

EVALUACIÓN DE TRES SISTEMAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS MIELES EN
EL MUNICIPIO DE TIMBÍO CAUCA.



Leidy Elizabeth Ortiz Coral
María del Mar Rengifo Jiménez

Directora:
Mg. Sandra Morales

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL
POPAYAN
2017

EVALUACIÓN DE TRES SISTEMAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS MIELES EN
EL MUNICIPIO DE TIMBÍO CAUCA.

Leidy Elizabeth Ortiz Coral
María del Mar Rengifo Jiménez

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR PARA EL TÍTULO DE INGENIERAS
AMBIENTALES

Directora:
Mg. Sandra Morales

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL
POPAYAN
2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del director del trabajo de grado

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, abril de 2017

AGRADECIMIENTOS

Primero queremos agradecer a nuestros Padres, hermanos y hermanas porque durante estos años de vida universitaria, siempre nos brindaron su amor y fueron nuestro apoyo moral y económico para seguir estudiando y lograr todos nuestros objetivos profesionales y personales a pesar de las dificultades.

A la Universidad del Cauca y a nuestros profesores por abrirnos las puertas al mundo de la ciencia y la investigación, gracias por los conocimientos brindados que han sido los pilares para terminar esta carrera profesional con éxito.

Un especial agradecimiento a nuestra directora, la profesora Mg. Sandra Morales, por habernos dado la oportunidad de trabajar con ella y compartir sus conocimientos, también por su comprensión, ayuda y paciencia infinita para guiarnos durante todo este proceso.

Al profesor Javier Fernández por la ayuda prestada durante el desarrollo de este trabajo.

Por ultimo agradecer a todos nuestros familiares, compañeros de estudio y en especial a nuestro grupo de amigas y amigos por su amistad y apoyo que fueron esenciales para poder continuar y terminar nuestra carrera con satisfacción.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2. JUSTIFICACION.....	4
3. OBJETIVOS	5
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	5
4. MARCO TEORICO	6
4.1 EL RECURSO HÍDRICO EN COLOMBIA.....	6
4.2 CAFÉ	7
4.2.1 Beneficio del café.....	7
4.3 AGUAS MIELES.....	8
4.3.1 Características físico-químicas de las aguas mieles del café.....	8
4.4 SISTEMAS ANAEROBIOS.....	8
4.5 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS MIELES	9
4.5.1 Sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA).....	9
4.5.2 Sistema artesanal de aguas mieles	9
4.5.3 Sistema mixto para tratamiento de aguas mieles	10
4.6 MARCO LEGAL	10
5. METODOLOGÍA	12
5.1 LOCALIZACIÓN	12
5.2 VALORACIÓN DEL PROCESO DE BENEFICIO DEL CAFÉ Y FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO.....	13
5.3 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN EN RELACIÓN A LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LAS MUESTRAS DE AGUAS MIELES.	13
5.3.1 Caracterización fisicoquímica de las aguas mieles	13
5.3.2 Porcentaje de remoción para solidos suspendidos totales (SST) y demanda biológica de oxigeno (DBO ₅).....	14
5.3.3 Análisis estadístico	14
5.4 COSTO BENEFICIO	15
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
6.1 VALORACIÓN DEL PROCESO DE BENEFICIO DEL CAFÉ Y FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO.....	16
6.1.1 Finca La Sultana.....	16
6.1.2 Finca El Pensamiento.....	21
6.1.3 Finca La Empalizada.....	24

6.2 ANALISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LAS MUESTRAS DE AGUAS MIELES.....	29
6.2.1 Demanda Biológica de Oxígeno- DBO ₅	30
6.2.2 Solidos Suspendidos Totales - SST	31
6.2.3 Conductividad (µs/cm).....	32
6.2.4 Oxígeno Disuelto – O.D	33
6.2.5 pH.....	34
6.2.6 Temperatura	36
6.2.7 Comparación estadística entre los sistemas de tratamiento.....	37
6.3 PORCENTAJE DE REMOCIÓN PARA DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO ₅) Y SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST).....	37
6.3.1 Porcentaje de remoción para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅)	37
6.3.2 Porcentaje de remoción para Solidos Suspendidos Totales (SST)	38
6.4 ANALISIS COSTO – BENEFICIO.....	39
6.4.1 Sistema Mixto	40
6.4.2 Sistema Artesanal.....	40
6.4.3 Sistema modular de tratamiento anaerobio-SMTA.....	41
6.5 ALTERNATIVAS DE MANEJO	41
6.5.1 Finca La Sultana	42
6.5.2 Finca El Pensamiento	42
6.5.3 Finca La Empalizada	43
7. CONCLUSIONES.....	45
8. RECOMENDACIONES.....	46
9. BIBLIOGRAFIA.....	47
ANEXOS.....	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del grano del café.....	7
Figura 2. Localización de las tres unidades productivas.....	12
Figura 3. Comparación de las variaciones de temperatura y precipitación durante el periodo del muestreo.	16
Figura 4. Distribución de la finca La Sultana.	17
Figura 5. Sistema Belcosub.	17
Figura 6. Esquema del Sistema Mixto.....	18
Figura 7. Sistema de tanques y laguna de infiltración.	19
Figura 8. a. Tanque de sedimentación, b. Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA).	19
Figura 9. Laguna de infiltración	20
Figura 10. Compostaje de la finca La Sultana.	20
Figura 11. Distribución de la finca El Pensamiento.....	21
Figura 12. Sistema Belcosub para la finca El Pensamiento.....	22
Figura 13. Esquema del Sistema Artesanal.	22
Figura 14. Sistema de tratamiento artesanal.....	23
Figura 15. a. Laguna de sedimentación con trampa de pulpas, b. Laguna del proceso Hidrolítico/ Acidogénico, c. Exterior de la laguna de metanogénesis d. Interior laguna de metanogénesis.	23
Figura 16. Compostera Finca El pensamiento.....	24
Figura 17. Plano finca La Empalizada.....	25
Figura 18. Beneficiadero Tradicional con zaranda.	25
Figura 19. Esquema del Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio- SMTA.	26
Figura 20. Reactores Hidrolítico/ Acidogénico RHA.	27
Figura 21. a. Cámara dosificadora en tanque de polietileno de 250 L, b. Parte interna de la cámara dosificadora, c. Parte exterior del reactor metanogénico, d. Botellas plásticas y microorganismos dentro del reactor metanogénico.	28
Figura 22. Sitio de recolección de las aguas mieles tratadas.	29
Figura 23. Compostera Finca La Empalizada.....	29
Figura 24. Valores promedios de DBO ₅ para las unidades productivas.....	31
Figura 25. Valores promedios de SST para las unidades productivas.....	32
Figura 26. Valores promedios del parámetro de conductividad en $\mu\text{s}/\text{cm}$	33
Figura 27. Valores promedios del parámetro de oxígeno disuelto para las unidades productivas.	34
Figura 28. Comparación de los valores promedios de pH entre las tres fincas productoras.....	35
Figura 29. Valores promedios del parámetro de temperatura en las tres unidades productivas.	36
Figura 30. Porcentaje de remoción de Demanda Biológica de Oxígeno DBO ₅ en las tres unidades productivas.	38
Figura 31. Porcentaje de remoción de Solidos Suspendidos Totales SST y número de muestreos en las tres unidades productivas.	39

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros fisicoquímicos de las aguas mieles.....	8
Cuadro 2. Políticas y normas del manejo de aguas.....	10
Cuadro 3. Métodos de análisis fisicoquímicos.....	14
Cuadro 4. Media, desviación estándar y coeficiente de variación de las variables fisicoquímicas del líquido afluente y efluente de cada unidad productiva.	30
Cuadro 5. Costos construcción del sistema mixto.	40
Cuadro 6. Costos construcción del sistema artesanal.	40
Cuadro 7. Costos construcción del sistema modular anaerobio-SMTA.	41
Cuadro 8. Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio para productores de menos de 1500 @cps/año.....	44

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados obtenidos en el laboratorio para cada sistema de tratamiento. .	50
Anexo 2. Prueba de Normalidad para cada sistema de tratamiento.	52
Anexo 3. Prueba t pareada para la entrada y salida de cada sistema de tratamiento.	65
Anexo 4. Prueba ANOVA de comparación de medias y múltiple-Duncan en la entrada de los sistemas.	67
Anexo 5. Prueba ANOVA de comparación de medias y múltiple-Duncan en la salida de los sistemas.	68

INTRODUCCION

Colombia a pesar de ser considerado como uno de los países con mayor riqueza del recurso hídrico, no escapa de la problemática mundial relacionada con las grandes descargas de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales como resultado se ha reducido en un 60% la disponibilidad del recurso, por afectación a su calidad (IDEAM, 2014).

Las actividades agrícolas generan gran parte de contaminación a las fuentes hídricas de las zonas rurales, como es el caso de la actividad cafetera, la cual ha respondido en promedio por el 23% del Producto Interno Bruto (PIB) agrícola y el 2,3% del PIB total en los últimos 30 años. En Colombia se encuentran cultivadas en café, 921000 hectáreas y 563000 familias producen el grano. La población que vive directamente del café alcanza los 2.000.000 de personas y genera 631000 empleos al año (Cárdenas y Ortiz, 2014).

El cultivo del café se encuentra en altitudes comprendidas entre los 1000 y 2000 m.s.n.m, con temperaturas que oscilan entre los 17 y los 23°C. Durante muchos años, Colombia ha dado un valor agregado a su café por dar una bebida suave que se logra mediante un proceso llamado beneficio de café, el cual consiste en transformar el café cereza en café pergamino seco, mediante distintas etapas que requiere grandes volúmenes de agua, para conservar su aroma y sabor.

Las investigaciones realizadas en Cenicafé, han determinado que durante el proceso de beneficio húmedo del café se necesitan 40 L de agua por kilo de semilla obtenida generando dos subproductos: la pulpa y el mucílago frescos, los cuales al no ser utilizados en forma adecuada, representan el 72% y el 28%, respectivamente, del problema de contaminación generado en el proceso de beneficio húmedo del café (Cenicafé, 2011).

Las aguas residuales del café, tienen un alto contenido de materia orgánica y un pH ácido. En ensayos de laboratorio se han encontrado que pueden ocasionar la muerte de animales acuáticos tales como microorganismos, renacuajos y peces, eventualmente dañar la flora presente en dichas aguas y si se vierten en los ríos en grandes volúmenes, se puede ocasionar un medio anaeróbico que, de prolongarse mucho, cambiará totalmente la ecología del agua. Como consecuencia esta actividad agrícola es considerada una de las más contaminantes a nivel mundial (Cárdenas y Ortiz, 2014).

Aunque hoy en día se cuenta con la tecnología del beneficio ecológico (Belcosub) que evita el uso excesivo de agua, la mayoría de pequeños productores siguen usando el proceso de beneficio tradicional generando grandes volúmenes de aguas mieles las cuales deben ser tratadas.

Los sistemas de tratamiento de aguas mieles tienen el objetivo de mejorar la calidad de agua que va a ser vertida a las fuentes hídricas, debido a la alta carga orgánica de estas aguas cuyos valores de DBO₅ oscilan entre los 5000 mg/L a 10000 mg/L (Molina y Villatoro, 2009), requiriendo buena eficiencia para poder disminuir la alta carga contaminante. Actualmente en nuestro país se maneja sistemas de tratamiento como: el proceso anaerobio con tanques conocido como SMTA, el proceso artesanal que se lleva a cabo con lagunas y el proceso mixto que involucra los dos procesos anteriores. Estos sistemas son los más usados por los pequeños caficultores debido a su manera sencilla de operar y por sus bajos costos, sin embargo la falta de control de su funcionamiento y los pocos estudios acerca de estos sistemas hace que se presenten problemas para tratar las aguas mieles generando sobrecostos e ineficiencia en el

control de la contaminación de las fuentes hídricas. El objetivo de este estudio fue determinar la eficiencia de estos tres sistemas de tratamiento mediante un análisis de las variables productivas y ambientales que se ven involucradas en el proceso del lavado del café y mediante un estudio fisicoquímico de aguas a la entrada y salida de los tres sistemas de aguas mieles para determinar el costo beneficio con el fin de establecer cual sistema es más óptimo y da un mayor beneficio ambiental y económico para que sea aplicado por los pequeños y medianos caficultores.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los desechos de los procesos agroindustriales constituyen actualmente un elemento importante en la generación de la contaminación del agua, el suelo y el aire. Es por ello que actualmente se busca innovar y mejorar las tecnologías aplicadas a la industria agrícola para mitigar el daño ambiental y en el caso de la industria cafetera la cual está considerada como una de las más contaminadas del mundo afectando gravemente al ambiente.

La generación de aguas mieles se da durante el beneficio húmedo que actualmente sigue siendo el método de procesamiento de café más utilizado en Centroamérica, México y Colombia, sin embargo el uso de este método genera un gran desperdicio de agua, presentando al final concentraciones cercanas a los 27400mg/L de DQO, la cual expresa el déficit de oxígeno ocasionado por la contaminación presente en el agua y pH entre 4.0 a 4.5 unidades (Álvarez et al, 2011).

En Colombia la industria cafetera es responsable del 55% de la huella hídrica gris agrícola del país (Zambrano, Rodríguez, Orozco, y Lopez, 2015) debido al uso excesivo de agua y a los subproductos (pulpa y mucilago) que se generan durante el proceso del beneficio del café. Investigaciones desarrolladas en Cenicafé permitieron determinar que durante la operación de remoción de mucilago se generan aguas residuales y lixiviados, con una carga orgánica, en términos de la DQO, que oscila entre 25000 y 11000 ppm y que generan impactos ambientales significativos sobre el ecosistema cafetero (Cenicafé, 2011). Se estima que las aguas residuales del lavado del mucilago fermentado, provenientes de una producción de 1000 arrobas de café pergamino seco generan una contaminación equivalente a la generada en aguas negras por una población de 14400 habitantes en un día (Cenicafé, 2011).

Con el objetivo de tratar las aguas residuales del café, se han diseñado sistemas de tratamiento para este tipo de aguas, los cuales buscan optimizar el uso de los recursos, la tecnología y minimizar los impactos ambientales negativos. Según estimación de la Federación de Cafeteros, entre los sistemas más usados por los caficultores en Colombia y especialmente en el Cauca para tratar las aguas mieles están: el sistema artesanal cuya base son los sistemas con lagunas de fermentación y benéfica, y el sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA).

Actualmente la Federación Nacional de Cafeteros estima un total de 12000 fincas cafeteras en el Departamento del Cauca, de los cuales aproximadamente 3151 emplean sistemas de tratamiento de aguas mieles, 1654 aplican sistema SMTA y 1497 fincas tienen sistema artesanal con lagunas sin embargo, el mal manejo, la falta de recursos, y la complejidad del tratamiento disminuye la eficiencia de los sistemas impidiendo el adecuado tratamiento y en algunas ocasiones aumentando los costos económicos para el productor y afectando ambientalmente los ecosistemas cercanos; por lo que se hace necesario evaluar el costo beneficio y la eficiencia de los sistemas de tratamiento con los objetivos de determinar cuál sistema es más óptimo y permite un mayor beneficio para los productores cafeteros y dejar abierta la posibilidad de futuros estudios orientados a proponer posibles soluciones tecnológicas para optimizar estos sistemas de tratamiento y de esa manera mejorar la calidad de aguas residuales generadas en este proceso.

2. JUSTIFICACION

La producción de café actualmente sigue siendo una de las actividades agrícolas más importantes para el desarrollo rural del país, sin embargo se observa que esta actividad ha causado graves problemas ambientales como: la deforestación, sobreexplotación del suelo y contaminación de las fuentes hídricas siendo este uno de los problemas más difíciles de tratar debido a su alta carga contaminante.

La necesidad de contar con infraestructura adecuada para el beneficio de café es uno de los factores que afectan la implantación de un programa de prácticas agrícolas sostenibles en productores del grano; adicionalmente, según reporte del Ministerio de Ambiente de Colombia, solamente el 51% de los sistemas de tratamiento de aguas residuales tanto domésticos como industriales instalados en Colombia funcionan de manera aceptable (Cárdenas y Ortiz, 2014).

Lo anterior indica que, si bien es cierto algunos sistemas utilizados para tratar aguas residuales producto del beneficio del café vienen siendo objeto de preguntas de investigación, no se reportan investigaciones puntuales relacionadas con la evaluación de la eficiencia de remoción de los sistemas compuestos por lagunas, tanques o sistemas mixtos que son los más usados no solo en el municipio de Timbío sino también en gran parte del departamento del Cauca. Por lo cual es necesaria la investigación de estos sistemas de tratamiento para proponer nuevos diseños o cambios de operar de los mismos con el fin de lograr disminución en los costos económicos y ecológicos que se generan con un mal funcionamiento de estos sistemas de mitigación del impacto ambiental generado por esta actividad agrícola.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar tres sistemas de tratamiento de aguas mieles usados en las fincas cafeteras del municipio de Timbío, Departamento del Cauca.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Valorar el proceso de beneficio del café y funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas mieles en cada una de las fincas cafeteras.
- Determinar el porcentaje de remoción en relación a las características fisicoquímicas de las muestras de aguas mieles.
- Comparar el costo-beneficio de los tres sistemas de tratamiento de las aguas mieles.

4. MARCO TEORICO

4.1 EL RECURSO HÍDRICO EN COLOMBIA

Según el último estudio nacional del agua (ENA) que publicó el IDEAM en 2014, Colombia cuenta con un rendimiento hídrico promedio que equivale a 6 veces el promedio mundial y a 3 veces el de Latinoamérica; además de reservas de aguas subterráneas que triplican esta oferta y se distribuyen en el 74% del territorio nacional. Las condiciones más críticas del recurso hídrico, asociadas a presión por uso, contaminación del agua, vulnerabilidad al desabastecimiento, vulnerabilidad frente a variabilidad climática y condiciones de regulación; se concentran en 18 subzonas hidrográficas en las áreas Magdalena-Cauca y Caribe que abarcan 110 municipios.

La materia orgánica biodegradable vertida a los sistemas hídricos en 2012 se estima en 756945 t/año, mientras que la materia orgánica no biodegradable, se estima en 918670 t/año, siendo las ciudades más pobladas como Bogotá, Cali, Medellín y Cartagena los principales aportantes (IDEAM, 2014).

El informe del IDEAM logra identificar que los sectores agrícolas y pecuarios presentan una alta dependencia de agua verde, lo que hace que estos sectores económicos sean vulnerables al Cambio Climático.

Se identificaron 61 sistemas acuíferos, cuya ubicación geográfica coincide con zonas caracterizadas por altas presiones de uso, contaminación, vulnerabilidades al desabastecimiento, a la variabilidad y al cambio climático. Es así, como el agua subterránea se empieza a constituir en una alternativa para mejorar las condiciones de disponibilidad. Sin embargo, es necesario ampliar el conocimiento hidrogeológico en el país; pues sólo el 20% de estos sistemas se conoce con un nivel adecuado para la gestión, el aprovechamiento y, especialmente, para la toma de decisiones en el ordenamiento ambiental del país (IDEAM, 2014).

El ENA, se convierte en una herramienta de evaluación del agua, donde da a conocer las novedades temáticas, acordes a la cantidad de agua superficial y subterránea disponible en el país; a la calidad del agua respecto a las afectaciones y vulnerabilidades del recurso; y a la distribución que se realiza por todo el territorio nacional: aproximadamente el 62% de la lluvia en Colombia se convierte en oferta hídrica superficial equivalente a un volumen de 2012 km³. Es importante recalcar que el total de agua que se demanda en diferentes sectores a nivel nacional, es de 35987 m³; donde el sector de mayor demanda es el agrícola con un 46,6%, seguido del sector energético con el 21.5%, el pecuario con el 8.5% y el doméstico con el 8.2%.

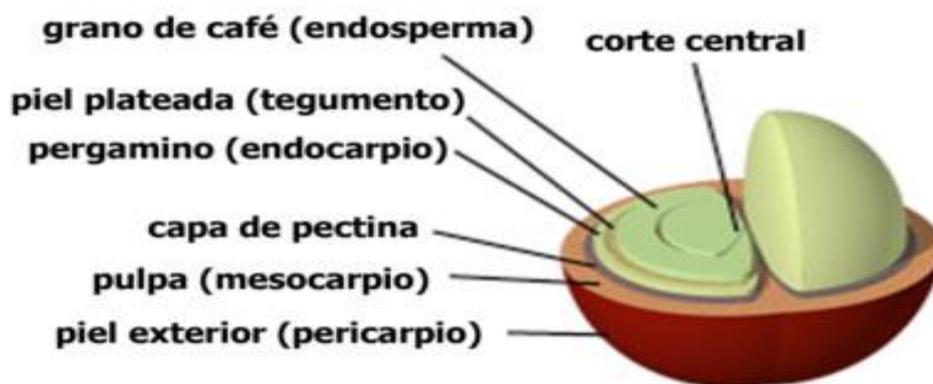
El ENA permite determinar que la disponibilidad del recurso hídrico en Colombia, va más allá de ríos, lagos y mar, la riqueza de aguas subterráneas y verdes en el país permite ver la importancia y la necesidad de un ordenamiento ambiental en el país para evitar su desperdicio, contaminación y poder disminuir la vulnerabilidad por desabastecimiento y cambio climático.

4.2 CAFÉ

Se conoce como café a los granos obtenidos de unas plantas denominadas cafetos, morfológicamente muy variables. El género pertenece a la familia de las Rubiáceas (*Rubiaceae*), que tiene alrededor de 500 géneros y más de 6000 especies. Taxonómicamente, todas estas plantas se clasifican como del género *Coffea* y se caracterizan por una hendidura en la parte central de la semilla (Cafedecolombia.com, 2016).

Los granos de café son las semillas del fruto llamado popularmente cereza. Estas cerezas están compuestas por una cubierta exterior, el *exocarpio*, el cual determina el color del fruto; en el interior se encuentran diferentes capas: *mesocarpio* el cual tiene una textura gruesa rica en azúcares la cual se encuentra adherida a la semilla y comúnmente se conoce como mucílago; el *endocarpio* o pergamino es una capa amarillenta que cubre al grano; la *epidermis* es una capa muy delgada y los granos verdes son los que se tuestan para preparar los distintos tipos de café. En la figura 1 se observa la estructura del grano del café.

Figura 1. Estructura del grano del café.



Fuente: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia 2016.

4.2.1 Beneficio del café

El beneficio de café es el proceso para transformar la cereza (café cereza) a semilla (café pergamino seco) mediante la separación de las partes del fruto con el fin de conservar su calidad física, organoléptica y sanitaria. En Colombia se utiliza el beneficio húmedo y beneficio ecológico, el primero se caracteriza por usar grandes cantidades de agua y logra obtener características de acidez y aromas pronunciados, que diferencian el café colombiano de los otros que se producen en otros sitios del mundo, este sistema usa en promedio 40 L de agua por kilogramo de café lavado.

Para realizar este beneficio se utiliza una despulpadora de la cual se obtiene el café para ser llevado a unos tanques tina en donde comienza el proceso de fermentación para retirar el mucílago al día siguiente por medio de un lavado. La cereza es llevada a unas fosas donde se combina con el mucílago (Vega y Martínez, 2011).

El beneficio ecológico o sistema Belcosub, se define como un conjunto de operaciones que permite transformar el café cereza a pergamino seco, este sistema está compuesto por: la despulpadora, el desmucilagador mecánico y un tornillo sin fin donde está mezclada la pulpa con el mucílago. El proceso inicia cuando el grano maduro de café es recolectado, se pesa en una báscula, pasa por la tolva a la despulpadora, en donde se le retira la pulpa en seco, de allí pasa al desmucilagador mecánico el cual remueve

el mucílago utilizando un litro de agua por kilogramo de café seco; por el tornillo sin fin se mezcla la pulpa con el mucílago para ser llevado a las composteras para su descomposición (Vega y Martínez, 2011).

El lavado y fermentación del café es uno de los procesos que se da durante el beneficio del café, viene luego del despulpe y es donde da lugar a la generación de aguas mieles. Los granos despulpados entran en los llamados tanques de fermentación donde ocurre un proceso bioquímico para la remoción del mucílago (sustancia mielosa que cubre el grano recientemente despulpado). Tiene una duración aproximada de 12 a 18 horas, según la temperatura ambiente y el volumen de café a tratar (Quintero, 2009)

4.3 AGUAS MIELES

Se denomina aguas mieles a las aguas que salen del proceso de fermentación y lavado del café, las cuales se caracterizan por tener material coloidal gelatinoso de la degradación de la pectina y otros productos que resultan de la fermentación. Aunque presentan una carga orgánica menor a las aguas del despulpe, presentan un alto consumo de oxígeno para degradar la materia orgánica.

4.3.1 Características físico-químicas de las aguas mieles del café

Cuadro 1. Parámetros fisicoquímicos de las aguas mieles.

PARAMETRO	VALOR
pH	4.5
Temperatura	27.5
Oxígeno disuelto	0 mg/L
DBO ₅	5000 mg/L
DQO	13000 mg/L
SST	6960 mg/L
ST	3503 mg/L
Solidos Totales Fijos	1730 mg/L
Solidos Totales Volátiles	5520 mg/L

Fuente: Molina G., Villatoro M. 2009

4.4 SISTEMAS ANAEROBIOS

Los sistemas anaerobios parten de los procesos de la descomposición u oxidación de compuestos orgánicos, en ausencia de oxígeno libre, para obtener la energía requerida para el crecimiento y mantenimiento de los organismos anaerobios (Romero, 2004).

En la descomposición de la materia orgánica por el proceso anaerobio se presentan dos etapas: fermentación de ácidos y fermentación de metano. En la fermentación ácida, los compuestos orgánicos como carbohidratos, proteínas y grasas son hidrolizados en moléculas más pequeñas que son sometidas a biooxidación para terminar convertidos en ácidos orgánicos, CO₂ e hidrógeno.

En la fermentación metanogénica, los microorganismos metanogénicos, en condiciones anaerobias, convierten los productos de la fermentación ácida en CO₂ y CH₄ (Romero, 2004).

Algunos de los procesos anaerobios residuales más comunes para el tratamiento de aguas para remover DBO, grasa y SS se nombran a continuación:

- Lagunas Anaerobias
- Tanque Séptico

- Proceso de flujo ascensional RAFA o UASB
- Tanque Imhoff
- Filtro anaerobio

4.5 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS MIELES

A continuación se describen los sistemas de tratamiento de mayor uso para el tratamiento de las aguas mieles del café.

