café en El Naranjal, comienza en el mes de septiembre y termina en el mes de diciembre, encontrándose los meses picos de producción entre los meses de octubre y noviembre.
- La recolección del fruto se realiza en cortes que suceden en periodos de cada 15 días y el procesamiento del mismo se debe realizar entre 12 y 24 horas luego de su recolección.
- Por corte se recolecta un aproximado de 140 quintales de café uva.
- El consumo de agua en el beneficio de El Naranjal se estima en unos 250 L por quintal de café procesado.
- La densidad de las aguas mieles según un estudio realizado por (Moronta et al., 2017) para la revista APF de la caracterización de aguas mieles provenientes del beneficio húmedo es de 1.05 kg/L.

Con estos datos podemos ponderar la producción de aguas mieles por quintal procesado y evaluar la carga diaria al digestor.

### III.1.3 Volumen de aguas mieles generados por corte

Como se recolecta 140 quintales (qq) de café uva por corte y el consumo de agua se estima en 250 L por quintal de café procesado. Esto genera un total de 35,000 L de agua por corte equivalente a unos 35 m<sup>3</sup> de agua.

Para determinar la masa de agua que entra al proceso, se utilizó la fórmula para el cálculo de la densidad ( $\rho$ ) del agua:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Despejando la masa (M) se obtiene que:

$$M = \rho \times V \quad (2)$$

$$M = (35,000 \text{ L}) \times (1 \text{ kg/L}) = 35,000 \text{ kg de agua.}$$

Para estimar la cantidad de quintales en kilogramos tenemos que:

$$\begin{aligned} 1 \text{ qq} &\rightarrow 100 \text{ kg} \\ 140 \text{ qq} &\rightarrow x \end{aligned} \quad (3)$$

Donde X= 14,000 kg de café uva.

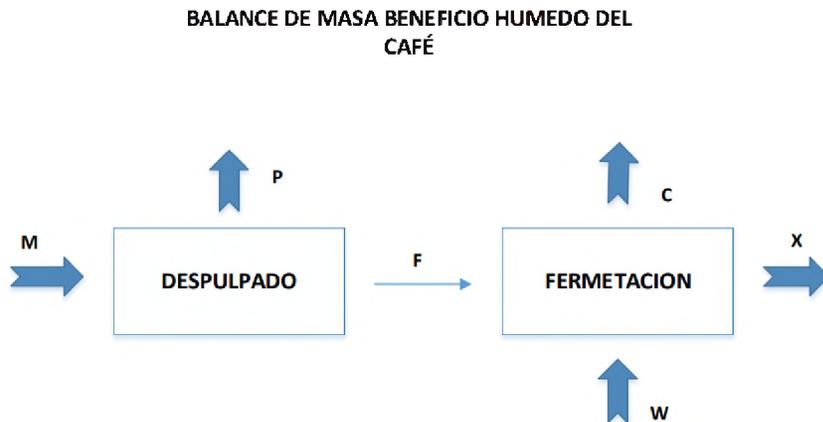
Para estimar la cantidad de aguas mieles producidas por quintal de café procesado partimos de la premisa de que:

- El 43.58 % del peso del grano se convierte en pulpa.
- El 14.58 % del peso del grano se convierte en mucilago.
- La densidad de salida de las aguas mieles en promedio es de 1.05 kg/L

- La densidad del agua de entrada al proceso es 1.0 kg/L
- Es un proceso ideal, donde no se generan pérdidas.

Con esto plantearemos un balance de masa:

### III.2 Balance de masa del beneficio húmedo del café



*Ilustración 5 balance de masa del beneficiado húmedo del café.*

Donde:

M: es la masa de café en kg que entra a la despulpadora.

P: es la masa de pulpa en kg que sale de la despulpadora.

F: es la masa de café que sale de la despulpadora y entra al proceso de fermentación.

W: es la masa de agua en kg que entra al proceso.

C: es la masa de café pergamino húmedo que sale del proceso.

X: es la masa de aguas mieles resultantes del proceso de fermentación.

El cálculo se basará en la cantidad de aguas mieles producidas por corte, tomando en cuenta toda la masa de café a tratar por corte.

Haciendo balance en el proceso de despulpado:



*Ilustración 6 balance de masa en el proceso del despulpado*

Tenemos que:

$$M = F + P \quad (4)$$

$$F = M - P \quad (5)$$

Donde:

$M = 14,000$  kg de café uva

$P = 0.4358 M$

Obtenemos que:

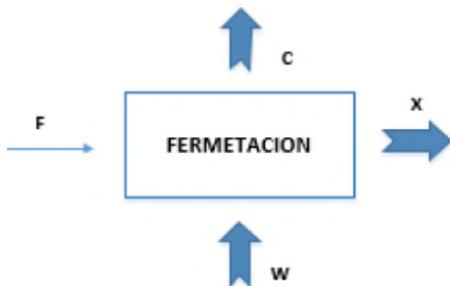
$P = 0.4358 (14,000 \text{ kg}) = 6,101.20 \text{ kg}$

$P = 6,101.20 \text{ kg}$

$F = (14,000 - 6,101.20) \text{ kg} = 7,898.80 \text{ kg}$

$F = 7,898.80 \text{ k}$

Balance en la pila de fermentación:



*Ilustración 7 balance de masa en la pila de fermentación*

Balance general en la pila de fermentación tenemos que:

$$F + W = C + X \quad (6)$$

$$C = F + W - X$$

Donde:

$$F = 7,898.80 \text{ kg} \quad W = 35,000 \text{ kg}$$

$$C = 7,898.8 \text{ kg} + 35,000 \text{ kg} - X$$

$$C = 42,898.80 \text{ kg} - X \quad (7)$$

$$C = 42,898.80 \text{ kg} - X$$

Balance por componente en el café:

$$x_f F + x_w W = x_c C + x_x X \quad (8)$$

Sustituyendo la ecuación (7) en la ecuación (8) obtenemos que:

$$7,898.80 \text{ kg} = 0.4184 (42,898.80 \text{ kg} - X) + 0.1458 X$$

$$7,898.80 \text{ kg} = 17,948.86 \text{ kg} - 0.4184 X + 0.1458 X$$
$$17,948.86 - 7,898.80 \text{ kg} - 0.4184 X + 0.1458 X = 0$$

$$0.2726 X = 10,050.06 \text{ kg}$$

$$X = \frac{10,050.06 \text{ kg}}{0.2726}$$

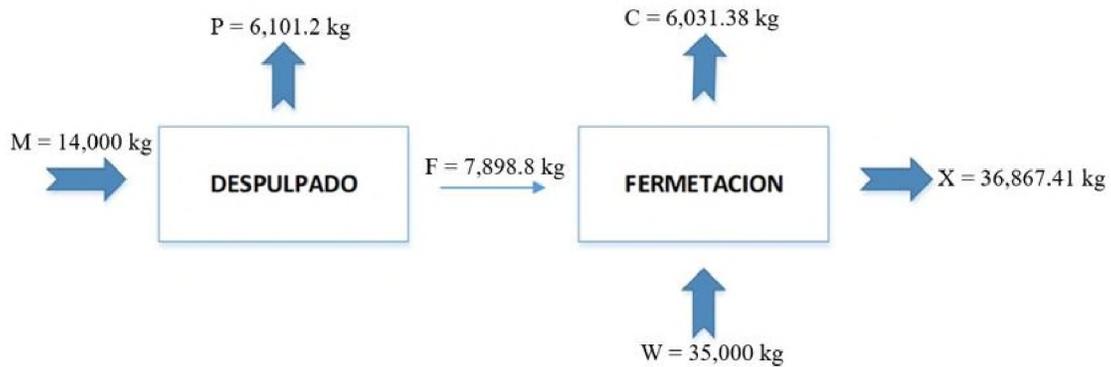
$$X = 36,867.41 \text{ kg}$$

Sustituyendo resultado de X en la ecuación (7) obtenemos que:

$$C = 42,898.80 \text{ kg} - 36,867.41 \text{ kg}$$

$$C = 6,031.38 \text{ kg}$$

**BALANCE DE MASA BENEFICIO HUMEDO DEL  
CAFÉ**



En el balance antes planteado se obtienen los valores en kg de las aguas mieles generadas en el beneficio de un corte pico de 14,000 kg de café uva, generándose unos 36,867.41 kg de aguas mieles.

La densidad promedio de las aguas mieles es 1.05 kg/ L, de aquí obtenemos:

Despejando la ecuación (1) tenemos:

$$V = \frac{M}{D} \tag{9}$$

$$V = \frac{36,867.41 \text{ kg}}{1.05 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 35,111.83 \text{ L}$$

Para obtener el valor del volumen en m<sup>3</sup>:

$$1000 \text{ L} \rightarrow 1 \text{ m}^3$$

$$35,111.83 \text{ L} \rightarrow X$$

Donde:

$$X = \frac{35,111.83 \text{ L} (1 \text{ m}^3)}{1000 \text{ L}} = 35.111 \text{ m}^3 \tag{10}$$

### III.3 Estimación de volumen diario de aguas mieles para el digestor

Como las aguas mieles se generan regularmente cada 15 días, se puede hacer una estimación diaria de la cantidad de aguas mieles que deberían ingresar al digestor por día. En la siguiente tabla se describen los valores de masa y volúmenes por día.

