

**EFICIENCIA DE UN FILTRO EN GEOTEXTIL NO TEJIDO PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CAFÉ EN LA FINCA “CAMPO
BELLO” EL ZARZAL (TAMBO-CAUCA).**



Uniautónoma
DEL CAUCA

**ANGIE MILENA BASTIDAS DORADO
ANGELICA MARIA VASQUEZ CASSO**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYÁN – CAUCA
2022**

**EFICIENCIA DE UN FILTRO EN GEOTEXTIL NO TEJIDO PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CAFÉ EN LA FINCA “CAMPO
BELLO” EL ZARZAL (TAMBO-CAUCA).**



**ANGIE MILENA BASTIDAS DORADO
ANGELICA MARIA VASQUEZ CASSO**

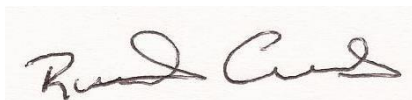
**Trabajo de investigación como requisito para optar por el título de
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO**

**Director trabajo de grado modalidad investigación Ing.
Ronald Edinson Cerón
M.S.c en ingeniería ambiental**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYÁN – CAUCA
2022**

NOTA DE ACEPTACIÓN

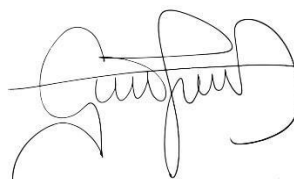
Este trabajo titulado “**EFICIENCIA DE UN FILTRO EN GEOTEXTIL NO TEJIDO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CAFÉ EN LA FINCA “CAMPO BELLO” EL ZARZAL (TAMBO-CAUCA)**”, realizado por las estudiantes Angie Milena Bastidas Dorado y Angélica María Vásquez Casso. Es **APROBADO** en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca para optar por el título profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.



Director de grado: Ronald Edinson Ceron



Jurado: Arnol Arias Hoyos



Jurado: Edwin Fernando Sierra Gaviria

Dedicatoria

A Dios por darme la oportunidad de llegar hasta esta etapa de mi vida y bendecirme con una familia tan maravillosa quienes siempre han estado acompañándome en este proceso de manera incondicional.

A mi padre Jaime Bastidas por su apoyo y sacrificio durante este tiempo de formación.

A todas las personas que de un modo u otro colaboraron para que este logro se hiciera realidad.

ANGIE MILENA BASTIDAS DORADO

A Dios por darme sabiduría, conocimiento y entendimiento, por permitirme haber llegado hasta este momento tan importante en mi formación profesional.

A la persona que más admiro, mi madre Elia Casso, gracias a ella por estar siempre apoyándome incondicionalmente, por enseñarme a enfrentar nuevos retos, por animarme cada día sin importar los tropiezos y así alcanzar mis metas, porque con su ayuda este sueño fue posible.

A mi compañera de trabajo de grado y amiga, Angie, tu ayuda fue fundamental en este proceso, por tu apoyo y enseñanzas. Gracias por tu amistad.

ANGELICA MARIA VASQUEZ CASSO

Agradecimientos

Agradecemos primero que todo a Dios, por brindarnos la inteligencia, la fe y la fortaleza en cada momento durante este proceso. A nuestras familias por estar en los momentos que más los necesitamos, brindándonos su apoyo incondicional

A todo el cuerpo docente, en especial a nuestro director de grado el ingeniero Ronald Edinson Cerón, gracias por el acompañamiento, apoyo y conocimientos que nos brindó a lo largo de esta investigación, los cuales sirvieron para culminar esta etapa de nuestras vidas

Queremos agradecer a todos nuestros compañeros y amigos, con quienes compartimos momentos de felicidad, amistad, aprendizaje y su apoyo.

Finalmente agradezco a mi compañera y amiga por ser una persona paciente, perseverante, comprometida y responsable, lo cual permitió realizar un excelente trabajo en equipo.

ANGIE MILENA BASTIDAS DORADO
ANGELICA MARIA VASQUEZ CASSO

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	12
1. CAPÍTULO I: PROBLEMA	13
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.2. JUSTIFICACIÓN	15
1.3. OBJETIVOS	17
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	17
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO O REFERENTES CONCEPTUALES.	18
2.1. ANTECEDENTES.	18
2.2. BASES TEÓRICAS.	19
2.2.1. Recurso hídrico.	19
2.2.1.1. Importancia del recurso hídrico en Colombia.	19
2.2.1.2. Contaminación del recurso hídrico en Colombia.	19
2.2.2. Vertimiento de aguas residuales.	19
2.2.2.1. Aguas industriales.	20
2.2.3. Calidad del agua	21
2.2.3.1. ¿Importancia de la calidad del agua?	21
2.2.3.2. La agricultura y su influencia en la calidad del agua.	21
2.2.3.3. Caracterización de aguas residuales.	22
2.2.3.4. Parámetros físico químicos.	22
2.2.4. Generalidades del café.	22
2.2.4.1. Composición del fruto del café.	23
2.2.4.2. Mucílago	23
2.2.5. Beneficio del café.	23
2.2.5.1. Beneficio seco.	24
2.2.5.2. Beneficio húmedo del café.	24
2.2.6. Aguas residuales del café.	25
2.2.7. Tipos de tratamiento para las aguas residuales de café.	25
2.2.7.1. Tratamiento primario.	25

2.2.7.2. Tratamiento secundario o final de las aguas residuales.	26
2.2.8. Geotextil No tejido.	27
2.3. BASES LEGALES	27
2.3.1. Normatividad nacional.	27
3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	28
3. 1. ETAPA 1. LÍNEA BASE DEL PROCESO PRODUCTIVO.	28
3.1.1. Descripción del área de estudio.	28
3.1.2. Aforo de los vertimientos.	30
3.2. ETAPA 2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL FILTRO.	31
3.2.1. Determinación del calibre del geotextil no tejido a utilizar.	31
3.2.2. Cálculo de la velocidad de filtración.	32
3.2.3. Construcción de los filtros (piloto y réplica).	33
3.2.4. Determinación del caudal.	34
3.3. ETAPA 3: EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE CARGA CONTAMINANTE DEL FILTRO.	35
3.3.1. Montaje del sistema.	35
3.3.2. Toma de muestras (tanque y filtros).	36
3.3.3. Análisis de laboratorio.	37
3.3.4. Análisis estadístico.	38
4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS.	40
4.1. Línea base del proceso productivo del café.	40
4.2. Diseño y construcción del filtro.	41
4.3. Eficiencia de la remoción de carga contaminante del filtro.	43
4.3.1. pH	43
4.3.2. DQO	44
4.3.3. SST	45
4.3.4. Método estadístico	47
5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	50
5.1 Conclusiones	50
5.2. Recomendaciones	51
REFERENCIAS	52

Lista de tablas

Tabla 1. Normatividad legal vigente.	27
Tabla 2. Caudales del vertimiento.....	40
Tabla 3. Resultados del Potencial de Hidrógeno.	43
Tabla 4. Resultados de Demanda Química de Oxígeno.....	44
Tabla 5. Resultados de Sólidos Suspendidos Totales.	46
Tabla 6. Método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas para las concentraciones de DQO.	47
Tabla 7. Método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas para las concentraciones de SST.....	48

Lista de figuras

Figura 1. Descripción del fruto.	23
Figura 2. Ubicación geográfica de la zona de estudio. Finca “Campo Bello”.....	29
Figura 3. Aforo volumétrico manual.	30
Figura 4. Diseño de los filtros (piloto y réplica).....	33
Figura 5. Diseño del sistema.....	35

Lista de gráficas

Gráfica 1. Caudales del filtro (prueba y réplica).....	42
---	----

Lista de diagramas

Diagrama 1. Proceso de beneficio seco de café.....	24
Diagrama 2. Proceso del beneficio húmedo del café.....	25
Diagrama 3. Información recopilada para conocer la línea base del proceso del beneficio húmedo del café.....	29

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Método para hallar caudal del vertimiento.....	30
Ecuación 2. Método para hallar la velocidad de filtración.	32
Ecuación 3. Método para hallar el espesor del geotextil.	32
Ecuación 4. Método para hallar tiempo de retención.....	32
Ecuación 5. Método para hallar el volumen del geotextil.	33
Ecuación 6. Método para hallar el caudal de los filtros.	34
Ecuación 7. Comparación de medias con población apareadas.	39
Ecuación 8. Muestra conjunta.....	39

Lista de fotografías

Fotografía 1. Entrevista.....	28
Fotografía 2. Toma de volumen y tiempo del vertimiento.	31
Fotografía 3. Elaboración de los filtros (prueba y réplica).....	34
Fotografía 4. Montaje del sistema.....	36
Fotografía 5. Toma de muestras.	37
Fotografía 6. Análisis de laboratorio.	38

RESUMEN

El 70% de la contaminación del agua corresponde a la agricultura donde sus principales factores de degradación se producen en el suelo y en el recurso hídrico, estas prácticas agrícolas insostenibles generan efectos en el medio ambiente reduciendo la materia orgánica y su capacidad de filtración. Una de las actividades de mayor demanda a nivel mundial son los procesos agroindustriales del beneficio húmedo del café, que genera consigo enormes cantidades de desechos de pulpa y mucílago, que, si no son manejados apropiadamente, representan respectivamente el 72% y el 28% de la contaminación que llega a las corrientes naturales de agua. Estos subproductos tienen escaso o nulo aprovechamiento, por lo cual se limita su potencial para la obtención de nutrientes valiosos para la industria [1].

Las investigaciones realizadas con respecto a esta temática han demostrado constante evolución, ya que se ha querido buscar alternativas innovadoras de solución económicas y viables que reduzcan en gran medida la contaminación generada por los vertimientos directos de aguas residuales industriales a los cuerpos receptores. Los estudios encontrados que favorecieron a este trabajo de grado fueron, el uso de geotextil en reemplazo a materiales granulares, la implementación de geotextil en el tratamiento de aguas piscícolas y para aguas grises.

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo principal evaluar la eficiencia de un filtro en geotextil no tejido para la remoción de sólidos suspendidos totales y demanda química de oxígeno en aguas residuales del lavado del mucílago fermentado del café en la finca “campo bello” El Zarzal (Tambo-Cauca). Para el desarrollo de este, se planteó la siguiente metodología la cual está dividida en tres etapas, la primera se basó en la línea base del proceso productivo del café, la segunda consistió en el diseño y construcción del filtro y la tercera determinó la eficiencia de la remoción de carga contaminante del filtro.

De acuerdo con los resultados y el análisis se determinó del punto de vertimiento de las aguas mieles del café, la cantidad de agua contaminada por unidad de tiempo. La construcción del diseño del filtro (prueba y réplica), permitió obtener datos estadísticos que evaluaron el funcionamiento y eficiencia del sistema, por lo tanto, permitió establecer que la capacidad de remoción de DQO fue de 26% y SST de 22% y 19%.

Palabras claves: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Potencial de hidrógeno (pH), aguas residuales de café, sistema de tratamiento, geotextil no tejido.

ABSTRACT

70% of water contamination corresponds to agriculture where the main degradation factors are produced in the soil and in the water resource; these unsustainable agricultural practices generate effects on the environment by reducing organic matter and its filtration capacity. One of the activities of greatest demand worldwide are the agroindustrial processes of wet processing of coffee, which generates enormous quantities of pulp and mucilage waste, which if not properly managed, represent 72% and 28% of the contamination that reaches natural water currents, respectively. These by-products have little or no use, which limits their potential for obtaining valuable nutrients for the industry.