4.5.1 Sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA)

Con el objetivo de mejorar la tecnología del proceso de tratamiento de las aguas mieles provenientes del beneficiadero de café, el centro nacional de investigaciones del café (Cenicafé), desarrolló el sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA); este sistema se construye utilizando tanques de polietileno como reactores, y trozos de botellas plásticas como medio de soporte de microorganismos. Las eficiencias de remoción típica promedio para el estado estable del sistema oscilan alrededor del 86.6% y 87,8% para DQO y DBO₅, respectivamente, con afluentes con concentraciones de DQO medias de 25000 ppm (Cenicafé, 2006).

Este sistema está compuesto por dos unidades: el reactor Hidrolítico/Acidogénico (RHA) y el reactor Metanogénico (RM). En el reactor RHA se da inicio al tratamiento de las aguas residuales que llegan del lavado del café, en su interior se llevan a cabo reacciones bioquímicas que conducen a la hidrólisis de compuestos de alto peso molecular, por ejemplo la pectina y a su vez acidifica los compuestos que han logrado ser hidrolizados o son solubles como los azúcares que hacen parte de la composición química del mucilago.

Estas reacciones de hidrólisis y acidogénesis son llevadas a cabo por microorganismos presentes en el mucilago, según datos de Cenicafé en una muestra de mucilago fresco se puede encontrar microorganismos aeróbicos mesófilos, del orden de $6.9 \cdot 10^6$ unidades formadoras de colonias por gramo (UFC/g) y levaduras del orden de $1.8 \cdot 10^6$ (UFC/g) (Zambrano D.1999).

Una vez que las aguas salen del RHA pasan a la cámara dosificadora, la cual usa principios de filtración lenta reteniendo material orgánico insoluble que no fue hidrolizado, según información de Cenicafé: “dosifica por gravedad las aguas residuales acidificadas entre 500-600 ml/min de caudal. Lo cual es equivalente a aplicar una carga diaria entre 9.8-11.8 Kg DQO/m³ (Zambrano, 1999).

En el reactor Metanogénico, tipo Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA), se lleva a cabo la fase final del tratamiento de las aguas residuales del café, en esta parte las aguas que llegan han aumentado su pH a 7.5, a diferencia del reactor RHA, es necesaria la inoculación la cual se hace con bacterias metanogénicas que se obtienen del estiércol vacuno, dentro del tanque se encuentra trozos de guadua para que las bacterias logren fijarse, el tanque donde se lleva a cabo este proceso debe de ser color negro para lograr por medio de la luz solar alcanzar la temperatura optima del proceso que es de 30 a 32°C.

4.5.2 Sistema artesanal de aguas mieles

Este sistema de tratamiento de aguas mieles está constituido por: una trampa de pulpas, una laguna de fermentación cuya función es fermentar las aguas mieles y sedimentar los lodos y una laguna de benéficos cuya función es terminar de fermentar las aguas mieles y sedimentar los lodos. Esta laguna a diferencia de la laguna de fermentación

lleva en su interior tacos de guadua, llantas o botellas plásticas, estiércol, miel de purga y cal con el objetivo de que las bacterias metanogénicas puedan llevar a cabo el proceso final de descontaminación de las aguas mieles.

Para este sistema artesanal se ha encontrado un porcentaje de remoción del 76% de DBO. Estando muy cerca de lo que se requiere (Sandoval, 2010).

4.5.3 Sistema mixto para tratamiento de aguas mieles

Este sistema de tratamiento de aguas mieles tiene como base un proceso anaerobio, que cuenta con tres etapas: pre-tratamiento el cual consiste en la sedimentación de la pulpa que se desprende en el lavado del café; la segunda etapa es el tratamiento biológico al igual que el proceso SMTA usa un reactor metanogénico, tipo filtro anaerobio de flujo ascendente, el proceso termina con una laguna de infiltración.

Dependiendo de cada caficultor la unión entre los tanques del proceso SMTA y las lagunas del proceso artesanal se realiza mediante canales o tubería.

4.6 MARCO LEGAL

Legislación ambiental colombiana relacionada con las aguas residuales y el uso eficiente del agua.

La constitución política de Colombia en sus artículos 79 y 80 establece que es deber del estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica como también garantizar la calidad del agua para consumo humano y, en general, para las demás actividades en que su uso es necesario, además fijar su destinación y posibilidad de aprovechamiento, estableciendo la calidad de la misma y ejerciendo control sobre los vertimientos (Constitución Política de Colombia, 1991).

La legislación colombiana maneja políticas nacionales y normas específicas referentes al tema de vertimientos de aguas residuales y su manejo, a continuación se muestran las más destacadas:

Cuadro 2. Políticas y normas del manejo de aguas.

DECRETO 2811 DE 1974: Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	Define normas generales de política ambiental y los medios para su desarrollo, asignando responsabilidades para conservación y ordenamiento de cuencas, control y sanciones, concesiones y uso de agua, tasas, incentivos y pagos, medición de usos, uso eficiente de agua, entre otras.
DECRETO 901 DE 1997	Reglamenta la Tasa Retributiva o pago de dinero por la contaminación que se deja de remover (según el decreto 1594) y que se descarga directa o indirectamente al recurso hídrico. Este cobro se hace en base a dos parámetros indicadores: la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST).
RESOLUCIÓN 372 DE 1998	Por la cual se actualizan las tarifas mínimas de las tasas retributivas por vertimientos líquidos y se dictan disposiciones. Se establecen las tarifas por kg o carga contaminante de SST y DBO.
REGLAMENTO DE AGUA POTABLE Y	El ministerio de desarrollo Económico en la resolución 1096 de 2000 adopta el RAS como el documento técnico que fija

SANEAMIENTO BÁSICO (RAS)	<p>critérios básicos y requisitos mínimos para los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, de agua potable y saneamiento básico (Cárdenas Garzón y Ortiz Prieto, 2014).</p>
DECRETO 3100 DE 2003	<p>El decreto reglamenta las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toma otras determinaciones.</p>
DECRETO 3440 DE 2004	<p>Las autoridades ambientales competentes cobrarán la tasa retributiva por los vertimientos puntuales realizados a los cuerpos de agua en el área de su jurisdicción, de acuerdo a los planes de ordenamiento del recurso establecido en el Decreto 1594 de 1984 o en aquellas normas que lo modifiquen o sustituyan. (República de Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004).</p>
RESOLUCIÓN 2115 DE 2007	<p>Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.</p>
DECRETO 3930 DE 2010	<p>Se establecen las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico y los vertimientos realizados a cuerpos de agua, al suelo y a los alcantarillados.</p>
DECRETO 4728 DE 2010	<p>Se modifica parcialmente el decreto 3930 de 2010 el cual hace referencia a la normatividad de vertimientos y como se deben aplicar en todo el territorio nacional.</p>
DECRETO 2667 DE 2012	<p>Por medio de este decreto se reglamenta la tasa retributiva, por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales.</p>
RESOLUCION 0631 DE 2015	<p>Se establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.</p>

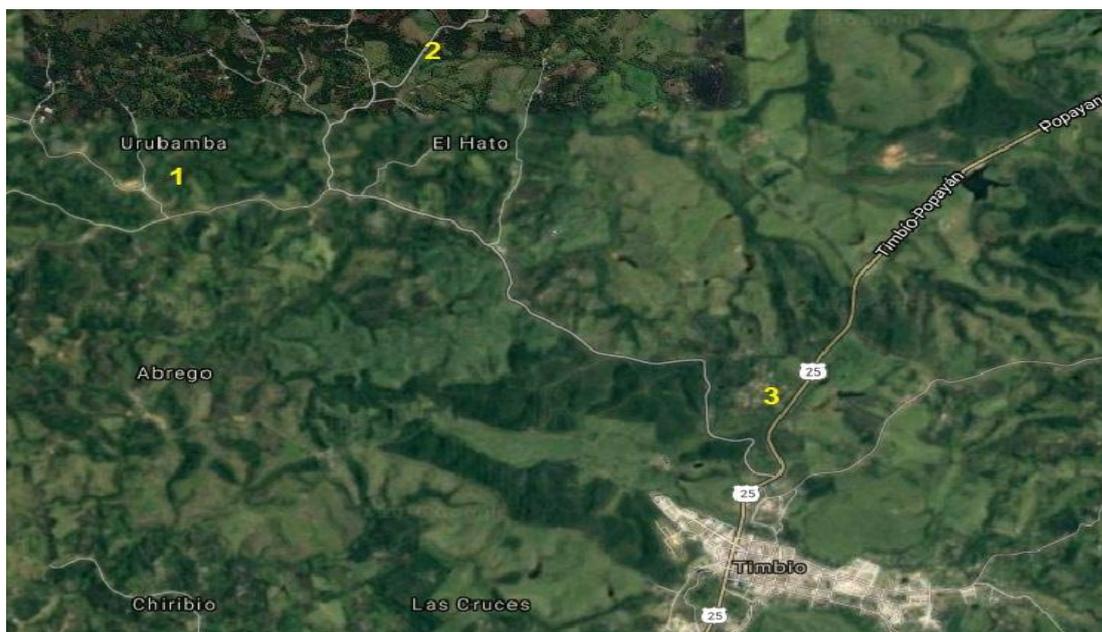
5. METODOLOGÍA

5.1 LOCALIZACIÓN

El estudio se realizó en el municipio de Timbío localizado al suroccidente de Colombia en el departamento del Cauca, entre las cordilleras central y occidental. Se encuentra entre altitudes que oscilan entre los 1000 y 2000 m.s.n.m con precipitación anual de 2000 mm, una temperatura promedio de 18°C y una humedad relativa del 73%.

La cabecera municipal se localiza a los 2° 21' 22" de Latitud Norte y 76° 41' 16" de Longitud Oeste a 13 kilómetros al sur de la ciudad de Popayán. En la figura 2 se aprecia la ubicación de las tres unidades productivas donde se realizó la investigación.

Figura 2. Localización de las tres unidades productivas.



1. Finca La Sultana.
2. Finca El Pensamiento.
3. Finca La Empalizada.

Fuente: Google Maps.

La finca 1 se denomina “La Sultana” de propiedad de la Universidad del Cauca, ubicada en la vereda Urubamba; la numero dos, es finca “El Pensamiento” perteneciente a la señora Elsa Muñoz y se halla en la vereda Las Piedras y la última finca “La Empalizada” que pertenece al señor Javier Córdoba, y se encuentra cerca de la cabecera municipal de Timbío.

Debido a que la maduración del café depende de los periodos de lluvia y de verano se tuvieron en cuenta las condiciones climáticas que se presentaron durante todo el periodo de estudio.

5.2 VALORACIÓN DEL PROCESO DE BENEFICIO DEL CAFÉ Y FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO.

Se visitaron las tres fincas productoras de café y mediante recorridos con GPS se tomaron coordenadas las cuales posteriormente se procesaron para obtener los planos de cada propiedad.

Para la caracterización de los sistemas de tratamiento de las aguas mieles se estuvo presente durante el lavado de café, revisando cada etapa de los procesos de tratamiento y se tomaron las principales medidas como largo, ancho, altura y diámetro para el caso de los sistemas con tanques; con los datos obtenidos se realizó un esquema en AutoCAD.

En el caso del sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA), para arrancar con su funcionamiento se hizo una inoculación del reactor metanogénico un mes antes. Para este proceso se usó 500 g de cal y 1 Kg de melaza. En una cubeta grande se mezcló en proporción 3:1 agua corriente y estiércol, es decir por un balde de estiércol, 3 baldes de agua, luego esta mezcla se depositó en un costal para filtrar el agua, el costal con el estiércol se colocó en el reactor metanogénico el cual se terminó de llenar con agua y aros de botellas plásticas. Para la etapa de aclimatación se dejó reposar el reactor por un periodo de un mes, una vez cumplido este tiempo se procedió al arranque y funcionamiento del reactor y de todo el sistema de tratamiento de las aguas procedentes del lavado del café.

Los aspectos evaluados en cada una de las fincas fueron:

- Variedad de café
- Número de plantas sembradas
- Arrobas producidas anualmente y los kilos de café lavados en máxima y mínima producción.
- Tipo de beneficiadero
- Cantidad de agua usada en el proceso de lavado del café

5.3 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN EN RELACIÓN A LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LAS MUESTRAS DE AGUAS MIELES.

Se realizaron muestreos en cada uno de los sistemas de tratamiento para un posterior análisis en el laboratorio con el objetivo de evaluar la eficiencia de cada uno de ellos. A continuación se da una información detallada de los diferentes métodos utilizados para cada uno de los parámetros a estudiar.

5.3.1 Caracterización fisicoquímica de las aguas mieles

En las tres fincas donde se llevó a cabo la investigación se realizaron cuatro muestreos donde se monitoreo el flujo a la salida del beneficio (afluente) y a la salida de los sistemas (efluente), con un total de 24 muestras evaluadas.

Cabe resaltar que la toma de muestras no se realizó cada 15 días como se había estipulado previamente, debido a que el muestreo estaba sujeto a la disponibilidad de tiempo de los encargados de cada una de las fincas, fallas en uno de los equipos de muestreo y factores climáticos que impidieron la recolección en las fechas establecidas.

Los parámetros que se le determino a cada muestra de agua fueron:

Cuadro 3. Métodos de análisis fisicoquímicos.

Variable	Método/ equipo	Código APHA	Unidades
pH	Sonda multiparamétrica HACH HQ 40D	4500-H+B	-
Temperatura de las muestras	Sonda multiparamétrica HACH HQ 40D	-	°C
Conductividad	Electrométrico	SM 2510 B	µs/cm
Oxígeno disuelto	Sonda multiparamétrica HACH HQ 40D	2550	mg/L
DBO ₅	*	SM 5210 B	mg/L
SST	Método de estufa a 105 °C	SM 2540D	mg/L

Fuente: Propia

* Con el fin de determinar el parámetro de DBO₅ se usó del equipo de DBO track y las últimas muestras fueron evaluadas en el laboratorio de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC).

Para el análisis se recolecto un volumen de 2 L de muestra, las cuales fueron refrigeradas y llevadas inmediatamente al laboratorio de Química sanitaria de la facultad de Ingeniería Civil para su análisis.

5.3.2 Porcentaje de remoción para solidos suspendidos totales (SST) y demanda biológica de oxigeno (DBO₅)

Para calcular el porcentaje de remoción de SST y DBO₅ se usó la misma formula la cual es presentada a continuación:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{C_1 - C_2}{C_1} * 100 \quad (1)$$

(1) Ecuación de eficiencia de remoción

Dónde:

C₁: Valor del afluente (SST Y DBO₅)

C₂: Valor del efluente (SST Y DBO₅)

Para el último análisis de cada sistema de tratamiento, las muestras fueron enviadas al laboratorio ambiental de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) con el fin de obtener resultados de alta calidad que corroboren los ya obtenidos anteriormente en el laboratorio de la Universidad del Cauca.

5.3.3 Análisis estadístico

Para el presente análisis se utilizaron los programas Excel 2013 y para las pruebas estadísticas el SPSS versión 23.

El experimento fue de medidas repetidas, donde se muestrearon las variables sobre la misma unidad (sistema de tratamiento), proporcionando información sobre el comportamiento en el tiempo.

Se emplearon estadísticos descriptivos y una prueba de distribución normal de Shapiro-Wilks (usada para un número inferior a 50 datos) con el fin de determinar el comportamiento de los datos y ver si cumplen la hipótesis nula de distribución normal,

los valores de significancia (p) para los parámetros fisicoquímicos fueron mayores > 0.05 , por lo cual se aceptó la hipótesis nula, de esta manera se deduce que la distribución de los datos es igual a la distribución normal.

Debido a que los registros obtenidos presentaron una distribución normal, se realizó la prueba t pareada para determinar diferencias significativas entre la entrada y la salida, que unido a la prueba de comparación múltiple de Duncan, fueron las herramientas para determinar el mejor sistema de tratamiento de aguas mieles.

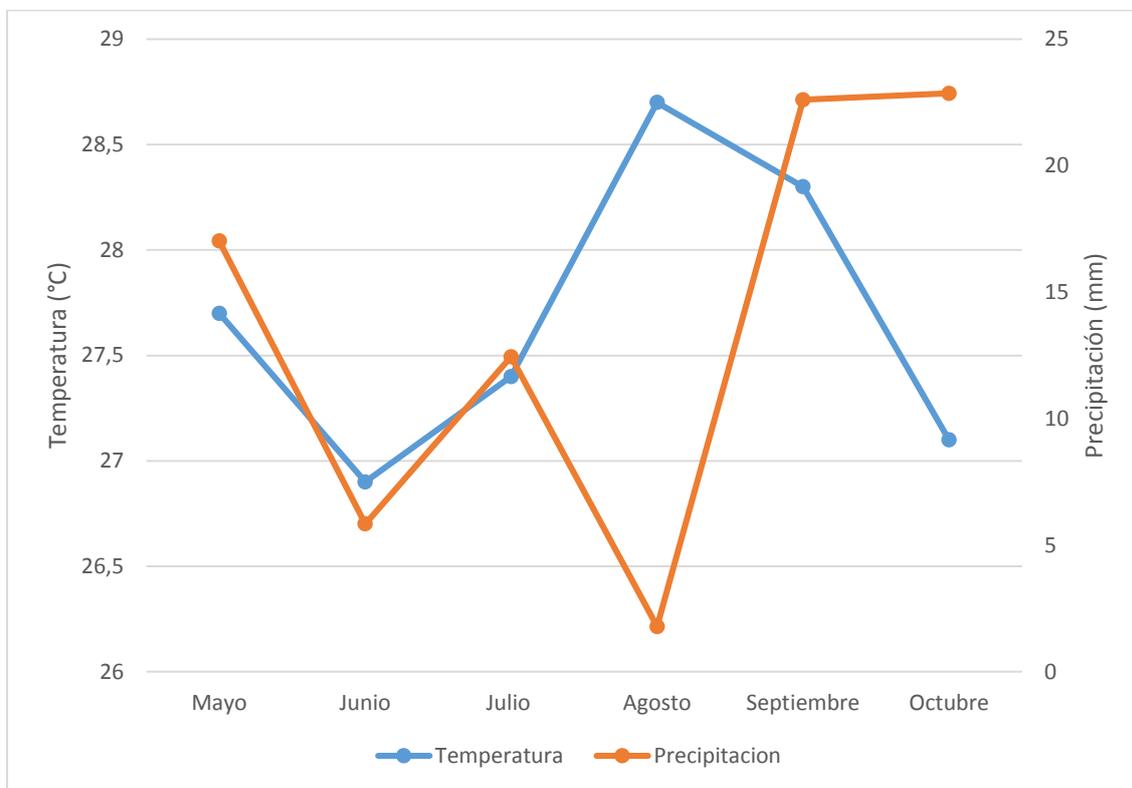
5.4 COSTO BENEFICIO

Para determinar los costos y beneficios de cada sistema de tratamiento se tuvieron en cuenta variables como costos de mantenimiento y construcción de cada sistema y los porcentajes de remoción de SST y DBO_5 para poder analizar los beneficios ambientales y económicos de estos tres sistemas.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo al IDEAM, el clima donde se desarrollaron las actividades es bimodal, correspondiendo a dos periodos de lluvia y dos de sequía (Figura 3).

Figura 3. Comparación de las variaciones de temperatura y precipitación durante el periodo del muestreo.



Como se puede observar en la figura 3, el estudio se desarrolló durante un periodo seco (PPM: 2.5 mm; T: 28°C) y uno lluvioso (PPM: 22.86 mm; T: 27°C). Las prolongadas sequias ocasionaron retrasos en los procesos de maduración del grano del café, el cual requiere de ciertas cantidades de agua para cumplir su ciclo fenológico, condición que afectó el inicio de los muestreos.

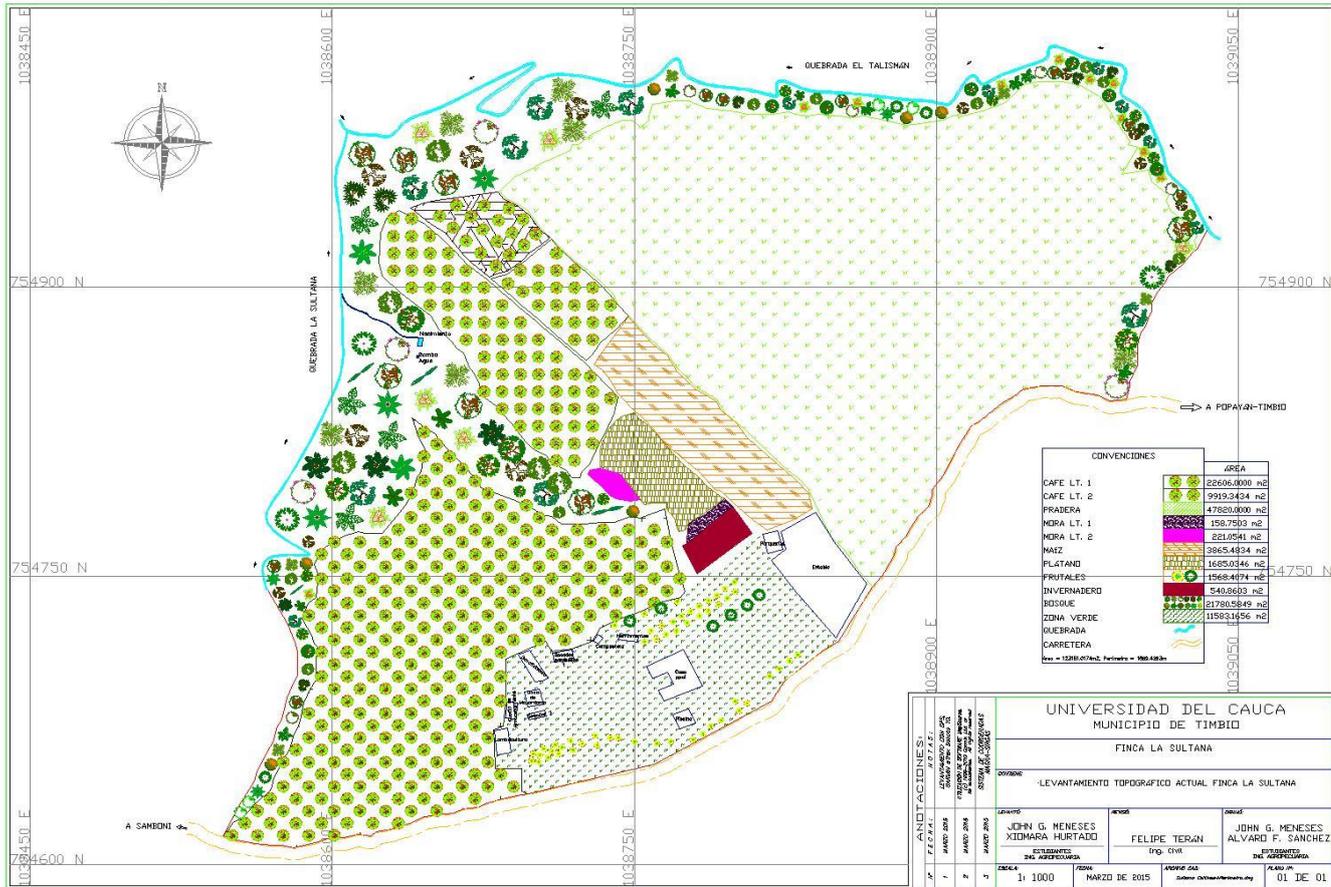
6.1 VALORACIÓN DEL PROCESO DE BENEFICIO DEL CAFÉ Y FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO.

A continuación se describen cada una de las unidades productivas.

6.1.1 Finca La Sultana.

Como se observa en la figura 4, este predio cuenta con 4,5 hectáreas en cultivo de café tres de ellas en producción y 1.5 en renovación, para un total de 19700 plantas de variedad castilla, con una producción anual de 750 arrobas de café pergamino aproximadamente (Figura, 4).

Figura 4. Distribución de la finca La Sultana.



Fuente: Modificado de Jhon Meneses y Ximena Hurtado

En el tiempo de cosecha, se lava 1000 kg (día de recolección normal) a 2000 kg (máxima producción) de café cereza.

Para el proceso de lavado, se cuenta con el sistema de beneficio ecológico Belcosub, que tiene una relación de 1:1; es decir por 1 kg de café cereza se necesita 1 L de agua, concentrando la carga contaminante en la mezcla mucílago pulpa (Vega y Martínez, 2011), pero el sistema permite un ahorro de agua y por ende una disminución de la presión al recurso hídrico.

Figura 5. Sistema Belcosub.



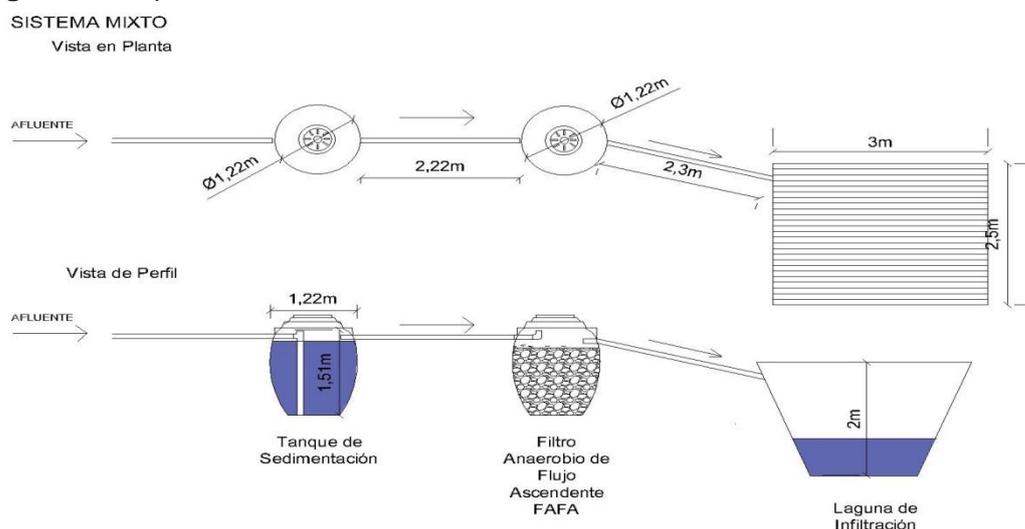
Fuente: Propia

El encargado de la finca expresó que en el proceso de beneficio de esta unidad productiva por cada 1.5 kg de café se necesita 1 L de agua aproximadamente, debido a que el café se deja en proceso de fermentación para mantener la tasa. Teniendo en cuenta esta información se estimó que la cantidad de agua usada durante el presente estudio fue de 667 L y 1300 L de agua, dependiendo del momento de la cosecha.