*Tabla 7 valores de masa y volumen por día en el proceso de beneficiado de CEPDCAFEN.*

DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD
Producción quincenal aproximada café uva	1400	cajas
Producción quincenal aproximada café uva	140	qq
Procesamiento diario de café	9.33	qq
Consumo de agua por quintal	250	L
Producción diaria aproximada café uva en kg	933.33	kg/día
Consumo diario de agua por kilogramo de café uva	2,333.33	L
kg de pulpa de café producida por día	406.75	kg/día
kg de mucilago de café producida por día	136.08	kg/día
kg de agua que se utilizan por día	2,333.33	kg/ día
kg de café que entran a la etapa de lavado	526.59	kg/ día
kg de café pergamino que se procesan por día	390.50	kg/ día
Estimación de kg de aguas mieles producidas	2,457.82	kg/ día
Volumen de aguas mieles diarias	2,340.78	L/día

Tabla realizada por los estudiantes en base a resultados obtenidos anteriormente

De la tabla antes descrita obtenemos que el volumen de ingreso al biodigestor de aguas mieles por día es de 2,340.78 L/día. El mismo se puede expresar como: 2.3407 m<sup>3</sup>/día.

### **III.4 Proceso de selección del modelo de biodigestor**

El biodigestor a utilizar debe de ser durable, sólido y practico, simple construcción, baja demanda de material, y de buena calidad.

Principios básicos para la construcción de la estructura del biodigestor

- El piso del digestor es una estructura de concreto, la forma estructural de este dependerá de las propiedades del suelo donde se trabaja y el diámetro seleccionado para el digestor. Se prefiere trabajar una forma ovalada, ya que eso disminuye el uso de hierro en la loza y hay una mejor distribución de la carga.
- Los sistemas de tratamiento llevan sus respectivas cajas de entrada y salida en cada pila o digestor, que pueden comunicarse entre sí bien trabajar en paralelo.

El tamaño de las cajas y los diámetros de tubería dependen del tipo de sustrato. Por ejemplo, si se trabaja con mucílago puro, se trabaja con tubería de 6", en el primer digestor. Si se trabaja con agua residual de despulpado y lavado o efluente de un digestor a otro, se trabaja con tubería de 4-6" (Cantarero y Fachini, 2006).

Los digestores de cúpula fija se ubican principalmente debajo del suelo porque eso contribuye a mantener varios factores controlados:

- La estructura se hace más resistente a movimientos de tierra.
- El domo queda bajo tierra, lo que compensa las fuerzas exteriores, con la presión interna del gas y el volumen de líquido.
- Hay mejor control del proceso, ya que no hay tanta variación en la temperatura (se prefiere trabajar con temperaturas constantes). Hay menor daño al concreto de repello, al no estar expuesta al sol.

### III.4.1 Selección y dimensionamiento del biodigestor

Para la selección del biodigestor se deben tomar en cuenta las condiciones geográficas y geológicas de El Naranjal.

Basándonos en que el centro de procesamiento está ubicado en una zona montañosa que no es de fácil acceso, la cual es considerada una zona rural, se proponen tres modelos de biodigestores loscuales podrían ser adecuados para la zona.

**Digestor de cúpula o campana flotante:** también conocido como digestor tipo hindú, se compone de un digestor construido en mampostería o estructura de concreto y un depósito de gas móvil en forma de campana, la cual puede flotar directamente en la masa de fermentación o en un anillo de agua, dependiendo de la producción de biogás. La campana debe tener una guía que permita el movimiento vertical, cuya altura dependerá del volumen de gas almacenado (Olaya y Gonzales, 2009).

Estos digestores en general son enterrados y verticales, semejando a un pozo. Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación (Moreno, 2011).

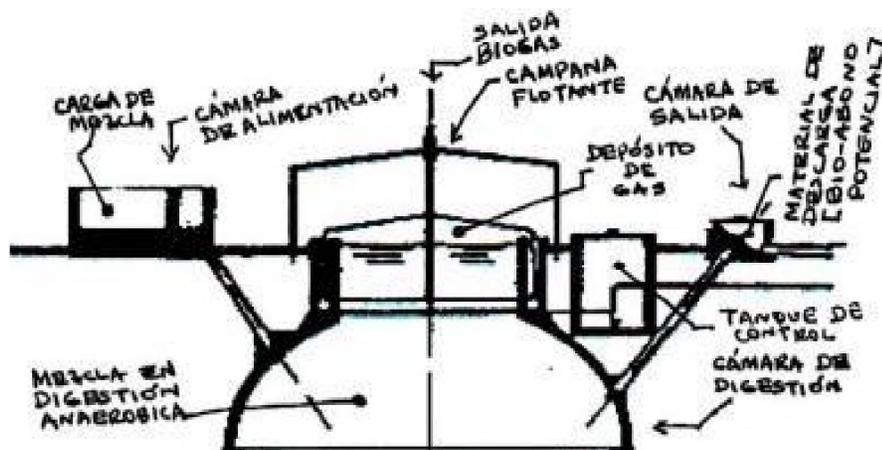
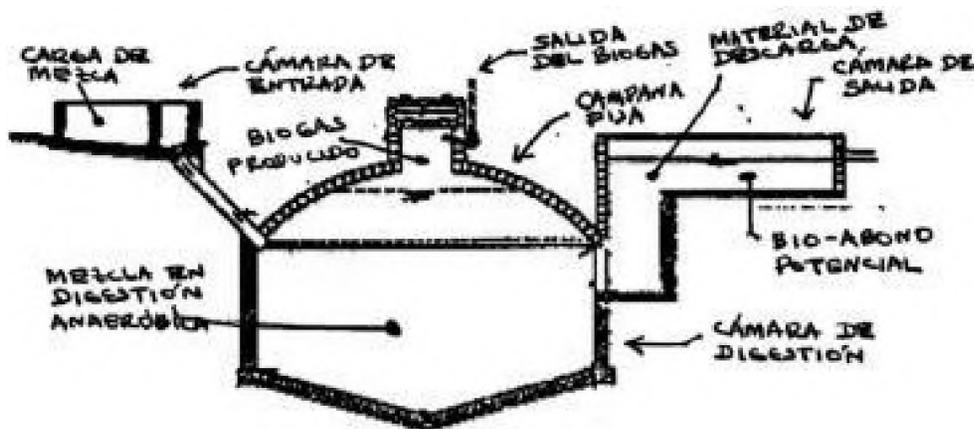


Ilustración 7 Esquema de una planta de campana flotante (tipo hindú)

**Biodigestor de cúpula o campana fija:** también conocido como digestor modelo chino, se compone de un digestor construido en mampostería y un domo fijo e inmóvil cerrado donde se almacena el biogás. Durante la producción de biogás, la masa de fermentación es desplazada hacia el tanque de compensación y cuando se extrae el gas, la masa líquida vuelve hacia el biodigestor (Olaya y Gonzales, 2009).

Al iniciar el proceso, el digestor se llena con residuos agrícolas compostados mezclados con lodos activos de otro digestor, a través de la cubierta superior, que es removible. Una vez cargado así, es alimentado diariamente con los residuos que se encuentren disponibles, provenientes de la letrina y de los animales domésticos, a través del tubo de carga el cual llega a la parte media del digestor (Moreno, 2011).



*Ilustración 8 Esquema de biodigestor capsula fija (tipo chino).*

**Biodigestor tipo balón o modelo tubular:** este tipo de biodigestor se construye en material plástico (polietileno, PVC, plastilina, entre otros, y una combinación de éstos) completamente sellado, la entrada y la salida están sujetas directamente a las paredes de la planta. La parte inferior de la planta, en un 75 % del volumen constituye la masa de fermentación, y en la parte superior, el 25 % restante, se almacena el biogás. Este tipo de planta se recomienda para aquellos sitios donde predominan las temperaturas altas y constantes (Olaya y Gonzales, 2009).

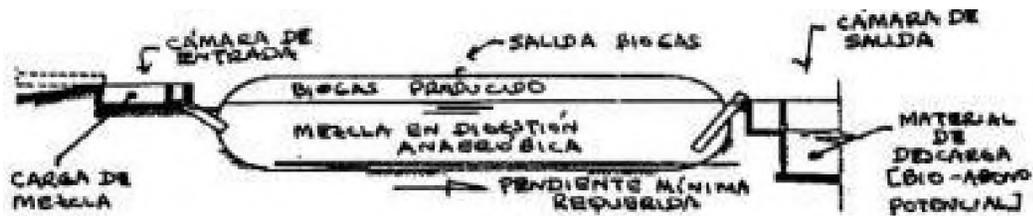


Ilustración 9 Esquema de un biodigestor tubular plástico.

**Ventajas y desventajas de los sistemas antes descritos:**

Tabla 8 Ventajas y desventajas de los diversos biodigestores, modelo hindú, modelo chino, modelo tubular.