The research carried out on this subject has shown constant evolution, since there has been a search for innovative, economical and viable alternative solutions that greatly reduce the contamination generated by the direct discharge of industrial wastewater into the receiving bodies. The studies found that favored this degree work were the use of geotextile as a replacement for granular materials, the implementation of geotextile in the treatment of fish water and gray water.

The main objective of this research work was to evaluate the efficiency of a non-woven geotextile filter for the removal of total suspended solids and chemical oxygen demand in wastewater from the washing of fermented coffee mucilage at the "campo bello" farm in El Zarzal (Tambo-Cauca). For the development of this project, the following methodology was proposed, which is divided into three stages: the first was based on the baseline of the coffee production process, the second consisted of the design and construction of the filter, and the third determined the efficiency of the removal of the pollutant load of the filter.

According to the results and the analysis, the amount of contaminated water per unit of time was determined at the point of discharge of the coffee water. The construction of the filter design (test and replication), allowed obtaining statistical data that evaluated the operation and efficiency of the system, therefore, it was possible to establish that the COD removal capacity was 26% and TSS 22% and 19%.

Keyword: chemical oxygen demand (COD), total suspended solids (TSS), hydrogen potential (pH), coffee wastewater, treatment system, non-woven geotextiles.

INTRODUCCIÓN

La calidad del café colombiano ha sido valorada y reconocida por los consumidores de café en el mundo, como una de las mejores dentro del café Arábica. A diferencia de granos de otros orígenes, el Café de Colombia es café "lavado", es decir, procesado por vía húmeda, lo que le otorga características moderadas en amargo y cuerpo, acidez y aroma pronunciados [2].

Sin embargo, durante el proceso de beneficio húmedo del café se generan dos subproductos: la pulpa y el mucílago del café, en donde para su separación se utilizan aproximadamente de 40 a 60 litros de agua por kilogramo de café tratado. Estas grandes cantidades de aguas residuales al no recibir un tratamiento previo antes de su vertimiento ocasiona [3], desequilibrios del ecosistema receptor y disminución de su productividad, debido a que estas aguas contienen grandes cantidades de materia orgánica que generan que las bacterias se metabolizan o descomponen produciendo valores bajos pH, alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO), además de la presencia de sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos sedimentables (SSS) [4] . Es así como la industria cafetera se convierte en una de las más contaminantes.

De acuerdo, a tal problemática El Centro Nacional de Investigaciones de café "Cenicafé" ha realizado investigación científica y desarrollo tecnológico para el sector cafetero, con el fin de adoptar de tecnologías limpias de beneficio húmedo del café, logrando una reducción importante del consumo de agua y por lo tanto de la contaminación generada, sin afectar su calidad. Sin embargo, esta contaminación es susceptible de reducirse significativamente.

Por consiguiente, es importante tomar medidas de prevención para reducir los índices de contaminación por estas aguas residuales; es por ello que el presente trabajo de investigación se desarrolló con el objetivo de determinar la eficiencia de remoción de DQO y SST en el agua residual del café a través de un filtro empacado.

1. CAPÍTULO I: PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es un recurso indispensable para el sostenimiento de la vida en el planeta, pero desafortunadamente el incremento poblacional y el afán del hombre por satisfacer sus necesidades ha generado su contaminación, ocasionando el efecto invernadero, metano y óxido nitroso que contribuyen en gran medida a la contaminación del aire, suelo y agua, y su vez, su agotamiento [5]. El 70% de la contaminación del agua corresponde a la agricultura donde sus principales factores de degradación se producen en el suelo y en el recurso hídrico (superficiales y subterráneos), como consecuencia de la erosión y de la escorrentía química. Estas prácticas agrícolas insostenibles generan efectos en el medio ambiente, como lo son, pérdida de biodiversidad del suelo ya que se reduce la materia orgánica y su capacidad de filtración; fomenta el crecimiento de bacterias aerobias que consumen el oxígeno existente debido a las altas concentraciones de nitratos, fosfatos y plaguicidas que estimulan el crecimiento de algas y otros organismos que provocan disminución de la biodiversidad en el agua [6]. El ser humano también se ve perjudicado a causa de la gestión inadecuada de estas aguas residuales, que conlleva a que cientos de millones de personas se vean peligrosamente contaminada o polucionada químicamente. El consumo de estas aguas puede transmitir enfermedades como el cólera, diarreas, hepatitis A, fiebre tifoidea, la poliomielitis entre otras [7].

Una de las actividades de mayor demanda a nivel mundial son los procesos agroindustriales del beneficio húmedo del café, haciendo que su producción se concentre cada vez más en zonas tropicales, las cuales son aptas para su producción, generando consigo enormes cantidades de desechos de pulpa y mucílago, que si no son manejados apropiadamente representan respectivamente el 72% y el 28% de la contaminación que llega a las corrientes naturales de agua, en una proporción de que un kilogramo de fruto procesado contamina igual que las aguas residuales domésticas de un habitante [8].

Por consiguiente, Colombia es el séptimo país exportador de café soluble a nivel mundial y hace parte de un mercado en continuo crecimiento, a pesar de ello se efectúan una serie de procedimientos inadecuados que producen grandes volúmenes de aguas residuales no tratadas en el proceso del beneficio húmedo del café, generando consigo residuos contaminantes que eventualmente afectan el agua, suelo y flora circundante [9]. Su producción conlleva a la generación de aguas residuales caracterizadas por un alto contenido de color que es producido por los minerales disueltos o ácidos húmicos de las plantas o por la presencia de hierro y magnesio, alta Demanda Química de Oxígeno (27400 mg/L), materia orgánica soluble, Sólidos Suspendidos Totales (10991,34 - 29642,73 mg/l) y componentes inhibitorios para los procesos biológicos [10].

El panorama se observa más grave teniendo en cuenta que para producir 11 millones de sacos de café pergamino seco, se procesan en Colombia cada año aproximadamente 2700 millones de kg de café cereza [11] . A pesar de que el beneficio húmedo del café está regulado bajo leyes, reglamentos, resoluciones y normas ambientales del país, no se lleva a cabo un control eficiente para el aprovechamiento de estos subproductos [12].

El departamento del Cauca es líder en la producción de café de alta calidad, cultivado en pequeñas parcelas por comunidades campesinas, indígenas y afrodescendientes [13], estas realizan su proceso a través del beneficio húmedo el cual genera focos de contaminación que son difíciles de controlar por las leyes ambientales en el país. La mayoría de estas fincas cafeteras no cuentan con sistemas de tratamiento para aguas residuales del café, debido a que la mayoría de caficultores son productores pequeños de bajos recursos y requieren de tecnologías económicas y sustentables; por otro lado, la falta de conciencia ambiental es otro de los factores que influyen en los caficultores a la hora invertir en un sistema de tratamiento de aguas mieles del café.

En el corregimiento de El Zarzal, la producción de café es realizada por pequeños productores, por lo tanto, se tomó como punto de investigación la finca “Campo Bello”. Esta finca es una pequeña productora de café castilla, cuenta con un área aproximadamente de dos hectáreas y su promedio de producción anual es de 320 arrobas de café pergamino seco, para lo cual se necesitan aproximadamente 29 m3 de agua para su respectivo lavado. Las aguas residuales de este proceso son vertidas directamente a los suelos del mismo terreno, en donde a lo largo de su trayecto se crean residuos y contaminantes que pueden llegar a los cuerpos receptores de agua (superficiales y subterráneas) a través de la percolación y escorrentía, creando condiciones anaerobias que deterioran la vida animal y vegetal [14].

Los caficultores de esta zona no cuentan con recursos económicos para establecer un sistema de tratamiento convencional. Por lo tanto, fue necesario buscar e implementar una alternativa de solución para tratamiento de las aguas mieles de café, que sea simple, eficiente y que evite o controle la contaminación ambiental; por ende, se diseñó e implementó un filtro en geotextil no tejido en la finca “Campo Bello” con el fin de determinar su eficiencia en la remoción de carga contaminante para este tipo de aguas residuales.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El 80% de aguas residuales del mundo son vertidas al medio ambiente sin recibir un tratamiento adecuado, es por ello que se ha insistido en tomar medidas para gestionar las aguas residuales de manera eficiente que permita la reutilización y recuperación de los recursos naturales. Ante esta situación se ha establecido por normatividad que los gobiernos deben convertir el tratamiento de las aguas residuales en una prioridad, por consiguiente, se han llevado a cabo numerosos proyectos de inversión de infraestructura para el saneamiento del agua, logrando beneficios a la salud pública, medio ambiente y a las economías tanto a corto como a largo plazo [15].

Al evaluar esta situación a nivel de Colombia el tratamiento de aguas residuales no está siendo implementado en todos los sectores de la industria, conllevando a problemas como el vertimiento de líquidos que contaminan los ríos y mares propiciando alteraciones y degradación del medio ambiente. Para la mitigación de este tipo de contaminación se hace el uso de plantas de tratamiento de aguas residuales que deben estar regidas bajo la Resolución de Vertimientos Puntuales a Cuerpos de Aguas Superficiales y a los Sistemas de Alcantarillado Público [16].

Con referencia al sector cafetero, Colombia utiliza el proceso del beneficio húmedo de café, en este proceso se generan líquidos y desechos con altos porcentajes de material orgánico. Con el fin de disminuir dichas cargas contaminantes, Cenicafé ha realizado investigaciones sobre tecnologías limpias para el beneficio húmedo del café, una de ellas es el Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA) que logra reducir en gran medida el consumo de agua y la contaminación generada, sin afectar su calidad [2].

A nivel regional, el departamento del Cauca es uno de los principales motores de la industria cafetera, sin embargo, es una actividad que tradicionalmente ha generado problemas de contaminación ambiental y altos consumos de agua, a causa del inadecuado tratamiento, aprovechamiento y disposición final de los subproductos del beneficio convencional del café por vía húmeda [17]. Por esta razón la Federación Nacional de Cafeteros (Comité de Cafeteros del Cauca) adoptó la implementación del SMTA propuesta por Cenicafé, para la regulación de las cargas contaminantes presentes en los vertimientos de aguas residuales de café.

Este trabajo de investigación se ejecuta con el fin de determinar la eficiencia de un sistema de filtración haciendo uso de geotextil no tejido, y comprobar si el material propuesto para la elaboración del sistema remueve las cargas contaminantes presentes en las aguas residuales de café y si estas se ajustan a los parámetros establecidos por la normatividad ambiental legal vigente. También espera comprobar si el sistema propuesto con geotextil NT es eficiente y si este puede reemplazar los tratamientos convencionales para las aguas mieles del café.

Por último, se pretende con este estudio generar un trabajo de grado para dos (2) estudiantes del programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Corporación

Universitaria Autónoma del Cauca, en donde permitirá de igual manera aportar a los caficultores una alternativa de solución para el tratamiento de las aguas residuales del café con el fin de mitigar los impactos ambientales negativos generados durante las etapas del beneficio húmedo del café.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de un filtro en geotextil no tejido para la remoción de sólidos suspendidos totales y demanda química de oxígeno en aguas residuales del lavado de mucílago fermentado del café en la finca “Campo Bello” El Zarzal (Tambo-Cauca).