6.1.1.1 Caracterización de los sistemas de tratamiento de aguas mieles

Esta finca, tiene un tratamiento mixto consta de una rejilla para evitar el paso de pulpa gruesa, seguido hacia la segunda parte del tratamiento que está conformado por: tanques de polietileno que funcionan como un reactor IMHOFF cuya finalidad es la remoción de sólidos suspendidos mediante procesos físico-químicos (Romero, 2004) y un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) el cual es un proceso de crecimiento de biomasa adherido a superficies para la remoción de residuos solubles (Romero, 2004); para este caso la biomasa proviene de estiércol vacuno que contiene a las bacterias metanogénicas y al final hay una laguna para que las aguas terminen su tratamiento y se infiltren (Figura 6).

Figura 6. Esquema del Sistema Mixto.



Fuente: Propia

Para este caso, el proceso de tratamiento se efectuó en los meses de mayo a julio y en los meses de septiembre a noviembre. El mantenimiento de este sistema se hace al inicio y final de cada cosecha de café.

Para el caso de la finca La Sultana, el sistema de tratamiento inicia con dos tanques de polietileno tipo ovoide de 1000 L, con un diámetro de 1.22 m y una altura de 1.55 m y una laguna de infiltración como parte final del tratamiento (Figura 7).

Figura 7. Sistema de tanques y laguna de infiltración.



Fuente: Propia

El primer tanque (Figura 8a), funciona como un sistema IMHOFF como resultado de este proceso se formaban tres capas; las natas sobrenadantes en la superficie, los lodos y material del café grueso que se sedimentan en el fondo y en medio la capa líquida que pasa al segundo tanque.

El segundo tanque, es el filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) en su interior se encuentra un lecho filtrante que está compuesto por envases lealplast de polietileno y las bacterias adheridas provenían de un inóculo de estiércol vacuno (Figura 8b).

Figura 8. a. Tanque de sedimentación, **b.** Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA).



Fuente: Propia

El objetivo de esta cámara, es la fermentación metanogénica que transforme los compuestos orgánicos ácidos en dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) y la materia orgánica se termine de mineralizar o se encuentre de una forma más asimilable para ser usada en cultivos y/o ser vertidos en fuentes hídricas.

En la última parte del tratamiento se depositan las aguas que salen del segundo tanque (filtro FAFA), van hacia una laguna de infiltración con dimensiones de 3 m por 2.5 m y

profundidad de 2 m, al lado de esta se encuentran una mata de guadua y los cultivos de café (figura 9).

Figura 9. Laguna de infiltración



Fuente: propia

La cantidad de pulpa que se genera durante el proceso de despulpado, oscila entre los 480 kg a 960 kg diarios (Figura 10).

Figura 10. Compostaje de la finca La Sultana.



Fuente. Propia

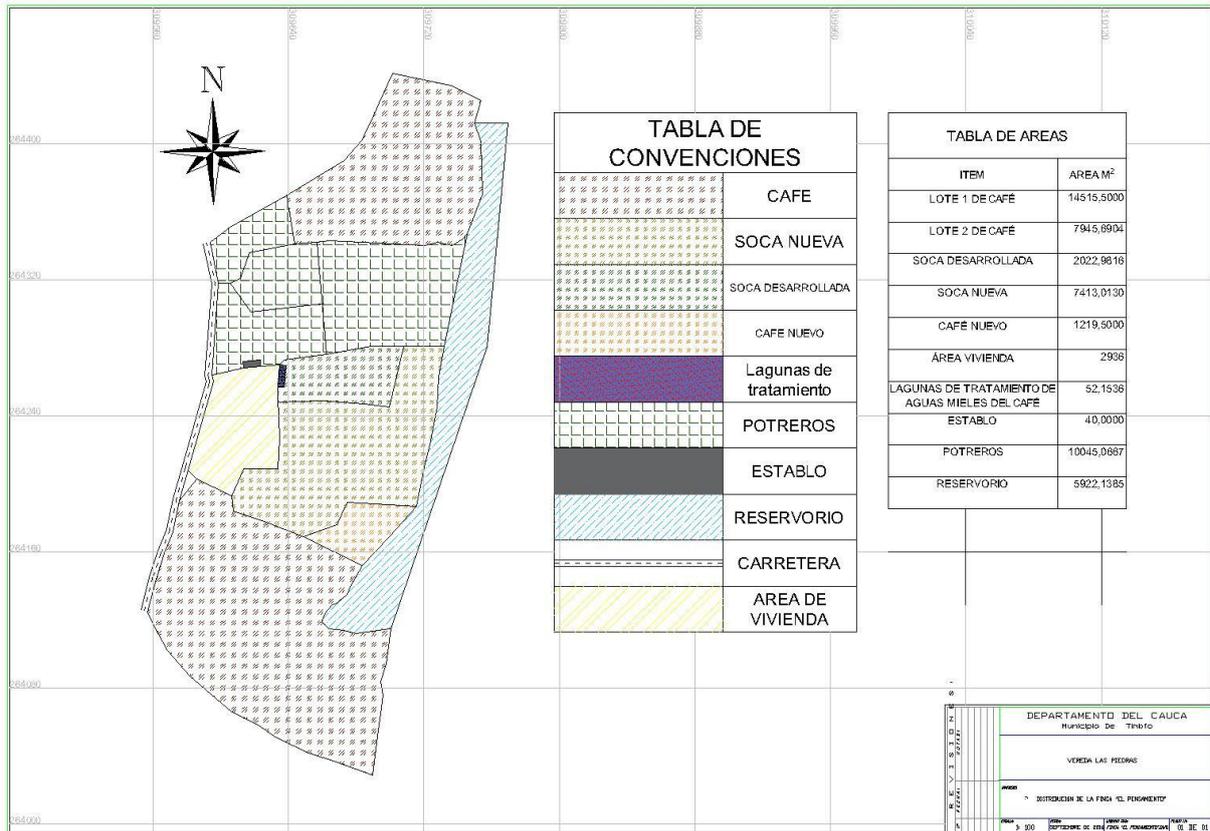
El manejo que se le da a estos residuos sólidos, es el proceso de compostaje, el cual es utilizado en el cultivo de café, estimándose que aproximadamente el 60% de la fertilización de esta unidad productiva se deriva de esta actividad, la cual no solo genera un ahorro en la compra de fertilizantes químicos; sino también evita problemas ambientales, como la acumulación de residuos orgánicos, presencia de vectores, malos

lores que pueden afectar la calidad del producto, que contribuye a los procesos de la renovación de la certificación Rain Forest de la finca.

6.1.2 Finca El Pensamiento.

En esta finca hay en total 2.0 ha de café variedad castilla, un lote de soca nueva aproximadamente de 7000 m²; un lote de soca desarrollada con un área de 2022 m² y un lote pequeño de café nuevo (Figura 11).

Figura 11. Distribución de la finca El Pensamiento.



Fuente: Propia

Entre los lotes de café nuevo y en producción hay en total de 18000 plantas, en este predio anualmente se produce 560 arrobas de café pergamino.

Para el lavado del café, la propietaria usa el agua proveniente del acueducto veredal y emplea un beneficiadero ecológico o Belcosub (Figura 12).

Figura 12. Sistema Belcosub para la finca El Pensamiento.



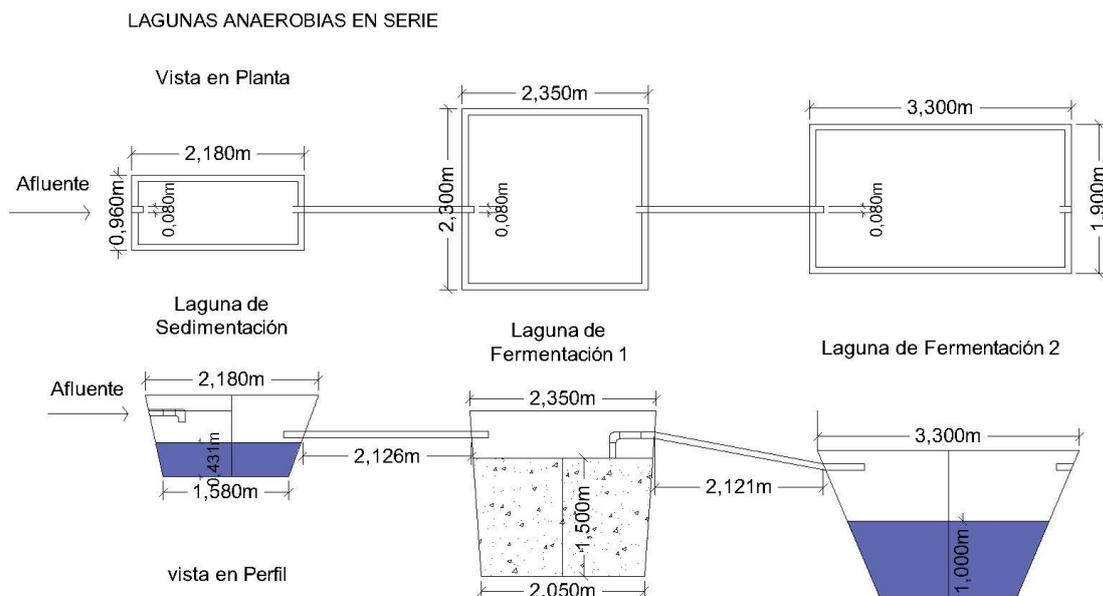
Fuente: Propia

La cantidad de café cereza que se lava por día en la época de producción va de los 500 kg a 2000 kg. Al usar un sistema de beneficio ecológico la dueña de la finca afirmó que aproximadamente por 1 Kg de café usa 1L de agua, por lo cual se necesita de 500 L a 2000 L de agua para el lavado de café en época de producción.

6.1.2.1 Caracterización de los sistemas de tratamiento de aguas mieles.

Este sistema de lagunas se denomina comúnmente como artesanal, debido a que a la hora de su construcción y manejo no tiene mayores consideraciones técnicas, y no requiere mayor cantidad de mano de obra. (Figura 13).

Figura 13. Esquema del Sistema Artesanal.



Fuente: Propia

Este modelo es sencillo, trata de aplicar los principios básicos de las lagunas anaerobias, donde se presentan procesos de sedimentación de sólidos y a su vez promover la estabilización de la materia orgánica sin embargo, la validación y manejo de este sistema para el tratamiento de aguas mieles no se han realizado (Figura 14)

Figura 14. Sistema de tratamiento artesanal.



Fuente: Propia

El sistema está compuesto por tres lagunas en serie: la primera tiene unas dimensiones de 2.18 m de largo, 0.96 m de ancho y 1 m de alto; revestida de plástico negro el cual no garantiza una buena impermeabilización. En esta se sedimenta la pulpa más gruesa y granos de café que lograron pasar la trampa de pulpas (Figura 15a).

Figura 15. a. Laguna de sedimentación con trampa de pulpas, b. Laguna del proceso Hidrolítico/ Acidogénico, c. Exterior de la laguna de metanogénesis d. Interior laguna de metanogénesis.



Fuente: Propia

La segunda laguna, posee unas dimensiones de: 2.35 m de largo, 2.30 m de ancho y 1.80 m de alto, al igual que la anterior está recubierta por plástico negro; una vez las aguas mieles se depositan en este sitio empieza el proceso de fermentación de las pectinas y demás polímeros que contiene el agua miel (Figura 15b).

La tercera y última laguna, posee unas dimensiones de 3.30 m de largo, 1.90 m de ancho y 3 m de altura, sin impermeabilización que lleva a posibles problemas de infiltración; en su interior se registraron botellas plásticas y tacos de guadua con el fin de promover crecimiento bacteriano que contribuya con el proceso de degradación de la materia orgánica (Figuras 15c y 15d).

La pulpa es transformada en abono orgánico por medio del proceso de compost. La pulpa de café proveniente del beneficio es llevada por un conducto metálico a un lugar donde se deposita para su manejo (Figura 16).

Figura 16. Compostera Finca El pensamiento.



Fuente: Propia

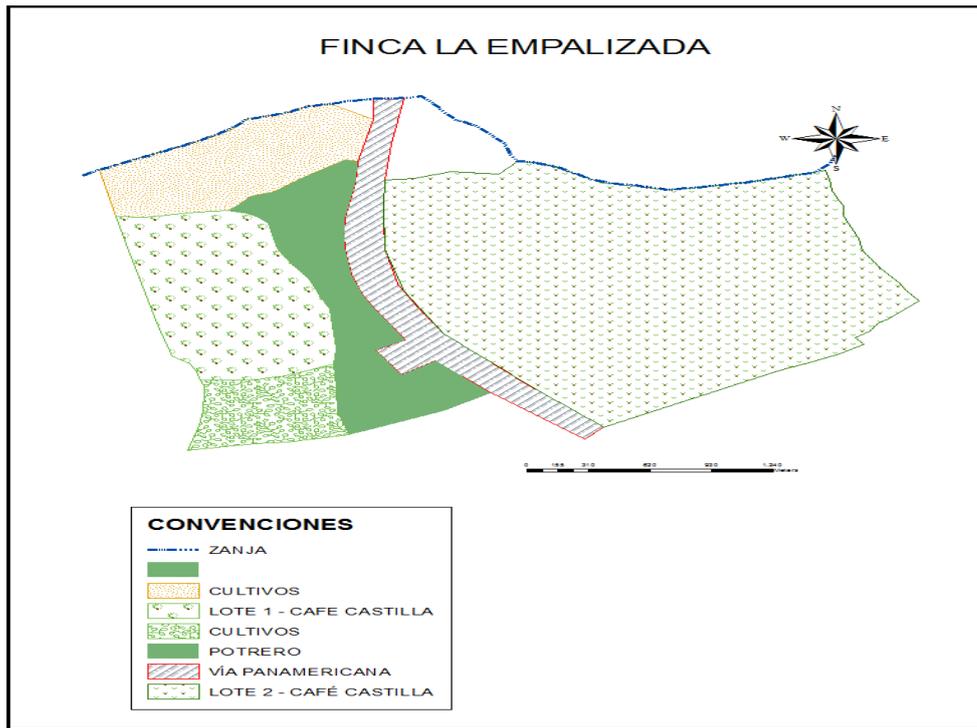
Se estima que la cantidad de pulpa que se genera en esta finca durante el proceso de beneficio es aproximadamente de 240 kg y 960 kg diarios.

6.1.3 Finca La Empalizada.

Consta de 2.0 ha sembradas de café, para un total de 18800 plantas de variedad castilla. En esta propiedad se produce un total de 310 arrobas de café pergamino al año.

En la figura 17 se muestra la distribución de los cultivos en esta finca.

Figura 17. Plano finca La Empalizada.



Fuente: Propia

Para el lavado de café cereza, los propietarios usan agua del acueducto veredal, el beneficiadero es tradicional con zaranda, conformado por: una tolva en madera, despulpadora mecánica y tanques tina (Figura 18).

Figura 18. Beneficiadero Tradicional con zaranda.



Fuente: Propia

En el segundo piso se encuentra ubicada la tolva donde se deposita el café cereza, el cual pasa por un pequeño conducto a la despulpadora mecánica de la cual se obtiene el café en grano, para seleccionar la pulpa y el café que aún no ha sido despulpado se usa la zaranda para evitar el uso de agua en este proceso y se garantiza el paso de café en grano a los tanques tina para el proceso de fermentación natural cuyo fin es retirar

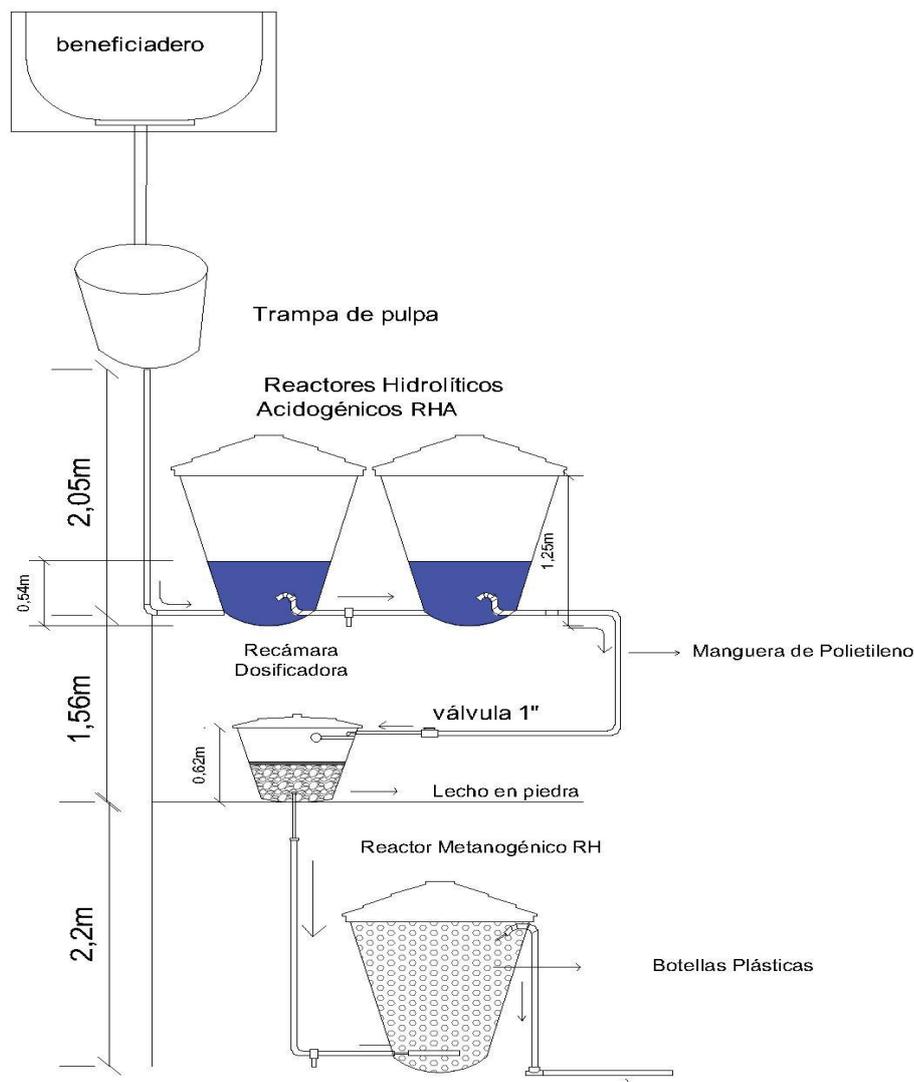
el mucílago, al día siguiente por medio del lavado del grano del café, el cual se debe hacer con agua limpia para retirar residuos e impurezas de los granos, con el fin de ahorrar agua en este paso, los productores solo hacen de 3 a 4 lavados. Los propietarios expresaron que para este proceso de beneficio por 1.0 kg de café cereza utilizan 5 L de agua aproximadamente.

En época de recolección se lava en promedio 1000 kg de café cereza por día y 1600 kg de café cereza en el día de máxima producción, usando en promedio de 5000 L a 8000 L de agua para el beneficio.

6.1.3.1 Caracterización de los sistemas de tratamiento de aguas mieles.

El sistema que tiene esta finca, se conoce como Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio-SMTA porque está compuesto por dos unidades que permiten la separación de fases de la digestión anaerobia: el reactor Hidrolítico/ Acidogénico y el Metanogénico (Cenicafé, 1999). El sistema anaerobio está compuesto, por un balde que sirve como trampa de pulpa que va hacia la compostera, después el agua miel llega al sistema de tratamiento SMTA (Figura 19).

Figura 19. Esquema del Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio- SMTA.



Fuente: Propia

Para la primera fase del tratamiento se adaptaron dos tanques de 1000 L de capacidad, calculados con el valor máximo de la cosecha para evitar que se rebosaran las aguas; estos tienen una altura de 1.25 m, diámetro exterior de 1.28 m y diámetro inferior de 0.91 m; donde llega el agua procedente del beneficiadero (Donde permanecen 48 horas). En su interior ocurren las acciones de hidrólisis y acidogénesis con los microorganismos presentes en el mucílago por lo cual no necesito inoculación (Figura 20).

Figura 20. Reactores Hidrolítico/ Acidogénico RHA.



Fuente: Propia

En esta fase son hidrolizados los polímeros complejos como polisacáridos y proteínas que hay en el mucílago del café, a compuestos orgánicos más simples como azúcares y aminoácidos los cuales terminaran convirtiéndose en su mayoría en acetatos ($\text{CH}_3\text{-COOH}$), dióxido de carbono (CO_2) e hidrógeno (H_2) (Guardia, 2012).

La segunda parte del proceso es el paso de las aguas residuales a una cámara dosificadora (Figuras 21a y 21b).

Figura 21. **a.** Cámara dosificadora en tanque de polietileno de 250 L, **b.** Parte interna de la cámara dosificadora, **c.** Parte exterior del reactor metanogénico, **d.** Botellas plásticas y microorganismos dentro del reactor metanogénico.



Fuente: Propia

La cámara dosificadora utiliza los principios de filtración lenta, reteniendo materia orgánica que no alcanza a hidrolizarse en el reactor RHA (Vega y Martínez, 2011), para lo cual se adaptó un tanque negro de polietileno de 250 L de capacidad, con altura de 0.73 m, el tiempo de retención es de 48 horas. Se instaló un marco colector de polietileno que transporta las aguas al reactor metanogénico, y el lecho filtrante se llenó con grava. Para evitar que la pulpa que aun saliera del reactor RHA generará taponamientos, se instaló una malla mosquitera y finalmente un flotador de PVC para mantener el nivel y flujo constante hacia la última etapa.

Para finalizar el tratamiento se halla el Reactor Metanogénico RM, se utilizó un tanque de 1000 L, altura 1.25 m, diámetro exterior 1.28 m y diámetro inferior de 0.91 m, el tiempo de retención en este reactor fue de 48 horas (Figuras 21c y 21d). Este reactor funciona como un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) con relleno de botellas plásticas que son el soporte de los microorganismos metanogénicos (inoculados con un mes de anterioridad) que convierten los productos de la fermentación acida en dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) (Guardia, 2012).

El efluente final, es conducido a un gradual que hace parte de la finca (figura 22).

Figura 22. Sitio de recolección de las aguas mieles tratadas.



Fuente: Propia

La pulpa de café se deposita en la compostera donde es transformada en abono orgánico, evitando la acumulación de residuos sólidos y haciendo buen uso de ellos (Figura 23).

Figura 23. Compostera Finca La Empalizada.



Fuente: Propia

La cantidad de pulpa del café que se desprende durante el proceso de beneficio es de aproximadamente entre 480 kg a 768 kg, esta pulpa es transportada de manera inmediata a través de un conducto metálico a la compostera.

6.2 ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LAS MUESTRAS DE AGUAS MIELES.

En el anexo 1 se presentan el total de los resultados de los parámetros evaluados para cada finca, durante el periodo de muestreo y a continuación se muestran los estadísticos descriptivos para la entrada y salida de cada sistema de tratamiento.

Cuadro 4. Estadísticos descriptivos de las variables fisicoquímicas del líquido afluente y efluente de cada unidad productiva.

Parámetro		SULTANA		PENSAMIENTO		EMPALIZADA	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
	N	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
DBO ₅ (mg/L)	\bar{X}	12178,25	6485,75	4358,50	4435,75	2587,50	178,00
	Ds	9048,23	1695,96	3225,64	2612,14	1467,52	46,90
	CV	74,30	26,15	74,01	58,89	56,72	26,35
SST (mg/L)	\bar{X}	27845,88	13560,63	1260,25	613,75	7690,65	833,00
	Ds	16371,75	10879,46	74,23	371,09	1104,08	607,97
	CV	58,79	80,23	5,89	60,46	14,36	72,99
Conductividad (μ/cm)	\bar{X}	2495,00	3475,00	3830,00	3377,50	672,84	749,50
	Ds	152,64	208,72	173,20	345,86	532,68	77,05
	CV	0,061	0,06	0,045	0,102	0,791	0,102
OD (mg/L)	\bar{X}	2,05	2,04	1,65	1,73	1,01	1,35
	Ds	1,77	1,09	1,23	1,57	0,08	0,09
	CV	86,67	53,65	76,45	90,80	7,49	6,97
pH	\bar{X}	5,10	4,24	5,27	5,44	3,96	5,04
	Ds	0,36	0,45	1,65	1,74	0,07	1,42
	CV	7,01	10,67	31,39	31,92	1,75	28,12
Temp (°C)	\bar{X}	24,85	25,18	26,28	26,10	25,70	25,88
	Ds	0,69	0,68	0,79	0,88	0,80	0,68
	CV	2,76	2,70	3,02	3,38	3,13	2,65

Como se registra en el cuadro anterior, el coeficiente de variación fue mayor en la entrada de los tratamientos que en el efluente, debido a las diferencias en los volúmenes de café beneficiado a lo largo del estudio, mientras que en la salida hay mayor estabilidad por la actividad biológica en cada compartimento de los sistemas.

El examen de las figuras del histograma y gráfico Q-Q mostró que la mayoría de los parámetros evaluados tuvieron una apariencia de comportamiento normal, conjuntamente los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk confirman que no se presenta una distribución de no normalidad (anexo 2).

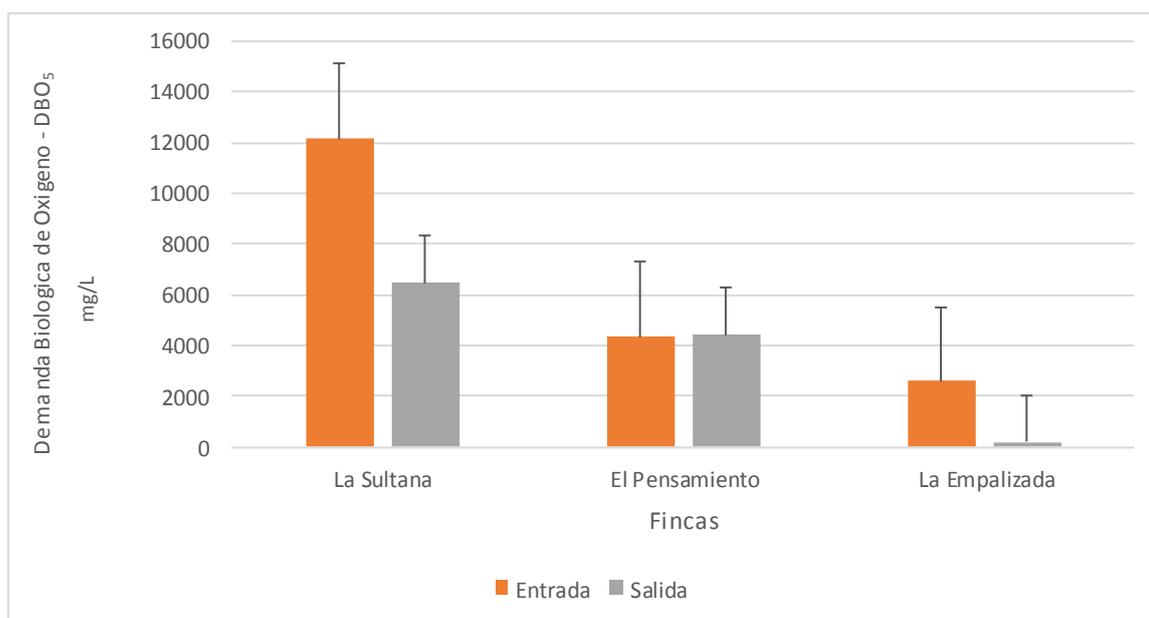
A continuación se describirán las variaciones entre sistema y finca evaluada.