Sistemas	Ventajas	Desventajas
Biodigestor modelo hindú	-La mampostería tiene una larga vida útil.	-La campana tiene alto costo de construcción.
	-La presión del gas es constante en el digestor.	-La campana del mismo es regularmente de metal por lo que la misma será susceptible a corrosión.
Biodigestor modelo chino	-Son de larga vida útil oscilando entre 15 y 20 años aproximadamente.	-La presión del gas no es constante, lo que provoca fluctuación en el biodigestor afectando el funcionamiento de este.
	-No poseen partes móviles o metálicas.	
	-Construcción subterránea ayudando a la poca fluctuación de la temperatura.	-Se debe impermeabilizar la cúpula para que no se agriete y provoque pérdida de gas y entrada de oxígeno al sistema.
Biodigestor modelo tubular	-Presenta menores costos de producción que el modelo hindú	-Presenta baja presión de gas y corta vida útil, entre 3 y 8 años dependiendo esto del material de construcción utilizado.
	-Materiales de construcción de fácil transporte e instalación.	-Altamente susceptible a los rayos del sol, por lo que se debe proteger de los mismos.
	-Adecuados para lugares de alto nivel freático debido a su construcción horizontal	

Fuente: (Cantarero y Fachini, 2006).

### III.4.2 Criterios de elección

Tomando en cuenta las condiciones ambientales y geográficas características de la zona donde se encuentra ubicado el centro de procesamiento perteneciente a CEPDCAFEN en El Naranjal, se ha determinado que el biodigestor más conveniente para instalar en esta zona es el digestor decúpula fija o tipo chino. Esto debido a las condiciones geográficas de montaña rocosa, los períodos de lluvia que podrían afectar la accesibilidad al centro y que con otro tipo de digestor podrían dañar la estructura del mismo, además hay que tener en cuenta larga vida útil de este tipo de digestor, que con su diseño subterráneo aporta un mayor control de la temperatura donde se busca que el mismo trabaje en un estado mesofílico.

### III.4.3 Propuesta de parámetros para el diseño del digestor de cúpula fija

Existen medidas estándares para la construcción de los digestores tipo chino en función del volumen de diseño de los digestores de cúpula fija:

Volumen de Digestor (m <sup>3</sup> )	5	10	20	40	50	75	100
Radio del digestor (m)	1.00	1.50	1.75	2.25	2.50	2.75	3.00
Diámetro del digestor (m)	2.00	3.00	3.50	4.50	5.00	5.50	6.00
Radio cúpula (rc)	1.40	1.75	2.20	2.80	3.00	3.45	3.80
Altura pared cilindro (m)	0.85	1.05	1.35	1.70	1.80	2.00	2.30
Altura cúpula (m)	0.55	0.70	0.90	1.15	1.20	1.40	1.50
Prof. del cono (m)	0.35	0.40	0.55	0.65	0.75	0.85	0.90
Altura Total (m)	1.75	2.15	2.80	3.50	3.75	4.25	4.70

*Ilustración 10 Medidas estándares para dimensionamiento de digestor.*

### III.4.4 Elementos del sistema de biodigestión

- Pila de recepción: en esta pila se recibe el agua que sale del proceso de fermentación en el beneficio, aquí se acondiciona el pH a las aguas mieles con alcalinizante (cal, hidróxido de sodio o carbonato de sodio). El tamaño de la pila de recepción se encuentra entre 2 a 6 m<sup>3</sup>.
- Pila de alimentación: aquí se regula el volumen de aguas residuales que va a entrar diariamente al digestor. El tamaño de esta va de 6 a 60 m<sup>3</sup>.
- Biodigestor: aquí se llevará a cabo el proceso de digestión anaerobia y la producción.

### III.4.5 Descripción del sistema

- **Pretratamiento:**

Para las aguas mieles originadas del lavado del café es necesario el pretratamiento del agua para que se regule el pH que llegue con alto grado de acidez. Estas pilas están dimensionadas para captar todo el volumen de agua producido en un día de trabajo en los beneficios húmedos, con más o menos 10 a 40 m<sup>3</sup> (Cantarero y Fachini, 2006).

La liberación de las aguas mieles para los biodigestores son controladas en la salida de la pila por una boya y/o directamente por el operador que regula el registro de salida. El volumen y la velocidad son controlados solamente por el operador del biodigestor (Cantarero y Fachini, 2006).

- **Sistema de tratamiento:**

Los biodigestores son contruidos con fondo ovalado, cilindro circular y cúpula ovalada la parte superior lleva un cuello y está instalada la salida del biogás. El agua que sale del biodigestor pasa por la caja de compensación que funciona como prensa hidráulica manteniendo constante la presión del biogás (Cantarero y Fachini, 2006).

El digestor se debe de construir con un piso de concreto de 0.40 – 1.00 metros en forma ovalada con una estructura de hierro 3/8". El cilindro tendrá un diámetro de 3 a 6 metros y una altura de 1.5 a 2. 5 metros. El domo con la cúpula puede ser de 0.70 a 1.45 metros de altura.

El digestor debe de estar como mínimo 50 centímetros debajo de la caja de alimentación de la pila de alimentación, para que el agua fluya por gravedad (Cantarero y Fachini, 2006).

- **Caja de compensación:** esta recibe el efluente del biodigestor. Su principal función es mantener el proceso de salida del biogás constante. Esta indica el momento exacto de retirada del lodo del biodigestor, porque este se concentra en mayor volumen en la cámara del biodigestor y es arrastrado a la cámara de compensación.
- **Material de soporte:** para los reactores anaerobios en flujo ascendente (que en este caso se estaría utilizando como estructura digestores de cúpula fija) se necesita un material de soporte el cual esté disponible en la zona de producción. Para el caso de Republica Dominicana se propone la utilización de bambú como material de empaque, el cual se debe cortar en segmentos de 15-20 cm y con un diámetro de preferencia de 2 a 3”, colocándose de forma irregular en el digestor (Cantarero y Fachini, 2006).

### III.4.6 Dimensionamiento del biodigestor de cúpula fija

Para el dimensionamiento de este digestor se tomó como referencia el texto “Fundamentos de Diseño de Biodigestores”.

Se debe establecer cuál será el volumen diario de digestión y el tiempo de retención hidráulico de las aguas mieles en el digestor.

Ya hemos establecido el flujo diario de procesamiento de las aguas mieles que serían unos 2,340.78 L/día aproximadamente  $2.3407 \text{ m}^3$  /día. La temperatura promedio anual de la zona es de 26 ° C.

Para dimensionar el digestor es necesario establecer un tiempo de retención hidráulico para la estimación del volumen de diseño del digestor. Este tiempo de retención será calculada estableciendo un tiempo de retención ideal y a partir de la temperatura media se utilizará un gráfico para hacer una corrección del tiempo de retención con el cual se determinará el volumen de diseño ideal.

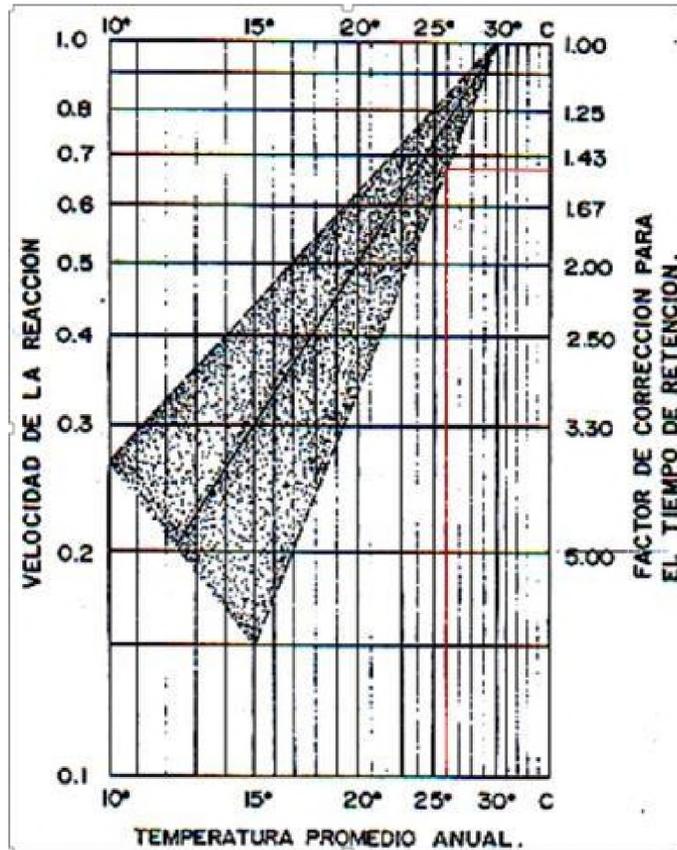


Ilustración 11 Lectura del factor de corrección para el tiempo de retención.

Para el dimensionamiento del digestor establecemos un tiempo de retención ideal de 21 días y del gráfico anterior obtenemos el factor de corrección 1.45 y procedemos a realizar los siguientes cálculos:

Tiempo de retención ideal= 21 días.

Factor de corrección= 1.45

$$Tr = \text{Tiempo de retención ideal} \times \text{Factor de corrección} \quad (11)$$

$$Tr = (21 \text{ días}) \times 1.45 = 30.45 \text{ días el } Tr = 31 \text{ días}$$

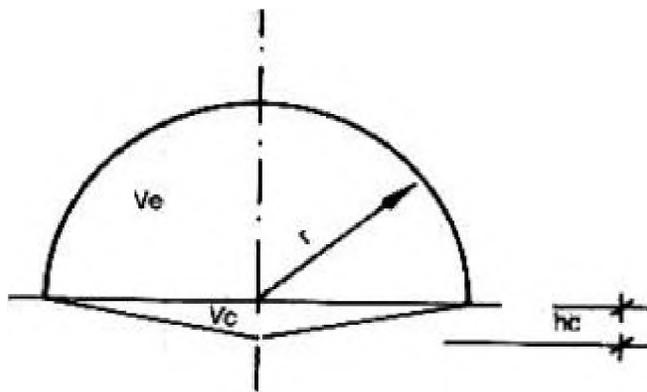
El volumen ideal de diseño será igual a la biomasa diaria por el tiempo de retención

$$Vd = \text{biomasa diaria que entra al digestor} \times Tr \quad (12)$$

$$Vd_{ideal} = (2.3407 \frac{m^3}{dia}) \times (31 dia) = 72.56 m^3$$

Tomando en cuenta este resultado tomaremos un volumen de diseño real de 75 m<sup>3</sup>.