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la línea base del proceso productivo de café en la finca “Campo Bello”.
- Diseñar un filtro en geotextil no tejido para el tratamiento físico de las aguas residuales del lavado del café.
- Analizar el porcentaje de remoción de DQO y SST de las aguas mieles del café, mediante un método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO O REFERENTES CONCEPTUALES.

2.1. ANTECEDENTES.

En el trabajo de grado realizado en el año 2013 “Estudio comparativo para la modificación de materiales granulares por geotextil en un filtro lento de arena promoviendo la calidad del agua para consumo humano” se determinó que el geotextil tiende a mejorar la calidad del agua pero no cumple con la mayoría de parámetros físicos químicos establecidos para el consumo humano, pero sí se concluyó que el geotextil NT presenta un alto porcentaje de retención de sólidos suspendidos totales por ser altamente filtrante, logrando un alto porcentaje de remoción de estas partículas [18].

Por otro lado, en el año 2016 Cenicafé llevó a cabo la cuantificación de la Demanda Química de Oxígeno en los subproductos del proceso de beneficio húmedo del café que ha permitido a Cenicafé plantear estrategias para disminuir la contaminación producida durante el beneficio húmedo del café y estimar la problemática de contaminación que producen la pulpa y el mucílago cuando se disponen directamente sobre las corrientes de agua. Como resultados se obtuvo que la distribución porcentual de la demanda química de oxígeno, nitrógeno total y los subproductos de un proceso convencional de beneficio húmedo del café indudable que la pulpa del café es el subproducto del proceso de beneficio húmedo del café que mayor problema de contaminación hídrica puede ocasionar, si no se maneja y dispone adecuadamente en el medio ambiente [19].

En el artículo realizado por Luna, Fernández y Caicedo publicado en el año 2017, también se puede evidenciar las ventajas de los geotextiles para el uso potencial de distintos tipos de tratamientos para aguas residuales, no solo por su gran capacidad de reducción de contaminantes; además evita el uso de agentes químicos que pueden incrementar los costos de operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento [20].

Por último, en la investigación realizada en el año 2020 “El uso de geotextiles para el tratamiento de aguas grises” se describe la construcción y muestreo de filtros con membrana de geotextil, con el fin de mejorar la calidad de las aguas grises domésticas. Este trabajo permitió identificar que el sistema propuesto anteriormente puede ser utilizado para un tratamiento domiciliario. También se pudo determinar que el sistema puede mejorar, incluyendo otra unidad de tratamiento como parte del sistema, ya que no se logró un mayor porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales y demanda química de oxígeno por lo cual se hace la recomendación de Evaluar la unidad de filtración de geotextiles en combinación con otras unidades, como una trampa de grasas o un filtro biológico [21].

2.2. BASES TEÓRICAS.

2.2.1. Recurso hídrico.

El agua es un recurso de vital importancia para la vida en la Tierra. El 70 % del planeta está formado por agua, desde los océanos hasta los ríos pasando por los lagos, los arroyos y las lagunas [22]. Además, el agua es un elemento de suma importancia para los sectores industriales, agrícolas y pecuarios, ya que la mayoría de sus actividades productivas están ligadas al consumo directo e indirecto del recurso hídrico [23].

2.2.1.1. Importancia del recurso hídrico en Colombia.

Colombia es uno de los países con mayor riqueza hídrica y diversidad biológica, presenta una precipitación anual de 3000 mm lo que representa una significativa abundancia hídrica con un nivel promedio anual de lluvias a nivel mundial de 900 mm. Además, se pueden encontrar 6 tipos de aguas: aguas lluvias, aguas superficiales, aguas subterráneas, aguas termo minerales, aguas marinas y oceánicas y aguas de alimentación glacial [23].

El territorio colombiano posee 5 grandes vertientes hidrográficas: Caribe, Orinoco, Amazonas, Pacífico y Catatumbo, de las cuales el 80% son aguas potables que se consumen en el país y sus ecosistemas de alta montaña que conservan entre el 30 y el 60% del agua en las zonas húmedas [23].

2.2.1.2. Contaminación del recurso hídrico en Colombia.

El consumo excesivo de agua ha generado que Colombia se convierta en un país vulnerable a riesgos de escasez de agua, pese a que este posee una mayor oferta hídrica en el mundo [24].

Se estima que la industria, el sector agropecuario y las aguas domésticas generan 9 mil toneladas de materia orgánica contaminando el recurso hídrico debido a la baja inversión en infraestructura sanitaria y saneamiento básico tanto pública como privada en un gran porcentaje de los municipios del país [25].

Según el Índice de Calidad del Agua (ICA) el sector industrial es el mayor contribuyente de carga orgánica neta que se descarga a los cuerpos de agua, estimada en 51% de demanda biológica de oxígeno (DBO), 62% en demanda química de oxígeno (DQO), con respecto a la carga total agregada por los tres sectores (agricultura, industria y doméstico) [26].

2.2.2. Vertimiento de aguas residuales.

Es la descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido [27].

2.2.2.1. Aguas industriales.

Las aguas residuales industriales se generan como consecuencia de las actividades de fábricas y centros de producción, estas aguas poseen químicos tanto inorgánicos como orgánicos que son tóxicos y difíciles de degradar [28]. La causa principal de contaminación es por productos orgánicos los cuales se identifican por la disminución de oxígeno gracias al proceso de degradación en el ámbito biológico [29].

2.2.2.1.1. Afectaciones de las aguas industriales

- **Agua subterránea**

El agua subterránea es agua dulce, proveniente de la infiltración de aguas lluvias, almacenada en poros del subsuelo y grietas de las rocas, conformando depósitos denominados acuíferos [30].

Su calidad se determina de acuerdo a la composición y uso del terreno que varía según su utilidad ya sea urbano, industrial o agrícola. Las aguas que se penetran por terrenos arenosos, por efecto de la filtración, están menos contaminadas que las que discurren por terrenos arcillosos, que son más impermeables, por lo que el agua no se filtra, sino que circula alrededor de las grietas, recogiendo todas las impurezas a su paso [31].

De forma general, las aguas subterráneas pueden sufrir:

- Contaminación Directa (sin dilución): cuando las sustancias contaminantes se introducen en el subsuelo y alcanzan directamente el acuífero [30].
- Contaminación Difusa (con dilución): cuando se produce mediante la recarga natural del acuífero, por ejemplo, la infiltración de aguas procedentes del arrastre del exceso de plaguicidas y fertilizantes agrícolas que provoca una creciente concentración de nitratos en las aguas [30].

- **Aguas superficiales**

Las aguas superficiales o Eutrofización son aquellas que se encuentran sobre la superficie del suelo como las que se encuentran contenidas en ríos, embalses y lagos. Estas se producen por la escorrentía generada a partir de las precipitaciones o por el afloramiento de aguas subterráneas. Estas aguas son muy susceptibles a la contaminación [32].

Las aguas superficiales pueden clasificarse como:

- Aguas loticas o corrientes: Son las masas de agua que se mueven siempre en una misma dirección como ríos, manantiales, riachuelos, arroyos [32].
- Aguas lenticas: Se denominan aguas lenticas a las interiores quietas o estancadas tales como lagos, lagunas, charcas, humedales y pantanos [32].

Artificiales o muy modificadas: Las aguas artificiales, (una masa de agua superficial creada por la actividad humana) o muy modificadas, (se trata de una masa de agua superficial que, como consecuencia de alteraciones físicas producidas por la actividad humana, ha experimentado un cambio sustancial en su naturaleza) [33].

2.2.3. Calidad del agua

La calidad de agua se relaciona con el conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos que indican que el agua puede ser usada para diferentes propósitos como: doméstico, riego, recreación e industria. La calidad del agua define las características del agua que pueden afectar su resiliencia a un uso específico [32].

El análisis de cualquier agua revela la presencia de gases, elementos minerales, elementos orgánicos en solución o suspensión y microorganismos patógenos relacionados con relación a la calidad natural del agua [34].

2.2.3.1. ¿Importancia de la calidad del agua?

La disponibilidad de agua para consumo humano cada vez es menor, a causa del crecimiento poblacional, aumento del consumo per cápita, contaminación de las fuentes de agua en general y al manejo inadecuado de las cuencas hidrográficas.

El problema de la calidad de agua es tan importante como aquellos relativos a la escasez de la misma, dado que ciertos elementos solubles que entran en contacto directo a fuentes de agua, representan un peligro inminente, alterando las condiciones y características naturales del agua que provocan enfermedades en la salud pública [34].

2.2.3.2. La agricultura y su influencia en la calidad del agua.

Uno de los problemas más relevantes en la mayoría de los países de Latinoamérica, es la contaminación proveniente de las fuentes no puntuales, como es el caso de la agricultura donde se hace uso del 70% de los recursos hídricos del mundo, que conllevan a la degradación de las fuentes de aguas superficiales y subterráneas, debido a la erosión y la escorrentía con productos proveniente de grandes cantidades de sales, nutrientes y agroquímicos [34].

La agricultura contamina principalmente las aguas superficiales, esta, está directamente relacionada con el proceso de pérdida de suelo y arrastre de sedimentos. Ésta posee dos magnitudes principales: la dimensión física (pérdida de

la capa arable del suelo), y la degradación de la tierra como consecuencia de la erosión laminar y cárcavas que provocan altos niveles de turbidez [34].

2.2.3.3. Caracterización de aguas residuales.

En la caracterización de agua residual se emplean métodos de análisis cuantitativos como cualitativos. Los primeros pueden ser gravimétricos, volumétricos o fisicoquímicos estos determinan de manera precisa la composición química del agua residual. El método cualitativo busca conocer las características físicas y biológicas del agua [35].

2.2.3.4. Parámetros físico químicos.

Los resultados de los análisis de muestras de agua residual se expresan en unidades de medida tanto físicas como químicas. Las mediciones de parámetros químicos suelen expresarse en unidades físicas, miligramo por litro (mg/l) o gramo por metro cúbico (g/m³) [35].

- pH

El potencial de hidrógeno (pH) es el valor que establece si una sustancia es ácida, neutra o básica, calculando el número de iones de hidrógeno presentes en determinadas disoluciones [36].

Se mide en una escala a partir de 0 a 14, en donde 7 es una sustancia neutra, si es menor a 7 indica que es ácida y si es mayor a 7 indica que es básica [36].

- Sólidos suspendidos totales

Los sólidos en suspensión están compuestos por materia orgánica e inorgánica. El incremento en estas dos variables se relaciona por el aumento en la turbidez del agua e indican un crecimiento en los aportes minerales u orgánicos que provienen tanto de la erosión como de efluentes [36].

- Demanda química de oxígeno

La DQO es una medida de la materia orgánica e inorgánica en el agua. Está determina la cantidad de oxígeno disuelto requerida para la oxidación química completa de contaminantes, se expresa en mg/l [37].