6.2.1 Demanda Biológica de Oxígeno- DBO₅

En la Figura 24 se describe el comportamiento de la DBO₅, donde se registran mayores valores para La Sultana a diferencia de La Empalizada, debido al tipo de beneficiadero que concentra o diluye los nutrientes presentes en la muestra.

Al realizar el análisis de la prueba t pareada (entrada-salida) se determinó que la finca La empalizada ($p=0.043$) presentó diferencia significativa indicando la disminución de la carga orgánica demostrando que el sistema SMTA fue capaz de adaptarse al sustrato y remover la mayor parte de la carga orgánica.

Figura 24. Valores promedios de DBO₅ para las unidades productivas.



Las fincas La Sultana ($p=0.22$) y El Pensamiento ($p=0.968$) no presentaron diferencias significativas probando que en los sistemas mixto y artesanal no hay una disminución eficiente de DBO₅ lo cual indica fallas en los procesos anaerobios encargados de la transformación de la materia orgánica. Unas de las razones en el caso las lagunas de la finca El Pensamiento es la falta de inoculación, según Guzmán y et. (2014) cuando los sistemas de tratamiento no han sido inoculados estos operan como lechos filtrantes y no como digestores, por lo cual se presentaron bajas eficiencias de remoción de DBO₅.

En estudios realizados por Guardia et. (2014); Cadavid (1994) resaltan la importancia del periodo de arranque, durante el cual se controlan las variables como caudal, carga orgánica y tiempo de retención con el fin de que los reactores se aclimaten y los microorganismos tengan una alta tasa de crecimiento que les permita llevar a cabo los procesos biológicos de manera eficiente. Guzmán et. (2014) en su investigación sobre la eficiencia de remoción de DBO₅ Y SS de un sedimentador y un filtro para el tratamiento de aguas mieles simularon las condiciones de la mayoría de fincas cafeteras las cuales no permiten un periodo de aclimatación e inoculación de los sistemas, como resultado se presentó bajas eficiencias de remoción para DBO₅ durante toda la operación del sistema; este mismo comportamiento se presentó en el caso de los sistemas mixto y artesanal los cuales al terminar el periodo de cosecha y beneficio los sistemas no operan por tres o cuatro meses aproximadamente y al iniciar nuevamente sus actividades no cuenta con un periodo de arranque.

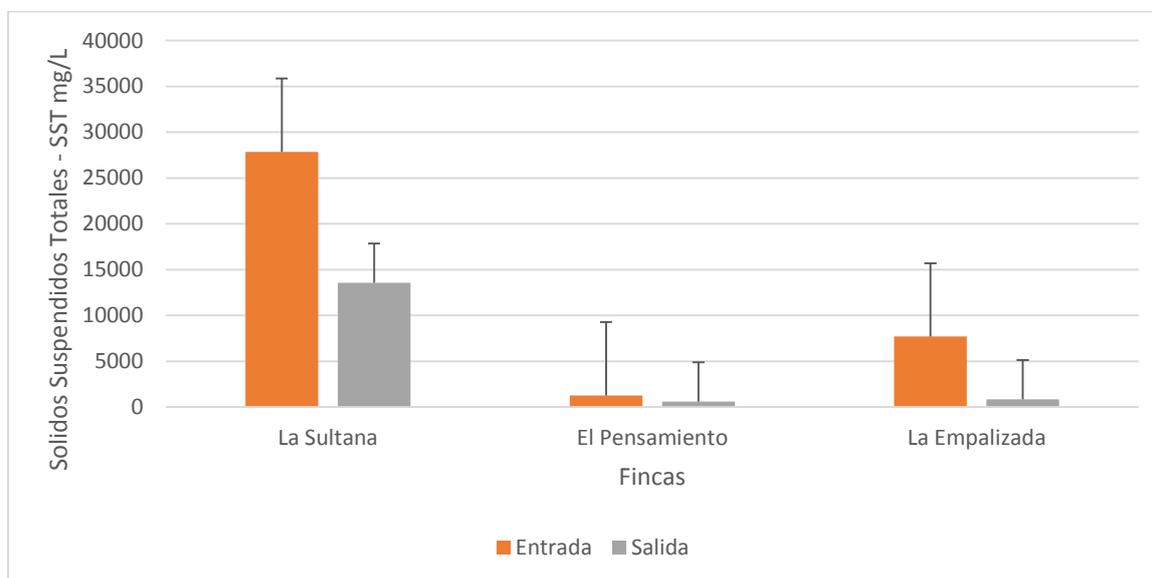
De acuerdo a la resolución 0631 de 2015, el único sistema que cumple con los parámetros establecidos es el sistema SMTA debido a que la DBO₅ del efluente es menor a los 400 mg/L para beneficio tradicional.

6.2.2 Sólidos Suspendidos Totales - SST

Corresponde a la cantidad de material (sólidos) que es retenido después de realizar la filtración de un volumen de agua. Es importante como indicador puesto que su presencia disminuye el paso de la luz a través de agua evitando su actividad fotosintética en las corrientes, importante para la producción de oxígeno (Cárdenas y Ortiz, 2014).

En la figura 25, se exponen las variaciones de este parámetro por cada unidad productiva, aquí queda en evidencia las altas concentraciones de SST que contienen las aguas residuales producto del beneficio del café.

Figura 25. Valores promedios de SST para las unidades productivas.



La remoción de los sólidos suspendidos es importante porque, mientras que solo una fracción de la materia orgánica encontrada en los sistemas acuáticos puede adsorberse sobre los sólidos en suspensión, la superficie del sólido puede estar completamente recubierta de materia orgánica y, por lo tanto, estos agregados presentan las propiedades características de la materia orgánica que los recubre (Marín, 2003).

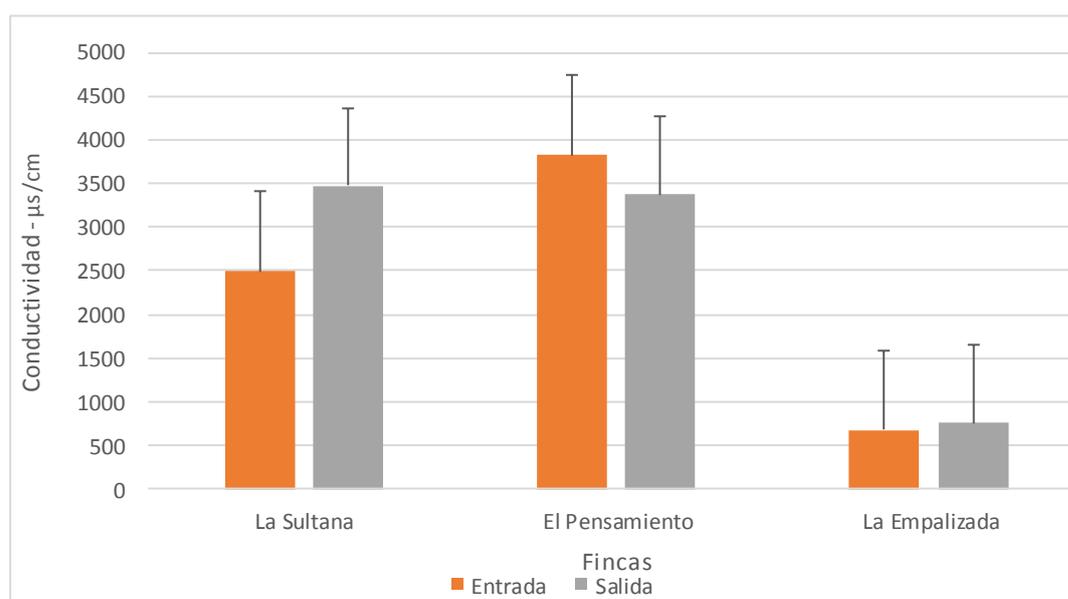
Como se observa en la figura 25 y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la prueba t donde se presentan diferencias significativas La Sultana ($p=0.04$), El Pensamiento ($p=0.023$) y La Empalizada ($p=0.004$); los sistemas de tratamiento muestran resultados favorables en la remoción de sólidos suspendidos, debido a que cada compartimiento cumple la función de sedimentador eliminando en gran medida el mucílago que entra producto de la fermentación del café cereza. Por otro lado la fase metanogénica descompone la materia insoluble o de bajo peso que no se retuvo en los procesos anteriores.

Sin embargo al comparar los resultados de SST en el efluente con la normativa legal vigente, se asume que el único sistema que cumple con el límite permisible es el sistema artesanal.

6.2.3 Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$).

La conductividad del agua es un valor muy utilizado para determinar el contenido de sales disueltas en ella. Descargas de aguas residuales suelen aumentar la conductividad debido al aumento de la concentración de Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} u otros iones.

Figura 26. Valores promedios del parámetro de conductividad en $\mu\text{s}/\text{cm}$.



Como se puede observar en la figura 26 los valores para la finca La Sultana y El Pensamiento se registran promedios superiores a los $2000 \mu\text{s}/\text{cm}$, tanto en la entrada como en la salida y de acuerdo a la prueba pareada estas fincas presentaron diferencias significativas de $p=0.001$ y $p= 0.043$ respectivamente. Según James et, (1982) una agua permisible para riego tienen registros de conductividad entre los 700 a $2000 \mu\text{s}/\text{cm}$, valores superiores indican un agua de tipo dudoso y no se aconseja su uso; la resolución Colombiana 2117 de 2007 indica un límite permisible de $1000 \mu\text{s}/\text{cm}$.

Teniendo en cuenta lo anterior el efluente de los sistemas de tratamiento no cumple con la normatividad Colombiana indicando que no funcionan de manera adecuada para la remoción de sólidos disueltos. El uso de fertilizantes y la elevada carga orgánica que contiene este tipo de aguas podría ser una de las causas por la cual se presentan estos altos valores de conductividad ya que en los procesos biológicos hay una alta producción de NO_3^- y SO_4^{2-} que contribuyen al aumento de iones en el agua.

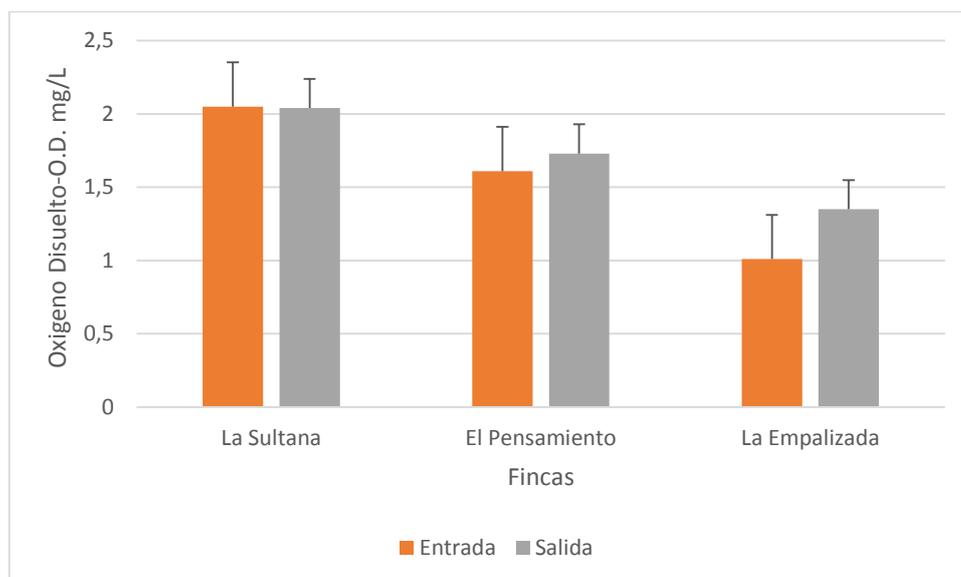
La finca la Empalizada presento una significancia $p= 0.810$ mostrando que no hay diferencia significativa además que presenta un aumento en el efluente respecto a la entrada del tratamiento sin embargo, presenta valores promedios inferiores a los $1000 \mu\text{s}/\text{cm}$, indicando que el agua que sale del sistema de tratamiento cumple con los parámetros dispuestos por la resolución 2117 de 2007. La razón por la cual se presentar valores más bajos de conductividad a la entrada del sistema se debe a que la carga orgánica se diluye debido a que el beneficio tradicional usa más agua potable, la cual tiende a presentar valores más bajos de conductividad.

6.2.4 Oxígeno Disuelto – O.D

La digestión anaerobia es uno de los procesos más antiguos empleados en la estabilización de fangos. En este proceso se produce la descomposición de materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno molecular (Metcalf y Eddy, 1997).

La figura 27 muestra concentraciones de oxígeno disuelto, que como era de esperarse fueron bajas, por la alta actividad microbológica, la cual consume el O.D con el fin de realizar los procesos de degradación de materia orgánica como se mencionó anteriormente.

Figura 27. Valores promedios del parámetro de oxígeno disuelto para las unidades productivas.



De acuerdo a los criterios de calidad estipulados en el artículo 45 del decreto 1594 de 1984, el agua debe tener una concentración mínima de 5mg/L de oxígeno disuelto para su destinación en la preservación de la flora y fauna. Como se puede observar en la figura 27 ninguno de los tres sistemas de tratamiento superan este valor lo cual puede afectar los diferentes tipos de vida que se encuentran en un cuerpo de agua receptor.

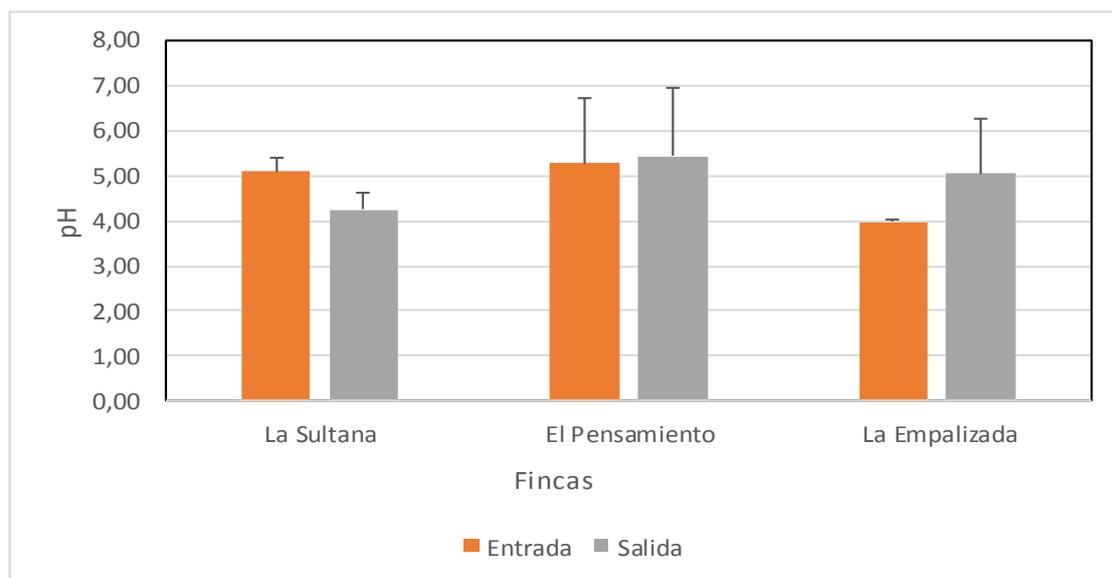
En la finca La Empalizada se observa un incremento de oxígeno disuelto más notorio, resultado que es confirmado por la prueba t la cual arrojó una significancia $p=0.000$, esto puede deberse a que su funcionamiento arrancó un mes antes del primer muestreo aproximadamente por lo tanto la reproducción de los organismos metanogénicos aún no llegaba a su punto más alto. A diferencia de la finca La Sultana y El Pensamiento cuyos valores obtenidos ($p=0.987$, $p=0.528$) respectivamente no muestran cambios significativos.

- Los resultados fueron comparados con el decreto 1594 de 1984 debido a la falta de información referente a este parámetro en la resolución 0631 de 2015.

6.2.5 pH

Como se puede observar en la figura 28 se obtuvo una variación en los valores de pH a la entrada y salida del sistema de tratamiento de las aguas mieles, indicando un aumento de los valores de pH del efluente con respecto a los valores de entrada sin embargo, al ser valores inferiores a 6 unidades indica que aún hay presencia de AVG, H^+ que generan la acidez del agua. A diferencia de las otras dos fincas la unidad productiva La Sultana tuvo un proceso inverso donde los valores del efluente presentaron una disminución del pH respecto a la entrada, este comportamiento queda en evidencia al aplicar la prueba t la cual mostró una diferencia significativa $p=0.008$.

Figura 28. Comparación de los valores promedios de pH entre las tres fincas productoras.



La razón por la cual se presenta la acidez de las aguas mieles es a causa del proceso de fermentación natural de estas aguas donde se retiran compuestos como ácidos orgánicos propios del proceso fermentativo de los azúcares y de la degradación de la pectina del mucílago que disminuye el pH (Cárdenas y Ortiz, 2014).

En base a la prueba t, no se obtuvieron diferencias significativas para la fincas el Pensamiento ($p= 0.274$) y La Empalizada ($p=0.233$). El motivo por el cual se mantuvo la acidez durante el proceso de tratamiento en las unidades productivas pudo ser causa de altas concentraciones de AVG, debido a las altas cargas orgánicas que entran a estos sistemas. Valores inferiores a 6 unidades según Guardia (2012) inhibe no solo a las bacterias metanogénicas sino también limita la producción de AVG, lo cual afecta los procesos de digestión anaerobia. En una de sus investigaciones para el tratamiento de aguas mieles con un reactor UASB, cuando los valores de acidez fueron inferiores a 5.5 la producción de AVG fue inhibida, en contraste Guardia señala que en investigaciones realizadas por Elefsiniotis y Oldham (1994) reportaron que a pH entre 4.3 y 5.2 este proceso no se ve afectado. Teniendo en cuenta lo anterior se podría decir que para los sistemas de tratamiento estudiados los bajos pH no inhibieron la producción de ácidos volátiles grasos indicando que se estaban llevando a cabo los procesos biológicos anaerobios y por lo tanto se presenta descomposición de la materia orgánica que entra a los sistemas de tratamiento.

La disminución del pH al final del tratamiento metanogénico como en el caso de la finca la Sultana, se debe a la sobrecarga orgánica que afecta la actividad metanogénica, por lo cual no se puede eliminar el hidrógeno y los ácidos grasos volátiles (AGV) producidos, resultando en una acumulación de estos últimos y por ende una disminución de la capacidad amortiguadora del sistema y disminución del pH (Guardia, 2012).

Se esperaba para el caso del sistema SMTA que el efluente presentara valores superiores a 6 unidades debido a que los estudios realizados por Cenicafé (2006) al final del tratamiento las aguas presentan registros iguales o superiores a este valor. Además la separación de dos fases, que es la base del diseño de este sistema, aumenta la estabilidad del proceso porque hay un mejor control de los procesos Acidogénico con

el fin de amortiguar el pH a las poblaciones metanogénicas del segundo reactor (Guardia et, 2014) sin embargo, los valores del efluente durante todo el estudio estuvo en promedio a 5 unidades, hay varias variables que pudieron influir en este comportamiento como: un tiempo insuficiente del periodo de aclimatación y arranque del reactor metanogénico el cual solo duro alrededor de un mes y no se llevaba un control adecuado de variables como el caudal y la sobrecarga orgánica; lo cual pudo incidir en la inhibición de la actividad metanogénica, resultando en una acumulación de ácidos orgánicos que impidió una adecuada estabilización del pH.

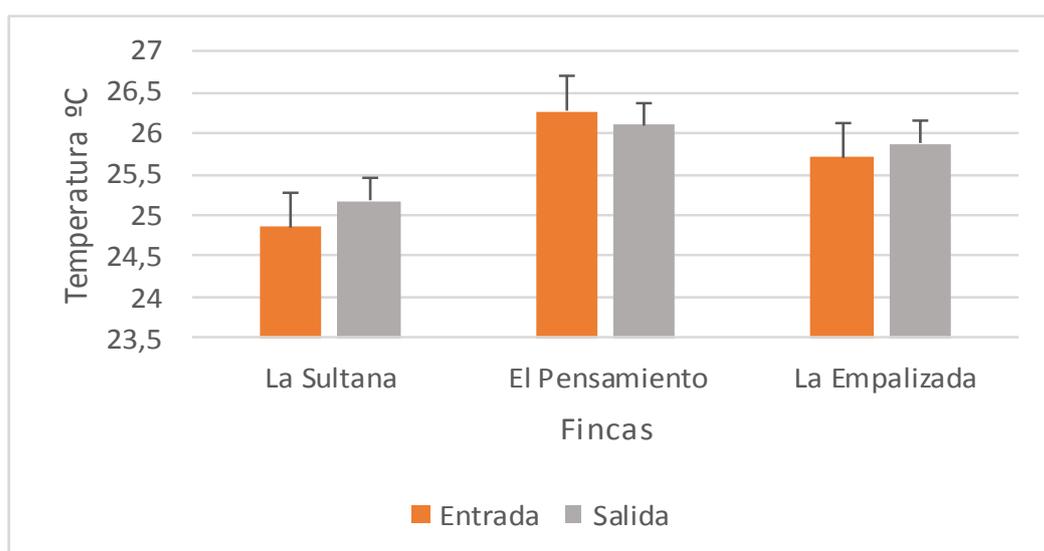
Si se compara los resultados obtenidos en las tres fincas con la resolución 0631 de 2015, los valores son inferiores al rango establecido, indicando alta acidez en el efluente que podría afectar la calidad hídrica del cuerpo receptor.

6.2.6 Temperatura

La temperatura es un factor también muy importante en cualquier tipo de tratamiento de aguas residuales, puesto que influye sobre las propiedades físicas del líquido objeto de tratamiento, y actúa sobre la capacidad e intensidad de las acciones biológicas, químicas y bioquímicas, y sobre la capacidad de asimilación de los suelos cuando estos sean objeto de vertido. Existe un coeficiente térmico básico que es diferente para cada tipo de tratamiento del agua residual, y varía también con las condiciones físicas, químicas, biológicas y ecológicas de cada situación (Seoanez, 1999).

La figura 29 permite observar los resultados de temperatura los cuales muestran variaciones entre los tres sistemas. En la finca La Sultana se obtuvo un valor de significancia $p=0.032$, indicando que se presentan diferencias de las medias de entrada respecto a la salida debido a que los muestreos fueron hechos en las primeras horas del día mientras en la finca El Pensamiento y La Empalizada se realizaron en horas cercanas al medio día explicando que sus valores sean mayores.

Figura 29. Valores promedios del parámetro de temperatura en las tres unidades productivas.



De acuerdo a estudios realizados por Ortiz et. (2016) los efectos de la temperatura mesofílica para el proceso cinético durante la fase metanogénica de la digestión anaerobia, conduce a que las reacciones metabólicas referente al crecimiento de dichos

consorcios microbianos experimentados a temperaturas comprendidas entre 27°C y 34°C, muestran una alta tasa de crecimiento poblacional.

En algunos casos, el mantenimiento de estos límites resulta difícil y exige un cuidadoso cálculo y una regulación automática por completo de los aparatos calefactores, mediante termostatos situados en el interior de los digestores (Ferrero, 1974), estos procedimientos tienen como desventaja el incremento en los costos de los sistemas, sin embargo los valores de temperatura obtenidos en este estudio se encuentran cercanos al rango mencionado anteriormente lo cual favorece el crecimiento bacteriano en los reactores y por ende el porcentaje de remoción de materia orgánica se incrementa; sin necesidad de implementar estos dispositivos.

De acuerdo a la prueba t se obtuvo que las fincas Pensamiento ($p=0.367$) y empalizada ($p=0.275$) no obtuvieron diferencias significativas, lo que indica que su temperatura promedio se mantuvo constante.

6.2.7 Comparación estadística entre los sistemas de tratamiento.

El comportamiento de los tres sistemas de tratamiento de aguas mieles, se evaluó mediante una prueba ANOVA de los parámetros evaluados: DBO₅, SST, Conductividad, O.D., pH, temperatura, en la entrada. Los resultados de la ANOVA están recogidos en los anexos 4 y 5, ellos revelan que no hubo diferencias entre los sistemas, excepto en SST ($p=0.008$) y conductividad ($p= 2.477E-07$). Del mismo modo se aplicó la prueba para la salida, en donde los únicos parámetros que tuvieron diferencia significativa fueron: DBO₅ ($p= 0.002$), SST ($p=0.027$) indicando la variabilidad en la operación y eficiencia en cada tratamiento.

Con el objetivo de determinar cuál de los tres sistemas de tratamiento fue más eficiente se aplicó la prueba de comparación múltiple Duncan (anexos 4 y 5), cuyos resultados mostraron que no hubo diferencias significativas tanto a la entrada como a la salida, esto se puede explicar por el escaso número de datos lo cual genera un alto rango de dispersión.

6.3 PORCENTAJE DE REMOCIÓN PARA DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO₅) Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST).

