

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN FILTRO ANAEROBIO DE GRAVA A
ESCALA PILOTO, ANÁLISIS COMPARATIVO CON UN FILTRO ANAEROBIO
DE GUADUA – PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES -
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – BUCARAMANGA**

**ASTRID HELENA GOMEZ PLATA
GABRIEL MAURICIO ALVAREZ SEQUEDA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2008**

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN FILTRO ANAEROBIO DE GRAVA A
ESCALA PILOTO, ANÁLISIS COMPARATIVO CON UN FILTRO ANAEROBIO
DE GUADUA – PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES -
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – BUCARAMANGA**

**GABRIEL MAURICIO ÁLVAREZ SEQUEDA
ASTRID HELENA GÓMEZ PLATA**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de:
Ingeniero ambiental**

**Director:
INGENIERO CESAR ENRIQUE ROJAS
Docente facultad de Ing. Ambiental**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2008**

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Septiembre de 2008

Primero a Dios por regalarnos la vida y toda la sabiduría que nos lleva al conocimiento. A mis padres quienes han puesto toda la confianza en mi para lograr grandes metas, por el apoyo incondicional en cada uno de los momentos de mi vida y por ayudar ha que mis sueños se hagan realidad. A mi familia por brindarme consejos y apoyo.

Astrid Helena Gómez Plata

A mis padres que me han apoyado desde el comienzo de mis estudios y me han guiado a través de sus consejos, a mi familia que siempre me ha brindado su compañía y apoyo.

Gabriel Mauricio Álvarez S.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus sinceros agradecimientos a:

Nuestros padres por su apoyo y consejos durante esta etapa.

Nuestro director Ingeniero Cesar Rojas, por su grandiosa labor de acompañamiento durante la investigación, compartiendo su conocimiento que fueron pieza fundamental para enriquecer nuestra vida profesional.

Alirio Mantilla por compartir su conocimiento y experiencia en el laboratorio de Análisis Químico de Aguas Residuales y convertirse en una guía durante la investigación.

A David Mantilla por su colaboración y acompañamiento amenizando los laboratorios.

La Ingeniera Marta Mantilla, por brindarnos la oportunidad de realizar este proyecto de investigación.

Todos los docentes que brindaron consejos, sirviendo como guía durante la investigación.

El área de Servicios generales de la Universidad Pontificia Bolivariana, por ayudarnos en todo momento con una actitud de servicio.

La Facultad de Ingeniería Ambiental, por su seguimiento y apoyo en los momentos cruciales de la investigación.

Alonso y Oscar por su colaboración e interés que demostraron durante la investigación, con aportes positivos.

Todas las personas que con su consejo y acompañamiento hicieron posible la culminación de la investigación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÒN	12
1. OBJETIVOS	13
1.1 OBJETIVO GENERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. MARCO REFERENCIAL	14
2.1 ANTECEDENTES	14
2.2 MARCO GEOGRÁFICO	16
2.3 MARCO TEÓRICO	16
2.3.1 Tipos de tratamientos biológicos	18
2.3.1.1 Proceso aerobio	188
2.3.1.2 Proceso anaerobio	188
2.3.1.3 Proceso combinado	19
2.3.2 Descomposición anaerobia	19
2.3.3 Sistemas anaerobios de tratamientos de agua residual	21
2.3.4 Filtro anaerobio de flujo ascendente	21
2.3.5 Medio de soporte	222
2.3.5.1 Materiales del medio de soporte	23
2.3.6 Comunidad biológica de los filtros	23
2.3.7 Parámetros de control de los filtros anaerobios	24
2.3.8 Parámetros de eficiencia de los filtros anaerobios.	25
2.3.9 Planta de Tratamiento de Agua Residual - UPB	26

3. METODOLOGÍA	¡Error! Marcador no definido.
3.1 FASE 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	29
3.1.1 Recopilación de la literatura existente sobre tratamiento de agua residual, Recopilación de artículos y memorias	29
3.1.2 Recopilación del trabajo de grado utilizando como medio filtrante la guadua	29
3.2 FASE 2. DISEÑO Y ADECUACIÓN DEL FILTRO CON MEDIO DE SOPORTE EN GRAVA.	30
3.2.1 Evaluación y adecuación de cada una de las unidades de sistema.	30
3.2.2 Realización de cálculos de diseño, para establecer los parámetros de operación inicial del sistema.	30
3.3 FASE 3. IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO DE FLUJO ASCENDENTE CON MEDIO DE SOPORTE EN GRAVA	31
3.3.1 Montaje y puesta en marcha del filtro con el medio de soporte en grava	31
3.4 FASE 4. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE EFICIENCIA DEL FILTRO	31
3.4.1 Evaluación de las cargas aplicadas al filtro.	31
3.4.2 Parámetros de evaluación del sistema	32
3.5 FASE 5. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON EL MEDIO DE SOPORTE DE AROS DE GUADUA	33
3.5.1 Determinación de la eficiencia de los sistemas evaluados	33
4. DATOS OBTENIDOS	34
4.1 FASE 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	34
4.1.1 Parámetros de diseño teórico del filtro anaerobio de flujo ascendente	34
4.1.2 Características de los medios de soporte del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente	35
4.1.3 Parámetros de control para el arranque del sistema anaerobio	36

4.2 FASE 2. DISEÑO Y ADECUACIÓN DEL FILTRO CON MEDIO DE SOPORTE EN GRAVA.	37
4.2.1 Evaluación y adecuación de las unidades del filtro anaerobio de flujo ascendente FAFA.	37
4.2.2 Cálculos de diseño para establecer los parámetros del filtro con medio de soporte en grava	44
4.3 FASE 3. IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO DE FLUJO ASCENDENTE CON MEDIO DE SOPORTE EN GRAVA.	49
4.3.1 Montaje y puesta en marcha del filtro con medio de soporte en grava, alimentado con agua residual proveniente de la UPB	49
4.4 FASE 4. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUIMICOS DE EFICIENCIA DEL FILTRO.	51
4.4.1 Evaluación de las cargas aplicadas al filtro	51
4.4.2 Evaluación de los parámetros de eficiencia del filtro	52
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	566
5.1 Relación DBO/DQO	56
5.3 Carga orgánica	56
5.4 Arranque del filtro anaerobio	56
5.3 Parámetros de evaluación de eficiencia del sistema	60
5.4 Comparación de los datos obtenidos con el medio de soporte en aros de guadúa.	63
5.5 Ventajas y desventajas de los dos medios de soporte	68
6. CONCLUSIONES	71
7. RECOMENDACIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	74
ANEXOS	74

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Proceso de digestión anaerobia.	20
Figura 2. Filtro anaerobio de flujo ascendente.	22
Figura 3. Planta de Tratamiento de Aguas Residual de la Universidad Pontificia Bolivariana	26
Figura 4. Esquema General	28
Figura 5. Perfil tanque de bombeo	38
Figura 6. Planta tanque de bombeo	38
Figura 7. Perfil del filtro vacío	40
Figura 8. Planta de la tapa del filtro	41
Figura 9. Planta de la Flauta	41
Figura 10. Rejilla	42
Figura 11. Tubería de entrada	43
Figura 12. Tubería de salida	43
Figura 13. Tanque Sedimentador	44
Figura 14. Determinación de caudal	46
Figura 15. Montaje actividad metanogenica	50
Figura 16. Determinación del pH	533
Figura 17. SST	54
Figura 18. Variacion del pH en el arranque del filtro	57
Figura 19. Temperatura en la etapa de arranque	58
Figura 20. Alcalinizada en etapa de arranque	588

Figura 21. AGV en la etapa de arranque	599
Figura 22. Relación AGV/ALK etapa de arranque	6060
Figura 23. % de remoción de DQO con medio filtrante en grava	61
Figura 24. % de remoción de SST con medio de soporte en grava	62
Figura 25. % de remoción de DBO ₅ con medio de soporte en grava	63
Figura 26. % de remoción de DQO con medio filtrante en grava.	64
Figura 27. % de remoción de DQO con medio filtrante en guadua	65
Figura 28. % de remoción de SST con medio filtrante en grava	66
Figura 29. % de remoción de SST con medio filtrante en guadua	66
Figura 30. % de remoción de DBO con medio filtrante en grava	67
Figura 31. % de remoción de DBO con medio filtrante en guadua.	68

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Contaminantes de importancia en el aguas residuales	17
Tabla 2. Requisitos del medio de soporte	23
Tabla 3. Parámetros utilizados para el control y evaluación de la eficiencia, con su respectivo método.	32
Tabla 4. Parámetros de diseño teórico del filtro anaerobio de flujo ascendente.	34
Tabla 5. Parámetros de diseño experimental usado en el filtro anaerobio de flujo ascendente con medio de soporte en guadua de la PTAR UPB Bucaramanga.	35
Tabla 6. Características de los medios de soporte del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente	36
Tabla 7. Parámetros de control para el arranque del sistema anaerobio	37
Tabla 8. Especificaciones Bomba	39
Tabla 9. Datos del monitoreo del filtro anaerobio de flujo ascendente.	47
Tabla 10. Parámetros de diseño experimental usado en el filtro anaerobio de flujo ascendente con medio de soporte en grava de la PTAR UPB Bucaramanga	48
Tabla 11. Comparación de volúmenes en las investigaciones con su respectivo medio filtrante.	48
Tabla 12. Características del lodo de la inoculación.	49
Tabla 13. Monitoreo realizado efluente del Reactor N° 1 por el Laboratorio de Análisis Químico.	51
Tabla 14. Datos de DBO en el afluente del filtro para determinar la eficiencia con cada tiempo de recirculación	51
Tabla 15. Reporte de los datos obtenidos con el medio de soporte en grava	55
Tabla 16. Remociones con guadua como lecho filtrante	56

Tabla 17. Parámetros de relación	56
Tabla 18. Parámetros importantes del medio de soporte	69
Tabla 18. Comparación e los parámetros del medio de soporte con el funcionamiento del filtro	70

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Tabla de Resultados	75
Anexo B. Reporte de Resultados realizados por el Laboratorio de Análisis Química de La Universidad Pontificia Bolivariana	76
Anexo C. Parámetros de control reportados en el arranque del filtro	77

RESUMEN

Se evaluó el funcionamiento y operación de un Filtro Anaerobio De Flujo Ascendente a escala piloto, en la Planta de Agua Residual de la Universidad Pontificia Bolivariana. La investigación se realizó en cinco fases. La primera fue la recopilación bibliográfica de los parámetros que garantizan la optimización del sistema. En la segunda fase, se diseñó y adecuó cada una de las unidades que conforman el sistema, dando inicio a la tercera fase que es la puesta en marcha y montaje del filtro incorporando 1m de grava como medio de soporte e inoculando con lodo proveniente de la PTAR de Río Frío, al cual se le realizó un estudio de actividad metanogénica. Durante el arranque del filtro (3 semanas) se evaluaron los parámetros de control los cuales son pH, temperatura, alcalinidad, ácidos grasos volátiles y relación AGVS/ALK. El sistema trabaja con tiempos de recirculación de 24, 36, y 48h, un caudal de 0.2785l/s, y un tiempo de retención de 10.85min.