2.2.4. Generalidades del café.

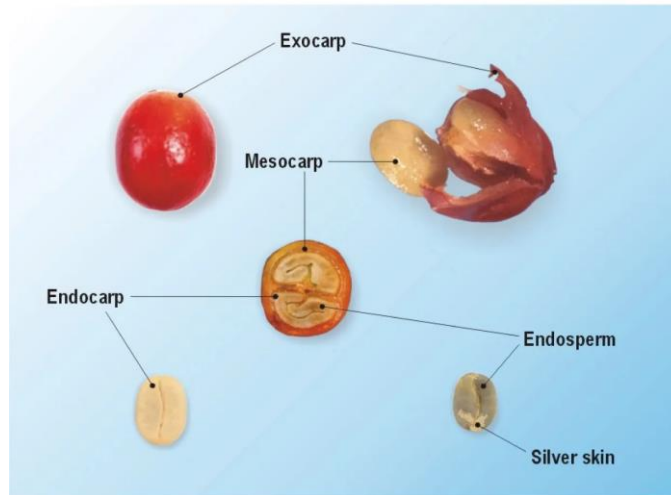
Los cafetos son arbustos que llegan a medir los 12 m de altura y en otras variedades hasta los 20m. Estos son podados entre los 2 y 4 m de altura para su recolección.

Un cafeto requiere alrededor de 3 años para la primera floración y 5 años para la primera cosecha. Se producen 2 floraciones al año que dependen de la humedad ambiental, pueden llegar hasta 8 veces, por esta razón se encuentran en la misma planta frutos en diferente estado de madurez. El fruto madura en 28 semanas después de la floración, con forma elíptica y con 1.5 cm de largo [38].

2.2.4.1. Composición del fruto del café.

La cereza de café está formada por cinco capas principales: epicarpio (piel), mesocarpio (pulpa), endocarpio (pergamino) y dos semillas. En el interior de estas hay dos semillas separadas por un surco y rodeadas de pulpa, estos son los granos de café, protegidos a su vez, por una película plateada y sobre esta, un tegumento fino amarillo (pergamino) [39].

Figura 1. Descripción del fruto.



Fuente: Imágenes Google [39].

2.2.4.2. Mucílago

El mucílago o mesocarpio es un componente del café, que queda expuesto cuando este es despulpado, es decir la separación del epicarpio (cáscara) del resto.

El mesocarpio es un coloide con gran capacidad de retención de agua y humedad, varía de acuerdo a las condiciones climáticas que prevalecen durante la recolección [40]. Este compuesto es uno de los residuos que genera alta contaminación debido a su composición química, por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra se generan aproximadamente 55 500 toneladas de mucílago fresco [38].

2.2.5. Beneficio del café.

El beneficio del café es el proceso en donde se logra transformar el café cereza en café pergamino seco, que consiste en la separación de las partes del fruto con la finalidad de preservar su calidad física, química, organoléptica y sanitaria [38].

En el mundo existen dos tipos de beneficiado: seco y húmedo.

2.2.5.1. Beneficio seco.

El beneficiado seco del café consiste en deshidratar los frutos recolectados y someterlos a secado inmediato, con el objeto de preservar los granos de café y trillarlos después. En una sola operación se remueve todas las coberturas deshidratadas (exocarpio, mesocarpio, endocarpio y parte del endospermo) para obtener la semilla (endospermo) y someterla después al proceso de torrefacción (tostado) y posteriormente a ser comercializado. Este beneficiado del café se aplica para cafés robustas, que tienen poco mucílago.

Diagrama 1. Proceso de beneficio seco de café.



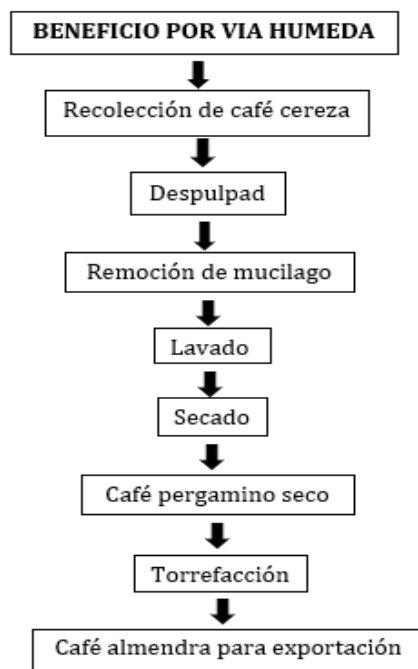
Fuente: Elaboración propia.

2.2.5.2. Beneficio húmedo del café.

La función principal del proceso físico del beneficio húmedo (BH) es la transformación de café cereza a café pergamino, en el que se eliminan las dos primeras capas del grano de café (pulpa y mucílago) mediante la utilización de agua y se obtiene un grano de café pergamino que es la tercera capa que lo cubre [41].

En Colombia, se utiliza el beneficio húmedo, gracias al cual se obtiene características de acidez y aromas pronunciados, amargos moderados. Por esta vía se obtienen los llamados cafés lavados, finos o suaves [41].

Diagrama 2. Proceso del beneficio húmedo del café.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.6. Aguas residuales del café.

En las etapas de producción del café, sólo se aprovecha el 5 % del producto fresco y se generan residuos como las aguas mieles, las cuales son ácidas y ricas en materia orgánica. Son particularmente nocivas si se descargan a cuerpos hídricos, y si se retienen en lagunas o fosas, se puede contaminar el agua subterránea [1].

La naturaleza química de las aguas residuales del beneficio húmedo del café (BHC), está asociada con la composición físico-química de la pulpa y el mucílago, debido a que estos dos elementos proporcionan partículas y componentes durante el contacto turbulento e intenso con el agua limpia durante el proceso de BHC [38].

2.2.7. Tipos de tratamiento para las aguas residuales de café.

2.2.7.1. Tratamiento primario.

- Separación y eliminación de sólidos

Para la separación de los sólidos de manera fácil y económica se implementan tamices que son mallas metálicas con agujeros con dimensiones pequeñas que permiten que el agua pase y que las partículas de mayor tamaño queden atrapadas. Generalmente el lugar adecuado para instalar estas mallas es al final del desagüe

de lavado y/o a la entrada de los sistemas de tratamiento, específicamente antes de ingresar en el tanque de almacenamiento [40].

- Eliminar la acidez de las aguas residuales de café a valores neutros.

Antes de ingresar las aguas al tratamiento secundario se debe regular el pH. Es decir, las aguas contaminadas deben ser almacenadas en un recipiente para realizar su respectivo procedimiento [40].

Las aguas residuales de café, por ser ácidas (pH entre 3.5 y 4.5), necesitan ser tratadas para eliminación de su acidez, llevando el pH a un valor neutro cercano a 7 [40].

2.2.7.2. Tratamiento secundario o final de las aguas residuales.

Según la disposición económica de los productores de café y dependiendo del terreno se pueden escoger algunos de los siguientes tratamientos:

- Biodigestor Tubular.

Es una bolsa de plástico resistente, se introduce estiércol de cerdo o vacuno (bacterias), que limpia las aguas residuales de café y al mismo tiempo produce y almacena biogás. La eficiencia de este tratamiento está entre el 70% y 85% [42].

La vida útil de este sistema es de aproximadamente de 8 a 10 años con los cuidados requeridos, por ejemplo, que esté protegido del sol y la lluvia [42].

- Escurrimiento superficial controlado.

Consiste en suministrar humedad suficiente en un área sembrada con plantas para su crecimiento óptimo, las cuales absorben el agua y eliminan la contaminación por evaporación o transpiración en la vegetación. Al no haber un efluente se puede considerar una eficiencia del 100% [42].

La vida útil del sistema es indefinida ya que depende de los cuidados requeridos antes y después de cada cosecha [42].

- Humedal por biofiltración.

Son sistemas que usan plantas como parte activa del tratamiento. Las plantas crecen encima de un humedal artificial el cual está relleno de grava y/o arena. Las aguas residuales ingresan en un extremo y se percolan entre la grava y las raíces de las plantas, recolectados al final del lecho. La eficiencia de este tratamiento es de 70% y 80% [42].

La vida útil del sistema es indefinida ya que depende de los cuidados requeridos antes y después de cada cosecha [42].

2.2.8. Geotextil No tejido.

Los geotextiles no tejidos son materiales textiles planos, permeables y compuestos por fibras poliméricas termoplásticas. Normalmente están realizados por fibras de polipropileno o poliéster.

Las principales funciones de los geotextiles no tejidos son el drenaje y filtración, ya que dejan pasar el agua y permiten retener sólidos finos. Además, tiene otros usos como separación para terrenos, reforzar y estabilizar el suelo; y proteger barreras impermeables [43].

2.3. BASES LEGALES

En Colombia los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial están regidos mediante la resolución 0631 del 2015, esta permite el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua vertidas por las actividades productivas presentes en los diferentes sectores económicos del país.

Para el desarrollo de este proyecto se empleó esta resolución como apoyo para la identificación y verificación del cumplimiento de los parámetros fisicoquímicos con los que deben contar las aguas residuales del café para su respectivo vertimiento.

2.3.1. Normatividad nacional.

Tabla 1. Normatividad legal vigente.

Norma	Artículos involucrados	Establece
Resolución 0631 del 2015	Capítulo VI. Art 9 agroindustrial	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones [44].

Fuente: Elaboración propia.

3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

METODOLOGÍA

Para dar cumplimiento a los objetivos específicos propuestos anteriormente, la metodología está dividida por tres objetivos específicos en donde se describió de manera puntual los procedimientos que se tuvieron en cuenta para su cumplimiento:

3. 1. ETAPA 1. LÍNEA BASE DEL PROCESO PRODUCTIVO.

El reconocimiento de la línea base del proceso productivo del beneficio de café es fundamental para determinar las materias primas que ingresan a este proceso, e identificar aquellas actividades críticas que más generan vertimientos y poder establecer estudios físicos y químicos si se requieren.

3.1.1. Descripción del área de estudio.

Con el fin de dar cumplimiento al objetivo uno (1), se realizó la salida de campo hacia la finca “Campo Bello” ubicada en el corregimiento de El Zarzal (Tambo-Cauca), una vez estando en el sitio, se procedió a ejecutar un diálogo con los propietarios de la finca, con el fin de conocer a gran rasgo el procedimiento del beneficio húmedo del café, esta entrevista proporcionó la información suficiente acerca de cada una de las etapas del beneficio del café permitiendo identificar el tipo de fertilizantes, número empleados en cosechas, funcionamiento de la maquinaria y consumo hídrico en el proceso productivo del café.

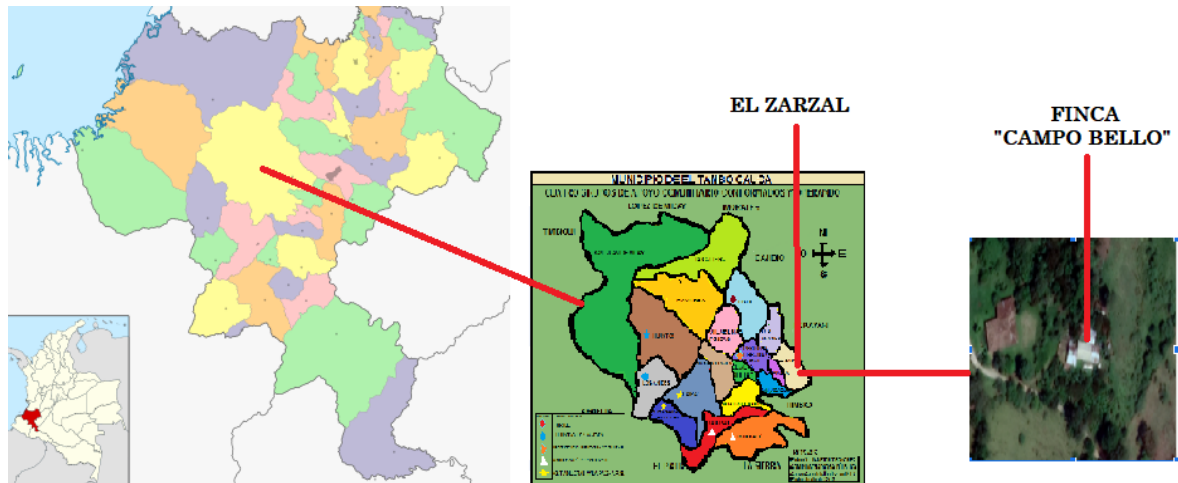
Adicionalmente se realizó un recorrido por el beneficiadero que permitió visualizar y analizar el punto de vertimiento de las aguas residuales del café que se generan en la etapa de fermentación y lavado.