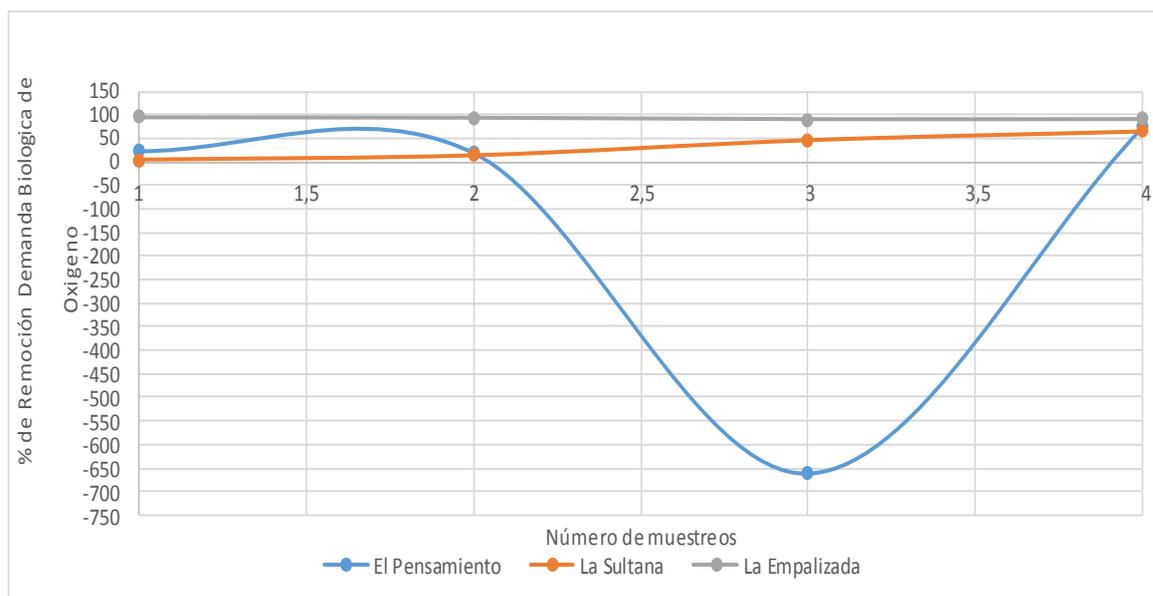
Se calcularon los porcentajes de remoción para determinar la eficiencia de los tres sistemas de tratamiento de aguas mieles para remover demanda biológica de oxígeno (DBO₅) y sólidos suspendidos totales (SST) a lo largo de los cuatro muestreos.

6.3.1 Porcentaje de remoción para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)

Para el caso del sistema modular de tratamiento anaerobio SMTA, que se encuentra en la finca La Empalizada, se ha determinado eficiencias mayores al 90% manteniéndose casi constante en los cuatro muestreos, permitiendo demostrar el funcionamiento de los procesos anaerobios en los dos reactores y la utilidad de este sistema de tratamiento para la remoción de carga orgánica provenientes de las aguas del beneficio del café, debido a que logran cumplir con los valores permitidos en la resolución 0631 de 2015 de la legislación colombiana.

En la figura 30 se muestra la remoción de Demanda Biológica de Oxígeno DBO₅ en los tres sistemas.

Figura 30. Porcentaje de remoción de Demanda Biológica de Oxígeno DBO₅ en las tres unidades productivas.



Para el caso del sistema mixto de la unidad productiva La Sultana, la eficiencia va aumentando durante los muestreos sin embargo, solo alcanza un porcentaje de remoción del 65%, indicando que este sistema a pesar de que logra disminuir cierta cantidad de materia orgánica, no está en la capacidad de remover cargas orgánicas elevadas que salen del beneficio Belcosub; una situación parecida se resalta en la investigación de Cadavid (1994) donde estudió las eficiencias de remoción de un sistema séptico-FAFA, destacando que los reactores biológicos presentaban limitaciones para tratar directamente desechos con altos contenidos de DQO y DBO provenientes del beneficio Belcosub, por lo tanto recomendaba que las aguas que salen de este tipo de beneficio debían ser diluidas para bajar su concentración por medio de la recirculación o un sistema de pre tratamiento.

Otra de las causales de las bajas eficiencias para DBO₅ es la falta de un periodo de aclimatación y arranque tanto del reactor metanogénico como de todo el sistema mixto, estas variables Guardia (2012) y Guzmán et. (2014) han demostrado que son la base para que funcione de manera eficiente y halla estabilización en los sistemas anaerobios que tratan este tipo de aguas.

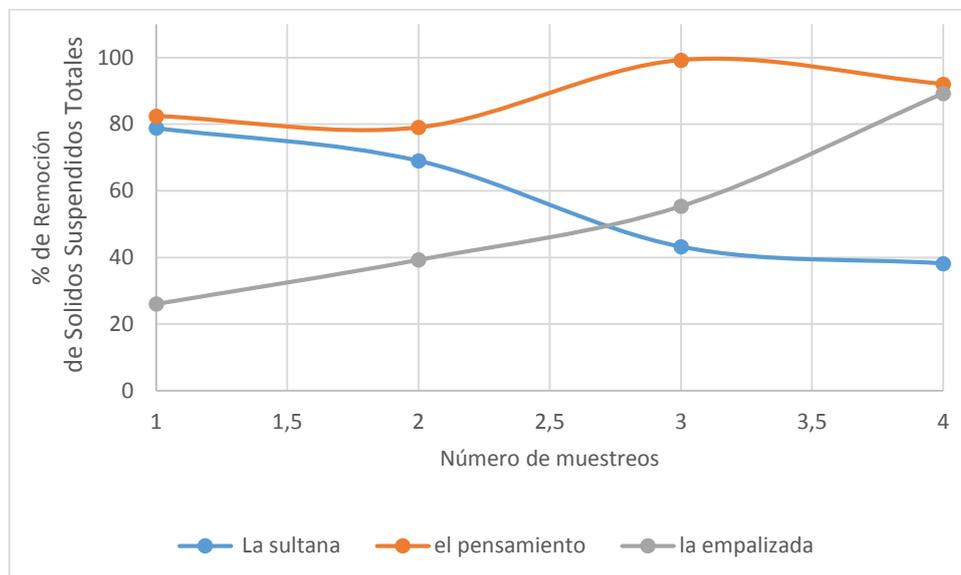
En el caso del sistema artesanal, se ve un comportamiento que indica bajas eficiencias debido a posibles fallas en el diseño de las lagunas, otra de las causas es el hecho de que solo se presenta actividad acidogénica, la falta de inoculación en la última laguna interrumpe el proceso de actividad biológica que termina afectando los procesos anaerobios y por ende decae la eficiencia de transformación de materia orgánica.

6.3.2 Porcentaje de remoción para Solidos Suspendedos Totales (SST)

La finca El Pensamiento presenta remociones aproximadas al 80% o mayores, esto se debe a que las tres unidades que forman este sistema están funcionando como sedimentadores, las variaciones pueden ser resultado de épocas de baja y alta producción.

En la figura 31 se observan las fluctuaciones existentes en lo que respecta a la remoción de sólidos suspendidos totales durante el tiempo de estudio en los tres sistemas de tratamiento.

Figura 31. Porcentaje de remoción de Sólidos Suspendidos Totales SST y número de muestreos en las tres unidades productivas.



Los sólidos en suspensión presentes en las aguas residuales, están constituidos por materia orgánica e inorgánica en forma particulada. Una fracción de estas partículas es capaz de decantar por su propio peso (sólidos sedimentables), mientras que otras lo hacen por la acción de microorganismos que se adhieren a su superficie, formando flóculos de mayor densidad que el agua. De esta forma, progresivamente, se va formando una capa de lodos en el fondo de las lagunas, susceptible de ser degradada por los microorganismos que en ellas se desarrollan. (Alianza por el agua, 2008). Es así como se explica el alto rendimiento del sistema artesanal comparado con el sistema SMTA y mixto.

En el sistema mixto de la finca La sultana el porcentaje de remoción disminuye con el paso del tiempo porque el beneficio con Belcosub produce altas concentraciones de sólidos y aunque cuente con una rejilla que impide el paso de pulpa gruesa, la falta de mantenimiento de las unidades provoca rebose y mal funcionamiento del sistema reduciendo su eficiencia por la acumulación de lodos.

El sistema SMTA de la finca La empalizada a pesar de no presentar buenos resultados en los primeros muestreos, alcanzo remociones superiores al 80% al final del estudio, puesto que su periodo de arranque fue de un mes antes de la época de cosecha, lo cual muestra una relación proporcional entre la aclimatación y remoción de los sólidos. Esto indica que si se mantienen estas condiciones el sistema podría seguir funcionando con porcentajes de remoción altos.

6.4 ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO

El objetivo de estos sistemas de tratamiento de aguas del café no solo es disminuir el impacto ambiental negativo que genera esta actividad agroindustrial, también busca ofrecer un beneficio al productor por ende es importante dar a conocer los costos económicos de los tres sistemas de tratamiento y cual aporta mejores beneficios.

En los cuadros 5, 6 y 7 se presentan los costos a diciembre de 2016, de cada uno de los componentes de los tres sistemas de tratamiento de las aguas mieles.

6.4.1 Sistema Mixto

A continuación se presenta un cuadro con los componentes del sistema mixto y el costo de cada uno de ellos.

Cuadro 5. Costos construcción del sistema mixto.

Materiales	Costos \$ colombianos
Tubería 8" Polietileno naranja y accesorios	106.000
2 tanques tipo ovoide 1000 L y	1.253.960
Plástico negro calibre 6	50.000
Mano de obra (3 jornales)	
3 trabajadores	360.000
TOTAL	1.719.960

Se puede observar que los costos más elevados incurren con los dos tanques tipo ovoide, los cuales serán usados para el sistema IMHOFF y el filtro FAFA. La durabilidad de estos tanques es aproximadamente de 10 años con buen mantenimiento y cuentan con una garantía de 5 años por defecto de fabricación. Una vez en funcionamiento el sistema mixto logró remoción del 65% para DBO₅ y 50 % para SST sin embargo, en momentos de máxima producción este sistema colapsa debido a que el volumen de los tanques no se adaptó para la cantidad de café que se estaba procesando y disminuye su eficiencia hasta en un 40% para la remoción de SST. Este sistema con buen mantenimiento evita malos olores y la propagación de vectores.

6.4.2 Sistema Artesanal

En el cuadro 6, se presentan los costos de los componentes para la realización del sistema artesanal.

Cuadro 6. Costos construcción del sistema artesanal.

Materiales	Costos \$ colombianos
Plástico negro o blanco calibre 6	118.500
Tubo - PVC 2"	28.000
Codos PVC 2"	4.650
Tee PVC 2"	9.600
Tubería y accesorios (2")	42.250
Mano de obra (20 jornales)	520.000
TOTAL:	680.750

* Para este caso no se estimó el costo del lecho filtrante debido a que se usaron tacos de guadua los cuales se obtuvieron de la misma finca.

Al observar el cuadro 6, se puede deducir que para la realización de este sistema, los mayores costos son: para mano de obra y el plástico que recubrirá las lagunas. Este es un sistema de tratamiento de aguas de bajo costo y fácil construcción lo cual lo hace propicio para medianos caficultores sin embargo, presenta malos olores en especial en

época de verano y de máxima producción, creando molestias en los alrededores de las fincas. Si no cuenta con un mantenimiento constante hay propagación de vectores, el plástico negro que cubre las lagunas se deteriora fácilmente por lo que requiere mayor inversión con el tiempo. Los porcentajes de remoción son 80 % y 40 % para SST y DBO₅ respectivamente, hay que tener en cuenta que los altos porcentajes de remoción para SST se deben a que las lagunas de tratamiento, están operando como sedimentadores y lechos filtrantes.

6.4.3 Sistema modular de tratamiento anaerobio-SMTA

En el cuadro 7, se presenta los componentes necesarios para la construcción de este sistema y el valor de cada uno de ellos.

Cuadro 7. Costos construcción del sistema modular anaerobio-SMTA.

Materiales		Costos \$ colombianos
Reactor Hidrolítico/ Acidogénico		
Tubería y accesorios		321.600
2 tanques de polietileno 1000L		747.504
Recámara dosificadora		
Accesorios		120.000
Tanque polietileno de 250 L		123.600
Reactor Metanogénico		
Tubería y accesorios		250.000
Botellas plásticas*		20.000
Tanque polietileno de 1000 L		373.752
Mano de obra (2 jornales)		
3 trabajadores		250.000
Mampostería		80.000
TOTAL		2.035.856

* Este es un costo aproximado del lecho filtrante, sin embargo para este estudio este material fue reciclado y no tuvo ningún costo.

Al igual que en el sistema mixto los mayores costos se relacionan con los tanques de polietileno los cuales para este caso, cumplirían la función de los reactores Hidrolítico/ Acidogénico y Metanogénico, aunque este sistema es más costoso, los beneficios que ofrece son altos porcentajes de remoción superiores al 80 % y 90% para SST y DBO₅ respectivamente. Este sistema evita los malos olores, la propagación de vectores, su mantenimiento es sencillo y los reactores al ser de polietileno tienen una vida media de 35 años, ofreciendo una reducción en costos a largo plazo.

6.5 ALTERNATIVAS DE MANEJO

Con el fin de hacer un buen uso del recurso hídrico en las fincas cafeteras evaluadas y mejorar las condiciones de los sistemas de tratamiento de aguas mieles del café, es necesario la ejecución de las buenas prácticas agrícolas (BPA), las cuales son reconocidas como mecanismos para reducir los riesgos relacionados con el uso de plaguicidas, para velar por la salud pública, seguridad y garantiza la protección del medio ambiente, en especial del suelo y recurso hídrico (Cenicafé, 2006).

Analizando los sistemas de tratamiento de las aguas residuales del café en las tres unidades productivas, se determinó que las falencias en estos sistemas se deben a la falta de capacitación, control, evaluación y ejecución de buenas prácticas agrícolas.

6.5.1 Finca La Sultana

En el caso de la finca La Sultana el sistema mixto no cuenta con señalización de la zona donde se encuentra el tratamiento de aguas, no hay un mantenimiento constante y adecuado generando la proliferación de vectores y en época de máxima producción los sistemas se rebosan debido a que no fueron diseñados para tratar los volúmenes de agua que se generan durante el proceso de beneficio del café, afectando el correcto funcionamiento de estos sistemas.

Como solución a las falencias que presenta esta unidad productiva se presentan unas medidas relacionadas con las buenas prácticas agrícolas para que sean aplicadas a corto y largo plazo

A corto plazo

- Realizar limpiezas periódicas de la tubería para evitar taponamientos ya sean por materia orgánica o vectores como roedores y gusanos, que pueden interferir en el flujo de las aguas mieles y transmitir enfermedades a quienes trabajan en la zona. Además estas acciones servirán para verificar en qué estado se encuentra la tubería y cambiarla si es necesario.
- Implementar y revisar frecuentemente la trampa de pulpas para un mejor funcionamiento de los sistemas.
- Se recomienda cercar el área donde están los sistemas de tratamiento de aguas mieles para evitar posibles accidentes.

A largo plazo

- La capacitación para los encargados de las fincas, las cuales deberán ser realizadas por entidades o personas competentes y deberán llevar un registro que permita llevar un control sobre estas fincas.
- Buscar un proceso económico y ambientalmente viable para el tratamiento de los lodos y natas que salen de cada sistema cuando se hace el mantenimiento o termina la época de cosecha.

6.5.2 Finca El Pensamiento

La finca El Pensamiento presenta inconvenientes con las lagunas anaerobias: hay un deterioro de los componentes de las lagunas, la proliferación de plagas y vectores como roedores, zancudos y moscas, además se presentan malos olores en época de cosecha debido a que no hay mantenimiento adecuado y constante, afectando la eficiencia del sistema. El lugar donde se deposita la pulpa antes de ser llevada al compostaje también se ha convertido en un lugar de proliferación de vectores como los moscos. Por estas razones se puede decir que hay riesgos de salud y seguridad para los productores y trabajadores. Con el fin de mejorar las condiciones de esta unidad productiva las alternativas que se recomiendan son:

A corto plazo:

- Se hace necesario la capacitación debido a que es evidente la falta de información por parte de los propietarios sobre el funcionamiento y adecuado mantenimiento de las lagunas, como se mencionó anteriormente, la capacitación deberá ser realizada por entidades o personas competentes que lleven un control y seguimiento sobre los avances que se hagan en esta finca.
- Hacer mantenimiento a cada una de las lagunas y posteriormente cerrar de manera adecuada cada uno de estas unidades que componen los sistemas de tratamiento para favorecer el ambiente anaerobio y evitar la proliferación de mosquitos y malos olores.
- Mejorar el lugar donde llega la pulpa después del proceso de beneficio del café, mediante la impermeabilización con plástico del lugar, para evitar el derrame de lixiviado producto de la descomposición, realizar una limpieza de los alrededores para evitar la proliferación de vectores.
- Proceder al mantenimiento especial de la última laguna, a la cual se le debe remover los tacos de guadua y reemplazarlos por botellas plásticas e impermeabilizarla con plástico calibre 6.
- Realizar mantenimiento frecuente a la trampa de pulpas.

Si se cumplen estas alternativas a corto plazo se puede mejorar la eficiencia de las lagunas y evitar el crecimiento de plagas y vectores, garantizando que la finca sea un lugar que brinde seguridad para los trabajadores y sea ambientalmente viable.

A largo plazo:

- Se podría implementar un programa de higiene y saneamiento de las instalaciones donde se deposita la pulpa y donde se encuentra el sistema de tratamiento de las aguas mieles.
- Reemplazar el plástico negro por geomembranas para el recubrimiento de las lagunas.
- Buscar un proceso económico y ambientalmente viable para el tratamiento de los lodos y natas que salen de cada sistema cuando se hace el mantenimiento o termina la época de cosecha.

6.5.3 Finca La Empalizada

Con el fin de que esta finca siga en su proceso de ser una finca modelo en la implementación de técnicas y tecnologías responsables con el medio ambiente, las alternativas que puede aplicar son:

A corto plazo:

- Se recomienda cercar el área donde están los sistemas de tratamiento de aguas mieles para evitar posibles accidentes.
- Implementar y revisar frecuentemente la trampa de pulpas para un mejor funcionamiento de los sistemas.

A largo plazo:

- Cambiar el beneficio húmedo del café por el beneficio ecológico Belcosub en la finca La Empalizada para un mejor uso del recurso hídrico.
- Buscar un proceso económico y ambientalmente viable para el tratamiento de los lodos y natas que salen de cada sistema cuando se hace el mantenimiento o termina la época de cosecha.

Con el fin de determinar el número de tanques y su volumen para el tratamiento SMTA, Cenicafé presenta una tabla donde se dan estos datos en relación a las arrobas de café pergamino seco que se produce al año y a la cantidad de café cereza que se lava por día.

Cuadro 8. Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio para productores de menos de 1500 @cps/año.

Café beneficiado Día pico (kg cc/día)	Producción equivalente Anual (@cps)	RHA	RM
		N° de tanques	N° de tanques
1710 - 1251	1500 - 1101	3 de 2000 L	2 de 2000 L
1250 - 834	1100 - 751	3 de 2000 L	3 de 1000 L
833 - 626	750 - 551	3 de 1000 L	1 de 2000 L
625 - 418	550 - 401	3 de 750 L	2 de 750 L
417 - 314	400 - 301	3 de 500 L	1 de 1000 L
313 - 209	300 - 201	2 de 750 L	1 de 750 L
208 - 105	200 - 101	1 de 1000 L	1 de 500 L
104 ó menos	<100	1 de 500 L	1 de 250 L

Fuente: Boletín técnico N° 29 de 2006. Cenicafé

7. CONCLUSIONES

Para el caso de las fincas que manejaban el sistema Belcosub en el proceso del beneficio del café, se logró determinar que las aguas que salen después de estos procesos presentan valores muy elevados de demanda biológica de oxígeno (DBO_5) y sólidos suspendidos totales (SST) a diferencia de la finca que maneja el sistema de beneficio tradicional, la razón por lo cual sucede esto es debido a que no usan una cantidad elevada de agua por ende la carga orgánica será mayor.

El sistema modular de tratamiento anaerobio-SMTA, el cual fue objeto de estudio en condiciones normales de operación, con variaciones de la carga orgánica, permitió detectar una eficiencia de remoción alrededor del 80% y 90% para sólidos suspendidos totales (SST) y demanda biológica de oxígeno (DBO_5) respectivamente, con lo cual se logra cumplir la resolución 0631 de 2015.

Es necesario disminuir las cargas orgánicas a las entradas de los sistemas de tratamiento debido a que es uno de los factores que afectan las eficiencias de remoción y las características fisicoquímicas del agua del efluente.

Las bajas eficiencias en los sistemas mixto y artesanal se deben principalmente a la falta de mantenimiento y capacitación por parte de los productores para el manejo correcto de estos sistemas de tratamiento de agua.

Teniendo en cuenta el proceso de beneficio del café y el estado de los sistemas de tratamiento, la capacitación y aplicación de buenas prácticas agrícolas les permitirá a los propietarios de las fincas mejorar y controlar de manera más adecuada el manejo del recurso hídrico y de los residuos sólidos orgánicos.

Analizando el costo-beneficio de cada sistema de tratamiento de aguas mieles se determinó que para esta investigación el sistema más óptimo es el SMTA, debido a que permite altos porcentajes de remoción de DBO_5 y SST, los reactores al estar construidos en polietileno garantiza una durabilidad mayor a los 35 años, permitiendo ahorrar gastos en el futuro.

8. RECOMENDACIONES

Continuar con el seguimiento y evaluación de estas tecnologías relacionadas con el tratamiento de las aguas mieles, con el fin de que los caficultores colombianos las puedan implementar en sus predios.

Con el fin de tener mayor precisión en los parámetros fisicoquímicos es necesario que en próximos estudios se tome un mayor número de muestras.

En próximas investigaciones es necesario tener en cuenta las variables como caudal y tiempo de retención hidráulico.

En próximos estudios se debe analizar el parámetro fisicoquímico de demanda química de oxígeno (DQO) y un análisis microbiológico de Escherichia Coli y Coliformes Totales, a la hora de evaluar la calidad de agua estos tres sistemas de tratamiento.

Realizar estudios a escala piloto del sistema artesanal con el fin de mejorar esta tecnología para el tratamiento de aguas mieles del café.

Con el fin de aumentar las eficiencias de remoción de carga orgánica de las aguas mieles y mejorar su calidad, se recomienda implementar en serie con cualquiera de los tres sistemas evaluados un sistema de pos tratamiento como los humedales con alguna especie de macrófitas.

9. BIBLIOGRAFIA

Álvarez, Hugh, Cuba, and Loza, (2011). Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales del pre beneficiado de café (*Coffea arabica*) implementado en la comunidad Carmen Pampa provincia Nor Yungas del Departamento de La Paz. *Journal of the Selva Andina Research Society*, pp.35-36.

Bruno y Oliveira, (2008). Tratamiento anaeróbico de aguas residuárias do beneficiamento de café por via úmida em reatores uasb em dois estágios *Revista Ingeniería agrícola Jaboticabal*, 28(2), 364-377. Recuperado en 10 de marzo de 2017, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542014000100004&lng=es&tlng=en.

Cafedecolombia.com, (2016). *Historia del Café | Café de Colombia*. [En línea] disponible en:http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/el_cafe/ [fecha de acceso: enero 2016]

Cadavid Sánchez, (1994) Evaluación de un sistema de tratamiento séptico-filtro anaerobio de flujo ascendente para las aguas residuales del beneficio ecológico del café. *Revista facultad de ingeniería Universidad de Antioquia*. Disponible en: <http://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/ingenieria/article/view/325674/20783025>

Cárdenas Garzón y Ortiz Prieto, (2014). *Manejo Integrado Del Recurso Agua, en el Proceso de Beneficio Húmedo del Café, Para la Asociación De Productores De Café Especial "ACAFETO" en el Municipio De Fresno, Departamento Del Tolima*. Maestría. Universidad de Manizales.

Cenicafé (2006). Buenas prácticas agrícolas para el café, [En línea]. Disponible en: http://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/avances_tecnicos/P75 [fecha de consulta: enero de 2017].

Cenicafé (2011). Construyendo el modelo para la gestión integrada del recurso hídrico en la caficultura colombiana, [En línea]. Disponible en: http://www.cenicafe.org/es/documents/PROPUESTA__P_A_CENICAFE_ABRIL13.pdf [fecha de consulta: noviembre de 2016].

Federación Nacional de Cafeteros, (2012). Post-cosecha, [En línea]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/post-cosecha/ [fecha de consulta: enero de 2016].

Guardia Puebla, Yans, Rodríguez Pérez, Suyén, Cuscó Varona, Yennys, Jiménez Hernández, Janet, & Sánchez Girón, Víctor. (2014). Two-phase anaerobic digestion of coffee wet wastewater: Effect of recycle on anaerobic process performance. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(1), 25-31. Recuperado en 10 de marzo de 2017, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542014000100004&lng=es&tlng=en.

Gutiérrez Guzmán, Valencia Granada and Aragón Calderón, (2014). Eficiencia de remoción de DBO5 y SS en sedimentador y lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café (*Coffea arabica*). *Colombia Forestal*, 17(2), p.151. Disponible en: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/article/view/5407/9646> [fecha de consulta: diciembre de 2015].

IDEAM (2003).Guía de monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas, [En línea]. Disponible en: http://www.corponor.gov.co/control_calidad/2014/Guia_monitoreo_IDEAM.pdf. [Fecha de consulta: enero de 2016].

IDEAM (2014).Estudio Nacional del Agua IDEAM, [En línea]. Disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf [fecha de consulta: enero de 2016].

Molina guardado, A. y Villatoro Martínez, R. (2006). *Propuesta de tratamientos de aguas residuales en beneficios húmedos de café*. Universidad de El Salvador.

Peña, f. y Sanz, j. (2003). Evaluación de la calidad física del café en los procesos de beneficio húmedo tradicional y ecológico. *Cenicafé*, [en línea] 54(4). Disponible en: [http://www.cenicafe.org/es/publications/arc054\(04\)286-296.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/arc054(04)286-296.pdf) [consulta: enero 2016].

Puerta Quintero, (2009). Efecto de enzimas pectolíticas en la remocion del mucilago de coffe arabica, según el desarrollo del fruto. *Cenicafé*, [en línea] 60(4).Disponible en: [http://www.cenicafe.org/es/publications/arc060\(04\)291-312.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/arc060(04)291-312.pdf) [Consulta: Septiembre 2016].

República de Colombia, Ministerio de Ambiente (2003). Decreto 3100 Octubre 30 de 2003. [En línea]. Disponible en: http://www.epacartagena.gov.co/NewWeb/Normas/decreto_3100_de_2003.pdf. [Consulta: Diciembre de 2015].

República de Colombia, Ministerio de Salud (1984). Decreto N° 1594 de 1984. [En línea]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18617> [Consulta: Diciembre de 2015].

República de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2010). Decreto 3930 de 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620> [Consulta: Diciembre de 2015].

República de Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Decreto 4728 de 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=41009> [Consulta: Diciembre de 2015].