El dimensionamiento del digestor también incluye el dimensionamiento de la campana o gasómetro para dimensionar la misma tomaremos en cuenta los siguientes parámetros:



$V_e$  = volumen de la cúpula.

$V_c$  = volumen de compensación.

$V_g$  = volumen de almacenamiento del gas.

$r$  = radio de la cúpula.

$h_c$  = altura del volumen de compensación.

*Ilustración 12 variables involucradas en el diseño del digestor*

Se ha establecido una relación entre el volumen de la campana y el volumen de compensación de 10 a uno y el volumen total del digestor es de un 4 % mayor que el volumen de diseño, esto tomando en cuenta que el mismo será construido en mampostería o ladrillo y esto agrega una nueva dimensión al mismo debido al recubrimiento interno que debe tener el mismo.

Lo anterior establecido lo podemos formular como sigue:

$$\frac{V_e}{V_c} = \frac{10}{1} \tag{13}$$

$$V_c + V_e = 1.04 Vd \tag{14}$$

Despejando la ecuación (13) obtenemos la ecuación:

$$V_e = 10 V_c \quad (15)$$

Sustituyendo la ecuación (15) en la ecuación (14) tenemos como resultado:

$$V_c + 10 V_c = 1.04 V_d \quad \text{obtenemos } 11V_c = 1.04 V_d$$

$$V_c = \frac{1.04 V_d}{11}$$

Aplicando el valor de volumen de diseño ( $V_d$ )

$$V_c = \frac{1.04 (75 \text{ m}^3)}{11} = 7.091 \text{ m}^3$$

Con el resultado del volumen de compensación obtenemos el volumen de la cúpula

$$V_e = 10 (7.091 \text{ m}^3) = 70.91 \text{ m}^3$$

Para determinar el radio de la cúpula podemos auxiliarnos de la ecuación de la semiesfera ya que esta es la forma geométrica de la misma. Entonces partiendo de esto tenemos que:

$$\text{Volumen de la semiesfera} = \frac{2}{3} \pi r^3 \quad (16)$$

Así podemos plantear que:

$$V_e = \frac{2}{3} \pi r^3 \quad \text{despejando tenemos } r^3 = \frac{3}{2\pi} \times V_e$$

Al despejar esta ecuación obtengo:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{2\pi}} \times V_e \tag{17}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{2\pi}} \times (70.91 \text{ m}^3) = 3.24 \text{ m}$$

Para determinar la altura del volumen de compensación tenemos nos auxiliamos de la ilustración 12 donde se forma un cono con el volumen de compensación, entonces auxiliándonos de la ecuación del volumen de un cono:

$$V_c = \frac{1}{3} \pi r^2 h_c \text{ despejando } h_c = \frac{3V_c}{\pi r^2} \tag{18}$$

$$h_c = \frac{3 \times (7.091)}{\pi \times (6.94)} = 0.6470 \text{ m}$$

Para obtener el volumen de almacenamiento del digestor lo haremos de la siguiente manera:

- h: altura del volumen de almacenamiento.
- hr: es un espacio que debe estar entre 0.20 m - 0.25 m.

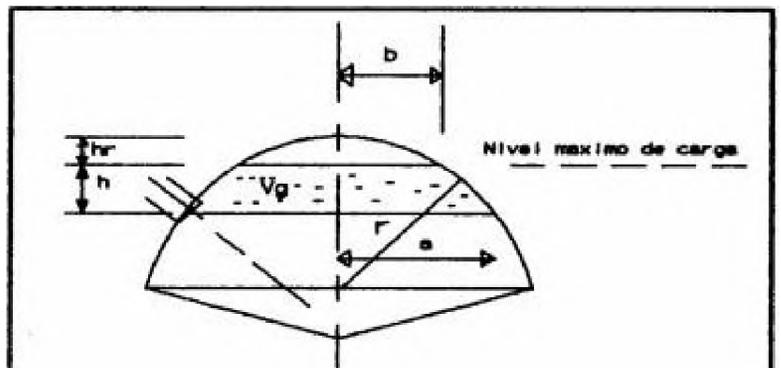


Ilustración 13 Dimensiones necesarias para los parámetros de diseño del digestor.

Para calcular el volumen de almacenamiento de biogás ( $V_g$ ) nos auxiliaremos de las ecuaciones:

$$V_g = \frac{\pi x h}{6} x (3a^2 + 3b^2 + h^2) \quad (19)$$

Donde:

$$a = \frac{4r}{2} \quad (20)$$

$$b = \frac{r}{2} \quad (21)$$

$$h = \frac{2r}{5} - hr \quad (22)$$

Tomando en cuenta estas ecuaciones determinaremos el volumen que estará destinado a ocupar el gas en el digestor:

Sustituyendo en la ecuación (20) tenemos:

$$a = \frac{4(3.24)}{2} = 2.59 \text{ m}$$

Sustituyendo en la ecuación (21) tenemos:

$$b = \frac{3.24}{2} = 1.62 \text{ m}$$

Sustituyendo en la ecuación (22) tenemos:

$$h = \frac{2(3.24)}{2} - 0.25 = 1.044 \text{ m}$$

Con estos datos sustituimos en la ecuación (19) para obtener:

$$Vg = \frac{\pi (1.044)}{6} [3(2.59)^2 + 3(1.62)^2 + (1.044)^2] = 15.87 \text{ m}^3$$

### III.5 Etapa de arranque del digestor

1. Se recomienda la utilización de bambú como material de empaque en el biodigestor para que sirva como soporte a la biomasa.
2. Se debe realizar una prueba de sellado en el digestor, se llenará con agua para verificar que la mampostería no tenga grietas y que no haya filtraciones en el digestor.
3. Se retira el agua del biodigestor dejando solo 1/3 de la altura del mismo. Esta agua contribuye a diluir la materia orgánica a utilizar con la que se cargara el digestor en la fase inicial.
4. Preparación de la carga inicial o primera carga: en esta etapa se procede a llenar por completo el digestor por la parte superior del mismo la cual es removible y sin llenarla parte destinada para almacenar el biogás.
5. En recipientes limpios de cualquier producto químico o combustible, se prepara una mezcla, en partes iguales de residuos animales y/o humanos con residuos vegetales, como pajas, tallos, previamente trozados. Es necesario incorporar esta carga de materias orgánicas diluida con agua. La proporción final de sólidos totales debe estar cercana al 10 %. Antes de colocar la tapa selladora del digestor, se debe remover la costra (material fluctuante) que suele formarse en la superficie.

6. Dejar abierta conexión a salida de gas, durante 5 a 7 días, con el objeto de eliminar todo el oxígeno que pueda existir como producto de las primeras fases del proceso de descomposición de las materias orgánicas. Posteriormente cerrar y dejar que se eleve la presión interna y soltar el gas. Repetir esta operación hasta completar 10 – 15 días, con lo cual se elimina todo el oxígeno remanente, junto con el anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) que se genera en las primeras fases del proceso de fermentación, previas a la etapa de formación de metano ( $\text{CH}_4$ ).
7. Pruebas de inicio de producción de biogás: transcurridos 15 días de la carga inicial o de arranque, se debe comenzar a verificar el inicio de producción de biogás ( $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  en proporción similar), mediante la verificación de “quema de biogás”. Se acopla una manguera a la salida de gas y utilizando un quemador o mechero, se prueba si el gas se enciende. Si el gas quema con una llama azulada y de buena consistencia, se puede iniciar el uso normal del biogás.
8. En caso contrario, si no enciende o quema mal, se debe eliminar todo el gas y repetir la prueba cada vez que se alcance una presión interna adecuada. Si después de 30 días o 45 días, de acuerdo a la temperatura interna del digestor de completada la carga de arranque, el gas que se genera, no se quema, podría existir algún problema en la fermentación. Se debe verificar que no exista una acidificación excesiva de la carga (inferior a pH 6) o variaciones bruscas de la temperatura interna del digestor, materiales contaminados con productos químicos que pudieran alterar la actividad microbiana (Moreno, 2011).

### **III.5.1 Etapa de operación**

Luego del arranque del digestor se debe introducir una carga diaria de aguas mieles y deberá salir del biodigestor una carga igual a la introducida. El volumen total de esta mezcla está en función del volumen total del digestor y del tiempo de retención hidráulico. Se debe esperar la hora de mayor temperatura en el día para hacer la carga en el digestor. Este proceso deberá ser efectuado por el operador del biodigestor.