Fotografía 1. Entrevista.



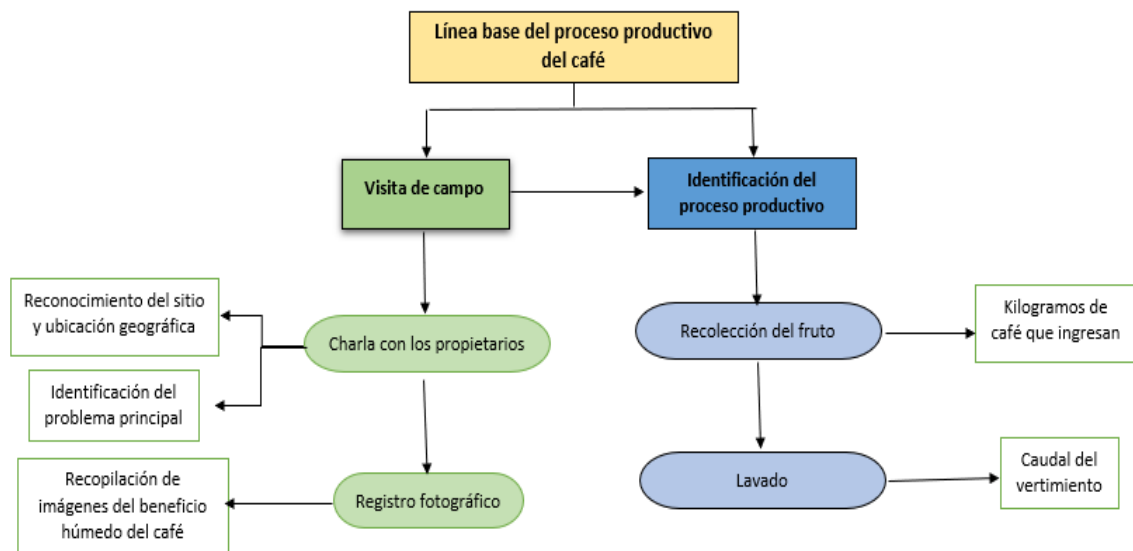
Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Ubicación geográfica de la zona de estudio. Finca “Campo Bello”.



Fuente: Imágenes Google y Google Earth Pro [45] [46].

Diagrama 3. Información recopilada para conocer la línea base del proceso del beneficio húmedo del café.

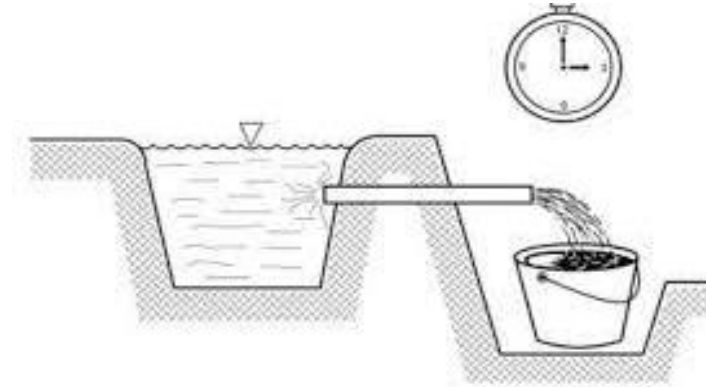


Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Aforo de los vertimientos.

El aforo volumétrico del vertimiento se tomó cada vez que se realizaba el proceso de lavado. El aforo se realizó 12 veces para obtener un promedio del caudal del vertimiento.

Figura 3. Aforo volumétrico manual.



Fuente: Imágenes Google [47]

Se determinó mediante el método volumétrico manual que consta de medir el volumen en función del tiempo de llenado de un recipiente. Se utilizó un cronómetro y un envase aforado de 1 l en el punto de muestreo. Los datos a tener en cuenta para el cálculo final son:

Ecuación 1. Método para hallar caudal del vertimiento.

$$Q = \left(\frac{V}{t}\right)/2$$

Donde:

Q = Caudal (l/s)

V = Volumen (l)

t = Tiempo (s)

Fotografía 2. Toma de volumen y tiempo del vertimiento.



Fuente: Elaboración propia.

3.2. ETAPA 2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL FILTRO.

De acuerdo a los datos obtenidos en la Etapa uno (1), se determinaron las dimensiones y características de un filtro empacado en geotextil no tejido. Se llevó cabo las siguientes actividades:

3.2.1. Determinación del calibre del geotextil no tejido a utilizar.

Para la determinación del calibre se pretendía realizar una prueba mediante el método de filtración en embudo con los geotextiles no tejido: NT 1600 y NT 2000. El geotextil NT 2000 fue imposible de adquirir debido a que este no está siendo importado al país a causa de la situación de salud pública en la que nos encontramos. De tal manera que el geotextil NT 1600 fue el seleccionado ya que este tiene un uso más común y comercial. Además, este geotextil tiene características filtrantes y de drenaje como lo son el tamaño de apertura aparente de 0,025 mm (tamiz 60), permeabilidad de 45×10^{-2} y espesor 0,0254 m.

3.2.2. Cálculo de la velocidad de filtración.

Se determinó la velocidad con que pasa el efluente por el sistema, de acuerdo al calibre del geotextil realizado en la actividad 3.

Para calcular la velocidad de filtración se tuvo en cuenta las siguientes ecuaciones:

Ecuación 2. Método para hallar la velocidad de filtración.

$$v_f = \frac{E}{t_r}$$

Donde:

Vf = Velocidad de filtración (m/s)

E = Espesor (m)

tr = Tiempo de retención (s)

Ecuación 3. Método para hallar el espesor del geotextil.

$$E = \frac{D - d}{2}$$

Donde:

E = Espesor del geotextil (m)

D = Diámetro tubo grande (m)

d = Diámetro tubo pequeño (m)

Ecuación 4. Método para hallar tiempo de retención.

$$t_r = \frac{V * P}{Q}$$

Donde:

tr = Tiempo de retención

V = Volumen del geotextil

P = Porosidad geotextil

Q = Caudal del filtro (m³/s)

Ecuación 5. Método para hallar el volumen del geotextil.

$$V = V_{tg} - V_{tp}$$

Donde:

V = Volumen del geotextil

V_{tg} = Volumen tubo grande (m³)

V_{tp} = Volumen tubo pequeño (m³)

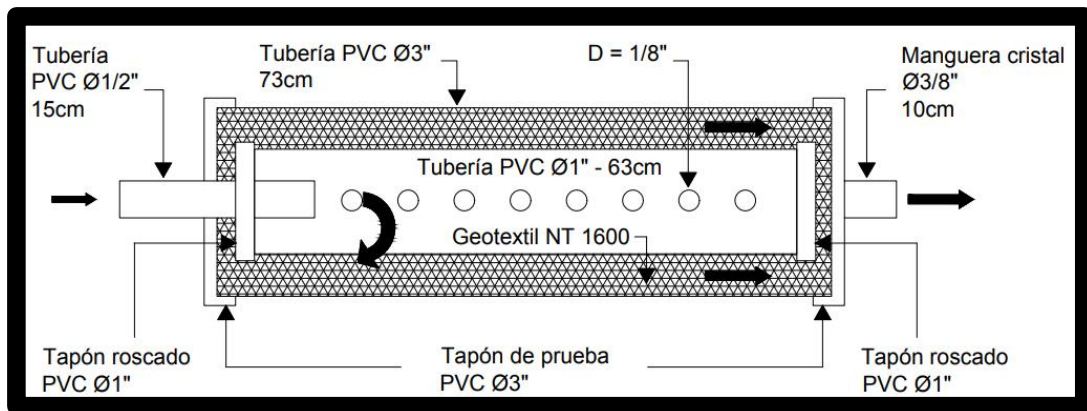
3.2.3. Construcción de los filtros (piloto y réplica).

Se construyeron dos filtros con las mismas dimensiones para obtener datos estadísticos que comprobaran su funcionamiento y si ambos filtros trabajaron de la misma manera.

Cada filtro tuvo una serie de veinte (20) capas de geotextil NT 1600. Para un ajuste entre los tubos de 3 pulgadas y 1 pulgadas.

La elaboración de los dos filtros se construyó de acuerdo a los materiales y dimensiones representadas en la **Figura 4**.

Figura 4. Diseño de los filtros (piloto y réplica).



Fuente: Elaboración propia.

Fotografía 3. Elaboración de los filtros (prueba y réplica).



Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Determinación del caudal.

Para determinar el caudal que alimentó los filtros prueba y réplica se utilizó el método de aforo volumétrico, este se midió las doce (12) veces que se utilizó el filtro. Se tomó el tiempo en el que se vacía el tanque de veinte litros (20 l) del filtro y este se dividió en dos, debido a que el filtro prueba y replica deben tener un mismo caudal.

Ecuación 6. Método para hallar el caudal de los filtros.

$$Q = \left(\frac{V}{t}\right)$$

Donde

Q = Caudal de los filtros (l/s)

V = Volumen (l)

t = Tiempo (s)

3.3. ETAPA 3: EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE CARGA CONTAMINANTE DEL FILTRO.

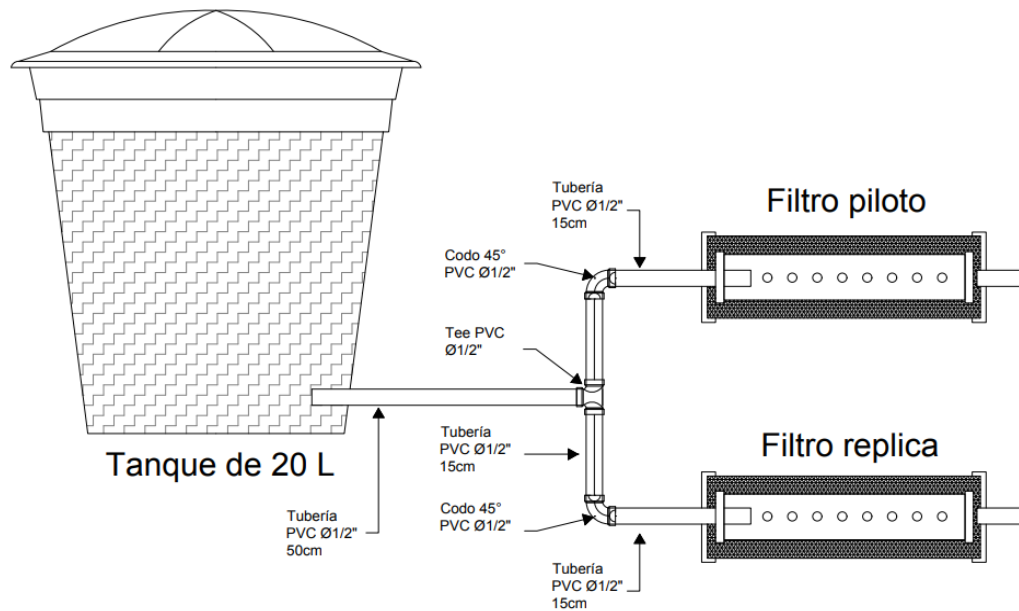
Para establecer la eficiencia de los filtros se debía determinar la capacidad de remoción generada por los filtros (prueba y réplica) a través de la medición de los parámetros fisicoquímicos (pH, DQO y SST). Se tomaron doce (12) muestras de agua residual de café de entrada y salida de los sistemas.