República de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible (2015). Resolución 631 de 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.acoplasticos.org/acceso_clientes/imagenes/Resolucion%20Vertimientos%200631%202015.pdf [Consulta: Diciembre de 2015].

Sandoval, (2010). *Tratamiento Artesanal de Aguas Mieles*.1ª edición, Popayan.2013

Solano Valencia, (2014). *Implementación de infraestructura para el beneficio húmedo y seco del café a pequeños caficultores de la vereda las yescas, municipio de Sotará, departamento del Cauca*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD.

Vega Serrano y Martínez Chamorro, (2011). Adaptación del smta al tratamiento de aguas residuales del beneficio ecológico del café con la tecnología becolsub. *Centro de investigación de ingeniería ambiental*. Disponible en: www.unilibresoc.edu.co/publicaciones/index.php/centauro/article/.../48 [consulta: Diciembre 2015].

Yans Guardia, (2012). Estudio de la digestión anaerobia en dos fases para el tratamiento de las aguas residuales de despulpe del beneficiado húmedo del café. Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid.

Zambrano D. et al. (1999). Tratamiento Anaerobio de las Aguas Mieles de Café. Cenicafé. Boletín T. No.20.1999.

Zambrano F. et al. (2015). Evaluación de un reactor metanogénico tipo filtro anaeróbico de flujo ascendente para tratar aguas mieles del café. Cenicafé. [En línea] 66(1). Disponible en: [http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/607/1/arc066\(01\)32-45.pdf](http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/607/1/arc066(01)32-45.pdf) [Consulta: agosto 2016].

Zambrano D. et al. (2006). Tratamiento Anaerobio de las Aguas Mieles de Café. Cenicafé. Boletín T. No.29.2006. Disponible en: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/410/1/avt0426.pdf> [consulta: Diciembre 2015].

Alianza por el agua. (2008). *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales - Monográfico 3: MANUAL DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS.* [En línea]. Disponible en: <http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf> [Consulta: Marzo de 2017].

Marín Galvín, (2003). Físicoquímica y microbiología de los medios acuáticos: tratamiento y control de calidad de aguas, p. 144, 145. [En línea]. Disponible en: <http://site.ebrary.com/acceso.unicauca.edu.co/lib/biblioucaucasp/reader.action?docID=10139992> [Fecha de consulta: marzo de 2017].

Metcalf y Eddy. (1997). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización, México: Mc Graw Hill.

Ortiz, J. et al. (2016). Estudio cinético de bacterias metanogénicas a diferentes temperaturas. Bistua Revista de la facultad de Ciencias Básicas Universidad de Pamplona. [En línea]. Disponible en: http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/BISTUA/article/viewFile/1690/960 [Fecha de consulta: marzo de 2017].

Seoanez Calvo, (1999). Aguas residuales urbanas. Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento. Madrid: Mundi-Prensa.

Ferrero, (1974). Depuración biológica de las aguas. Madrid: Alhambra.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados obtenidos en el laboratorio para cada sistema de tratamiento.

SISTEMA MIXTO

No. de muestra	Parámetro	Entrada	Salida
Muestra 1	DBO ₅ (mg/L)	6075	5832
	SST (mg/L)	6280	1328
	Conductividad (μs/cm)	2560	3340
	O.D (mg/L)	4,53	3,62
	pH	4,69	3,6
	Temperatura (°C)	24,2	24,5
Muestra 2	DBO ₅ (mg/L)	5490	4761
	SST (mg/L)	34996	10843
	Conductividad (μs/cm)	2360	3500
	O.D (mg/L)	1,1	1,12
	pH	5,56	4,56
	Temperatura (°C)	25,1	25,2
Muestra 3	DBO ₅ (mg/L)	12178	6580
	SST (mg/L)	25462,5	14466,5
	Conductividad (μs/cm)	2680	3760
	O.D (mg/L)	0,51	1,61
	pH	5,04	4,56
	Temperatura (°C)	25,7	26,1
Muestra 4	DBO ₅ (mg/L)	24970	8770
	SST (mg/L)	44645	27605
	Conductividad (μs/cm)	2380	3300
	O.D (mg/L)	2,04	1,8
	pH	5,1	4,24
	Temperatura (°C)	24,4	24,9

SISTEMA ARTESANAL

No. de muestra	Parámetro	Entrada	Salida
Muestra 1	DBO ₅ (mg/L)	8073	6174
	SST (mg/L)	1345	995
	Conductividad (μs/cm)	4040	3520
	O.D (mg/L)	3,31	3,95
	pH	3,96	4,75
	Temperatura (°C)	26,1	26,4
Muestra 2	DBO ₅ (mg/L)	5832	4671
	SST (mg/L)	1276	775
	Conductividad (μs/cm)	3660	3280
	O.D (mg/L)	1,13	1,15

	pH	4,58	4,62
	Temperatura (°C)	27,2	27
Muestra 3	DBO ₅ (mg/L)	819	6228
	SST (mg/L)	1255	560
	Conductividad (µs/cm)	3720	2950
	O.D (mg/L)	1,55	1,54
	pH	4,86	5,45
	Temperatura (°C)	26,5	26,1
Muestra 4	DBO ₅ (mg/L)	2710	670
	SST (mg/L)	1165	125
	Conductividad (µs/cm)	3900	3760
	O.D (mg/L)	0,43	0,28
	pH	7,69	6,7
	Temperatura (°C)	25,3	24,9

SISTEMA MODULAR DE TRATAMIENTO ANAEROBIO – SMTA

No. de muestra	Parámetro	Entrada	Salida
Muestra 1	DBO ₅ (mg/L)	4518	240
	SST (mg/L)	6842,86	1200
	Conductividad (µs/cm)	1300	657
	O.D (mg/L)	1,06	1,42
	pH	4,06	4,05
	Temperatura (°C)	26,1	26,5
Muestra 2	DBO ₅ (mg/L)	2935	186
	SST (mg/L)	6805,46	1427
	Conductividad (µs/cm)	1,346	843
	O.D (mg/L)	1,06	1,42
	pH	3,93	7,04
	Temperatura (°C)	24,8	25,1
Muestra 3	DBO ₅ (mg/L)	1545	154
	SST (mg/L)	9128,57	70
	Conductividad (µs/cm)	750	733
	O.D (mg/L)	0,9	1,22
	pH	3,9	4,02
	Temperatura (°C)	25,3	25,5
Muestra 4	DBO ₅ (mg/L)	1352	132
	SST (mg/L)	7985,71	635
	Conductividad (µs/cm)	640	765
	O.D (mg/L)	1,01	1,35
	pH	3,96	5,04
	Temperatura (°C)	26,6	26,4

Anexo 2. Prueba de Normalidad para cada sistema de tratamiento.

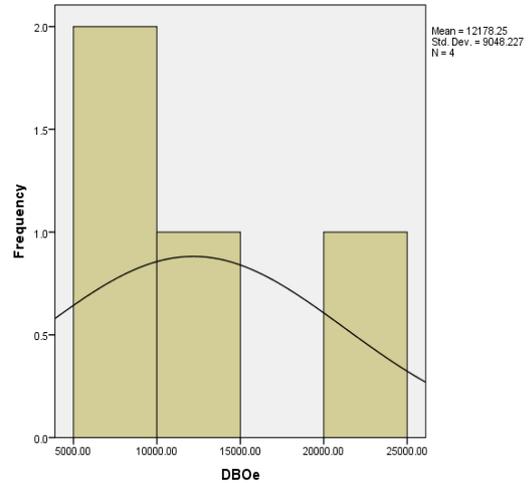
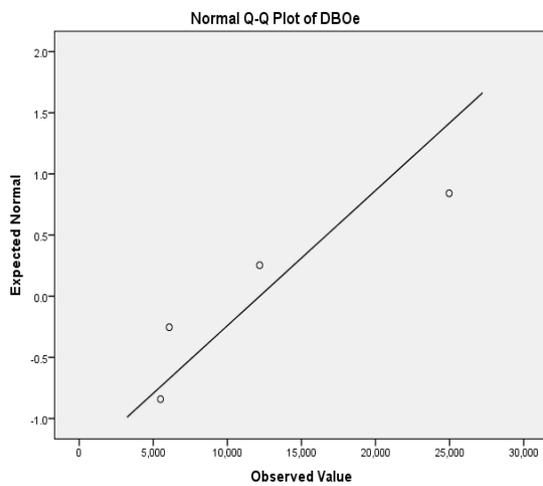
- **Sistema mixto.**

Prueba de Normalidad

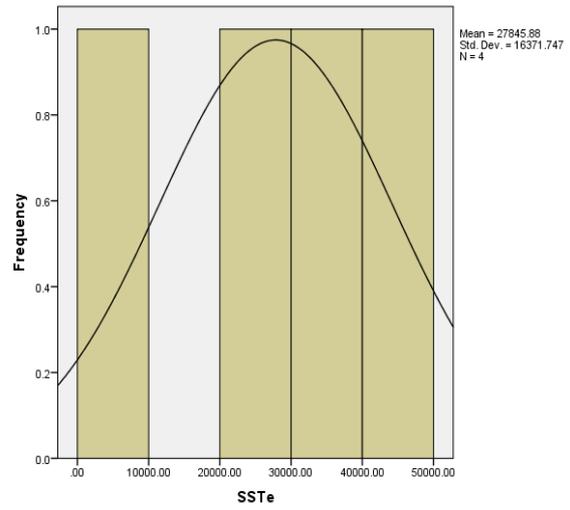
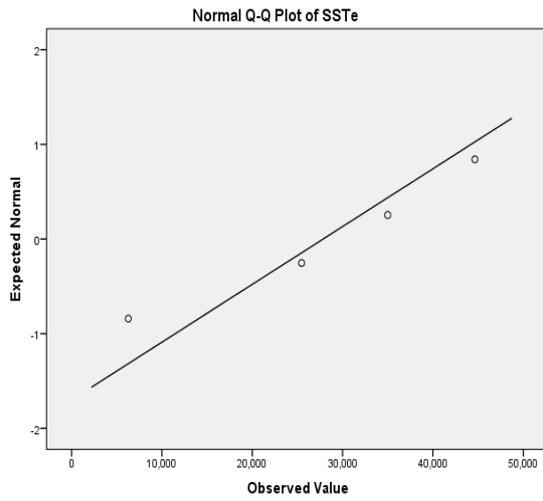
	Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.
DBO _{5e}	,845	4	,209
DBO _{5s}	,961	4	,785
SSTe	,972	4	,852
SSTs	,981	4	,907
Conde	,893	4	,398
Conds	,899	4	,425
ODe	,904	4	,452
ODs	,854	4	,239
pHe	,964	4	,805
pHs	,827	4	,161
Tempe	,934	4	,616
Temps	,952	4	,731

Gráficos de normalidad e Histograma de normalidad a la entrada del sistema

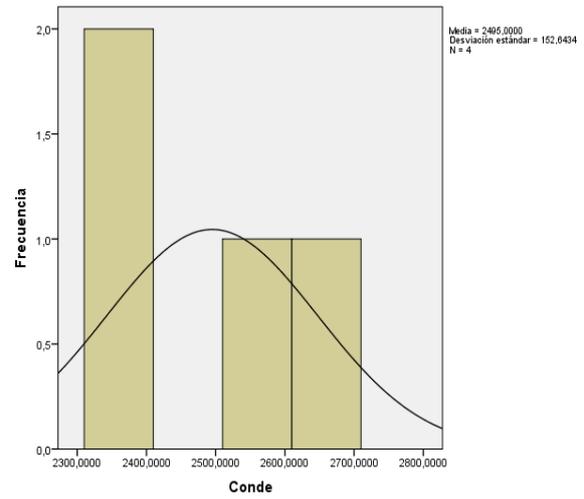
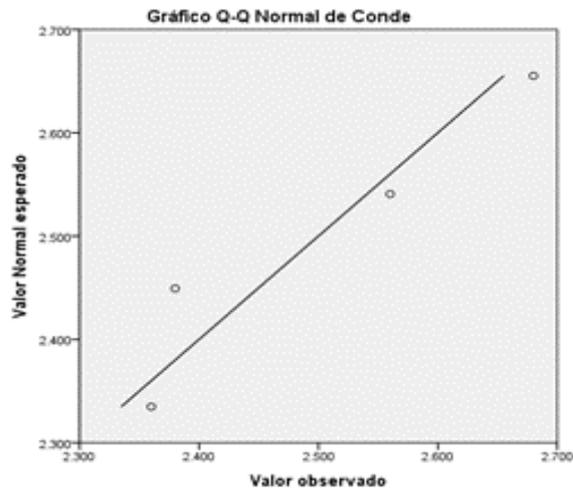
DBO₅



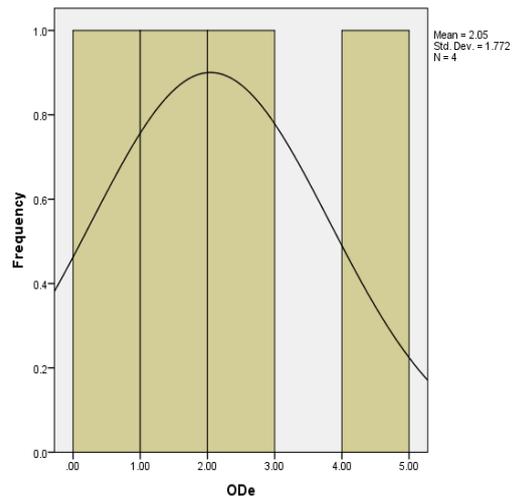
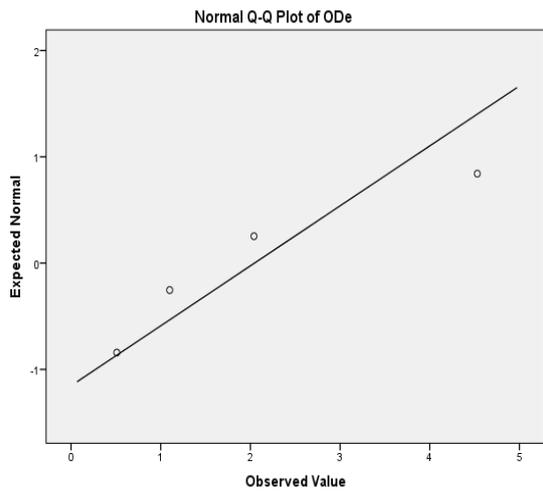
Sólidos Suspendidos Totales



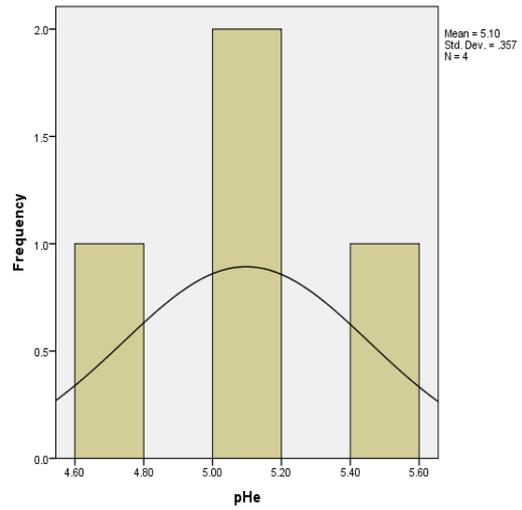
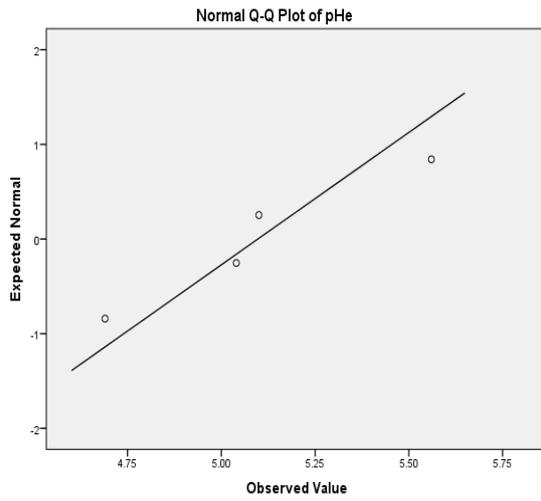
Conductividad



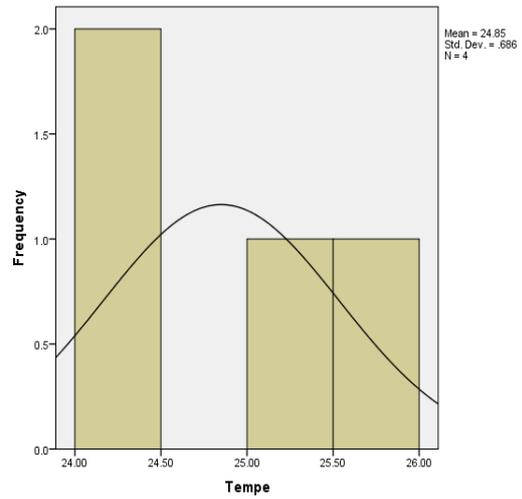
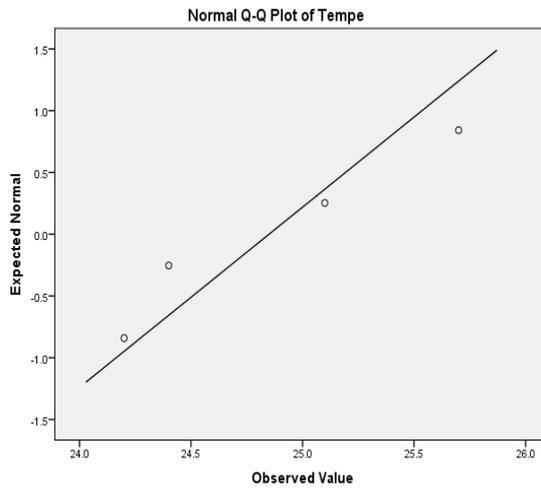
Oxígeno Disuelto



pH

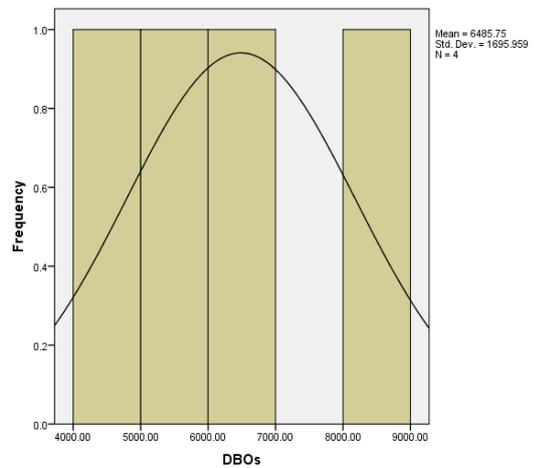
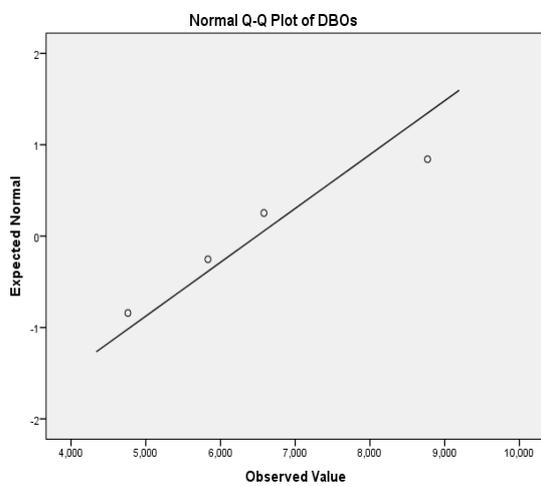


Temperatura

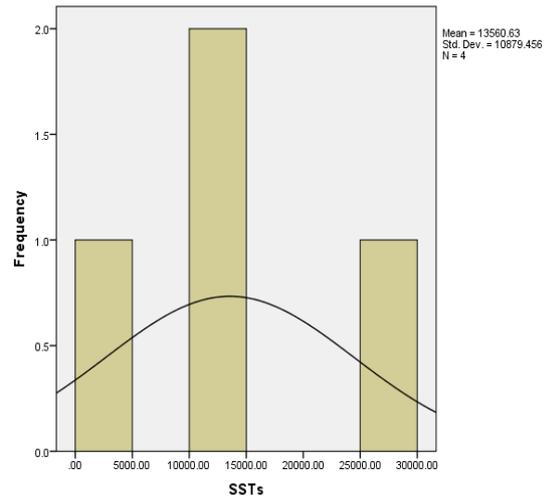
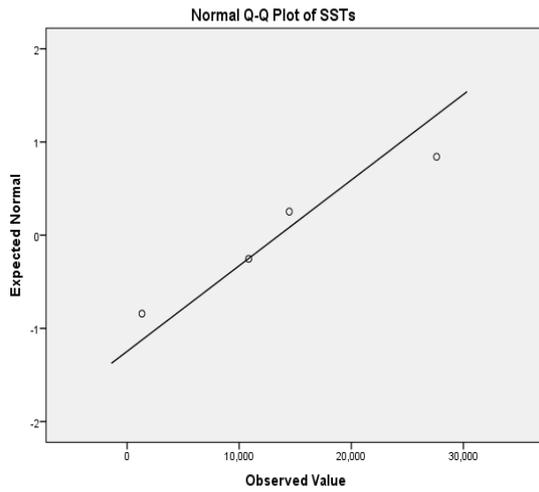


Gráficos de normalidad e Histograma de normalidad en la salida del sistema

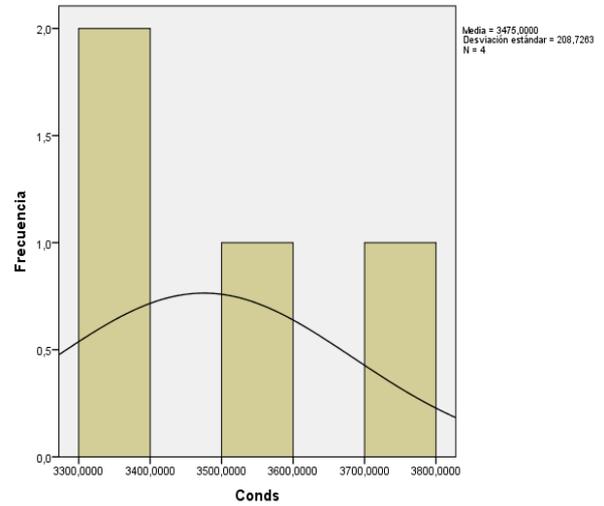
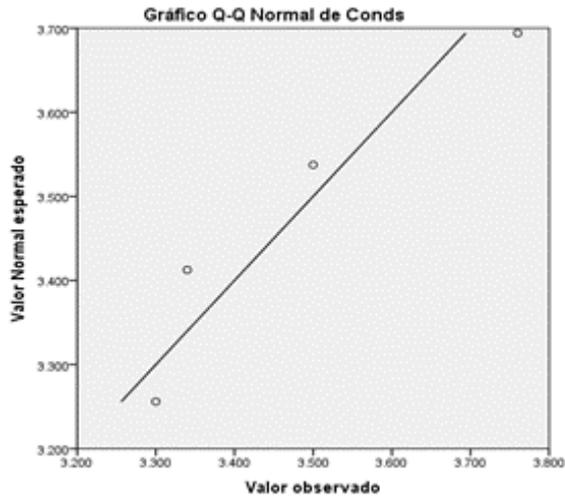
DBO₅



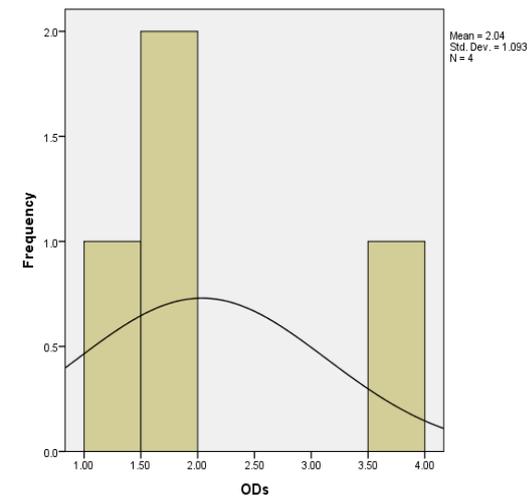
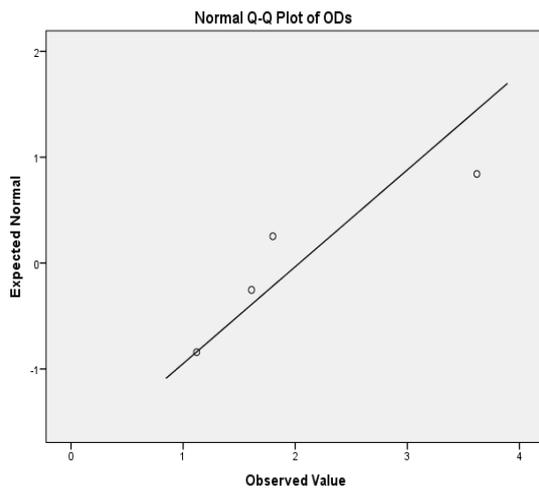
Sólidos Suspendidos Totales



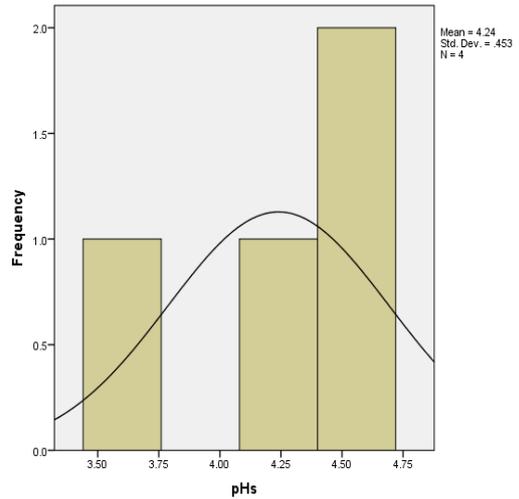
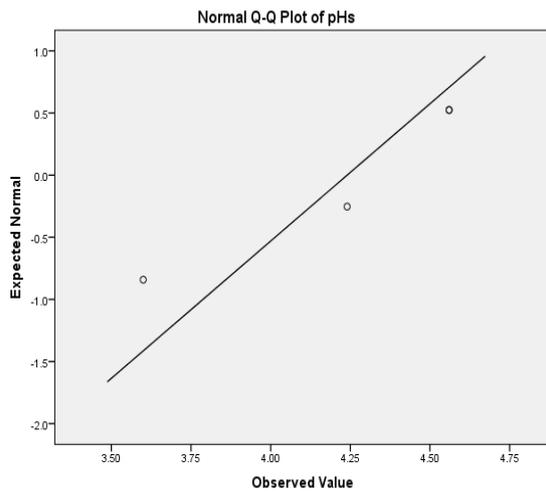
Conductividad



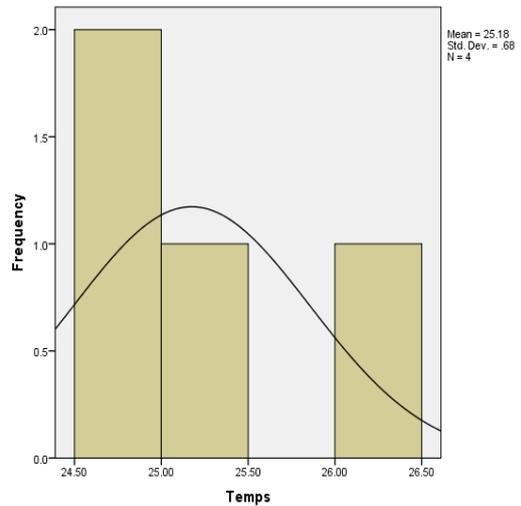
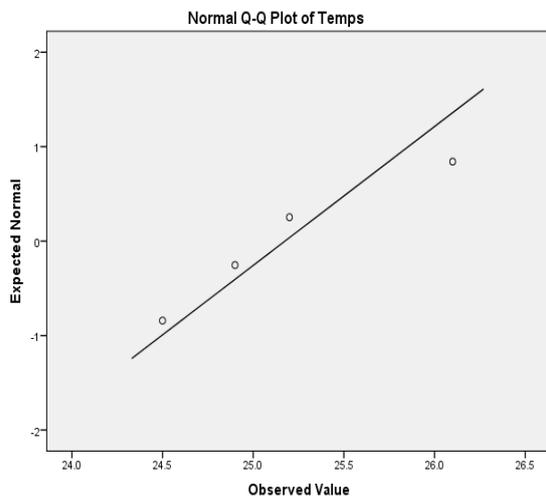
Oxígeno Disuelto



pH



Temperatura



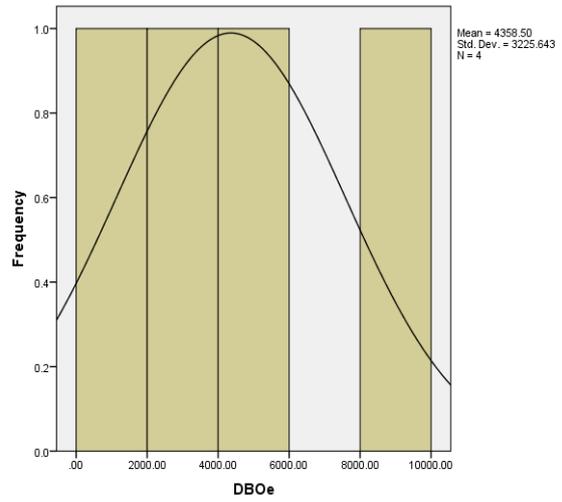
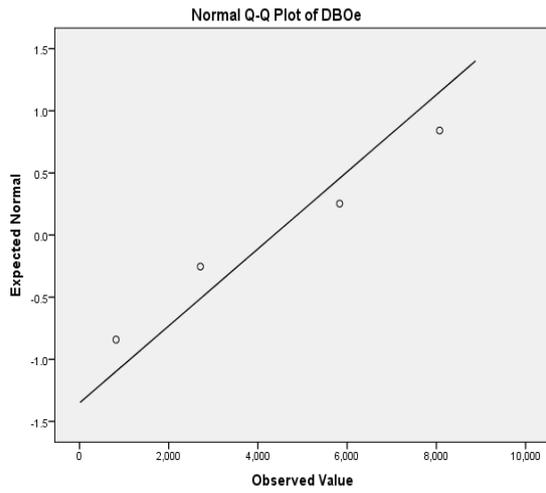
- Sistema artesanal.