En la fase cuatro se evaluaron durante 4 meses los principales parámetros de eficiencia los cuales son DQO, DBO₅, SST, sin descuidar los parámetros de control para evitar una desestabilización en el sistema. En la última fase se realizó un análisis comparativo entre la grava y la guadua medio utilizado en una investigación anterior bajo las mismas condiciones.

La evaluación demostró que la grava como medio de soporte obtuvo remociones de DQO entre 60 y 82% cuando el tiempo de recirculación era de 48h, esto afirma que cuando el tiempo de recirculación aumenta los porcentajes de remoción son altos. Este comportamiento fue igual en la remoción de SST y DBO. La guadua arrojó porcentajes mayores de remoción de DBO, DQO y SST (81 – 95%), sin embargo la guadua demostró una inestabilidad pues los parámetros de control no cumplían los rangos óptimos.

ABSTRACT

We evaluated the functioning and operation of a filter Flow Anaerobic Ascending on a pilot scale, at the Waste Water from the Universidad Pontificia Bolivariana. The research was conducted in five phases. The first was the literature collection of parameters that guarantee the optimization of the system. In the second phase, design and fits each of the units that make up the system, by launching the third phase which is the launching and assembling the filter incorporating 1m gravel as a means of support and inoculating with mud from the Rio Frio WWTP, which was conducted a study of methanogenic activity. During the startup of the filter (3 weeks) were assessed control parameters which are pH, temperature, alkalinity, fatty acids and volatile relationship AGVS / ALK. The system works with times of recirculation 24, 36, and 48h, a wealth of 0.2785l / s, and a retention time of 10.85min

In phase four were assessed for 4 months the main parameters of efficiency which are COD, BOD₅, TSS, while the parameters of control to avoid a destabilization in the system. In the last phase was carried out a comparative analysis between the gravel and bamboo medium used in a previous investigation under the same conditions.

The evaluation showed that the gravel as a means to support removal of COD was between 60 and 82% if the recirculation time was 48h, it says that when the time increases the recirculation rate of removal is high. This behavior was the same in the removal of TSS and BOD. The bamboo showed higher percentages of removal of COD, BOD₅ and TSS (81 - 95%), however the bamboo showed instability because the parameters of control did not meet the optimal rang

INTRODUCCIÓN

La Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, promueve y brinda respaldo a investigaciones de tratamientos de agua residual que buscan el desarrollo de técnicas apropiadas para el progreso de la comunidad. En consecuencia la Facultad de Ingeniería Ambiental desarrolló un proyecto de investigación, denominado “Evaluación de la eficiencia de aros de guadua como medio de soporte para un filtro anaerobio de flujo ascendente a escala piloto en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de La Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga”, con el fin de evaluar la remoción en el sistema y verificar su eficiencia, afirmando que el medio de soporte en guadua arroja remociones en carga de DQO y SST de 70, 80 y 90% con diversos tiempos de retención

Con el objeto de dar continuidad en la evaluación del sistema se desarrollo el presente proyecto de grado con el fin determinar la eficiencia de operación del filtro biológico con grava y realizar un análisis comparativo de los datos obtenidos con aros de guadua. Para lograr esto; se desarrollo una metodología que contemplo cinco fases, donde se desarrollo en primera instancia la revisión bibliográfica, en la cual se recopilo la información necesaria para la ejecución y desarrollo del proyecto teniendo en cuenta los datos de la investigación anterior, en la segunda fase se realizo el diseño y adecuaciones técnicas a cada una de las unidades que conforman el sistema.

La tercera fase tiene como objeto el montaje y puesta en marcha del filtro utilizando grava como medio de soporte, para cumplir con esta fase de debe realizar una inoculación en el sistema, dando paso a la cuarta fase que evalúa los parámetros de control que permiten estabilizar el medio filtrante, siendo la clave para obtener altas remociones. Al tener los parámetros de control estabilizados se evalúa la eficiencia del sistema utilizando parámetros de análisis de aguas residuales como son DQO, DBO₅, SST, pH, temperatura, pruebas realizadas en el Laboratorio de Aguas Residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Por último en la fase cinco se analizan los datos obtenidos con el medio de soporte en grava y se compararon con los expuestos en la investigación que utilizo como medio filtrante la guadua, esto permitió establecer cual sistema presenta una mayor eficiencia y las ventajas y desventajas de cada tipo de medio filtrante y sobre que condiciones seria aplicable a escala real.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la eficiencia de un filtro anaerobio de flujo ascendente a escala piloto, utilizando como medio de soporte grava, basada en el análisis comparativo, con los resultados provenientes de la evaluación existente de un filtro de condiciones similares en el cual se utilizó como medio de soporte aros de guadua.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las condiciones de carga y concentración de contaminantes del agua residual en el afluente del filtro.
- Adaptar las condiciones del montaje según los parámetros necesarios para el funcionamiento del filtro utilizando como medio de soporte grava.
- Establecer los parámetros que garanticen la optimización del funcionamiento del filtro obteniendo altos porcentajes de remoción.
- Evaluar los parámetros de DBO, DQO, SST, AGVS para determinar la eficiencia de remoción del filtro.
- Comparar la eficiencia obtenida del filtro utilizando como medio de soporte grava y la eficiencia obtenida para la evaluación existente de un filtro de condiciones similares en el cual se utilizó como medio de soporte aros de guadua.
- Establecer las ventajas y desventajas de cada uno de los medios de soporte utilizados en filtro anaerobio de flujo ascendente.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 ANTECEDENTES

A comienzos del siglo XX algunas ciudades e industrias empezaron a reconocer que los vertidos directos a los ríos eran los causantes de la mayoría de enfermedades, ocasionando problemas sanitarios. Esto con lleva a la creación de sistemas de depuración de las aguas residuales, surgiendo como primera alternativa la creación de la fosa séptica utilizada por Mouras en 1891, implantando el tratamiento de descomposición anaerobia como mecanismo de saneamiento de aguas residuales domesticas tanto urbanas como rurales.

El tratamiento anaeróbico de residuos líquidos orgánicos ha ganado popularidad en años recientes debido a consideraciones energéticas y ambientales. El método anaeróbico de tratamiento ofrece un número de significativas ventajas, con pocas limitaciones serias, sobre otros métodos de tratamiento (Pfeffer, 1981; McCarty, 1964; Lettinga et al., 1980)¹.

Se han propuesto diversos métodos de tratamiento para descontaminar anaeróbicamente diferentes residuos. Dentro de estos métodos, los sistemas más comúnmente utilizados han sido el digestor convencional, el proceso de contacto anaeróbico (Schroepfer y Ziemke, 1959), el proceso anaeróbico con colchón de lodos (Lettinga et al., 1980) y los filtros anaeróbicos (Young y McCarty, 1969) .

Los filtros anaeróbicos son sistemas denominados de alta tasa, desarrollados a finales de los años sesenta, teniendo un papel protagónico Young y McCarty, este sistema de tratamiento de agua residual ha sido estudiado en forma relativamente extensa durante los últimos años en ciertos países desarrollados por ofrecer simplicidad de control y mayor facilidad de construcción. Permitiendo que sea una opción aplicable a países subdesarrollados que buscan alternativas económicas para la remoción de contaminantes en aguas residuales.

En Colombia uno de los sistemas que se ha venido implementado en los municipios y zonas rurales durante los últimos años son los filtros anaerobios de flujo ascendente que al combinarse con un tanque séptico como pretratamiento

¹ SAEZ R., Pablo. Filtros anaeróbicos: una forma de descontaminar y producir energía. Vol. II. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 1986

han permitido obtener eficiencias mayores al 60%². La función del tanque séptico es remover la materia orgánica suspendida, mientras el filtro anaerobio se encarga de transformar la materia orgánica soluble presente en el agua residual. Las bacterias encargadas de la biodegradabilidad requieren una superficie para adherirse que se conoce comúnmente como medio de soporte o lecho filtrante.

Este último ha sido un aspecto polémico causando gran interés en el desarrollo de estudios e investigaciones con diferentes medios de soporte como la guadua (Osorio, 1999; Zambrano, 1999;); la cáscara de coco y tejas de barro (Rodríguez et al, 2001), el Bambú (Camargo, 2001); también se han utilizado medios más sofisticados como los anillos sintéticos, las matrices plásticas de flujo cruzado o tubular; con el fin de establecer los materiales que optimicen el funcionamiento del filtro generando una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes y reduciendo costos de operación y construcción.

Actualmente el Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento (2000) recomienda utilizar como material de soporte piedra triturada angulosa o redonda (grava), sin finos, de tamaño entre 4-7 cm. Sin embargo, en los casos en que el medio de soporte ha sido la grava, se presenta pérdida de eficiencia con el paso del tiempo, debido a colmatación y atascamiento del medio. Lo anterior en el caso de la guadua requiere un mantenimiento dispendioso³.

La Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, desarrolló una investigación de aguas residuales, denominada “Evaluación de la eficiencia de aros de guadua como medio de soporte para un filtro anaerobio de flujo ascendente a escala piloto en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de La Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga”(2007), en la cual se afirma que el material utilizado como medio filtrante es económico y presente porcentajes de remoción mayores a los de la grava, siendo un sistema aplicable en la institución. Esto creo la necesidad de comparar el método con otro medio filtrante, pues es importante conocer las condiciones dependiendo del tipo de agua residual a tratar y no se puede estipular sin un parámetro de comparación cual filtro puede obtener mayores beneficios a la institución. Por esto, fue importante la implementación de un filtro con la mismas condiciones pero con un medio de soporte tradicional que permita comparar la eficiencia, economía, ventajas y

² ROMERO R, Jairo A. Tratamiento de las aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería, Bogota: 1999, p 17

³ PAREDES C., Diego y CASTAÑO C., Juan Mauricio. Uso de aros de guadua en filtro anaerobio para el tratamiento de aguas residuales. Pereira: Seminario – taller: avances en la investigación sobre Guadua, 2002

desventajas de cada medio de soporte y así establecer cual tratamiento es el adecuado implementar en la institución.

2.2 MARCO GEOGRÁFICO

La Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga desde 1998 tiene su sede, ubicada en el Km. 7 de la Autopista que de Bucaramanga conduce a Piedecuesta.

La Facultad de Ingeniería Ambiental tiene al servicio de la familia Bolivariana y la comunidad en general, la planta de tratamiento de agua residual, pues la institución se encuentra ubicada en zona rural careciendo del servicio de alcantarillado generando la necesidad de tratar las aguas residuales que esta genere en sus actividades, cumpliendo con todas las especificaciones legales ambientales.

La planta de tratamiento se encuentra en funcionamiento desde 1998, ubicada dentro de las instalaciones de la universidad y realiza su descarga en la Quebrada Menzulí, para obtener remociones altas de contaminantes se han implantado tres tipos de tratamiento y se encuentran divididos en dos secciones:

- La primera se encuentra ubicada en la entrada peatonal del campus universitario y se realiza el tratamiento primario y secundario. Cubierto por una cerca viva que lo limita.
- En la segunda se encuentra el tratamiento terciario que hace parte del sendero ecológico, pues contiene plantas flotantes (buchon de agua), este tratamiento va desde el parqueadero de los estudiantes hasta la zona deportiva.

2.3 MARCO TEÓRICO

Las aguas residuales son aquellas que han tenido algún tipo de uso, ya sea propio de actividades domesticas, comerciales, institucionales e industriales, y requieren ser transportadas mediante el sistemas de alcantarillado. Las aguas residuales provenientes de inodoros son denominadas aguas negras, estas transportan excrementos humanos y orina, se caracterizan por su alto contenido en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales. Los efectos mas

importantes de los principales agentes de polución de las aguas residuales son los especificados en la tabla 1.

Tabla 1. Contaminantes de importancia en el aguas residuales

Contaminante	Causa de su importancia
Sólidos suspendidos	Pueden conducir al desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias cuando se descargan en agua residual cruda en un medio acuático.
Materia orgánica biodegradable	Está compuesta principalmente de proteínas, carbohidratos y grasas, se mide en términos de DBO y DQO por lo general. Si no es previamente removida puede producir agotamiento del OD de la fuente receptora y desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Producen enfermedad.
Nutrientes	El C, N y P son nutrientes. Cuando se descargan en las aguas residuales pueden producir crecimiento de vida acuática indeseable. Cuando se descargan en cantidades excesivas sobre el suelo pueden producir polución del agua subterránea.
Materia orgánica refractaria	Resiste tratamiento convencional. Ejemplos: detergentes, fenoles y pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Proviene de aguas residuales industriales y comerciales, es posible que deban ser removidas para el reuso del agua.
Sólidos inorgánicos disueltos	Algunos como el calcio, sodio y sulfatos son agregados al suministro doméstico original como resultado del uso y es posible que deban ser removidos para el reuso del agua.

ROMERO R, Jairo A. Tratamiento de las aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería, Bogotá: 1999.

Los ríos son considerados los receptores naturales de las aguas residuales con su correspondiente carga de contaminantes y nutrientes para mitigar el daño que estas producen en las fuentes hídricas, se han creado diferentes técnicas apropiadas para el tratamiento y disposición final según las características de estas. El objeto básico del tratamiento de aguas es proteger la salud y promover el bienestar de los miembros de la sociedad. A medida que crece la población aumenta la necesidad que permita eliminar los riesgos para la salud y minimizar los daños al ambiente⁴.

⁴ Ibíd.p 18

El tratamiento biológico de aguas residuales trabaja bajo el principio de la actividad biológica permitiendo la remoción de los contaminantes especificados en la tabla 1, mediante la conversión de gases volátiles y en biomasa extraíble a través de la sedimentación. El tratamiento biológico permite remover el nitrógeno y fósforo presentes en el agua residual.

2.3.1 Tipos de tratamientos biológicos. Existen tres grupos principales de procesos biológicos:

- Procesos aerobio
- Procesos anaerobio
- Procesos combinado

2.3.1.1 Proceso aerobio. Procesos de respiración por medio de oxígeno libre, donde este es el único aceptor final de electrones, el oxígeno es reducido y el carbono es oxidado, al igual que la materia orgánica e inorgánica⁵.

Las bacterias tienen una gran importancia dentro del tratamiento aerobio por ser excelentes oxidantes de materia orgánica, este proceso es ejecutado para obtener la energía necesaria para la síntesis de tejido celular, cuando carece de materia orgánica el tejido celular respirará endógenamente convirtiéndose en energía y productos gaseosos, en este proceso suceden las tres reacciones esenciales catabolismo, anabolismo y autólisis simultáneamente, el catabolismo es el proceso por el cual la materia orgánica es oxidada o descompuesta, el anabolismo es la asimilación o síntesis de la materia orgánica por parte de la bacterias, la autólisis es la respiración endógena o auto-oxidación.

2.3.1.2 Proceso anaerobio. Es la descomposición u oxidación de compuestos orgánicos en ausencia de aire para la obtención de energía para el crecimiento y mantenimiento de los organismos anaerobios⁶, en este proceso no es tan eficiente la producción de energía como el aerobio, puesto que la energía que se libera en el catabolismo anaerobio permanece en los productos reducidos como metano, generando una cantidad de biomasa menor que la presente en el proceso aerobio.

⁵ ROMERO, Op. Cit.

⁶ ROMERO R, Jairo A. Tratamiento de las aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería, Bogotá: 1999.p 229 -233

2.3.1.3 Proceso combinado. Proceso en el cual se realiza la oxidación de materia orgánica, mediante la combinación de bacterias aerobias, bacterias facultativas y bacterias anaerobias. Un ejemplo de proceso combinado son las lagunas facultativas, donde se excava en el terreno un estanque profundo. Se podría decir que este se divide en tres zonas: la zona inferior, donde se produce la digestión anaerobia de los fangos; zona intermedia en donde la descomposición de los residuos orgánicos es llevado a cabo por bacterias facultativas, una zona superior que es donde ocurre la descomposición aerobia, el oxígeno necesario para realizar este proceso es obtenido por las algas o aireadores en la superficie.

2.3.2 Descomposición anaerobia. Esta degradación es posible gracias a todos los compuestos orgánicos que contengan oxígeno en sus moléculas. En el tratamiento anaerobio ocurren todos los procesos básicos de descomposición anaerobia, estos son:

Hidrólisis. Proceso químico en el cual ocurre una transformación de material orgánico complejo en compuestos más simples por la acción del agua, este proceso se desarrolla por las bacterias fermentativas que producen y excretan enzimas hidrolíticas.

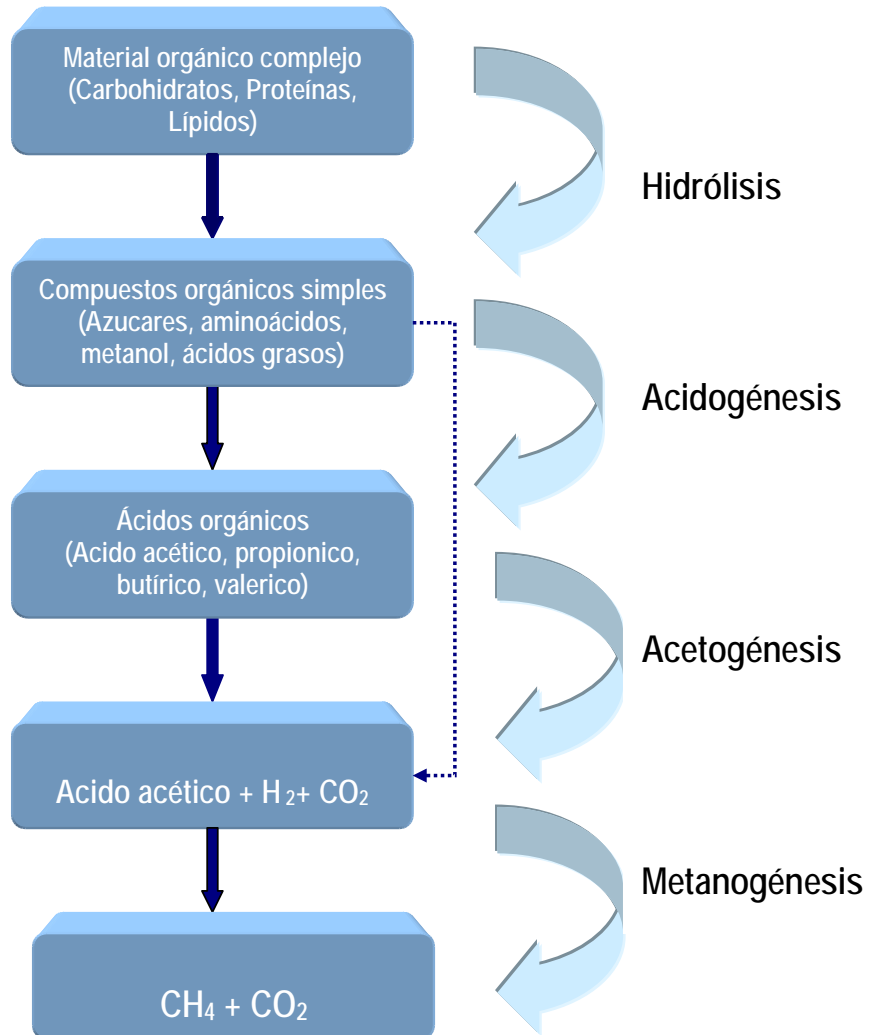
Acidogénesis. Una vez hidrolizados los compuestos orgánicos complejos, las bacterias forman ácidos orgánicos, como ácido butírico, propiónico y acético, por medio de bacterias fermentativas acidogénicas.