Los parámetros anteriormente mencionados fueron comparados de acuerdo a los valores permisibles de la resolución 0631 de 2015, con el fin de evaluar si estos indicadores están bajo los criterios establecidos por la norma.

3.3.1. Montaje del sistema.

Se ensambló el sistema de alimentación con un tanque de veinte litros de 20 l el cual abastece los dos filtros construidos anteriormente (prueba y réplica). El montaje del sistema tiene el siguiente esquema:

Figura 5. Diseño del sistema.



Fuente: Elaboración propia.

Fotografía 4. Montaje del sistema.



Fuente: *Elaboración propia.*

3.3.2. Toma de muestras (tanque y filtros).

La toma de muestras se realizó con el fin de verificar la concentración promedio de la carga orgánica antes y después de su ingreso al filtro. Se implementaron muestreos compuestos para conocer las condiciones promedio del agua, estas se componen de la mezcla de varias muestras simples.

Para la recolección de muestras se realizaron alícuotas con respecto al periodo de vertimientos de las aguas residuales del café, de acuerdo a las normas establecidas por el IDEAM (colecta y transporte de muestras) [48].

Las muestras fueron llevadas para su respectivo análisis al laboratorio de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca. El muestreo se realizó de la siguiente manera: se tomaron doce (12) muestras de entrada y doce (12) de salida por cada filtro (piloto (F1) y réplica (F2)), estas se tabularon en las **Tablas 3, 4 y 5**.

Fotografía 5. Toma de muestras.



Fuente: *Elaboración propia.*

3.3.3 Análisis de laboratorio.

Mediante el método espectrofotométrico (espectrofotómetro HACH 2700) y el pHmetro digital del laboratorio de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca se evaluaron los parámetros de pH, SST y DQO.

Fotografía 6. Análisis de laboratorio.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.4. Análisis estadístico.

El análisis estadístico se realizó mediante el método de Comparación de medias con Poblaciones apareadas.

En este caso se puede plantear las siguientes hipótesis:

- $H_0: \mu_1 = \mu_2$ (los filtros no tienen diferencia significativa)
- $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$ (los filtros tienen diferencias significativas)

Se rechaza H_0 si $|t_0| > t_{\alpha/2}$ o sea las áreas bajo la curva a la derecha del punto $t_{\alpha/2}$

Sin embargo, para el caso apareado se ajustan a las siguientes:

- $H_0: \mu_d = 0$
- $H_a: \mu_d \neq 0$

Donde μ_d es la media de las diferencias entre las dos muestras apareadas.

De esta manera el problema se simplifica al comparar la media con una constante.

Por lo cual el estadístico de prueba será [49]:

Ecuación 7. Comparación de medias con población apareadas.

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

Donde:

t = Comparación de muestras

\bar{X}_1 = Promedio de datos del filtro 1 (piloto)

\bar{X}_2 = Promedio de datos del filtro 2 (replica)

s_p = Muestra conjunta

n_1 = Número de datos del filtro 1 (piloto)

n_2 = Número de datos del filtro 2 (replica)

Ecuación 8. Muestra conjunta.

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) * S_1^2 + (n_2 - 1) * S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Donde:

s_p = Muestra conjunta

n_1 = Número de datos del filtro 1 (piloto)

n_2 = Número de datos del filtro 2 (replica)

S_1 = Desviación estándar de datos del filtro 1 (piloto)

S_2 = Desviación estándar de datos del filtro 2 (replica)

4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

En el presente capítulo, se presentan los resultados y análisis de las diferentes etapas realizadas, tanto en campo como en laboratorio, para el desarrollo de la investigación. Para llevar un orden específico y paralelo a los objetivos planteados inicialmente se prefirió seguir con el mismo orden de la metodología del proyecto.

4.1. Línea base del proceso productivo del café.

Como punto de partida para la realización de la línea base del proceso productivo del café, fue necesario realizar un recorrido por el área de estudio para la identificación del punto de vertimiento y con ello poder realizar su respectiva georreferenciación.

La finca Campo Bello se encuentra a una altura de 1676 msnm y sus coordenadas son N 2°27'08,86" y W 76° 44" 46,28' del municipio de El Tambo, esta visita permitió llevar a cabo una entrevista con el propietario que proporcionó información suficiente para conocer el proceso productivo que se lleva a cabo antes y después de realizar el beneficio húmedo del café. Posteriormente se logró identificar el punto de vertimiento de las aguas mieles del café, el cual permitió realizar el aforo volumétrico (**Fotografía 2**) permitiendo calcular el promedio del caudal del vertimiento siendo este de 0,31 l/s como se evidencia en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Caudales del vertimiento.

CAUDAL DEL VERTIMIENTO (l/s)				
N° muestra	Fecha muestra	Volumen (l)	Tiempo (s)	Caudal (l/s)
1	9/10/2021	1	4	0,25
2	10/10/2021	1	3	0,33
3	20/10/2021	1	5	0,20
4	21/10/2021	1	4	0,25
5	5/11/2021	1	2	0,50
6	6/11/2021	1	3	0,33
7	9/11/2021	1	4	0,25
8	10/11/2021	1	4	0,25

9	11/11/2021	1	3	0,33
10	12/11/2021	1	4	0,25
11	30/11/2021	1	2	0,5
12	2/12/2021	1	4	0,25
Promedio				0,31

Fuente: *Elaboración propia.*

El caudal previamente calculado determinó que la cantidad de agua contaminada por unidad de tiempo procedente del lavado de café es alta debido a las pérdidas de agua por factor de no retorno.

4.2. Diseño y construcción del filtro.

En el diseño y construcción del filtro se determinó la velocidad con que pasa el efluente por el filtro para ello se calculó el tiempo de retención que fue de 332 segundos, este indico el tiempo con que se demoró el agua residual de café en desplazarse a la entrada y salida del sistema de tratamiento. La porosidad teórica del geotextil Nt 1600 fue del 70%. Por lo tanto, la velocidad de filtración fue de 0,000076 m/s, demostrando que existe una disminución en la velocidad a causa del aumento en la concentración de los sólidos.

- Velocidad de filtración.

$$vf = \frac{0,0254 \text{ m}}{332 \text{ s}}$$

$$Vf = 0.000076 \text{ m/s}$$

- Espesor del geotextil.

$$E = \frac{0,0762\text{m} - 0,0254\text{m}}{2}$$

$$E = 0,0254 \text{ m}$$

- Tiempo de retención.

$$tr = \frac{0,00332m^3 * 0,70}{0,000007m^3 /s}$$

$$tr = 332s$$

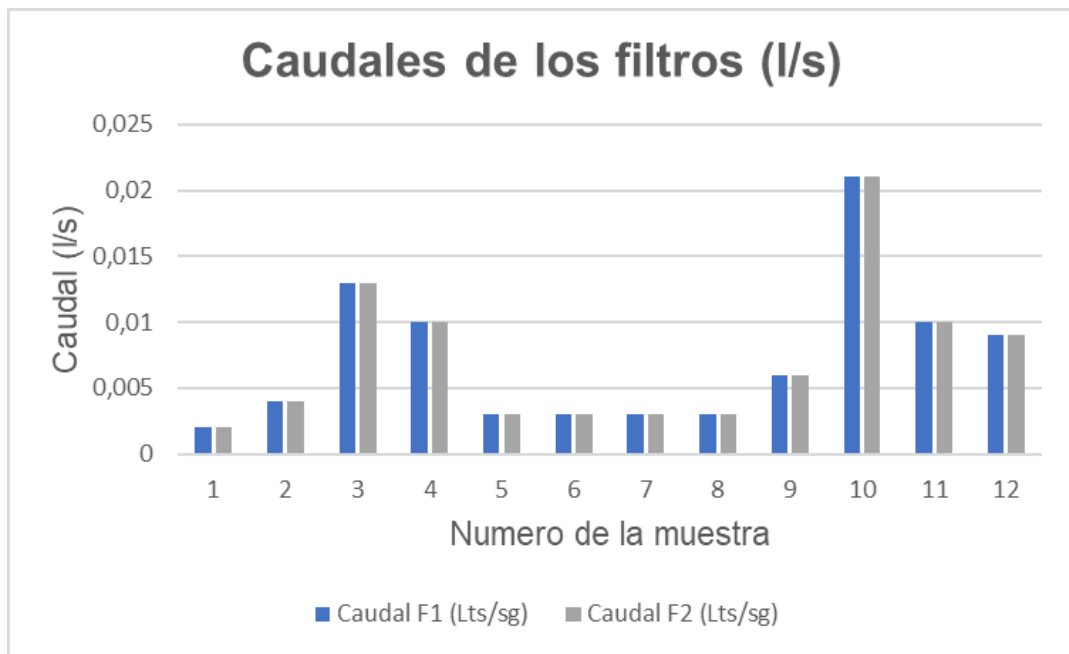
- Volumen del geotextil.

$$V = 0,00332m^3 - 0,00000309m^3$$

$$V = 0,00332m^3$$

Para la construcción de los filtros se utilizó geotextil NT 1600 y se tuvieron en cuenta las dimensiones especificadas en la **Figura 4**. En la **Fotografía 3** se evidencia la elaboración de los filtros prueba y réplica.

Gráfica 1. Caudales del filtro (prueba y réplica).



Fuente: Elaboración propia.

En la **Gráfica 1** se demuestra que ambos filtros cuentan con un mismo caudal, debido a que la distribución del afluente se direccionó por medio de una tee para que ambos filtros tuvieran el mismo flujo de agua residual, por esta razón se realizó el cálculo de caudales en uno de los filtros. Cabe mencionar que el caudal de cada muestreo realizado varió porque en cada uno de estos, la cantidad de café era

diferente por lo que se empleaban menores o mayores concentraciones de agua para el proceso de lavado de café.

4.3. Eficiencia de la remoción de carga contaminante del filtro.

Para la determinación de la eficiencia de la remoción de carga contaminante de los filtros (prueba y réplica) se realizó el montaje del sistema de acuerdo al diseño propuesto en la **Figura 5** y **Fotografía 4**. Previamente se realizó la toma de muestras para el análisis de pH, DQO y SST, algunas de estos muestreos fueron tomadas in situ y otras en el lugar de residencia (**Fotografía 5**).

A continuación, se presentan las tablas de resultados de cada una de las muestras de agua al evaluar los parámetros de pH, DQO y SST.