Prueba de Normalidad

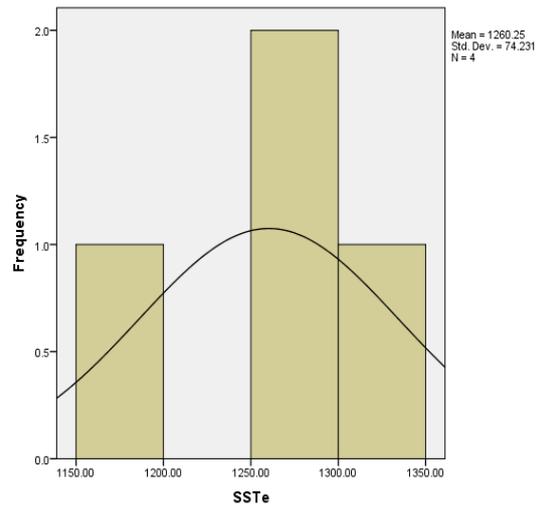
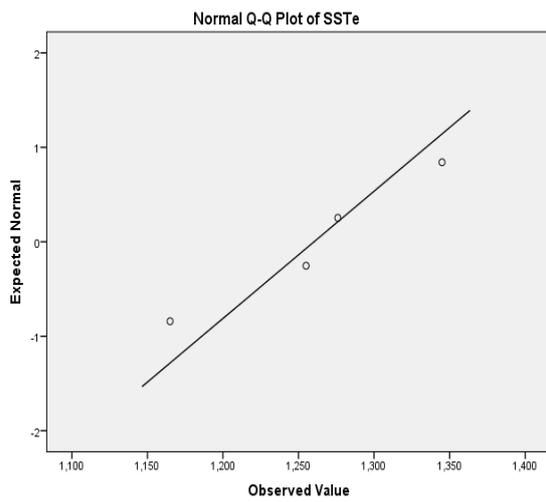
	Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.
DBOe	,971	4	,846
DBOs	,809	4	,120
SSTe	,979	4	,895
SSTs	,972	4	,854
Conde	,942	4	,660
Conds	,990	4	,960
ODe	,930	4	,593
ODs	,904	4	,452
pHe	,829	4	,165
pHs	,870	4	,330
Tempe	,998	4	,993
Temps	,953	4	,734

Gráficos de normalidad e Histograma de normalidad a la entrada del sistema

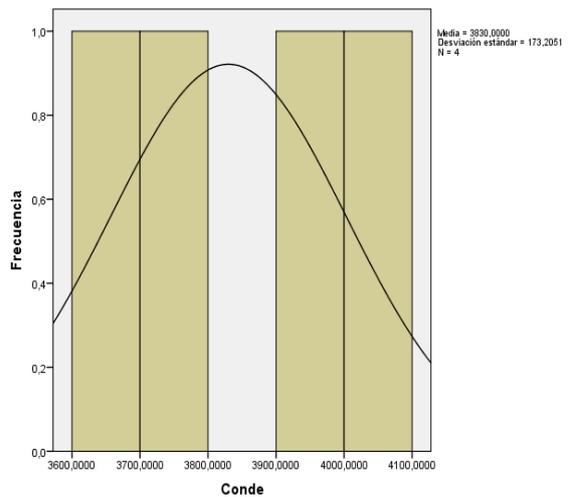
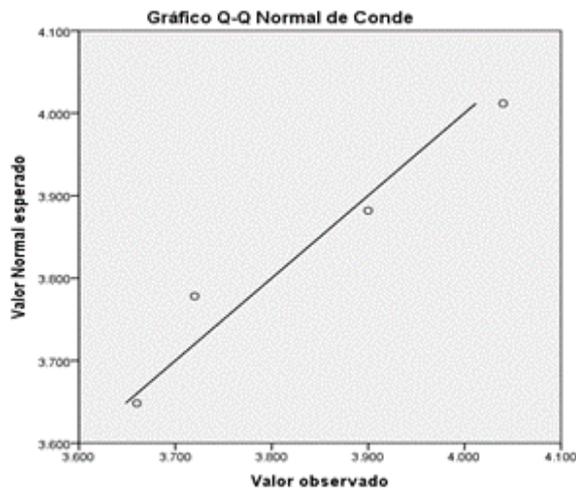
DBO₅



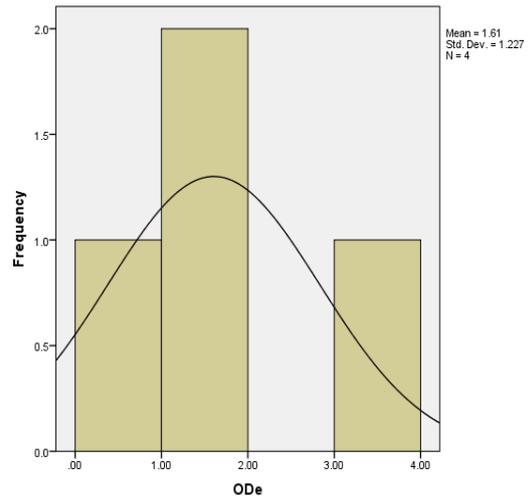
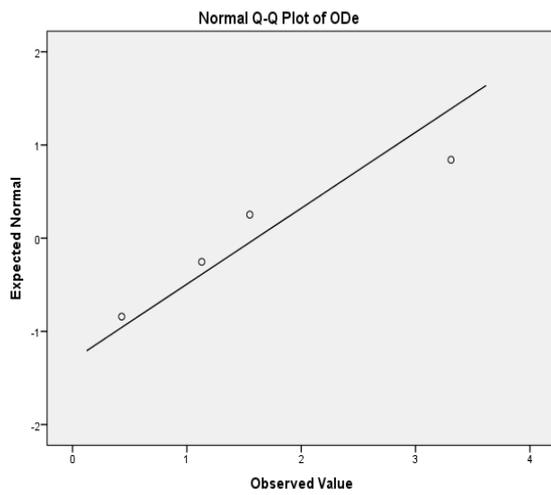
Sólidos Suspendidos Totales



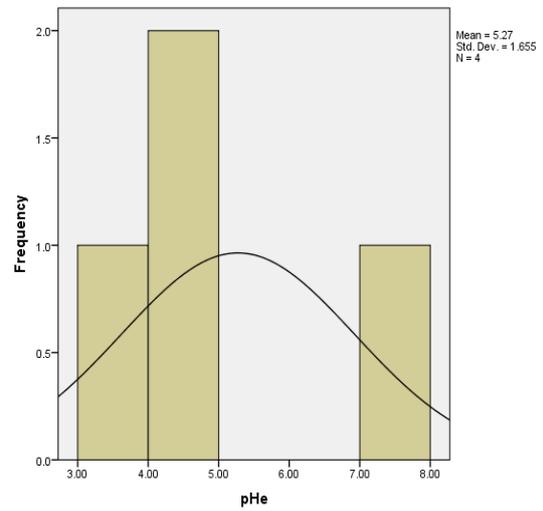
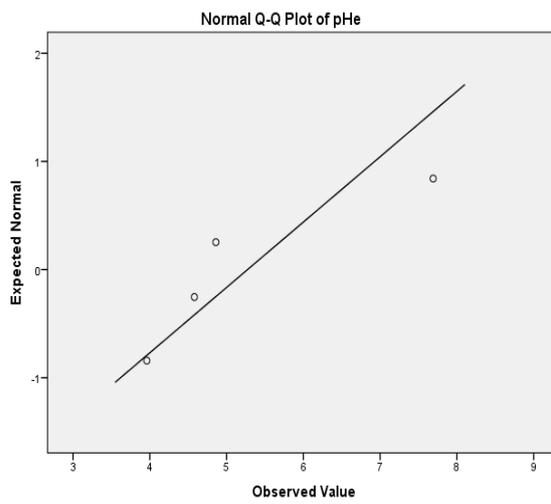
Conductividad



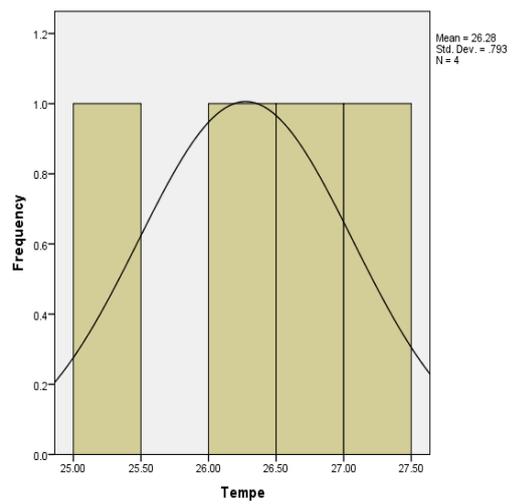
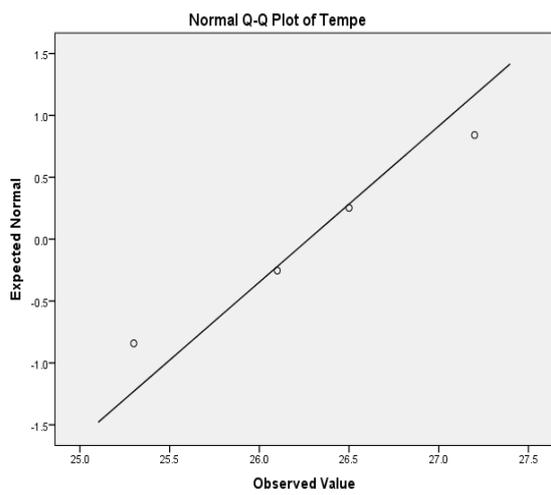
Oxígeno Disuelto



pH

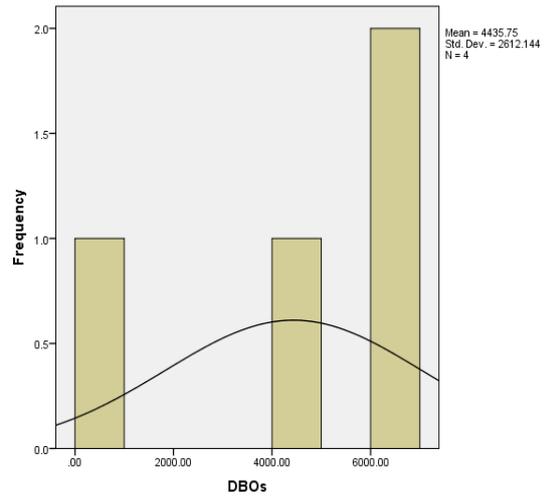
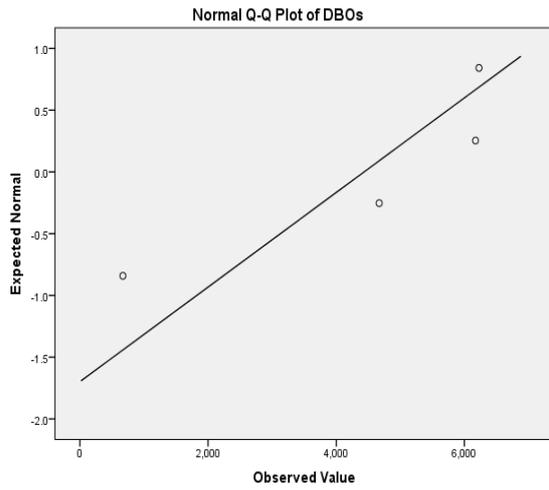


Temperatura

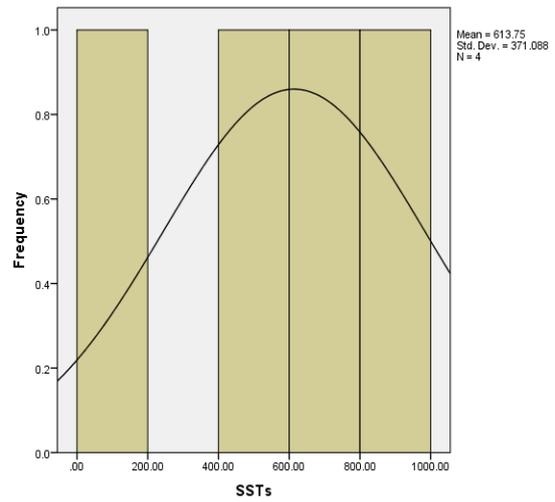
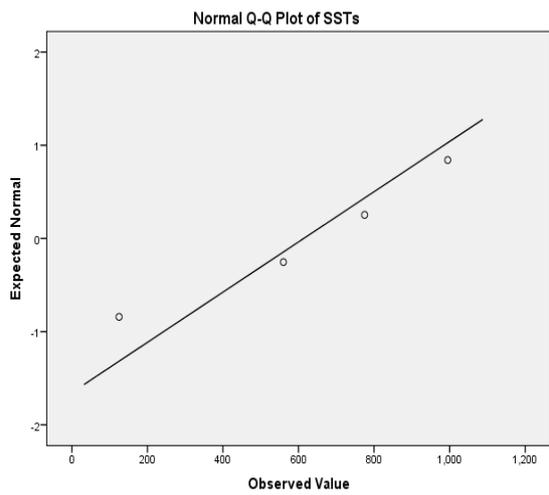


Gráficos de normalidad e Histograma de normalidad en la salida del sistema

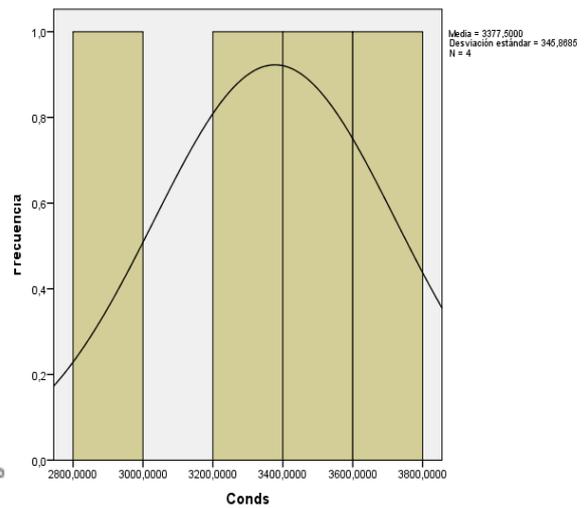
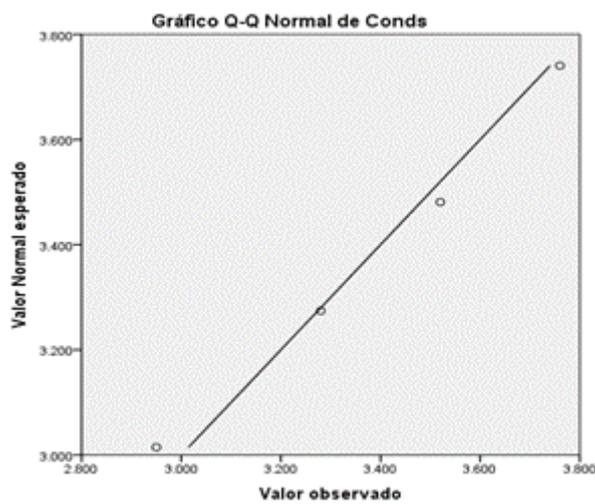
DBO₅



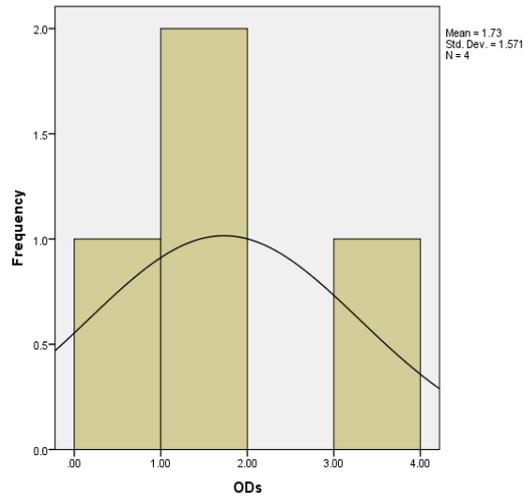
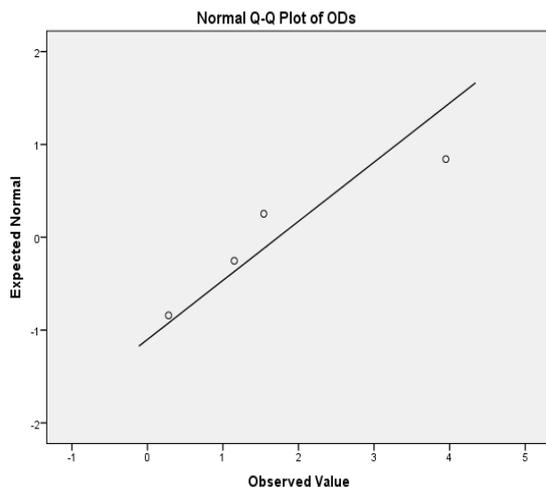
Sólidos Suspendidos Totales



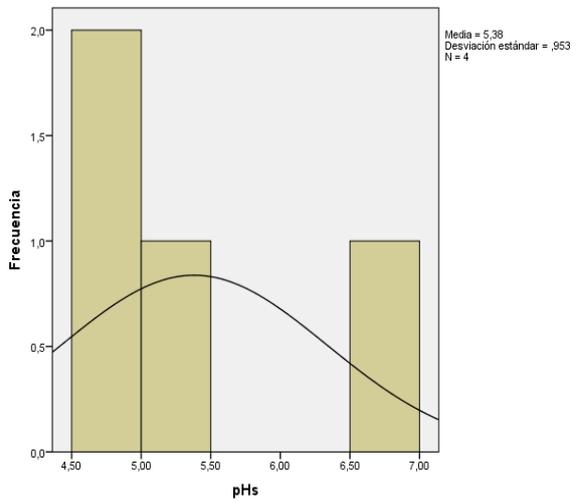
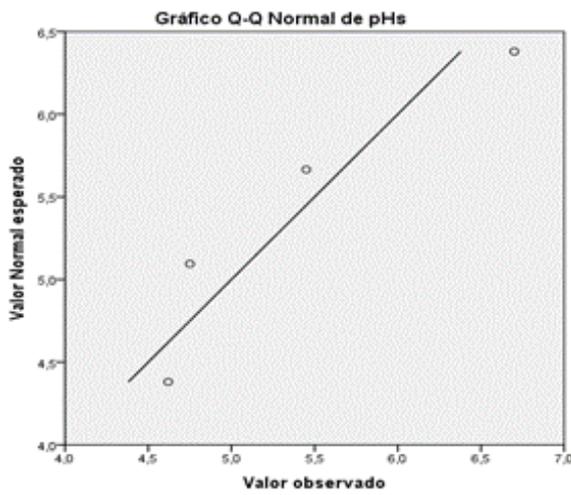
Conductividad



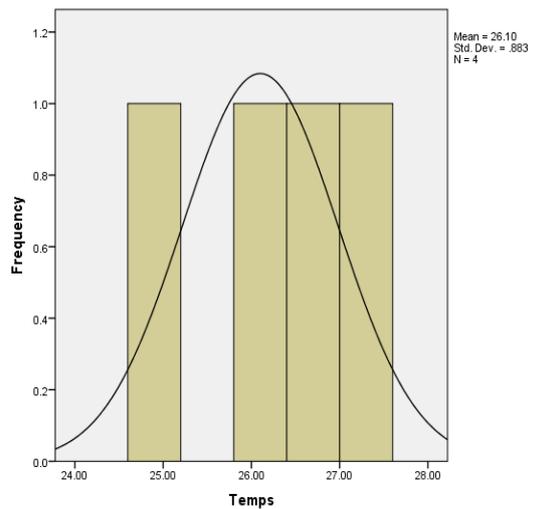
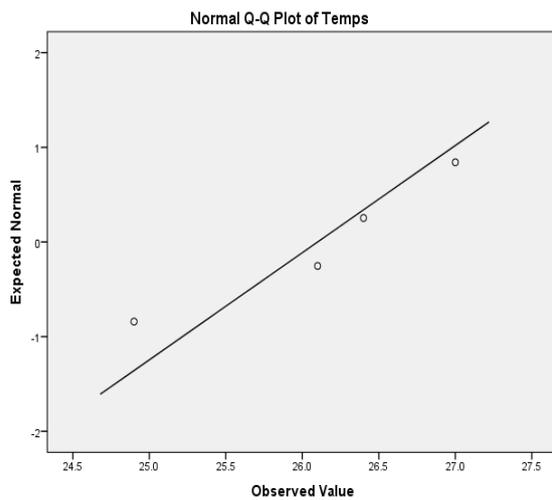
Oxígeno Disuelto



pH



Temperatura



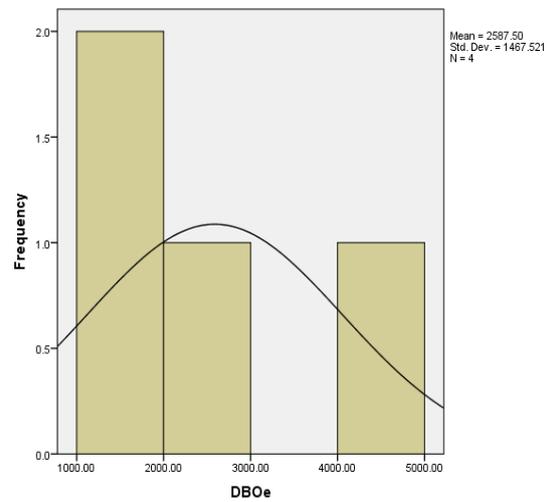
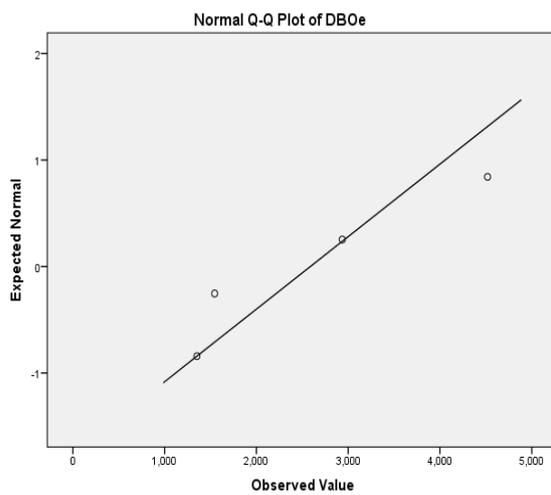
- Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio SMTA