Acetogénesis. Las bacterias fermentativas acetogénicas convierten los productos de la acidogénesis en hidrógeno, gas carbónico y ácido acético, estos sustratos son propicios para las bacterias metanogénicas.

Metanogénesis. Finalmente se produce metano y gas carbónico, gracias a los microorganismos metanogénicos que convierten los productos de la fermentación ácida.

Los procesos básicos que intervienen en la descomposición anaerobio descritos anteriormente se aprecian en la Figura 1.

Figura 1. Proceso de digestión anaerobia.



Fuente: Adaptado de ROMERO R, Jairo A. Tratamiento de las aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería, Bogota: 1999

Desnitrificación de nitritos. Proceso de reducción de nitritos hasta gas nitrógeno, este proceso lo realizan bacterias durante la respiración usando el nitrato como aceptor de electrones en ausencia de oxígeno. Las bacterias que se destacan en este proceso son: Achromobacter, Aerobacter, Alcalibacter, Alcaligenes, Bacillus, Brevibacterium, Flavobacterium, Lactobacillus, Micrococcus, Proteus, Pseudomonas y Spirillum.

2.3.3 Sistemas anaerobios de tratamientos de agua residual. Los sistemas mas utilizados para el tratamiento de las aguas residuales son:

Reactor UASB (RAFA). Reactor anaerobio de flujo ascendente en manto de lodos. En este tipo de reactor el agua es introducida por el fondo del reactor a través de unas boquillas uniformemente distribuidas, pasa a través de un manto de lodos y posee una estructura de sedimentación integrada al mismo tanque que permite el retorno de los lodos de manera natural al espacio de reacción inferior.⁷

Reactor anaerobio de flujo pistón (RAP). Es una modificación del reactor anaerobio de pantallas, en el cual se permite que la superficie de interfase líquido-gas esté en contacto directo con la atmósfera natural. También se adiciona un lecho de empaquetamiento para mejorar la distribución hidráulica del flujo y evitar la compactación de la biomasa. Posee un compartimiento final de sedimentación⁸.

Filtros anaerobios. En este tipo de reactores existe un medio de soporte fijo inerte al cual crecen adheridos los microorganismos. El agua residual puede tener un flujo vertical ascendente o descendente a través de la cámara. Usualmente no tiene un compartimiento final de sedimentación⁹.

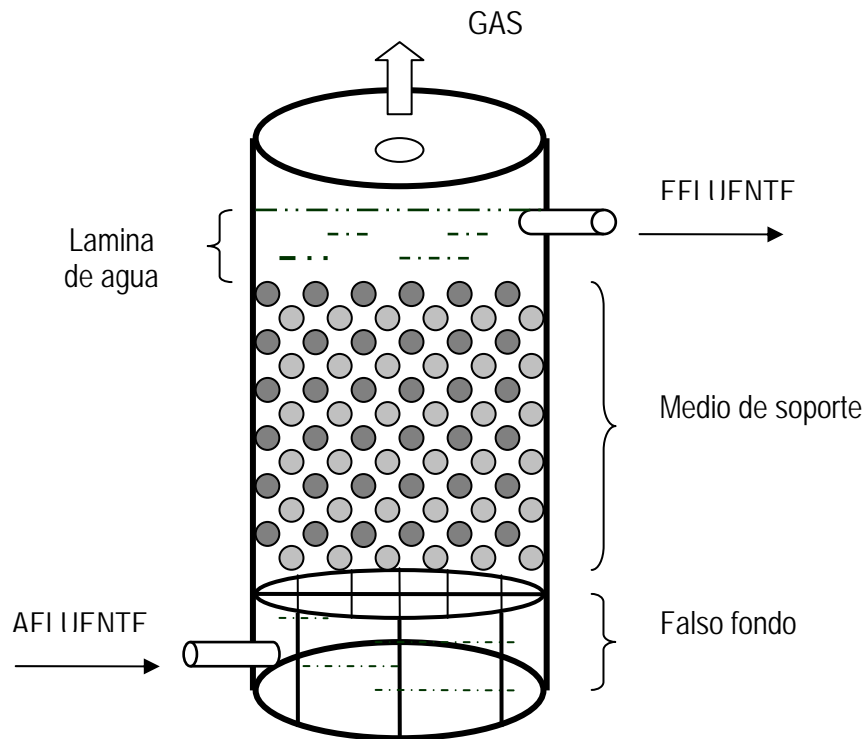
2.3.4 Filtro anaerobio de flujo ascendente. Actualmente en el país la cobertura de sistemas de tratamiento alcanza solamente el 12%. Uno de los sistemas mas ampliamente utilizado en Colombia para el tratamiento de aguas residuales es el filtro anaerobio de flujo ascendente. Su aplicación ha estado orientada al sector rural, en donde se combina con un tanque séptico como pretratamiento y permite obtener eficiencias de remoción de contaminantes superiores al 60%. La función del tanque séptico es principalmente remover o retener la materia orgánica suspendida, mientras que el filtro anaerobio se encarga de transformar la materia orgánica soluble presente en el agua residual. En términos prácticos, el filtro es un sistema de tratamiento de aguas residuales de película fija, es decir, es un dispositivo en el cual las bacterias encargadas de la biodegradación requieren una superficie a la cual adherirse y el flujo ascensional minimiza los posibles taponamientos en el sistema.

⁷ Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento. 2000.

⁸ *Ibíd.* p 706.

⁹ *Op. Cit.* p 706 – 708.

Figura 2. Filtro anaerobio de flujo ascendente.



Fuente: Los autores

Los filtros anaerobios de flujo ascendente se componen de tres zonas funcionales:

- Zona de entrada, que permite una distribución uniforme del residuo en el medio filtrante.
- Zona empacada, en la que se ubica el medio y se presenta el principal crecimiento bacterial.
- Zona de salida, debe garantizar una homogénea y uniforme distribución del agua residual.

2.3.5 Medio de soporte. Manto de material inerte que sirve de soporte para el crecimiento de los microorganismos, creando una capa de biomasa adherida. La mayor parte de la biomasa se acumula en los vacíos, donde quedan los

microorganismos, al pasar el agua residual por los vacíos se genera una mezcla y el contacto afluyente – biomasa.

Tabla 2. Requisitos del medio de soporte

REQUISITOS	OBJETIVOS
Estructuralmente resistentes	Soporte del peso propio más la biomasa adherida.
Biológica y químicamente inerte	Evitar que se produzca una reacción ajena a la del sistema.
Alta área específica	Permite una mayor adherencia de biomasa.
Elevada porosidad	Disminuye la posibilidad de colmatación en el sistema.
Bajo costo	Hace factible el proceso desde el punto de vista económico.

Fuente: Los autores

2.3.5.1 Materiales del medio de soporte. En los últimos años se han realizado investigaciones con diferentes medios de soporte de lecho filtrante como la guadua (Osorio, 1999; Zambrano, 1999;); la cáscara de coco y tejas de barro (Rodríguez et al, 2001), el Bambú (Camargo, 2001); también se pueden usar medios más sofisticados como los anillos sintéticos, las matrices plásticas de flujo cruzado o tubular.

En el País el Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento (2000) recomienda como medio, la piedra triturada angulosa o redonda (grava) sin finos, de tamaño entre 4 y 7 cm. Este lecho filtrante es reconocido a nivel mundial y es catalogado como medio de filtración convencional.

En estudios e investigaciones realizadas con filtros de arena y grava se indica que son medios de soporte efectivos para filtrar tanto contaminantes orgánicos, como inorgánicos. El tamaño y la naturaleza tridimensional de la cama de arena y grava proveen más área de filtrado y tienen una mayor capacidad de retención que muchos otros tipos de filtros¹⁰.

2.3.6 Comunidad Biológica en los filtros. La comunidad biológica en un filtro se compone principalmente de protistas, incluyendo bacterias facultativas, aerobias y

¹⁰ VALVES & CASTINGS, Inc. Filtros de arena y grava verticales. Manual de instalación y operación. p 17- 22.

anaerobias, hongos, algas y protozoos. Suelen también encontrarse algunos animales superiores como gusanos, larvas de insectos y caracoles¹¹.

2.3.7 Parámetros de control de los filtros anaerobios. Los principales parámetros que evalúan y se deben tener en cuenta para medir el desempeño del proceso anaerobio son:

Volumen de gases producidos. El producto mas importante en los procesos anaerobios es el biogás, cuando se producen cantidades elevadas indica la degradación de la materia orgánica hasta el límite posible en la anaerobiosis. El volumen del gas producido es el mejor indicador del buen o mal funcionamiento del proceso, la primera señal es la reducción en la cantidad de gases producidos, lo que ocurre antes del aumento en la concentración de ácidos volátiles¹².

pH. Logaritmo negativo de la concentración de ion de hidrogeno presente en el agua. El valor de pH adecuado para el proceso anaerobio, es un poco restrictivo y critico, generalmente es de 6.5 a 8.5, pero este permite la existencia de vida de los microorganismos que participan en la digestión anaerobia. Todas las reacciones que ocurren dentro del filtro anaerobio dan como resultado el rango de pH óptimo

Alcalinidad. La alcalinidad es la medida de la capacidad de tamponamiento de los componentes del reactor¹³. A través de esta medida se tiene noción de la capacidad del sistema de impedir reducciones bruscas del pH. Las bacterias metanogénicas son muy sensibles a dichas variaciones, por eso es necesario revisar constantemente este parámetro

Ácidos grasos volátiles. Al alterarse las condiciones óptimas de los procesos anaerobios, se genera un desequilibrio en la fase acidogénica y en la fase de producción de biogás aumentando la concentración de ácidos grasos volátiles.