### III.5.2 Mantenimiento del equipo

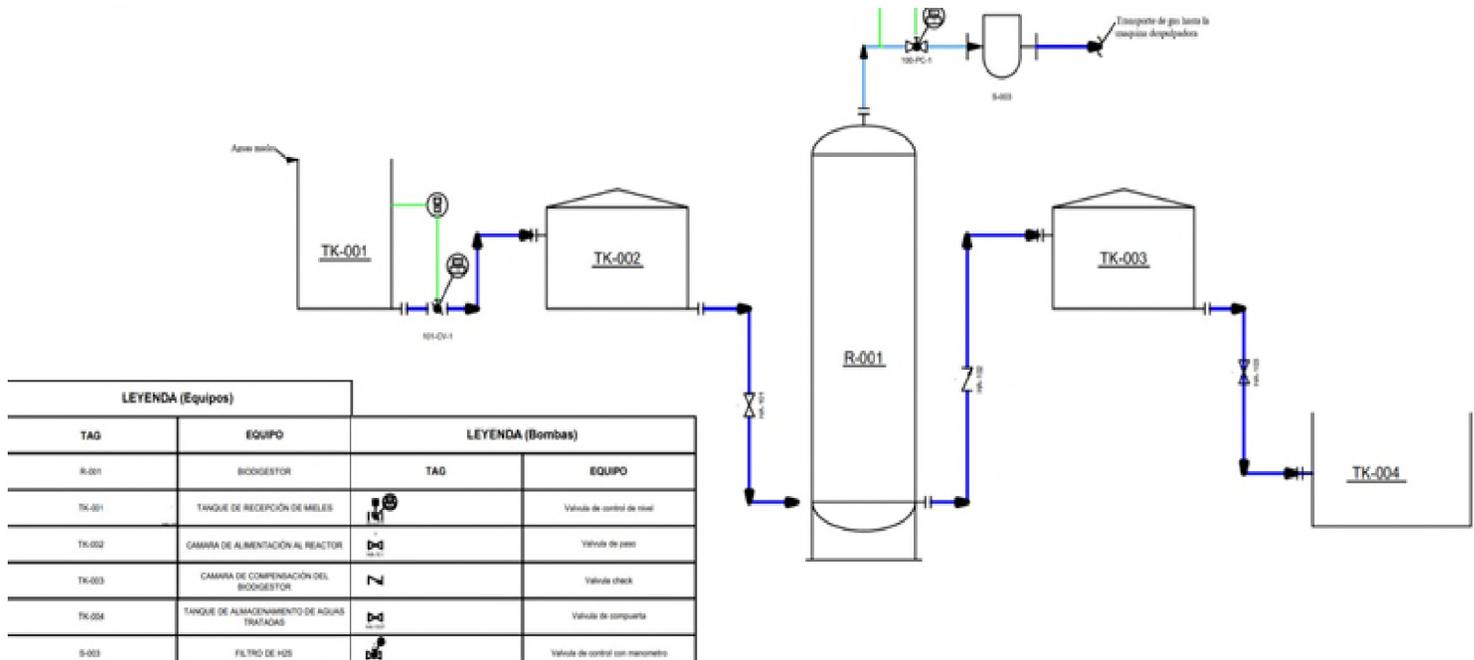
Periódicamente se debe inspeccionar y verificar si existen filtraciones de agua o aire en los digestores de biogás, para proceder a su reparación. En los digestores de carga continua, por lo menos una vez al año, se debe vaciar completamente el digestor, retirando el lodo del fondo.

Esto permite realizar lo siguiente:

1. Tratamiento de roturas.
2. Cuando no se encuentran filtraciones, se debe lavar la cámara de fermentación y aplicar dos o tres capas de enlucido con una pasta pura de cemento.
3. Si el agua freática penetra al biodigestor, es preciso aplicar una pasta salada con agua; setapa el hoyo y se aprieta aplicando cemento con una cubierta de cenizas durante 20 minutos y entonces se remueve la cubierta. El cemento del enlucido con material salado se vuelve a aplicar, se vuelve a apretar con la envoltura y se repite este proceso tres veces.
4. Si se produce una combinación de filtraciones en caños (tubos de entrada y salida) y cúpula, se cincela alrededor de la filtración y se saca el caño; entonces se vuelve a colocarse cemento u hormigón de gravilla, haciendo fraguar localmente para que se fije el caño.
5. Si el fondo se hunde o la pared se separa, se agrandará la resquebrajadura y se profundizará al máximo, rellenándose con una mezcla de hormigón con grava fina.
6. Se debe revisar frecuentemente las juntas de la manguera para asegurar que no se filtren el agua ni el aire.
7. Si el depósito de descarga permanece sin uso por un período largo, se debe exponer al ambiente para evitar su corrosión interna (Moreno, 2011).

### III.6 Diagrama de proceso

Ilustración 14 Diagrama de flujo de proceso



Fuente: Elaboración propia

Tabla 9 listado de equipos utilizados

LEYENDA (Equipos)	
TAG	EQUIPO
R-001	BIODIGESTOR
TK-001	TANQUE DE RECEPCIÓN DE MIELES
TK-002	CAMARA DE ALIMENTACIÓN AL REACTOR
TK-003	CAMARA DE COMPENSACIÓN DEL BIODIGESTOR
TK-004	TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUAS TRATADAS
S-003	FILTRO DE H <sub>2</sub> S

Tabla 10 listado de válvulas utilizadas

LEYENDA (Bombas)	
TAG	EQUIPO
	Valvula de control de nivel
	Valvula de paso
	Valvula check
	Valvula de compuerta
	Valvula de control con manometro

## CAPÍTULO IV

### IV.1 Análisis de costos.

Los siguientes valores que se visualizan en este análisis están sujetos a variación debido a que están sujetos a valores actuales de materiales y mano de obra. Los mismos representan los costos de construcción del sistema de tratamiento.

*Tabla 11 Presupuesto para la construcción del sistema de tratamiento de las aguas mieles*

<b>Presupuesto para la construcción del sistema de tratamiento aguas mieles, beneficio húmedo del café</b>	
Construcción de biodigestor	204,119.46
Construcción tanque de recepción	69,251.43
Cámara de alimentación	25,600.00
Cámara de compensación	25,600.00
Tanque almacenamiento agua tratada	65,400.00
Mano de obra	300,000.00
Asesoría	170,000.00
Transporte de materiales	50,000.00
Costo total	909,970.89

*Fuente: Costos realizados en base a precios vistos en el mercado de empresas que se dedican a la fabricación de tanques.*

En la tabla siguiente se estará presentando un aproximado de los costos fijos de operación y mantenimiento del sistema, estos están sujetos a los cambios que se puedan presentar a través del tiempo, por tanto, estas pueden no ser constantes ya que son solo una proyección, tomando en cuenta la vida útil del digestor que está estimada en unos 20 años.

Tabla 12 Costos de operación y mantenimiento

Costos de operación y mantenimiento		
Actividad	Costos mensuales	Costos anuales
Preparación y arranque	-	5,000.00
Mantenimiento preventivo	-	20,000.00
Operación	2,000.00	8,000.00
Operador	5,000.00	20,000.00
Total	7,000.00	53,000.00

## IV.2 Aplicaciones del biogás.

Entre los principales usos que se le pueden dar al biogás obtenido mediante el proceso de digestión anaerobia se encuentran: la producción de calor o vapor, generación de electricidad y como combustible.

- **Producción calor o vapor:** El uso más simple del biogás es para la obtención de energía térmica (calor). En aquellos lugares donde los combustibles son escasos, los sistemas pequeños de biogás pueden proporcionar la energía calórica para actividades básicas como cocinar y calentar agua. Los sistemas de pequeña escala también se pueden utilizar para iluminación. Los quemadores de gas convencionales se pueden adaptar fácilmente para operar con biogás, simplemente cambiando la relación aire-gas. (Moreno, 2011).
- **Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad:** Los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible y el calor residual que se genera. Algunos sistemas combinados producen principalmente calor y la electricidad es secundaria (Moreno, 2011).

- **Combustibles para vehículos:** El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como diésel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, por otro lado, una desventaja es su baja velocidad de encendido (Moreno, 2011).

*Tabla 13 componentes del biogás*

Componentes	Porcentaje
Metano	55 a 70 %
Dióxido de carbono	30 a 40 %
Anhidro sulfúrico	Menos del 1 %
Hidrogeno	1 a 3 %
Otros gases	1 a 3 %

#### **IV.2.1 Construcción de biodigestor casero**

Para poder determinar si es factible producir biogás a partir de aguas mieles de café nos dimos a la tarea de construir un biodigestor manual y determinar si el biogás generado es suficiente para ser utilizado en la maquina despulpadora.



*Ilustración 8 biodigestor casero 1*

**Partes del biodigestor:**

**1:** Almacenamiento de las aguas mieles de café aproximadamente  $\frac{3}{4}$  y el otro espacio vacío para el biogás.

**2:** Trampa de agua, permite que el biogás generado pase limpio sin humedad.

**3:** Tubo de goma, donde se almacena el biogás.

**4:** Salida de biogás para prueba.

Esta imagen que presentamos se realizó antes de la recolección de las aguas mieles de café, a continuación, la imagen después de la recolección.



*Ilustración 9 biodigestor después de la recolección de aguas mieles de café*

Como se puede observar el tubo de goma se llenó del biogás generado, para asegurarnos que el biogás fuera suficiente para la quema lo dejamos aproximadamente por 14 días.