4.3.1. pH

Las aguas mieles de café tienden a ser acidas bajo estas condiciones, muere la flora y los microorganismos, los cuales se encargan de eliminar y absorber la contaminación presente en las aguas residuales del beneficio húmedo del café [50].

Tabla 3. Resultados del Potencial de Hidrógeno.

pH				
N° muestra	Fecha muestra	Entrada	Salida F1	Salida F2
1	9/10/2021	3,50	3,56	3,53
2	10/10/2021	3,62	3,65	3,64
3	20/10/2021	4,09	4,11	4,12
4	21/10/2021	4,07	4,08	4,09
5	5/11/2021	4,00	4,00	4,00
6	6/11/2021	4,10	4,20	4,10
7	9/11/2021	3,43	3,45	3,48
8	10/11/2021	3,46	3,48	3,47
9	11/11/2021	4,39	4,87	4,88
10	12/11/2021	4,86	5,30	5,22
11	30/11/2021	3,99	3,99	3,99

12	2/12/2021	4,00	4,10	4,20
PROMEDIO		3,96	4,07	4,06

Fuente: *Elaboración propia.*

En el **Tabla 3** se evidencio que los promedios de pH se encuentran en un rango de acidez de 3,96, 4,07 y 4,06 a causa de la acidificación y la hidroxilación de sales que producen ácidos debido a las influencias de tipo natural o antropogénicas que se llevan a cabo en el lavado del café [10].

Los datos anteriormente mencionados indicaron que no hay diferencias significativas, pero sí existe una pequeña variación de pH en algunos muestreos. Este cambio se da posiblemente porque la medición de este parámetro no fue in situ, de modo que se modifican los equilibrios iónicos debido al transporte o permanencia prolongada en recipientes, cuando estos son llevados al laboratorio. Además, la temperatura no afecta el pH de manera significativa, pero al no tenerla en cuenta da lugar a mediciones poco precisas, como se evidencia en la **Tabla 3** en donde la disminución de temperatura implicó un aumento mínimo en el pH con respecto a la entrada y salida de los filtros.

4.3.2. DQO

La Demanda Química de Oxígeno es un indicador de la cantidad de material oxidable biológico y químico que contiene una muestra de agua. Para las aguas residuales de café, las concentraciones máximas del DQO se encuentran entre los 18,000 y 55,000 miligramos por litro [42] , estos compuestos orgánicos e inorgánicos consumen directa o indirectamente el oxígeno disponible presente en el agua contaminando a los ecosistemas.

Tabla 4. *Resultados de Demanda Química de Oxígeno.*

DQO (mg/l)						
N° muestra	Fecha muestra	Entrada	Salida F1	Salida F2	% rem F1	% rem F2
1	9/10/2021	42730	22750	36790	47	14
2	10/10/2021	34700	23220	23670	33	32
3	20/10/2021	24980	22530	16530	10	34
4	21/10/2021	27950	27000	23550	3	16

5	5/11/2021	58320	32720	44320	44	24
6	6/11/2021	47400	35120	45520	26	4
7	9/11/2021	44960	39440	16000	12	64
8	10/11/2021	38280	19960	25400	48	34
9	11/11/2021	24940	15640	23640	37	5
10	12/11/2021	27720	18880	19800	32	29
11	30/11/2021	26620	21820	17340	18	35
12	2/12/2021	20360	19720	15860	3	22
PROMEDIO					26	26

Fuente: Elaboración propia

En la anterior tabla (**Tabla 4**) se presentan los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio con respecto a la entrada, se encontraron valores máximos de DQO de 58320 mg/l, los cuales pudieron estar influenciados por la cantidad de material orgánico presente en el proceso de lavado del café, pero también se encontraron valores mínimos de 20360 mg/l. Cabe destacar que esta carga contaminante es producida principalmente debido al mucílago generado en la etapa de desmucilaginado.

Como se puede observar, el promedio de eficiencia de remoción de DQO en los filtros 1 y 2 es del 26%, valor significativo en términos de disminución de contaminantes. Este porcentaje es muy bajo para el tratamiento de las aguas residuales de café y esto se debe a la composición del mucílago (35.8% sustancias pécticas, 17 % celulosa y cenizas y 45.8% azúcares totales). El mucílago representa aproximadamente el 5% del peso total del grano del café; dentro del fruto constituye una capa de 0.5 a 2 mm de espesor y está fuertemente adherido a la cáscara. El material orgánico disuelto del mucílago puede retirar o consumir muy rápidamente el oxígeno del agua en un proceso natural de oxidación, por lo que la pulpa y el mucílago contenidos en 1 kg de café cereza pueden retirar todo el oxígeno a 7.400 litros de agua pura [38].

4.3.3. SST

Los sólidos suspendidos son aquéllos que son retenidos en un filtro de 0,45 μm y que a grandes rasgos corresponden a sólidos insolubles de una muestra de agua, aunque no necesariamente tengan una inclinación a sedimentar. En general, los sólidos suspendidos se utilizan para evaluar la calidad general del agua después de un proceso de tratamiento [51].

Tabla 5. Resultados de Sólidos Suspendidos Totales.

SST (mg/l)						
N° muestra	Fecha muestra	Entrada	Salida F1	Salida F2	% rem F1	% rem F2
1	9/10/2021	7410	3750	6320	49	15
2	10/10/2021	6020	3690	4120	39	32
3	20/10/2021	4260	3620	2700	15	37
4	21/10/2021	4520	4460	4120	1	9
5	5/11/2021	6880	5740	5080	17	26
6	6/11/2021	11440	6420	9080	44	21
7	9/11/2021	7900	6160	4120	22	48
8	10/11/2021	7020	4360	6880	38	2
9	11/11/2021	5140	5040	4740	2	8
10	12/11/2021	5900	4480	4920	24	17
11	30/11/2021	3959	3710	3410	6	14
12	2/12/2012	4010	3820	3780	5	6
PROMEDIO					22	19

Fuente: Elaboración propia.

Esta agua residual analizada posee una alta concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST) como se muestra en la **Tabla 5**, en donde se registran los resultados obtenidos en laboratorio y sus respectivos porcentajes de remoción de SST, por lo que se puede deducir que estos valores no se encuentran entre los rangos máximos permisibles de acuerdo a la Resolución 0631 de 2015 (400,00 mg/l).

Los porcentajes de remoción de SST en los filtros prueba y réplica fueron de 22% y 19% respectivamente, dando a entender que no hay divergencia significativa entre ambos filtros. Este porcentaje es muy bajo para el tratamiento de estas aguas residuales, por lo tanto, no pueden ser vertidas a cuerpos receptores, ya que conlleva a desarrollar depósitos de lodos, los cuales están asociados a material

suspendido y materia orgánica que provocan condiciones anaeróbicas en el ambiente acuático.

4.3.4. Método estadístico

En el método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas se tomaron muestras aleatorias (**Tabla 4 y 5**) en los dos filtros los cuales estaban sujetas a unas mismas condiciones y abastecidos por el mismo afluente

Para ejecutar este método se calculó la media, varianza, desviación estándar y muestra conjunta de los datos obtenidos tanto de DQO como de SST. Posteriormente, se realizó el cálculo de t_0 (Comparación de medias con poblaciones apareadas), el cual es empleado para determinar si los efluentes son iguales o diferentes de acuerdo con los parámetros evaluados.

- DQO

Tabla 6. Método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas para las concentraciones de DQO.

FILTRO 1 (DQO)		FILTRO 2 (DQO)	
22750	39440	36790	16000
23220	19960	23670	25400
22530	15640	16530	23640
27000	18880	23550	19800
32720	21820	44320	17340
35120	19720	45520	15860
Promedio	24900,0	Promedio	25701,667

Desv. Est	7243,772	Desv. Est	10682,637
n	12	n	12

Fuente: Elaboración propia.

$$S_p = \sqrt{\frac{(12-1) * 7243,772^2 + (12-1) * 10682,637^2}{12 + 12 - 2}}$$

$$S_p = 9126,636$$

$$t_0 = \frac{24900,0 - 25701,667}{1427,506 \sqrt{\frac{1}{12} + \frac{1}{12}}}$$

$$t_0 = - 0,215$$

Como resultado se obtuvo que: $t_0 = -0,215$, valor menor a $t_{\alpha/2} = 2,074$, lo que significa que no hay una diferencia significativa en la remoción de DQO entre los filtros (prueba y réplica), de acuerdo a las hipótesis planteadas en este método estadístico (Aceptación de H_0). Mediante este método se confirmó que ambos filtros tienen la misma eficiencia de remoción, lo que significa que tienen un comportamiento similar en la filtración de las aguas mieles de café con respecto al DQO y por ende se puede llevar a una réplica de tamaño real.

- SST

Tabla 7. Método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas para las concentraciones de SST.

FILTRO 1 (SST)		FILTRO 2 (SST)	
3750	6160	6320	4120
3690	4360	4120	6880

3620	5040	2700	4740
4460	4480	4120	4920
5740	3710	5080	3410
6420	3820	9080	3780
Promedio	4604,167	Promedio	4939,167
Desv. Est	1010,944	Desv. Est	1747,437
n	12	n	12

Fuente: Elaboración propia.

$$S_p = \sqrt{\frac{(12-1) * 1010,944^2 + (12-1) * 1747,437^2}{12 + 12 - 2}}$$

$$S_p = 1427,506$$

$$t_0 = \frac{4604,167 - 4939,167}{1427,506 \sqrt{\frac{1}{12} + \frac{1}{12}}}$$

$$t_0 = -0,575$$

El cual dio como resultado una $t_0 = -0,575$, valor menor a $t_{\alpha/2} = 2,074$, lo que significa que no se presentan diferencias significativas en la remoción de SST entre los filtros (prueba y réplica) de acuerdo a las hipótesis planteadas en este método estadístico (Aceptación de H_0). Mediante este método se confirmó que ambos filtros tienen la misma eficiencia de remoción, lo que significa que tienen un comportamiento similar en la filtración de las aguas mieles de café con respecto a los SST y por ende se puede llevar a una réplica de tamaño real.

5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones

- Se determinó que las aguas residuales de café (aguas mieles) procedentes del beneficio húmedo, contienen un alto grado de materia orgánica que ocasiona un gran impacto negativo tanto en la calidad del recurso hídrico como en los suelos en donde son vertidas directamente sin ningún tratamiento preliminar, alterando las características físicas y químicas de estos recursos.
- En la implementación del sistema de tratamiento para las aguas residuales del café, se puede observar que el geotextil NT 1600 después de llevar una sola filtración, tiende a taparse impidiendo la circulación a causa de la colmatación de residuos sólidos y mucílago por lo que debía ser lavado para su próxima utilización.
- En la medición de DQO y SST se evidencio que los porcentajes de remoción de estos, oscilan entre los 19% y 26%, determinando que su capacidad de eliminación de carga contaminante es significativa, pero a largo plazo.
- El método estadístico de comparación de medias con poblaciones apareadas confirmó que el filtro prueba y réplica no tienen diferencias significativas, por lo tanto, el sistema se puede llevar a escala real, pero no es eficiente como tratamiento para aguas residuales de café.
- Se concluyó que el sistema de filtración empleado en este trabajo de grado no cumple con los valores máximos permisibles para el vertimiento de aguas residuales procedentes de café dictados en la resolución 0631 de 2015.