Prueba de Normalidad

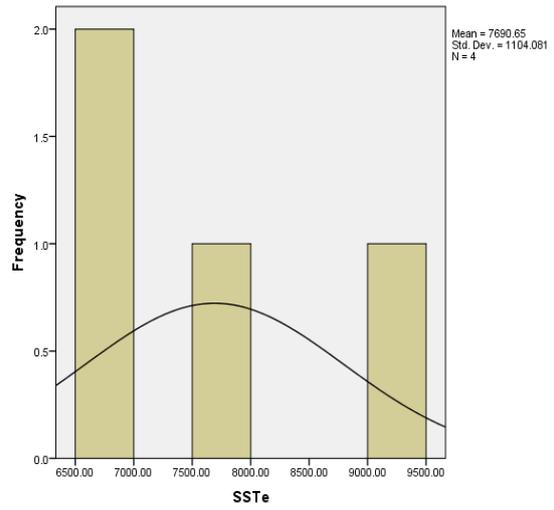
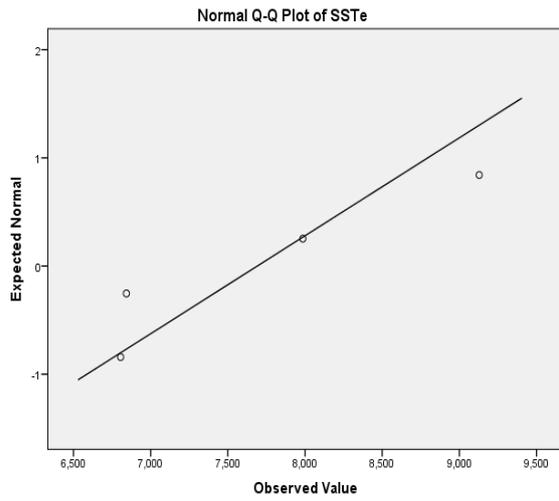
	Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.
DBOe	,897	4	,415
DBOs	,959	4	,771
SSTe	,873	4	,309
SSTs	,950	4	,719
Conde	,970	4	,860
Conds	,990	4	,980
ODe	,819	4	,142
ODs	,833	4	,177
pHe	,913	4	,498
pHs	,834	4	,177
Tempe	,968	4	,827
Temps	,878	4	,332

Gráficos de normalidad e Histograma de normalidad a la entrada del sistema

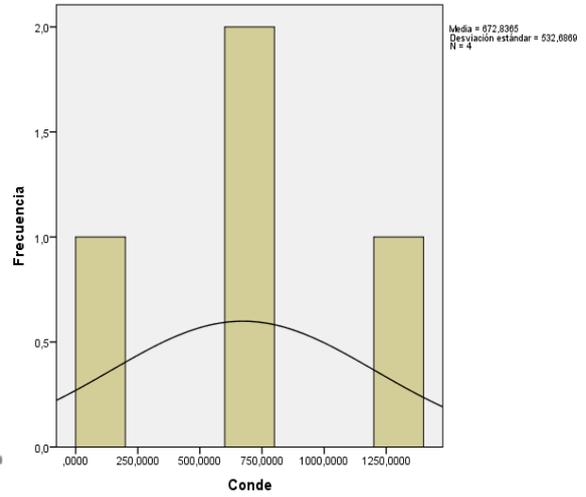
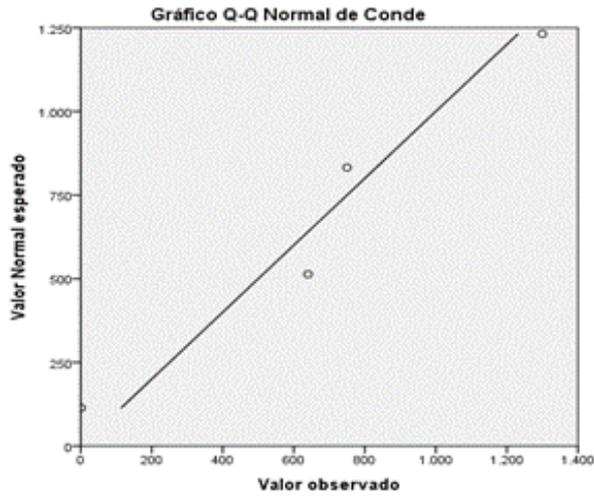
DBO₅



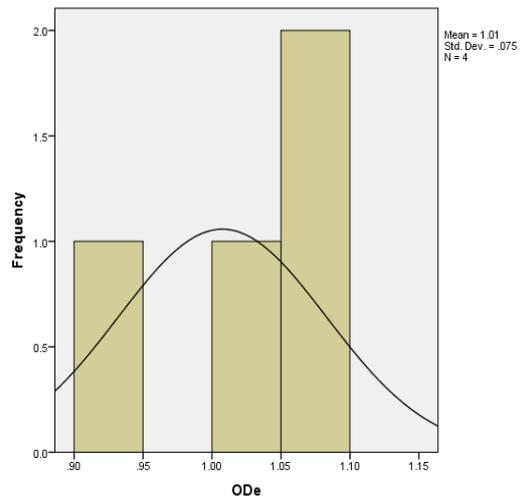
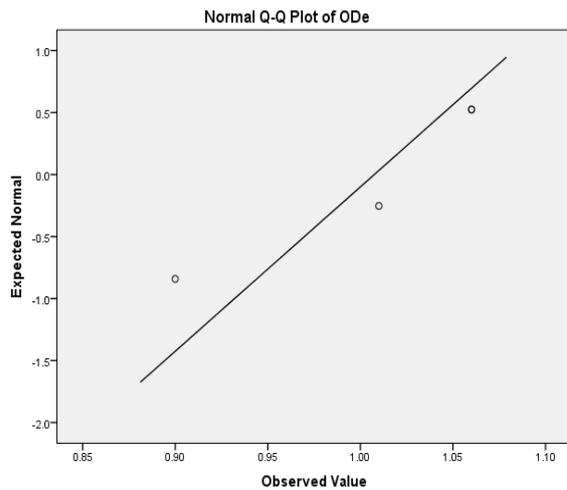
Sólidos Suspendidos Totales



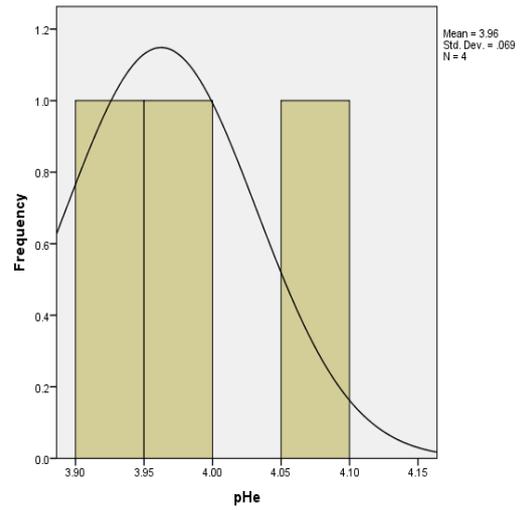
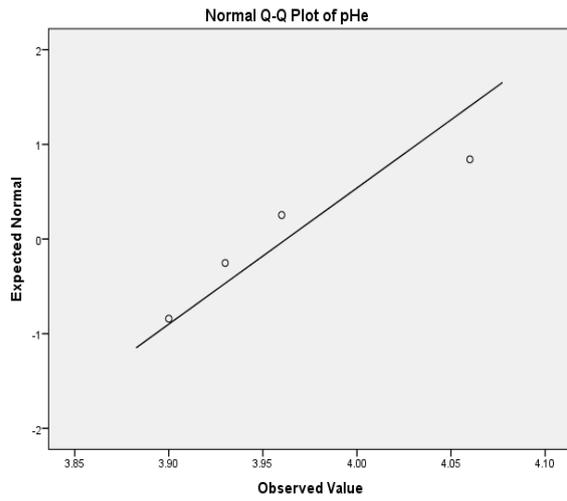
Conductividad



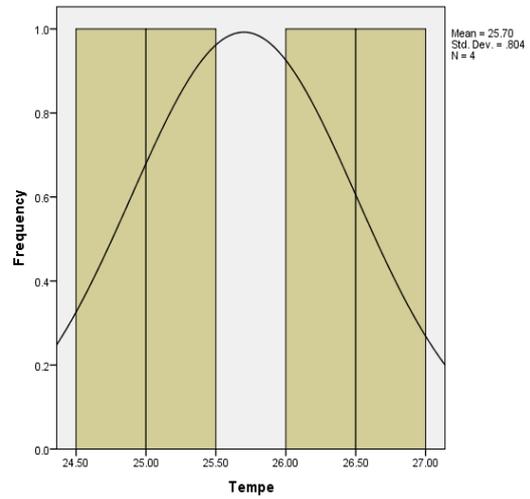
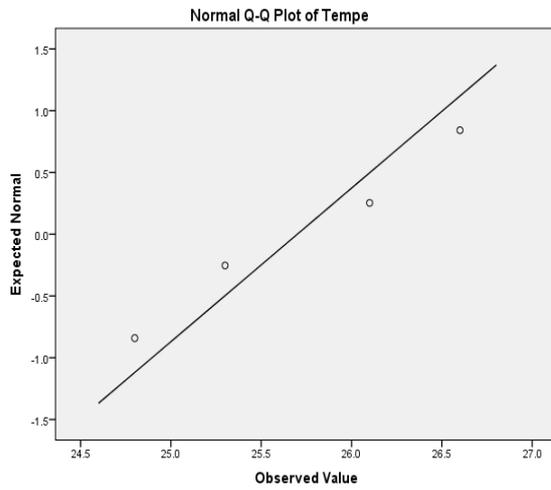
Oxígeno Disuelto



pH

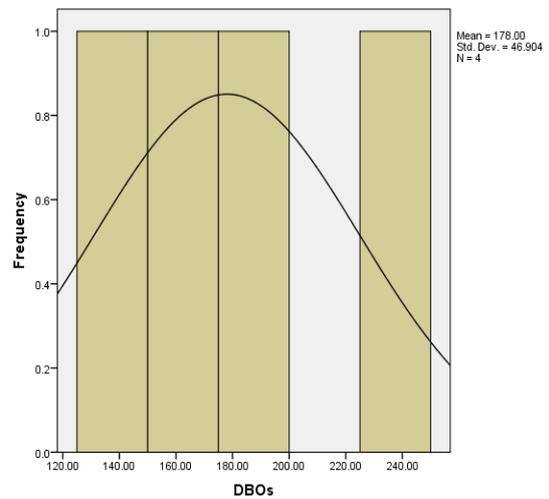
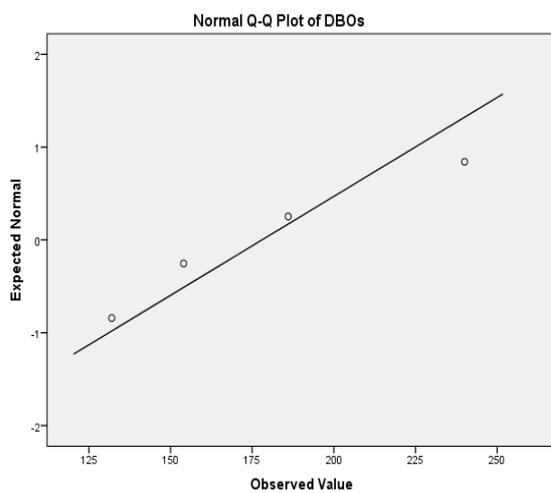


Temperatura

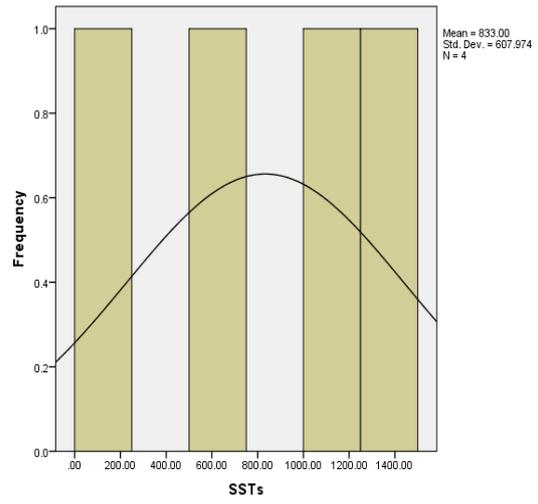
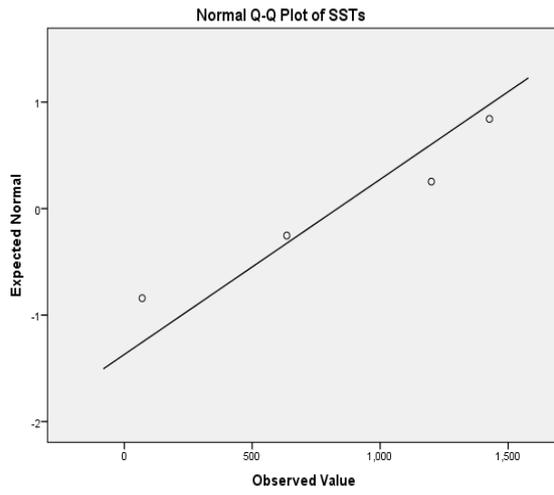


Gráficos de normalidad e Histograma de normalidad en la salida del sistema

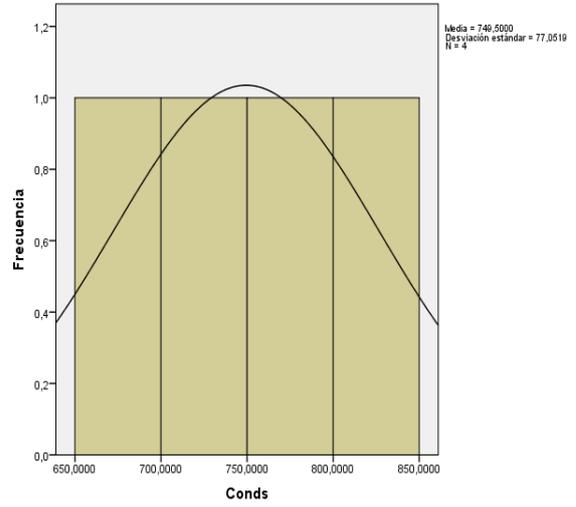
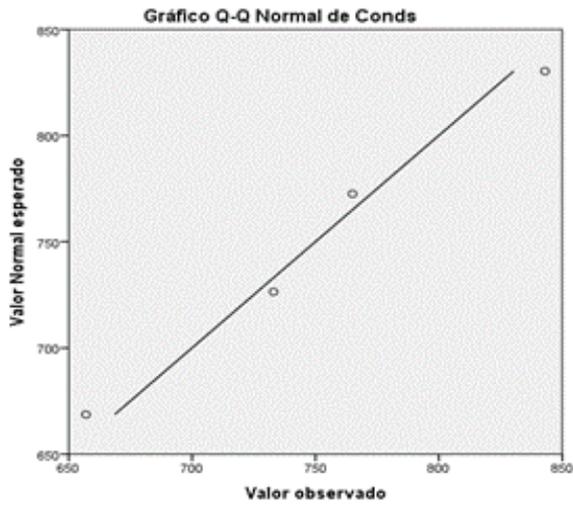
DBO₅



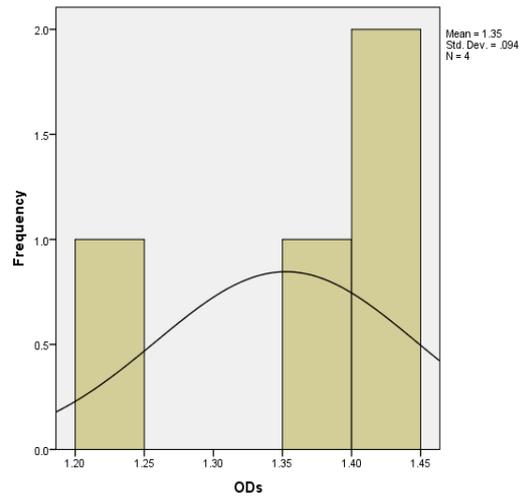
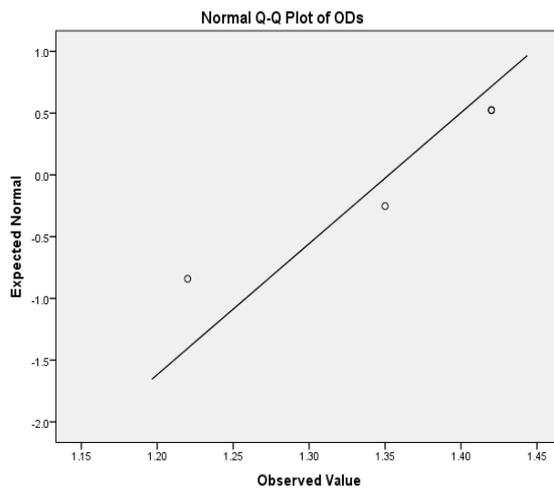
Sólidos Suspendidos Totales



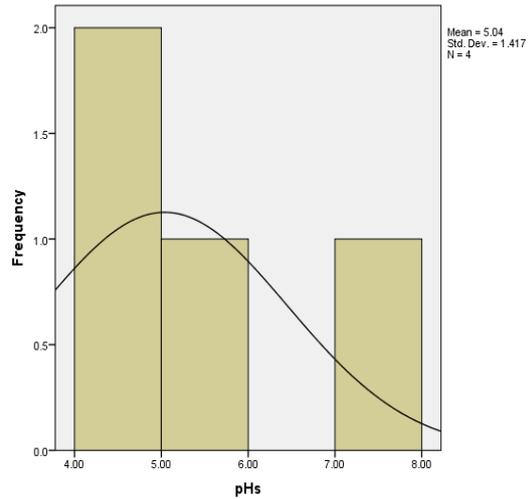
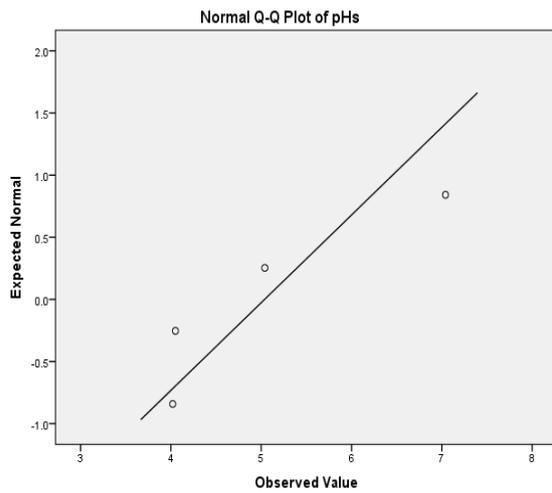
Conductividad



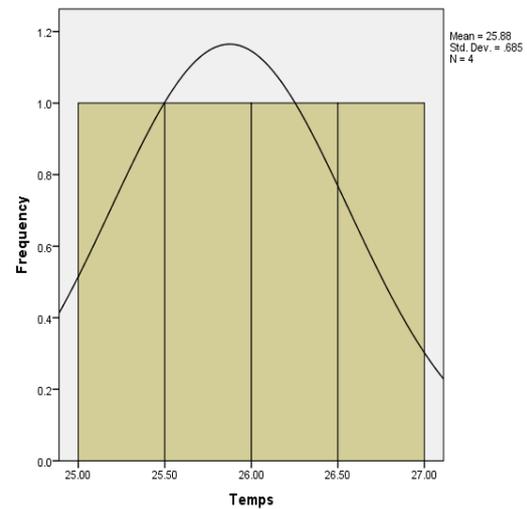
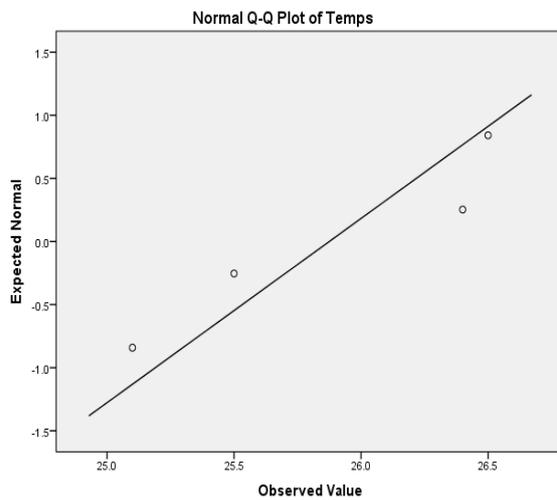
Oxígeno Disuelto



pH



Temperatura



Anexo 3. Prueba t pareada para la entrada y salida de cada sistema de tratamiento.

- Prueba t pareada - sistema mixto

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	DBOe - DBOs	5692,50000	7410,57508	3705,28754	-6099,37864	17484,37864	1,536	3	,222
Pair 2	SSTe - SSTs	14285,25000	8223,74324	4111,87162	1199,43935	27371,06065	3,474	3	,040
Pair 3	Conde - Conds	980,0000000	,0001625	,0000812	721,4600000	1238,4500000	-12,063	3	,001
Pair 4	ODe - ODs	,00750	,83584	,41792	-1,32250	1,33750	,018	3	,987
Pair 5	pHe - pHs	,85750	,26887	,13444	,42967	1,28533	6,379	3	,008
Pair 6	Tempe - Temps	-,32500	,17078	,08539	-,59675	-,05325	-3,806	3	,032

- **Prueba t pareada - sistema artesanal**

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	DBOe - DBOs	-77,25000	3575,33834	1787,66917	-5766,41115	5611,91115	-,043	3	,968
Pair 2	SSTe - SSTs	646,50000	297,92449	148,96224	172,43566	1120,56434	4,340	3	,023
Pair 3	Conde - Conds	452,5000000	173,2310000	60,1123000	33,2350000	871,7700000	3,430	3	,043
Pair 4	ODe - ODs	-,12500	,35124	,17562	-,68389	,43389	-,712	3	,528
Pair 5	pHe - pHs	,10750	,24678	,12339	-1,16140	1,37640	-0,270	3	,274
Pair 6	Tempe - Temps	,17500	,33040	,16520	-,35075	,70075	1,059	3	,367

- **Prueba t pareada - SMTA**

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	DBOe - DBOs	2409,50000	1421,12690	710,56345	148,16997	4670,83003	3,391	3	,043
Pair 2	SSTe - SSTs	6857,65000	1707,91050	853,95525	4139,98327	9575,31673	8,030	3	,004
Pair 3	Conde - Conds	76,6630000	,3109651	,1554825	-893,0800000	1046,4000000	0,252	3	,810
Pair 4	ODe - ODs	-,34500	,01915	,00957	-,37547	-,31453	-36,034	3	,000
Pair 5	pHe - pHs	-1,07500	1,44112	,72056	-3,36815	1,21815	-1,492	3	,233
Pair 6	Tempe - Temps	-,17500	,26300	,13150	-,59348	,24348	-1,331	3	,275

Anexo 4. Prueba ANOVA de comparación de medias y múltiple-Duncan en la entrada de los sistemas.

Comparación de valores de entrada

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
DBO	Between Groups	208356555,500	2	104178277,750	3,310	,084
	Within Groups	283286394,750	9	31476266,083		
	Total	491642950,250	11			
SST	Between Groups	1539171460,802	2	769585730,401	8,574	,008
	Within Groups	807775843,488	9	89752871,499		
	Total	2346947304,289	11			
Cond	Between Groups	15931300,000	2	7965640,000	127,7	2,477E-07
	Within Groups	561392,000	9	62376,9		
	Total	16492700,000	11			
OD	Between Groups	2,169	2	1,085	,699	,522
	Within Groups	13,958	9	1,551		
	Total	16,127	11			
pH	Between Groups	4,047	2	2,023	2,114	,177
	Within Groups	8,614	9	,957		
	Total	12,661	11			
Temp	Between Groups	4,112	2	2,056	3,533	,074
	Within Groups	5,238	9	,582		
	Total	9,349	11			

Prueba de comparación múltiple-Duncan

DBO₅

Finca	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
3.00	4	2587,5000	
2.00	4	4358,5000	4358,5000
1.00	4		12178,2500
Sig.		,666	,080

SST

Finca	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
2.00	4	1260,2500	
3.00	4	7690,6500	
1.00	4		27845,8750
Sig.		,362	1,000

CONDUCTIVIDAD

Finca	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
3,00	4	1009,000000		
1,00	4		2495,000000	
2,00	4			3830,000000
Sig.		1,000	1,000	1,000

O.D.

Finca	N	Subset for alpha = 0.05
		1
3.00	4	1,0075
2.00	4	1,6050
1.00	4	2,0450
Sig.		,289

pH

Finca	N	Subset for alpha = 0.05
		1
3.00	4	3,9625
1.00	4	5,0975
2.00	4	5,2725
Sig.		,103

T°C

	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
1.00	4	24,8500	
3.00	4	25,7000	25,7000
2.00	4		26,2750
Sig.		,150	,314

Anexo 5. Prueba ANOVA de comparación de medias y múltiple-Duncan en la salida de los sistemas.

Comparación de medias para los valores de salida**ANOVA**

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
DBO	Between Groups	82824860,167	2	41412430,083	12,806	,002
	Within Groups	29105321,500	9	3233924,611		
	Total	111930181,667	11			
SST	Between Groups	439549441,292	2	219774720,646	5,547	,027
	Within Groups	356609695,438	9	39623299,493		
	Total	796159136,729	11			
Cond	Between Groups	19125700,000	2	9562830,000	169,600	,000
	Within Groups	507386,000	9	56376,200		
	Total	19633000,000	11			
OD	Between Groups	,942	2	,471	,385	,691
	Within Groups	11,015	9	1,224		
	Total	11,957	11			
pH	Between Groups	2,973	2	1,487	,854	,458
	Within Groups	15,672	9	1,741		
	Total	18,645	11			
Temp	Between Groups	1,862	2	,931	1,631	,249
	Within Groups	5,135	9	,571		
	Total	6,997	11			

Prueba de comparación multiple-Duncan

DBO₅

Finca	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
3.00	4	178,0000	
2.00	4		4435,7500
1.00	4		6485,7500
Sig.		1,000	,141

SST

Finca	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
2.00	4	613,7500	
3.00	4	833,0000	
1.00	4		13560,6250
Sig.		,962	1,000

CONDUCTIVIDAD

Finca	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
3,00	4	749,500000	
2,00	4		3377,500000
1,00	4		3475,000000
Sig.		1,000	,576

O.D.

Finca	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	
3.00	4	1,3525	
2.00	4	1,7300	
1.00	4	2,0375	
Sig.		,424	

pH

Finca	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	
1.00	4	4,2400	
3.00	4	5,0375	
2.00	4	5,4375	
Sig.		,251	

T°C

Finca	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	
1.00	4	25,1750	
3.00	4	25,8750	
2.00	4	26,1000	
Sig.		,132	