Luego de esto procedimos a realizarle la prueba de gas, a continuación, la imagen:



*Ilustración 10 generación de biogás*

El poder calorífico del biogás en estado bruto oscila entre los 5000 y 5500 Kcal/m<sup>3</sup> esto debido a la variación de concentración de metano. Debido a su poder calorífico el biogás puede ser utilizado como combustible en artefacto de gas y en motores de combustión interna. El valor calórico del biogás depurado de CO<sub>2</sub> equivale a más o menos 8700 Kcal/m<sup>3</sup> acercándose este valor al poder calorífico del metano.

*Tabla 14 Equivalencia del biogás con otras fuentes de energía*

Combustibles	Estado bruto 1m <sup>3</sup> de biogás (5,500 kcal/ m <sup>3</sup> )	Biogás depurado (8500 kcal/ m <sup>3</sup> )
Nafta	0.730 litros	1.100 litros
Alcohol	1.100 litros	1.700 litros
Gasoil	0.650 litros	1.000 litros
Gas natural	0.620 litros	0.950 litros
Carbón mineral	0.820 kilos	1.250 kilos
Carbón vegetal	1,240 kilos	1.900 kilos

*Tabla 16 Ahorro total obtenido en combustible reutilizando el gas obtenido en la digestión anaerobia*

<b>Cantidad de café cultivado</b>				
<b>Semanal</b>	<b>Unidad</b>	<b>Numero de semanas</b>	<b>Cantidad promedio anual</b>	<b>Unidad</b>
140	qq	19	2,660	qq
<b>Cantidad de Combustible necesario para despulpar</b>				
<b>Cantidad (galones por cada 20 qq)</b>	<b>Cantidad anual en galones</b>	<b>Precio Gasolina (por galón)</b>	<b>Costo total anual</b>	
1	133	274.50	36,508.50	

**TERCERA PARTE**

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **CONCLUSIONES**

Luego de haber desarrollado el presente trabajo podemos dar respuestas a las hipótesis planteadas al principio del proyecto como sigue:

- Fue posible dimensionar un proceso de tratamiento anaerobio que podría ayudar a descontaminar aguas mieles provenientes del proceso de beneficio húmedo de café obteniendo como resultado biogás que al ser utilizado en la máquina despulpadora genera un ahorro de 36,508.50.
- En términos económicos la construcción del digester anaerobio tendría un costo aproximado de 909,970.89 y un costo de operación y mantenimiento de 159,000.00.
- La puesta en marcha del digester anaerobio en el centro de procesamiento ubicado en el Naranjal, impacta de manera positiva las comunidades aledañas debido a que las aguas mieles del café son una gran fuente de contaminación, el digester cumpliría con la misión de mitigar los daños que estas causan, teniendo como resultado no infringir en las normas ambientales y una mejora en el entorno en la que se desarrolla el proceso, eliminando aproximadamente el 80 % de la DQO que anteriormente generaba el proceso.
- Se pudo obtener biogás a partir de las aguas mieles generadas en el proceso de beneficio húmedo del café según las investigaciones planteadas en este proyecto, gracias a la implementación del digester anaerobio que aprovecha los residuos orgánicos, mejorando las condiciones sanitarias y de este modo promoviendo el desarrollo sostenible del cual el producto resultante es el biogás.

## **RECOMENDACIONES**

Luego de haber desarrollado el presente proyecto se han establecido las recomendaciones siguientes:

- Apoyándonos en la revisión bibliográfica realizada para el desarrollo de esta tesis se recomienda utilizar la parte líquida que se genera a la salida del biodigestor denominada biol, como abono líquido en la fertilización de los campos de café.
- Controlar los parámetros del efluente de salida del biodigestor con el fin de asegurar que el equipo esté funcionando de manera óptima y que los límites de descarga cumplan con la norma.

**CUARTA PARTE**  
**REFERENCIAS Y ANEXOS**

## Referencias bibliográficas

- BRIDGEWATER, A. (2009). *Energías alternativas. Handbook*. Ediciones Paraninfo, SA.
- ACARLEY GARCÍA, F. E. (2018). *Evaluación de la producción de metano a partir de las aguas mieles del beneficio húmedo del café mediante digestión anaerobia*. Obtenido de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3629/acarley-garcia-fullen-espiritu.pdf?sequence=1>
- Becerril Rivera, G. (2022). *Generación de biogás a partir de residuos del beneficio húmedo del café*. Obtenido de [https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/5236/Geiner\\_Tesis\\_Licenciatura\\_2021.pdf?sequence=1](https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/5236/Geiner_Tesis_Licenciatura_2021.pdf?sequence=1)
- del Real Olvera, J. &. (2010). Biodegradación anaerobia de las aguas generadas en el despulpado del café. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 12(2), 230-239.
- García Cabrera, J. M., & Córdova Mosquera, R. A. (2021). *PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LAS AGUAS RESIDUALES DE CAFÉ INSTANTÁNEO*. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*. ISSN 2602-8166, 5(3), 9-20. Obtenido de <file:///C:/Users/jose/Downloads/348-Texto%20del%20art%C3%ADculo-1764-1-10-20210919-2.pdf>
- Gotteland, M. &. (2007). Algunas verdades sobre el café. *Revista chilena de nutrición*, 34(2), 105-115.
- Herrero, J. (2008). *Biodigestores de bajo costo para producir biogás y fertilizante natural a partir de residuos orgánicos*. *IDEASS*, 2-4. Obtenido de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fcotec.unam.mx%2Fwp-content%2Fuploads%2FBiodigestores-de-bajo-costo.pdf&clen=906239&chunk=true>
- Olano Requelme, E. (2018). *Repositorio Institucional*. Obtenido de <https://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14077/1637/Olano%20Requelme%20Edil.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Paredes, C. A. (2018). Obtenido de <file:///C:/Users/jose/Downloads/348-Texto%20del%20art%C3%ADculo-1764-1-10-20210919-2.pdf>
- Romero, J. M., & Camilo, J. (2019). *Manual de producción sostenible de café en la República Dominicana*. Santo Domingo: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Salazar, K. A. (2016). Tiempos en la recolección manual tradicional de café. *ingeniería industrial*, 114-126.
- Torres Valenzuela, S. L. (2019). *Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café*. *Revista Ion*, 32(2), 59-66. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v32n2-2019006>
- Orozco, M., Chacon, C., Antonio, D., Monteros, J. (2018). Buenas prácticas de beneficiado húmedo del café fundamentales para mantener la calidad. *Boletín técnico-cedicafe*, 1-12. [Chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.anacafe.org](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.anacafe.org)

- Herrero, J. (2008). Biodigestores de bajo costo para producir biogás y fertilizante natural a partir de residuos orgánicos. *IDEASS*, 2-4. [chrome extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fcotec.unam.mx%2Fwp-content%2Fuploads%2FBiodigestores-de-bajo-costo.pdf&clen=906239&chunk=true](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fcotec.unam.mx%2Fwp-content%2Fuploads%2FBiodigestores-de-bajo-costo.pdf&clen=906239&chunk=true)
- Ley 6400 de 2000. Ley general sobre medio ambiente y recursos naturales. 18 de agosto de 2000.
- López, A. (2010). Arte rupestre en el Parque Nacional Aniana Vargas. *Rupestreweb*. <http://www.rupestreweb.info/aniana.html>
- Lorenzo, Y. y Obaya, C. (2005). La digestión Anaerobia. Aspectos Teóricos. *ICIDCA*, XXXIX (1), 35-48. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>
- Ministerio de medio ambiente y recursos naturales [MMARENA]. Art. 1. septiembre de 2012 (Republica Dominicana).
- Moreno, V. (2011). *Manual del biogás*. Ministerio de Energía; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Moronta, H., Espaillat, A., Escarramán, A. y Lagunes, S. (2017). Caracterización química de subproductos obtenidos del beneficiado del café. *Revista APF*, 6(1), 11-14. [chrome extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Fwww.sodiaf.org.do%2Frevista%2Fsodiaf%2Fvol6\\_n1\\_2017%2Farticulo%2F03%2520articulo.pdf&clen=407950&chunk=true](http://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Fwww.sodiaf.org.do%2Frevista%2Fsodiaf%2Fvol6_n1_2017%2Farticulo%2F03%2520articulo.pdf&clen=407950&chunk=true)
- Olaya, Y. y Gonzales, L. (2009). [Fundamentos para el diseño de biodigestores, Universidad Nacional de Colombia]. <https://studylib.es/doc/8059442/fundamentos-para-el-dise%C3%B1o-de-biodigestores>

- Posso, F. (2000). Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. parte dos basado en energías alternativas. *Geoenseñanza*, 54-73.  
[https://www.researchgate.net/publication/242599438\\_ENERGIA\\_Y\\_AMBIENTE\\_PASADO\\_PRESENTE\\_Y\\_FUTURO\\_Parte\\_Uno\\_Sistema\\_Energetico\\_Basado\\_en\\_Fuentes\\_Fosiles](https://www.researchgate.net/publication/242599438_ENERGIA_Y_AMBIENTE_PASADO_PRESENTE_Y_FUTURO_Parte_Uno_Sistema_Energetico_Basado_en_Fuentes_Fosiles)
- Secretaria de estado de medio ambiente y recursos naturales. (2004). Norma ambiental sobre calidad de aguas subterráneas y descargas al subsuelo.
- Secretaria de Medioambiente y Recursos Naturales, secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, pesca y alimentación y El Fideicomiso de Riesgo Compartido. (2010). *Especificaciones técnicas para el diseño y construcción de biodigestores en México*. Chrome extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fbi
- Selvamurugan, M., Doraisamy, p. y Maheswari, M. (2010). An integrated treatment system for coffee processing wastewater using anaerobic and aerobic process. *Ecological Engineering*, 36(12), 1686-1690.  
[https://www.cabdirect.org/cabdirect/welcome/?target=%2fcabdirect%2fabstract%2f2010\\_3333237](https://www.cabdirect.org/cabdirect/welcome/?target=%2fcabdirect%2fabstract%2f2010_3333237)
- Torres Valenzuela, Sofia, L., Sanín Villarrea, A., Arango Ramírez, A., Jiménez, S., y Andrea, J. (2019). Caracterización físicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café. *Revista Ion*, 32(2), 59-66.  
<http://dx.doi.org/10.18273/revion.v32n2-2019006>
- Vivanco, E., Yaya, R. y Chamy, R. (s.f.). Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales. *Triton*. chrome extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Ftriton-cyted.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F04%2FTratamiento-anaerobio-de-aguas-residuales.pdf&chunk=true
- Zambrano, D., Isaza, J. Rodríguez, N. y Lopez, U. (1999). Tratamiento de aguas residuales del lavado del café. *Cenicafe*, 1(20).