¹¹ CASTAÑO ROJAS, Juan Mauricio. Consideraciones sobre diseño, arranque, operación y mantenimiento de filtros anaerobios de flujo ascendente. Pereira, 2002, p. 15. Trabajo de investigación (Ingeniero Ambiental). Universidad Técnica de Pereira. Facultad de ciencias Ambientales.

¹² TORREZ LOZANO, Patricia. Asociación de Ingenieros Sanitarios de Antioquia. Control de una planta anaerobia. Medellín: 1993. p. 648-656

¹³ Ibíd.

Relación AGV/Alcalinidad. Control sencillo y eficaz como indicador de la estabilidad del proceso, la relación AGV/Alcalinidad debe ser menor a 0.35. Valores mayores indican una posible sobre carga en el sistema.

Temperatura. Las velocidades de las reacciones bioquímicas son directamente afectadas por la temperatura¹⁴. Las bacterias anaerobias son sensibles a los cambios de temperatura, generando variaciones significativas en la producción de metano.

2.3.8 Parámetros de eficiencia de los filtros anaerobios. Los principales parámetros que evalúan y se deben tener en cuenta para medir la eficiencia del proceso anaerobio son:

Sólidos totales. De la carga orgánica depende la digestión anaerobia, esta medida se puede realizar a través de los sólidos totales y volátiles de la alimentación.

DQO. Parámetros que representan indirectamente el contenido de materia orgánica de un residuo a través de la medida de la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica. En el proceso anaerobio:

- Representa el contenido de materia orgánica del residuo a ser tratado.
- Permite verificar la eficiencia de remoción de materia orgánica del proceso
- Permite estimar la producción de gases posibles de ser obtenidos a partir de un residuo determinado.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅). Es uno de los parámetros más usados para medir la calidad de aguas residuales, pues permite determinar la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos para estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua, permitiendo evaluar la eficiencia del proceso de tratamiento y fijar cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras.

Relación C : N : P. Proporciones recomendadas para la digestión anaerobia son:

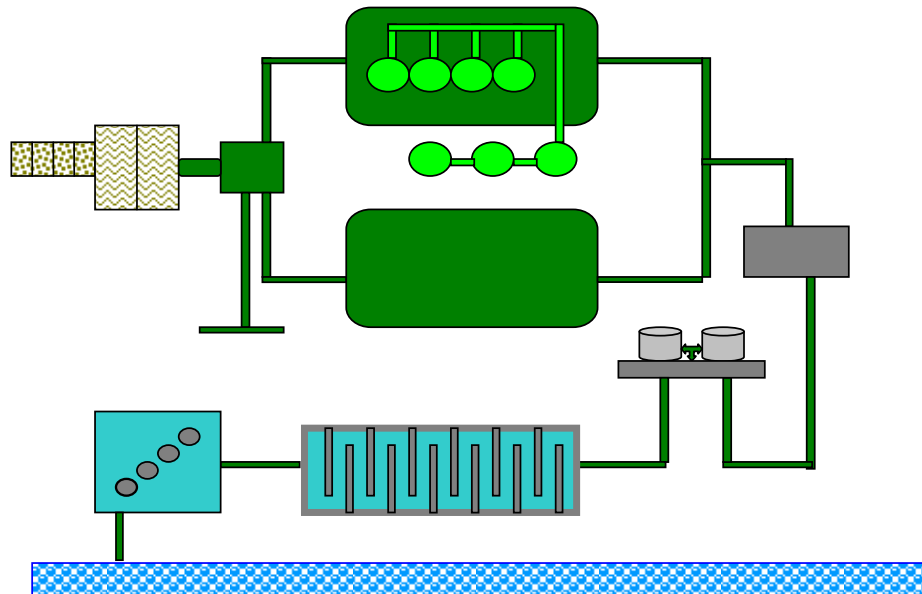
¹⁴ TORRES LOZANO, Op.cit.

C:	N:	P	
350	5	1	aguas residuales acidificadas
1000	10	1	aguas residuales no acidificadas

Cuando las cantidades de nitrógeno son muy altas (baja relación C/N) puede ocurrir inhibición en el proceso, debido a la formación de amoniaco, principalmente a pH de operación por encima de 8.0¹⁵.

2.3.9 Planta de tratamiento de agua residual de la UPB. Para evitar el impacto ambiental que se genera por el vertimiento de aguas negras en el medio ambiente y en las fuentes hídricas, se crea la planta de tratamiento de aguas residual de la UPB con el objetivo de recuperar las aguas residuales que se producen en las actividades de la institución antes de ser vertidas a la quebrada Mensulí. Los tratamientos de depuración de las aguas residuales de la institución se realizan por medio de procesos biológicos innovadores, que permiten obtener remociones altas de materia orgánica e inorgánica, para dar cumplimiento a las remociones establecidas por la normatividad vigente, según la autoridad ambiental.

Figura 3. Planta de Tratamiento de Aguas Residual de la Universidad Pontificia Bolivariana.



Fuente: Los autores

¹⁵ TORREZ LOZANO, Patricia. Asociación de Ingenieros Sanitarios de Antioquia. Control de una planta anaerobia. Medellín: 1993. p. 648-656

Tratamiento preliminar. Permite la remoción de material contaminante grueso o desperdicios que puedan afectar la operabilidad de la planta de agua residual, ayudando a aumentar la efectividad de los tratamientos primarios secundarios y terciarios. Dentro de la PTAR –UPB, este tratamiento es realizado por la criba de barras.

Tratamiento primario. Remover contaminantes que se puedan sedimentar como sólidos sedimentables, suspendidos, y grasas que se encuentran suspendidas en la superficie del agua residual. Los componentes que se hallan en el tratamiento primario de la PTAR – UPB son:

- Cámara desarenadora
- Lamina perforada,
- Trampa de gasas y aceites,
- Pozo de succión y bombeo
- Caja de distribución de flujo

Tratamiento secundario. Remover la DBO soluble resultante del tratamiento primario, remueve los sólidos suspendidos adicionales. Estas remociones son realizadas por medio de tratamientos biológicos en la PTAR-UPB está compuesto por:

- Reactor N°1, reactor N°2,
- Cuarto de control
- Caja de recolección de lodos

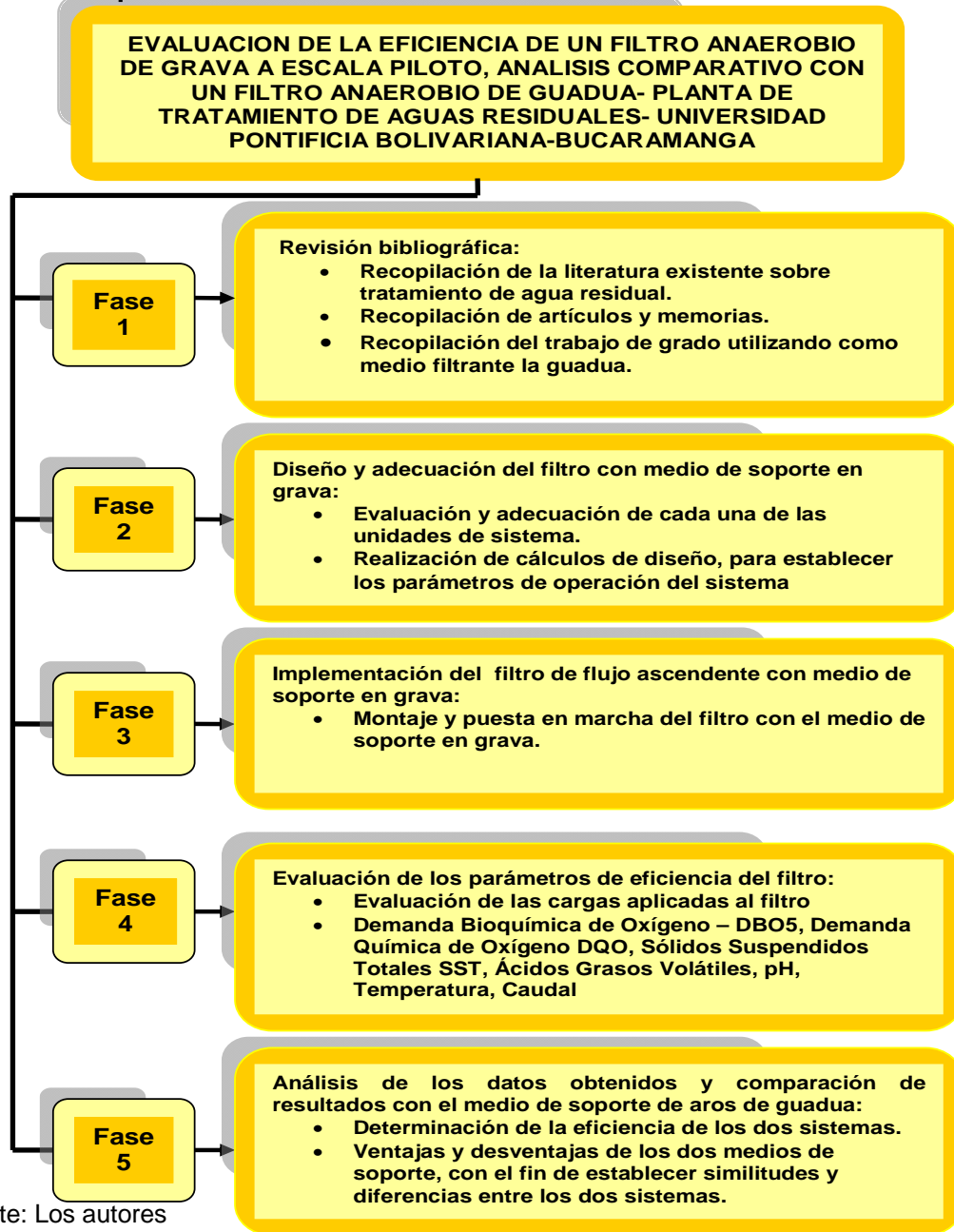
Tratamiento terciario. Para remover los compuestos que no cumplen con ciertos niveles de calidad del efluente del tratamiento secundario. Estos compuestos pueden ser Nitrógeno, fósforo, metales pesados, DQO soluble y tratamiento o disposición de lodo, compuesto en la PTAR – UPB por:

- Tanque de igualación
- Canal con buchón de agua
- Vertedero
- Laguna de aireación.