5.2. Recomendaciones

- Para que el sistema de filtración propuesto en esta investigación pueda cumplir con los parámetros del artículo 9 de la Resolución 0631 de 2015, se recomienda implementar un sistema alternativo que solucione los problemas de saturación en el sistema propuesto anterior, con el objetivo de obtener una mayor eficiencia en la remoción de materia orgánica.
- Se sugiere tomar como base el diseño de esta investigación, para implementar y evaluar otros tipos de geotextiles, ya sean con otra porosidad o tipo de tejidos.
- Investigar otros métodos de tratamiento, principalmente para la neutralización del pH, ya que resultó ser el parámetro con menos cambio en el sistema de tratamiento empleado, dentro de los cuales podría estar el uso de cal.

REFERENCIAS

- [1] L. S. Torres-Valenzuela *et al.*, «Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café», *Revista ION*, vol. 32, n.º 2, pp. 59-66, dic. 2019, doi: 10.18273/revion.v32n2-2019006.
- [2] P. Orozco, «Arranque y puesta en marcha de un reactor metanogénico tipo UAF para el tratamiento de las aguas residuales del lavado del café», p. 95, 2003.
- [3] E. Y. Urquijo Trujillo, «Identificación de impactos ambientales relacionados con el proceso de beneficio húmedo del café en la vereda de tres esquinas - Huila - Colombia», p. 7.
- [4] L. F. C. Morales y D. A. Duran Medina, «Diseño de un sistema de tratamiento para las aguas residuales agrícolas generadas en el beneficio húmedo del café en la finca Buena Vista; Planadas Tolima, 2019.», p. 101.
- [5] V. Matuk-Velasco, G. I. P.- Quintero, y N. Rodríguez-Valencia, «Impacto biológico de los efluentes del beneficio húmedo del café», p. 19.
- [6] «Los contaminantes agrícolas: una grave amenaza para el agua del planeta | Agro noticias: Actualidad agropecuaria de América Latina y el Caribe | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura». <https://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/1141955/> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [7] «Agua». <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [8] M. Capera Garzón y H. D. Sánchez, «Diagnóstico del Impacto Ambiental de los Residuos Sólidos (pulpa y mucilago), del café Generados por unidades productivas no certificadas en BPA en las Veredas Tabacal y Betania del Municipio De Pitalito Departamento del Huila», p. 52.
- [9] E. Y. UrquijoTrujillo, «Identificación de impactos ambientales relacionados con el proceso de beneficio húmedo del café en la Vereda de Tres Esquinas - Huila - Colombia», p. 7.
- [10] A. E. Molina Guardado y R. A. Villatoro Martínez, «Propuesta de tratamientos de aguas residuales en beneficios húmedos de café», p. 298.
- [11] «Eficiencia de remoción de DBO5 t SS en sedimentador y lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café (*Coffea arabica*)». http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-07392014000200003#Ref2 (accedido 7 de marzo de 2022).
- [12] «diseño de planta de tratamiento de aguas residuales compuesto por un reactor anaeróbico y biofiltros para el beneficio húmedo de café: Finca La Esperanza, en el Municipio de Dipilto, Nueva Segovia». Accedido: 7 de marzo

- de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/250145809.pdf>
- [13] «Federación Nacional de Cafeteros Cauca», *Federación Nacional de Cafeteros Cauca*. <https://cauca.federaciondecafeteros.org/> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [14] K. L. Cronon, «Aguas Mieles: de Contaminante a Fertilizante Orgánico», *Perfect Daily Grind Español*, 3 de febrero de 2020. <https://perfectdailygrind.com/es/2020/02/04/aguas-mieles-de-contaminante-a-fertilizante-organico/> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [15] «El agua residual puede generar beneficios para la gente, el medioambiente y las economías, según el Banco Mundial», *World Bank*. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-resource-that-can-pay-dividends-for-people-the-environment-and-economies-says-world-bank> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [16] «Importancia de una planta de tratamiento de aguas residuales para el medio ambiente», *DISIN S.A. Plantas de Tratamiento de Agua. Colombia*, 8 de abril de 2020. <https://www.disin.com/importancia-de-una-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-para-el-medio-ambiente/> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [17] J. Escobar Llanos, *La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar*. Santiago de Chile: CEPAL, División de Recursos Naturales e Infraestructura, 2002.
- [18] «Estudio comparativo para la modificación de materiales granulares por geotextil de un filtro lento de arena promoviendo la calidad del agua para consumo humano».
- [19] D. A. Zambrano Franco y Isaza Hinestroza, «Demanda química de oxígeno y nitrógeno total, de los subproductos del proceso tradicional de beneficio húmedo del café», p. 11.
- [20] M. A. Luna-Imbacúan, J. E. Fernández-Mera, y J. R. Caicedo-Bejarano, «Estudio de geotextiles para el tratamiento de efluentes del cultivo de Trucha Arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*)», *Orinoquia*, vol. 21, n.º 2, pp. 22-29, dic. 2017, doi: 10.22579/20112629.414.
- [21] «El uso de geotextiles para el tratamiento de aguas grises». Accedido: 7 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/14806/1/Melisa%20Noemi%20Le%C3%B3n%20Urrutia.pdf>

- [22] «Recurso hídrico». <https://web2018.crc.gov.co/index.php/ambiental/recursos/recurso-hidrico> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [23] M. S. Ramírez Salazar, «La contaminación del agua de los ríos en el Municipio de Santiago de Cali», p. 139.
- [24] «El 50% del agua en Colombia es de mala calidad - Red de Desarrollo Sostenible de Colombia». <https://rds.org.co/es/novedades/el-50-del-agua-en-colombia-es-de-mala-calidad> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [25] «Causas y consecuencias de la contaminación del agua en Colombia - Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del Río Bogotá». <http://www.orarbo.gov.co/es/con-la-comunidad/noticias/causas-y-consecuencias-de-la-contaminacion-del-agua-en-colombia> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [26] C. E. E. Tiempo, «Causas y consecuencias de la contaminación del agua en Colombia», *El Tiempo*, 10 de mayo de 2021. <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/causas-y-consecuencias-de-la-contaminacion-del-agua-en-colombia-587364> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [27] «Permiso de Vertimientos | CAR». <https://www.car.gov.co/vercontenido/1168> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [28] «Aguas residuales industriales características esenciales», *Grupo Vento BLOG*, 17 de junio de 2017. <http://evaporadoresindustriales.grupovento.com/aguas-residuales-industriales-caracteristicas/> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [29] «Tratamiento de aguas residuales industriales», *Condorchem Envitech*. <https://condorchem.com/es/tratamiento-de-aguas-residuales-industriales/> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [30] «Aguas subterráneas», *Secretaría Distrital de Ambiente*. <https://ambientebogota.gov.co/aguas-subterranas> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [31] «Efectos de la contaminación de las aguas». <https://www.cesuma.mx/blog/efectos-de-la-contaminacion-de-las-aguas.html> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [32] «Efectos de la contaminación sobre el agua». Accedido: 7 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/salud_5af065353fd44_cotaminacion_nitratos3.pdf

- [33] «Aguas Superficiales - Información general». <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=337de1a259ad4e1abad811c0d6188c1a> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [34] «Análisis de la calidad del agua para consumo humano y percepción local de las tecnologías apropiadas para su desinfección a escala domiciliaria, en la microcuenca El Limón, San Jerónimo, Honduras.» Accedido: 7 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0602e/A0602e.pdf>
- [35] «Características de las aguas residuales». Accedido: 7 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://cidta.usal.es/cursos/etap/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>
- [36] A. Urbanas, «Monitoreo de variables físico-químicas de agua – Aguas Urbanas». <http://www.aguasurbanas.ei.udelar.edu.uy/index.php/2018/11/15/monitoreo-de-variables-fisico-quimicas-de-agua/> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [37] «Evaluación-de-la-calidad-agua-(FAQ-calidad-agua)». <https://www.lenntech.es/la-evaluacion-de-la-calidad-agua-faq-calidad-agua#ixzz7DkcMNsMP> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [38] «Residuos emitidos después del proceso de lavado del café, causantes de contaminación de lagos, riachuelos y aguas subterráneas». Accedido: 7 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.devida.gob.pe/documents/20182/335453/Manual+t%C3%A9cnico+sobre+manejo+de+aguas+mieles.pdf/5daea0b5-5c66-4ef2-8702-43b213d848af>
- [39] «Composición del fruto del café - | Coffee Media ✓». <https://www.yoamoelcafedecolombia.com/2016/06/05/composicion-del-fruto-del-cafe/> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [40] A. E. Peñuela Martínez, «Estudio de la remoción del mucílago de café a través de fermentación natural», p. 84.
- [41] J. Mantilla Duarte, «Optimización del proceso conocido como “beneficio húmedo y seco” en la industria de café. caso: Finca “Villa Ilma. María” en el Municipio de Toledo, Norte de Santander.», p. 68, 2019.
- [42] «Sistema-de-Tratamiento-de-aguas-residuales_Manual.pdf». Accedido: 7 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://utz.org/wp-content/uploads/2016/07/Sistema-de-Tratamiento-de-aguas-residuales_Manual.pdf
- [43] «Geotextiles tejidos y no tejidos, diferencias | Geotexan». <https://geotexan.com/diferencia-entre-geotextiles-tejidos-y-no-tejidos/> (accedido 7 de marzo de 2022).

- [44] «Resolucion-631-2015.pdf». Accedido: 7 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://fenavi.org/wp-content/uploads/2018/05/Resolucion-631-2015.pdf>
- [45] «Se declara la alerta naranja hospitalaria en el Departamento del Cauca – Radio Diez de Marzo». <https://radiodiezdemarzo.com/se-declara-la-alerta-naranja-hospitalaria-en-el-departamento-del-cauca/> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [46] A. J. M. Acosta, E. A. Riveros, C. H. A. Walteros, y A. R. Romero, «Sistema de información geográfica municipal 2013 actualización», p. 15.
- [47] «K65005 Covarrubias Cancino José Alejandro.pdf». Accedido: 7 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/42619/K65005%20Covarrubias%20Cancino%20Jos%C3%A9%20Alejandro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [48] «Instructivo de toma y preservación de muestras sedimentos y agua superficial para la red de monitoreo de calidad del IDEAM». Accedido: 7 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://sgi.ideam.gov.co/documents/412030/35488871/M-S-LC-I004+INSTRUCTIVO+DE+TOMA+Y+PRESERVACI%C3%93N+DE+MUESTRAS+SEDIMENTOS+Y+AGUA+SUPERFICIAL+PARA+LA+RED+DE+MONITOREO+DE+CALIDAD+DEL+IDEAM+v3.pdf/477bbe4a-5825-49c8-9961-10805a3c2288?version=1.0>
- [49] H. G. Pulido, «Análisis y diseño de experimentos», p. 564.
- [50] «Alternativa para el manejo adecuado de vertimientos en el lavadero eco lavado hangar en la ciudad de Bogotá D.C.» Accedido: 7 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/7684/VillamizarBoh%C3%B3rquezDianaCarolina2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [51] «Microlab Industrial - Parámetros - Propiedades agregadas - Sólidos Suspendidos Totales». <https://www.microlabindustrial.com/parametros/propiedades-agregadas/575/solidos-suspendidos-totales> (accedido 7 de marzo de 2022).