Caicedo, F. (2006). [DISEÑO, Construcción y arranque de un reactor U.A.S.B. piloto para el tratamiento de lixiviados]. <https://studylib.es/doc/7917155/dise%C3%B1o--construcci%C3%B3n-y-arranque-de-un-reactor-uasb-piloto>

Cantarero, V. y Fachini, V. (agosto 2006). *Manual de construcción de biodigestor de cúpula fija para el sistema de tratamiento de aguas residuales del beneficiado del café*. [Construcción de biodigestores]. Congreso Internacional para el proyecto Procaryn.

Corona, I. 2007. Biodigestores. [Trabajo de fin de grado]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Ecocontenedores (s.f.). Biodigestores. <https://www.ecocontenedores.cl/biodigestores/>  
Federación Nacional de Cafeteros en Colombia, Utilización del mucilago del café en la alimentación de cerdos. (febrero 1998).  
<http://www.ciap.org.ar/Sitio/Archivos/Utilizacion%20del%20mucilago%20de%20cafe%20en%20la%20alimentacion%20de%20cerdos.pdf>

Flotats, X. y Campos, E. (2012). Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje. En Diaz Santos (Ed.), Madrid: (618-684) *Energía, medioambiente, tratamiento de residuos. Diaz de Santos*.  
[https://www.researchgate.net/publication/304771327\\_Procesos\\_biologicos\\_La\\_digestion\\_anaerobia\\_y\\_el\\_compostaje](https://www.researchgate.net/publication/304771327_Procesos_biologicos_La_digestion_anaerobia_y_el_compostaje)

Herrero, J. (2008). Biodigestores de bajo costo para producir biogás y fertilizante natural a partir de residuos orgánicos. *IDEASS*, 2-4. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fcotec.unam.mx%2Fwp-content%2Fuploads%2FBiodigestores-de-bajo-costo.pdf&cliclen=906239&chunk=true>

Ley 6400 de 2000. Ley general sobre medio ambiente y recursos naturales. 18 de agosto de 2000.

- López, A. (2010). Arte rupestre en el Parque Nacional Aniana Vargas. *Rupestreweb*.  
<http://www.rupestreweb.info/aniana.html>
- Lorenzo, Y. y Obaya, C. (2005). La digestión Anaerobia. Aspectos Teóricos. *ICIDCA*, XXXIX (1), 35-48. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>
- Ministerio de medio ambiente y recursos naturales [MMARENA]. Art. 1. septiembre de 2012 (Republica Dominicana).
- Moreno, V. (2011). *Manual del biogás*. Ministerio de Energía; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Olaya, Y. y Gonzales, L. (2009). [Fundamentos para el diseño de biodigestores, Universidad Nacional de Colombia]. <https://studylib.es/doc/8059442/fundamentos-para-el-dise%C3%B1o-de-biodigestores>
- Orozco, M., Chacon, C., Antonio, D., Monteros, J. (2018). Buenas prácticas de beneficiado humedo del cafe fundamentales para mantener la calidad. *Boletín técnico-cedicafe*, 1-12. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.anacafe.org%2Fuploads%2Ffile%2F1296dfe8b18b492583788afbf8420d9%2FBoletin-Tecnico-CEDICAFE-201810.pdf%23%3A~%3Atext%3DLuego%2520del%2520utilizar%2520el%2520desmucilaginator%2Ccalidad%2520de%2520la%2520partida%2520siguiente&clen=1869278&chunk=true>
- Posso, F. (2000). Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. parte dos basado en energías alternativas. *Geoenseñanza*, 54-73.
- Programa Ambiental regional para Centroamérica. (s.f.). *Manual de buenas prácticas operativas de producción más limpia en el sector de beneficiado de café*. <https://manualzz.com/doc/5320212/manual-de-buenas-pr%C3%A1cticas-operativas-de-producci%C3%B3n>
- Secretaria de estado de medio ambiente y recursos naturales. (2004). Norma ambiental sobre calidad de aguas subterráneas y descargas al subsuelo.

- Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales, secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, pesca y alimentación y El Fideicomiso de Riesgo Compartido. (2010). *Especificaciones técnicas para el diseño y construcción de biodigestores en México*.  
 chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcgclcfndmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fbiblioteca.semarnat.gob.mx%2Fjanium%2FDocumentos%2FCiga%2Flibros2009%2FCD001057.pdf&cLen=1606627&chunk=true
- Selvamurugan, M., Doraisamy, p. y Maheswari, M. (2010). An integrated treatment system for coffee processing wastewater using anaerobic and aerobic process. *Ecological Engineering*, 36(12), 1686-1690.  
<https://www.cabdirect.org/cabdirect/welcome/?target=%2fcabdirect%2fabstract%2f20103333237>
- Torres Valenzuela, Sofia, L., SanínVillarrea, A., Arango Ramírez, A., Jiménez, S., y Andrea, J. (2019). Caracterización físicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café. *Revista Ion*, 32(2), 59-66.  
<http://dx.doi.org/10.18273/revion.v32n2-2019006>
- Vivanco, E., Yaya, R. y Chamy, R. (s.f.). Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales. *Triton*.  
 Chrome extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclcfndmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Ftriton-cyted.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F04%2FTratamiento-anaerobio- de-aguas-residuales.pdf&chunk=true
- Zambrano, D., Isaza, J. Rodriguez, N. y Lopez, U. (1999). Tratamiento de aguas residuales del lavado del café. *Cenicafe*, 1(20).  
 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclcfndmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.cenicafe.org%2Fes%2Fpublications%2Fbot020.pdf&cLen=3625165&chunk=true

## Anexos

### Resultados IBI

<b>INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN BIOTECNOLOGÍA E INDUSTRIA</b>		Solicitud No.40588	
Calle Olof Palme Esq. Núñez de Cáceres, Tels. 809-566-9121/29, Apartado Postal No. 329-2, Santo Domingo, D.N. - RNC:430-00016-7		2023	03
		Año	Mes
<b>INFORME DE RESULTADOS DEL LABORATORIO DE ENSAYOS FISICOS</b>		29	Día
<b>Datos del Solicitante</b>			
Nombre del Cliente o Empresa: LISBETH MARIEL POLANCO GONZALEZ		Tel: (809) 858-9676	
Nombre del contacto: LISBETH MARIEL POLANCO GONZALEZ			
Dirección: MANZANA 4707 EDIFICIO 1 APARTAMENTO 2D, INVIVIENDA SANTO DOMINGO			
<b>Datos del Servicio</b>			
Fecha de recibo: 2023-03-29	Fecha de inicio: 2023-03-29	Fecha de entrega: 2023-03-29	
Tipo de muestra: AGUA		Muestra(s) No.: 40588-1/1	
Condiciones de la(s) muestra(s): JARRON DE PLASTICO			
Muestra aportada por: El cliente		Tipo de muestreo: N/A	
<b>Resultado(s):</b> En la(s) muestra(s) analizada(s)			
<b>DETERMINACION</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>Muestra Identificada Como:</b>	
		AGUA MIELES 1/1	
Densidad (Temp 20 °C)	UNE EN 1131	1,05 g/mL	
DETERMINACIONES POR DUPLICADO <b>"DEBAJO DE ESTA LINEA NO HAY MAS RESULTADOS DE ESTE ENSAYO"</b>			

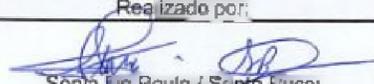
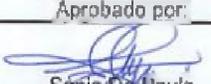
<b>Los resultados que se indican en este informe se refieren exclusivamente a la muestra analizada.</b>		
Metodología(s) o Referencias: ASTM		
Material(es) de Referencia(s): N/A		
Equipo(s) utilizado(s): viscolead pro (EQ-FIS-006878)		
<b>Firmas:</b>		
Realizado por:	Aprobado por:	Verificado por:
 Santo M. P. Santo Mateo		
Analista	Encargada del Laboratorio	Supervisor Técnico
<b>NOTA: Este informe no debe Ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la previa autorización del IBI</b>		
Ejemplar No.1: Cliente	Ejemplar No. 2: Servicio al Cliente	Ejemplar No.3: Supervisión Técnica
<b>DEBAJO DE ESTA LINEA NO HAY MAS DATOS DE ESTE INFORME</b>		