3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el desarrollo de la investigación, se llevo a cabo a través de cinco fases; con sus respectivas actividades las cuales se pueden apreciar en la figura 4.

Figura 4. Esquema General



3.1 FASE 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizó la recopilación de la información necesaria para el funcionamiento y operación del filtro anaerobio de flujo ascendente, FAFA.

3.1.1 Recopilación de la literatura existente sobre tratamiento de agua residual, Recopilación de artículos y memorias. Se realizó una investigación que permitió establecer los parámetros de diseño teóricos por los cuales se rige la operación y funcionamiento del FAFA como lo son:

- Área específica del medio, m^2
- DQO afluente, mg/L
- Porosidad de medio, %
- Velocidad de flujo, m/s
- Tiempo de retención hidráulico, TRH
- Altura del medio filtrante, h
- Diámetro del medio, \emptyset

Estos parámetros permiten establecer condiciones técnicas e hidráulicas y requerimientos que puedan garantizar el óptimo funcionamiento del FAFA.

3.1.2 Recopilación del trabajo de grado utilizando como medio filtrante la guadua. Para la ejecución de este proyecto de investigación es necesario trabajar con los mismos parámetros de diseño que se emplearon en el filtro anaerobio de flujo ascendente con medio de soporte guadua, elaborado por las estudiantes Diana Lucia Ibáñez y Silvia Juliana Celis, con el fin de proporcionar las mismas condiciones en el medio filtrante y poder realizar comparaciones que indiquen cual medio de soporte presenta mejor rendimiento de remoción en el sistema.

Los parámetros de diseño determinados en el filtro con medio de soporte en guadua fueron:

- Caudales, L/s
- Tiempos de retención, TRH
- Tiempos de recirculación, h
- Volúmenes, L

Adicionalmente se tuvo en cuenta las características físicas de los medios filtrantes como los son:

- Porosidad, %
- Densidad real, g/ cm³
- Altura del lecho, m
- Diámetro, cm
- Forma geométrica.

De estas dependen las remociones que se obtengan dentro del sistema.

3.2 FASE 2. DISEÑO Y ADECUACIÓN DEL FILTRO CON MEDIO DE SOPORTE EN GRAVA.

3.2.1 Evaluación y adecuación de cada una de las unidades de sistema. Se realizó una evaluación de las condiciones de diseño del filtro, con el objetivo de determinar las adecuaciones que se deberían modificar para la puesta en marcha del FAFA con medio de soporte en grava. Dentro de las unidades evaluadas están:

- Tanque de bombeo
- Bomba sumergible
- Filtro en acrílico
- Tubería de entrada
- Tubería de salida
- Tanque sedimentador

A cada uno de las unidades se le realizó una valoración donde se determinó su estado actual, se verificaron las dimensiones y finalmente se realizaron ajustes que permitieron soportar las condiciones del nuevo medio filtrante en el sistema.

3.2.2 Realización de cálculos de diseño, para establecer los parámetros de operación inicial del sistema. A pesar que el filtro debe operar con los mismos parámetros de diseño establecidos con el medio de soporte en guadua, varían los volúmenes útiles, debido a que la grava y la guadua no poseen las mismas características físicas como la porosidad, afectando el tiempo de retención

hidráulico, por este motivo fue necesario recalculer los parámetros de diseño utilizando como medio de soporte la grava.

De igual forma fue necesario calcular el caudal de diseño con el cual funciona el sistema, este se determinó por medio de aforo volumétrico durante un ciclo de operación normal de la UPB, el cual consta de 10 horas día.

Establecido el caudal medio en el monitoreo, tomando los tiempos de recirculación de la investigación anterior y conociendo las dimensiones de las unidades del sistema, se procede a recalculer los volúmenes, tiempo de retención y velocidad de flujo dentro del filtro.

3.3 FASE 3. IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO DE FLUJO ASCENDENTE CON MEDIO DE SOPORTE EN GRAVA

3.3.1 Montaje y puesta en marcha del filtro con el medio de soporte en grava.

Adecuado cada una de las unidades del sistema de tratamiento, se agregó la grava como medio de soporte cubriendo 1 metro de altura dentro del filtro, y se dio inicio a la alimentación del sistema con agua residual efluente del Reactor N°1, de igual forma se inoculo el sistema con lodo anaerobio proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Río Frió, tal como fue realizado por las estudiantes Diana Ibáñez y Silvia Celis, debido a que presentan mejores condiciones de estabilización.

Finalmente se realizó el análisis de la actividad metanogénica al lodo proveniente de la PTAR Río Frió aplicado a la grava como medio filtrante, con el fin de conocer la capacidad que tiene este lodo de convertir el sustrato en metano y la fracción de bacterias metanogénicas que lo componen.

3.4 FASE 4. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE EFICIENCIA DEL FILTRO.

3.4.1 Evaluación de las cargas aplicadas al filtro. Este parámetro se calculó con los datos obtenidos en el monitoreo fisicoquímico en términos de DQO, DBO, y SS realizado por El Laboratorio de Análisis Químico de Aguas Residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana, con el fin de determinar la carga contaminante en el efluente del reactor N°1.

3.4.2 Parámetros de evaluación del sistema. Los parámetros utilizados como método de control fueron Ácidos Grasos Volátiles, Alcalinidad, pH, Temperatura y los parámetros que determinaron la eficiencia del filtro anaerobio de flujo ascendente con medio de soporte en grava fueron Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO₅ mg/L, Demanda Química de Oxígeno DQO mg/L, Sólidos Suspendidos Totales SST mg/L, estos parámetros fisicoquímicos se realizaron en el laboratorio de agua residual de la UPB, siguiendo la metodología de las técnicas analíticas establecidas en los métodos estandarizados de agua potable y residuales como se muestra en la tabla.

Tabla 3. Parámetros utilizados para el control y evaluación de la eficiencia, con su respectivo método.

PARÁMETROS	REFERENCIA	MÉTODO
pH	Standard Methos for Examination of Water and Wastewater 21 th edition, 2005.	STÁNDARD METHODS 4500 H + A
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	Standard Methos for Examination of Water and Wastewater 21 th edition, 2005.	STÁNDARD METHODS 2540-D
NITRÒGENO	Standard Methos for Examination of Water and Wastewater 21 th edition, 2005.	STÁNDARD METHODS 4500 N _{org} - B
ÀCIDOS GRASOS VOLATILES	Standard Methos for Examination of Water and Wastewater 21 th edition, 2005.	STÁNDARD METHODS 5560 – C
ALCALINIDAD	Standard Methos for Examination of Water and Wastewater 21 th edition, 2005.	STÁNDARD METHODS 2320 – B
DQO	Standard Methos for Examination of Water and Wastewater 21 th edition, 2005.	STÁNDARD METHODS 5520 – B
DBO ₅	Standard Methos for Examination of Water and Wastewater 21 th edition, 2005.	STÁNDARD METHODS 5510 – B
FÒSFORO	Standard Methos for Examination of Water and Wastewater 21 th edition, 2005.	STÁNDARD METHODS 4500 P – E

Fuente: Los autores

3.5 FASE 5. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON EL MEDIO DE SOPORTE DE AROS DE GUADUA.

3.5.1 Determinación de la eficiencia de los sistemas evaluados. El filtro operó bajo tres tiempos de recirculación seleccionados de 24, 36 y 48 horas, a los cuales se les realizó un muestreo al afluente y el efluente del sistema con el fin de determinar la eficiencia dada con la grava como medio de soporte y poder comparar los resultados establecidos con el medio de soporte en guadua. Los parámetros evaluados que indican la eficiencia del sistema son DBO₅, DQO, SST, Nitrógeno y Fósforo.

4. DATOS OBTENIDOS

4.1 FASE 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1.1 Parámetros de diseño teórico del filtro anaerobio de flujo ascendente.

Para la ejecución del proyecto como primera medida fue necesario investigar los parámetros de diseño más importantes para el funcionamiento y operación del filtro anaerobio de flujo ascendente, esto permite establecer los requerimientos que puedan garantizar la optimización del sistema, llevándolo a condiciones técnicas

Tabla 4. Parámetros de diseño teórico del filtro anaerobio de flujo ascendente.

PARÁMETRO	VALOR TEÓRICO	AUTOR
Diámetro del medio (cm)	2-17 4-7 2.5 - 6.5	Droste, R. L. (1997) RAS (2000) Pedro Escobar
Altura del medio filtrante (m)	2 1.20	Young Young, J.C. y Yang, B.S (1989)
Tiempo de retención hidráulico (h)	24 - 48 4 - 6.5 20 -96	Matcalf & Eddy (1991) RAS (2000) Young, J.C. y Yang, B.S (1989)
Velocidad de flujo (m/d)	< 10	Droste, R. L. (1997)
Porosidad de medio	0.46 - 0.66	RAS (2000)
Área específica del medio (m ² /m ³)	98 - 130 100	RAS (2000) Young
DQO afluente, (mg/l)	1000 - 30000 2500 - 24000	Droste, R. L. (1997) Young, J.C. y Yang, B.S (1989)

Fuente: Los autores

Los datos de diseño registrados por la investigación del filtro anaerobio de flujo ascendente utilizando como medio de soporte aros de guadúa son los expuestos en la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de diseño experimental usado en el filtro anaerobio de flujo ascendente con medio de soporte en guadua de la PTAR UPB Bucaramanga.

CAUDAL (LPH)	TIEMPO DE RETENCIÓN (H) TEORICO	TIEMPO DE RETENCIÓN (H) CALCULADO POR LAS AUTORAS	VOLUMEN FILTRO(L)
40.24	24	16.55	665
26.86	36	24.82	665
20.12	48	33.09	665

Fuente: Los autores

Según los datos expuestos en la Tabla 5, se manejaron inadecuadamente los conceptos de tiempo de retención hidráulico y tiempo de recirculación. El tiempo de retención teórico es realmente el tiempo que duro el agua recirculando dentro del sistema, este tiempo no interviene dentro de los cálculos de caudal ni tiempo de retención hidráulico. Cabe anotar que el sistema no posee ningún método de regulación de caudales, por consiguiente se manejo el mismo caudal durante toda la investigación.

El volumen que se estableció es el volumen de todo el filtro, si embargo se omitió que en este se encontraba la guadua como medio de soporte, y no se contempló para determinar el volumen útil o de vacíos, la porosidad del material que conforma el lecho filtrante y de esta manera poder determinar el tiempo de retención hidráulico TRH

4.1.2 Características de los medios de soporte del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente. El proyecto de grado con aros de guadua como medio de soporte, concluyó diversa ventajas que proporcionaba la guadua como material del lecho filtrante, una de estas ventajas es la gran población microbiana que se genera en área de contacto, debido a la porosidad del medio, facilitando el crecimiento de estas poblaciones si se comparan con el método tradicional. Esta afirmación hace necesaria la comparación con un medio de soporte en grava, comúnmente llamado tradicional, con el fin de establecer cual de los dos medios filtrantes presentan una mayor eficiencia y menores costos de operativos.

Cabe anotar que actualmente el Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento (RAS 2000) recomienda utilizar como material de soporte piedra triturada angulosa o redonda (grava), sin finos, de tamaño entre 4-7 cm. Este es el

medio mas utilizado en municipios y zonas rurales en Colombia que poseen estos filtros anaerobios de flujo ascendente FAFA.

A continuación se presentan las características principales de los dos tipos de materiales utilizados como medios de soporte, en el filtro anaerobio de flujo ascendente instalado en la PTAR de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Tabla 6. Características de los medios de soporte del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente

PARÁMETRO	GRAVA	GUADUA
Porosidad %	0.40	0.60*
Volumen de Vacíos (L/m ²)	181.45	-
Altura del lecho (m)	1	1*
Forma	Rugoso redondeada	Anillos
Diámetro (cm)	4 – 7	≈ 4.56*
Longitud (cm)	-	5*
Densidad real (g/ cm ³)	2.64	0.75*
Volumen empacado (L)	453.64	-
Área Superficial	55 – 70 m ² /m ³	1.2 m ² *

Fuente: Los autores

Estas características permiten inferir que la guadua cuenta con ventajas sobre la grava, pues posee una alta área superficial por metro cúbico que genera una mayor adherencia de biomasa y una elevada porosidad lo cual disminuye la posibilidad de colmatación.

4.1.3 Parámetros de control para el arranque del sistema anaerobio. Para el arranque de un sistema anaerobio se deben facilitar las condiciones adecuadas para el crecimiento de la biomasa, proporcionando los nutrientes necesarios, manteniendo las condiciones hidráulicas y de cargas idóneas para el desarrollo de los microorganismos. Los parámetros de control que se deben tener en cuenta en el arranque del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de control para el arranque del sistema anaerobio

PARÁMETRO	RANGO	AUTOR
pH	6.5 y 8.5	Romero Rojas (2000)
Temperatura	25 – 35 °C	Romero Rojas (2000)
Alcalinidad	600 – 2000 mg/Lt]	Rittmann y McCarty (2001),
ALK / AGVS	> 0.4	Borja (1989)

Fuente: Los autores

4.2 FASE 2. DISEÑO Y ADECUACIÓN DEL FILTRO CON MEDIO DE SOPORTE EN GRAVA.

4.2.1 Evaluación y adecuación de las unidades del filtro anaerobio de flujo ascendente FAFA. Para realizar la evaluación y poder acceder al filtro se procedió a desocuparlo evacuando el medio de soporte en guadua de manera manual durante una semana.

Las unidades del sistema con sus características geométricas y adecuaciones son los siguientes:

Tanque de Bombeo. El agua residual que alimenta al tanque de bombeo proviene del efluente del Reactor No 1 de la UPB, que a su vez es el afluente de sistema evaluado, en este tanque se encuentra la bomba de succión Pedrollo Top 1, que bombea agua residual hacia el filtro anaerobio de flujo ascendente FAFA, en el tanque se encuentran tres tuberías, las cuales son:

- Tubería de entrada de agua al tanque con un diámetro de 2 “pulgadas.
- La tubería de bombeo con un diámetro de $\frac{3}{4}$ “de pulgada.
- La tubería de recirculación encargada de transportar el agua proveniente del tanque sedimentador al tanque de bombeo, esta tubería tiene un diámetro de 2” pulgadas.
- La dimensiones del tanque de bombeo son: 0.97 metros de altura, 1 metro de diámetro externo y 0.92 metros de diámetro interno.

Este sistema se encontraba en buen estado y no hubo necesidad de hacerle ninguna adecuación física ni mantenimiento como se aprecia en las figuras 5 y 6.

Figura 5. Perfil tanque de bombeo



Fuente: Los autores

Figura 6. Planta tanque de bombeo



Fuente: Los autores

Bomba. La bomba sumergible utilizada en el sistema de tratamiento es de marca Pedrollo referencia TOP 1 con las siguientes características:

Tabla 8. Especificaciones Bomba

ESPECIFICACIONES	VALOR
Caudal	20/120 L/s
Hmax	7 m
Hmin	1m
Hp	0.33
Rpm	3450
Wmax	320

Fuente: Catalogo Bomba

La bomba utilizada en el proyecto fue la misma empleada en la investigación de aros de guadua, la cual tuvo una duración de 7 meses de operación, esta se encontraba en buen estado en el inicio de proyecto, sin embargo, después de 4 meses de funcionamiento se presentó un sobre salto eléctrico en la PTAR de la Universidad Pontificia Bolivariana que fundió la bomba, sin permitir ningún tipo de arreglo. Por este motivo se dio la necesidad de comprar una bomba sumergible con las mismas especificaciones técnicas para poder realizar los últimos monitoreos del sistema y poder efectuar su respectiva evaluación.

Filtro. El filtro es retomado de la investigación anterior que trabajaba el lecho filtrante con aros de guadua, este filtro tiene forma cilíndrica y presenta las siguientes dimensiones:

- 1.77 de alto
- 0.76 de diámetro interno
- 0.77 de diámetro externo
- El material de las paredes es acrílico de calibre 10 mm
- La base del filtro está compuesta por una tapa plana de acrílico calibre 8 mm,

Internamente el filtro cuenta con una flauta giratoria encargada de distribuir uniformemente el agua residual y una rejilla encargada de soportar el peso del medio filtrante. El filtro se encontraba en buen estado, pero fue necesario realizar

una adecuación externa adicionando cuatro abrazaderas metálicas que permitan soportar la presión que ejerce el medio de soporte sobre las paredes del filtro.

Las abrazaderas están distribuidas uniformemente sobre el medio de soporte como se aprecia en a Figura 7.

Figura 7. Perfil del filtro vacío



Fuente: Los autores

Tapa superior del filtro. La tapa superior del filtro posee una forma cónica, con una pendiente de 2cm, y en el centro un orificio de $\frac{3}{4}$ de pulgada que permite la salida del gas metano (CH_4) del sistema, a esta salida se le adecuó un tubo de $\frac{3}{4}$ de pulgada en forma de L que evita la dispersión del gas, adicionalmente en el borde del filtro va sujeto un anillo que permite que encaje la tapa herméticamente con unos tornillos, evitando la salida del gas metano.

La tapa se encuentra en buen estado, pero el anillo que sirve de encaje se encuentra partido y la mayoría de tornillos se oxidaron de tal forma que no es conveniente colocarlos debido a que se quedan pegados al acrílico, finalmente fue necesario quitar la tapa para realizar mantenimiento en el filtro Véase la Figura 8.

Figura 8. Planta de la tapa del filtro



Fuente: Los autores

Flauta. La flauta giratoria es la encargada de distribuir uniformemente el agua residual dentro del filtro, véase la Figura 9, ésta necesita la presión que ejerce la bomba para girar y posee un largo de 72 cm. con un diámetro de $\frac{3}{4}$ de pulgada y diversos orificios ubicados longitudinalmente que permiten la distribución de flujo uniforme, evitando taponamientos y zonas muertas en el sistema.

Figura 9. Planta de la Flauta

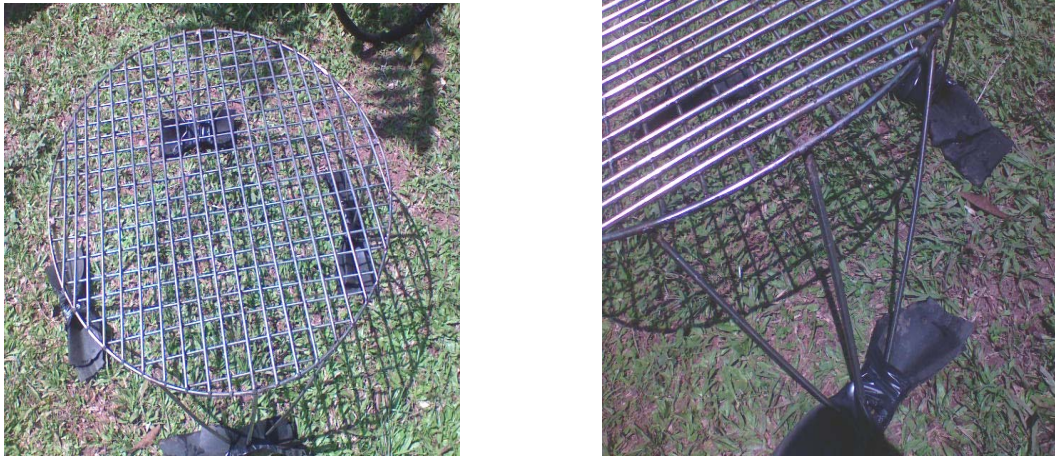


Flauta

Fuente: Los autores

Rejilla. El material de la rejilla es acero inoxidable, material que permite disminuir el riesgo de deterioro que puede generar el estar en contacto permanente con el agua residual, cuenta con un diámetro de 75 centímetros, con orificios cuadrados de 3x3 centímetros, la altura de las cuatro patas que la soportan son de 30 cm. El estado de la rejilla es bueno, pero como el peso que debe soportar con la grava es mayor a la guadua basándose en la densidad, se reforzaron las patas, adicionando en cada una varilla de acero inoxidable, con dos fines; el primero, que la parte inferior que está en contacto con el acrílico no le ejerza mayor presión ocasionando un vencimiento o ruptura en la tapa inferior del filtro, el segundo que pueda soportar el peso producido por el nuevo medio filtrante. Los cambios y el estado actual de la rejilla se pueden apreciar en la Figura 10.