A nuestros clientes:

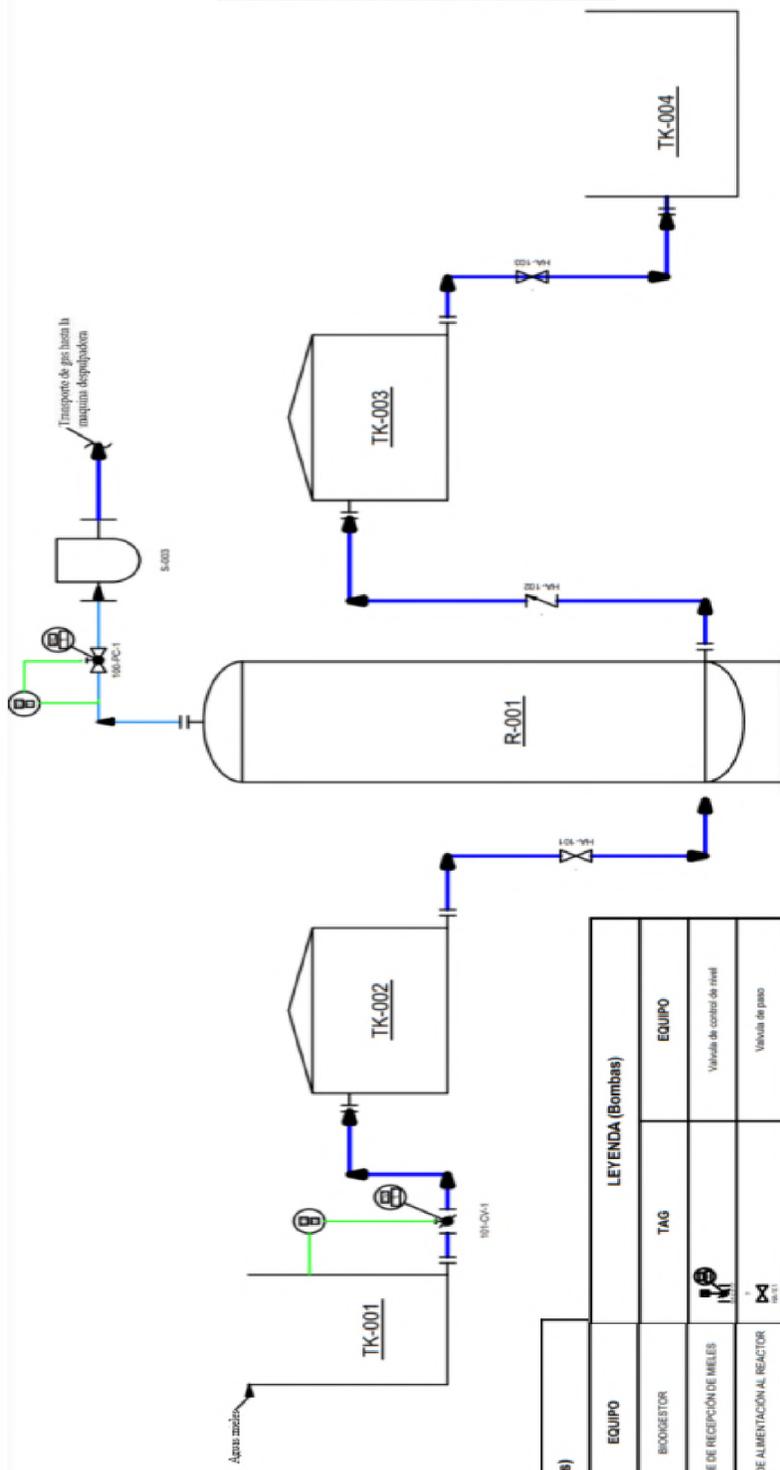
- 1) Las cifras de mil se separarán con un espacio Ej. 10,000 o 1,428 se expresarán como 10 000 o 1 428 respectivamente.
- 2) El marcador decimal es sustituido por una coma Ej. 0.25 y 28.30 se expresarán 0,25 y 28,30 respectivamente.

Este cambio es atendiendo a los procedimientos del Ente de Acreditación.

<b>INSTITUTO DE INNOVACIÓN EN BIOTECNOLOGÍA E INDUSTRIA</b> Calle Olof Palma Esq. Núñez de Cáceres, Tels. 809-566-812/129, Apartado Postal No. 329-2, Santo Domingo, D.N. -RNC:430-60016-7		Solicitud No. 40588		
		2023	04	04
<b>INFORME DE RESULTADOS DEL LABORATORIO DE AGUAS</b>		Año	Mes	Día
<b>Datos del Solicitante</b>				
Nombre del cliente o empresa: <b>LISBETH MARIEL POLANCO GONZALEZ</b>			Tel.: 809-858-9676	
Nombre del contacto: <b>LISBETH MARIEL POLANCO GONZALEZ</b>				
Dirección: <b>MANZANA 4707 EDIFICIO 1 APARTAMENTO 2D, INVIVIENDA</b>				
<b>Datos del Servicio</b>				
Fecha de recibo: 2023/03/24	Fecha de inicio: 2023/03/24	Fecha de entrega: 2023/04/04		
Tipo de muestra(s): <b>Agua</b>		Muestra(s) No.: 40588-1/1		
Condiciones de la(s) muestra(s): En frasco plástico y refrigerada.				
Muestra(s) aportada por: <b>Cliente</b>			Tipo de muestreo: <b>N/A</b>	
<b>Resultado(s): En la(s) muestra(s) analizada(s)</b>				
<b>DETERMINACIONES</b>	<b>RESULTADOS</b>			
	Muestra Identificada Como: 40588-1/1			
	<b>AGUAS MIELES DEL PROCESADO DEL CAFE</b>	Código de la Metodología		
Oxígeno Disuelto (mg/L)	24,938	SM 5210 B		
Sólidos Sedimentables (mL/L)	748.0	SM 2540-F		
Sólidos Totales (mg/L)	13,166	SM 2540 C, D		
Nitrógeno Total (mg/L)	132	SM 4500-N-C		
Fosforo (mg P <sub>T</sub> /L)	97.2	SM 4500-P-C		
pH	3.73 a 19,4 °C	SM 4500 H+ B		
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	ND	SM 2320 B		
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	13.5	SM 4500-NH3-C		
Nota: ND = No Detectado; D = detectado; LD < D < LC Límite de detección (LD) para Sólidos Sedimentables 0,10 mg/L; Límite cuantificación (LC) para Sólidos Sedimentables 0,50 mg/L				
<b>DETERMINACIONES POR DUPLICADO</b>				
<b>"DEBAJO DE ESTA LINEA NO HAY MAS RESULTADOS DE ESTE ENSAYO"</b>				

<b>Los resultados que se indican en este informe se refieren exclusivamente a la muestra analizada.</b>		
Metodología(s) o Referencias: APHA-AWWA-WPCF EDICION 2023, 24 <sup>TH</sup>		
Material(es) de Referencia(s): Buffer pH 4, 7 y 10, Standard de: Fosforo (AccuStandard Lots:220015056)		
Equipo(s) utilizado(s): pHmetro-Multiparámetro, RAPIDSTILL II, Horno, Espectrofotómetro UV-VIS, Micro Kjeldahl y equipos adecuados para análisis.		
Firmas:		
Realizado por:	Aprobado por:	Verificado por:
 Sonia De Paula / Santa Bussi	 Sonia De Paula	 Erc. Carlos Gómez M. Sc.
Analistas	Encargado del Laboratorio	Supervisor Técnico
NOTA: Este informe no debe ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la previa autorización del IBI		
Ejemplar No.1: Cliente	Ejemplar No. 2: Servicio al Cliente	Ejemplar No 3: Supervisión Técnica
<b>DEBAJO DE ESTA LINEA NO HAY MAS DATOS DE ESTE INFORME</b>		
A nuestros clientes:		
1) Las cifras de mil se separarán con un espacio Ej. 10,000 o 1,428 se expresarán como 10 000 o 1 428 respectivamente.		
2) El marcador decimal es sustituido por una coma Ej. 0.25 y 26.30 se expresarán 0,25 y 26,30 respectivamente.		
Este cambio es atendiendo a los procedimientos del Ente de Acreditación.		
INFORME DE RESULTADOS DEL LABORATORIO DE AGUAS		PG 14.0/A2: Rev. 6: 2021-08-04 Pág. 1/1

## DIAGRAMA DE PROCESO



LEYENDA (Equipos)		LEYENDA (Bombas)	
TAG	EQUIPO	TAG	EQUIPO
R-001	BIODIGESTOR		
TK-001	TANQUE DE RECEPCIÓN DE MIELES	V-001	Valvula de control de nivel
TK-002	CAMARA DE ALIMENTACIÓN AL REACTOR	V-002	Valvula de paso
TK-003	CAMARA DE COMPENSACIÓN DEL BIODIGESTOR	Z	Valvula check
TK-004	TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUAS TRATADAS	V-003	Valvula de compuerta
S-003	FILTRO DE H2S	PR	Valvula de control con manometro