Figura 10. Rejilla



Fuente: Los autores

Tubería de entrada. El flujo de agua al filtro se realiza por medio de una tubería PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada que se encuentra a 11 cm del fondo de filtro, adicionalmente contiene una válvula que permite el paso del agua, al terminar la tubería de entrada se encuentra la flauta giratoria, instalada en el interior del filtro.

La tubería de entrada se encuentra en buen estado, simplemente se le realizó mantenimiento con el fin de remover cualquier tipo de residuo que obstruya y que pueda afectar el movimiento de la flauta. Véase figura 11.

Figura 11. Tubería de entrada



Fuente: Los autores

Tubería de salida. El material de la tubería de salida es de PVC de $\frac{3}{4}$ " de pulgada a una altura de 1.47 m desde el fondo del filtro, finalmente se conduce al tanque sedimentador. Vease figura 12.

Figura 12. Tubería de salida



Fuente: Los autores

Tanque Sedimentador. El tanque sedimentador tiene como función captar el efluente del filtro anaerobio para enviarla de nuevo al tanque de bombeo y empezar el proceso de recirculación. El tanque posee las siguientes dimensiones 96 cm de largo, 61cm de ancho y 55 cm de alto. En el centro se adecuó una rejilla que evita el desplazamiento de partículas sólidas que puedan obstruir la bomba. La tubería que transporta el agua del tanque sedimentador a el tanque de bombeo tiene un diámetro de 2 pulgadas y una longitud de 5,20 m. El tanque sedimentador se aprecia en la figura 13.

Figura 13. Tanque Sedimentador



Fuente: Los autores

4.2.2 Cálculos de diseño para establecer los parámetros del filtro con medio de soporte en grava

Determinación del volumen del sistema

Volumen tanque de bombeo

$$v_{total} = \frac{\pi * D^2}{4} * h = \frac{\pi * (0.92m)^2}{4} * 0.97m = 0.644m^3 \approx 644.81L$$

$$V_{util} = \frac{\pi * D^2}{4} * h = \frac{\pi * (0.92m)^2}{4} * 0.80m = 0.531m^3 \approx 531.80L$$

Volumen tanque sedimentador

$$V_{total} = l * a * h = 0.96m * 0.61m * 0.55m = 0.322m^3 \approx 322.08L$$

Volumen del filtro

$$V_{falsofondo} = \frac{\pi * D^2}{4} * h = \frac{\pi * (0.76m)^2}{4} * 0.30m = 0.136m^3 \approx 136.09L$$

$$V_{la\ min\ agua\ sin\ lecho\ filtrante} = \frac{\pi * D^2}{4} * h = \frac{\pi * (0.76m)^2}{4} * 1.47m = 0.666m^3 \approx 666.8L$$

$$V_{la\ min\ agua} = \frac{\pi * D^2}{4} * h = \frac{\pi * (0.76m)^2}{4} * 0.17m = 0.077m^3 \approx 77.11L$$

$$V_{util} = \frac{\pi * D^2}{4} * h * p = \frac{\pi * (0.76m)^2}{4} * 1m * 0.40 = 0.181m^3 \approx 181.45L$$

$$V_{TOTAL\ agua\ en\ el\ sistema} = V_{util\ tan\ que\ bomba} + V_{tan\ que\ se\ dim\ entador} + V_{util\ del\ filtro} + V_{la\ min\ agua} + V_{falsofondo} = 531.80L + 322.08L + 181.45L + 77.11L + 136.09L = 1248.53L$$

Velocidad de flujo ascensional

$$velocidad = \frac{Q}{A} = \frac{2.785 * 10^{-4} m^3/s}{0.4536m^2} = 6.139 * 10^{-4} \approx 53.042m/dia$$

El volumen útil del filtro es el cuerpo de agua que hace contacto con el medio filtrante el cual es el encargado de realizar la remoción de contaminantes, pues allí es donde se encuentran adheridos los microorganismos encargados de la depuración dentro del sistema. Conociendo el volumen útil del filtro se determina el tiempo retención hidráulico, el cual indica el tiempo que dura el cuerpo de agua en contacto con los microorganismos presentes en el lecho filtrante.

Determinación de caudal. Antes de despejar el tiempo de retención es necesario conocer el caudal de diseño, para calcular este parámetro se realizó un monitoreo durante diez horas en el sistema, que permitió establecer datos reales de funcionamiento. Véase la Figura 14.

Este monitoreo permitió comparar los datos de caudal referenciados por la bomba y los hallados por medio del aforo, demostrando una gran diferencia.

Figura 14. Determinación de caudal



Fuente: Los autores

El dato de caudal que aparece referenciado en las especificaciones de la bomba es de 0.00208 L/s, para comprobar si el caudal (L/s) con el que funcionaba el sistema era el referenciado por la bomba, se realizó un monitoreo que arrojó los siguientes datos.

Tabla 9. Datos del monitoreo del filtro anaerobio de flujo ascendente.

HORA	Q (L/s)	pH	Temperatura °C
8:00	0.246	7.76	23
9:00	0.261	7.86	23
10:00	0.259	7.80	25
11:00	0.273	7.82	24
12:00	0.279	7.86	27
13:00	0.297	7.88	27
14:00	0.286	7.77	29
15:00	0.289	7.89	28
16:00	0.269	7.79	25
17:00	0.266	7.86	26
Promedio	0.2785	7.83	25.7

Fuente: Los autores

Para que el sistema operara bajo condiciones reales se utilizó el caudal obtenido a través del aforo en la determinación del tiempo de retención hidráulico.

Tiempos de retención hidráulicos

$$Q = \frac{V_{util}}{TRH} = TRH = \frac{181.45L}{0.2785 L/s} = 651.526s \approx 10.85 \text{ min}$$

El filtro operó con los tiempos recirculación utilizados con los aros de guadua como lecho filtrante, estos tiempos fueron determinados para 24, 36 y 48 horas, sin embargo, la falencia observada es la utilización del término tiempo retención, cuando el verdadero fin que se tiene con estos tiempos es la de recircular el agua.

El parámetro de tiempo de retención al utilizar la grava como medio de soporte fue de 10.85 minutos, este tiempo es el que dura el cuerpo de agua en el lecho filtrante en contacto con los microorganismos, el sistema recircula 24 horas, en este período una gota de agua residual en el sistema, teniendo en cuenta el volumen de los tanques existentes demoraría un periodo de 60 min en volver a ingresar al FAFA, por consiguiente en el día una gota de agua pasaría 24 veces por el lecho filtrante.

El caudal no varia debido que no existe ningún sistema que permita regularlo, por consiguiente el caudal siempre va hacer constante. Las siguiente tabla resume los parámetros de diseño calculados en la investigación con grava:

Tabla 10. Parámetros de diseño experimental usado en el filtro anaerobio de flujo ascendente con medio de soporte en grava de la PTAR UPB Bucaramanga

CAUDAL (LPS)	TIEMPO DE RECIRCULACIÓN (H)	TIEMPO DE RETENCIÓN (MIN)	VOLUMEN ÚTIL FILTRO (L)	Nº DE PASADAS POR EL LECHO	TIEMPO DE RETENCIÓN (H)
0.2785	24	10.85	181.45	24	4.34
0.2785	36	10.85	181.45	36	6.51
0.2785	48	10.85	181.45	48	8.68

Fuente: Los autores

Los datos de volúmenes para los dos sistemas son diferentes, pues en la investigación anterior se omitió el parámetro de porosidad en el lecho filtrante al determinar el volumen útil o de vacíos, y la medición del tanque de bombeo se realizó de manera externa, despreciando la altura total del tanque. La siguiente tabla muestra los volúmenes calculados en las investigaciones con medio de soporte en grava y guadua.

Tabla 11. Comparación de volúmenes en las investigaciones con su respectivo medio filtrante.

VOLÚMENES	GRAVA (L)	GUADUA (L)
Tanque de bombeo	644.81	500 L
Volumen útil tanque de bombeo	531.80	-
Tanque sedimentador	322.08	300.9
Volumen lamina de agua	77.11	-
Volumen lamina de agua sin lecho	666.8L	-
Volumen Útil del filtro	181.45	665
Volumen falso fondo	136.09	-
TOTAL	1248.53	965.9

Fuente: Los autores

4.3 FASE 3. IMPLEMENTACIÓN DEL FILTRO DE FLUJO ASCENDENTE CON MEDIO DE SOPORTE EN GRAVA.

4.3.1 Montaje y puesta en marcha del filtro con medio de soporte en grava, alimentado con agua residual proveniente de la Universidad Pontificia Bolivariana. El filtro anaerobio de flujo ascendente FAFA con medio de soporte en grava se encuentra dentro de las instalaciones de la PTAR Universidad Pontificia Bolivariana y es evaluado como tratamiento terciario

El filtro se acondicionó de manera manual, dentro de la limpieza se procedió a extraer la guadua utilizada como medio, este proceso duró una semana aproximadamente, la idea era recuperar el lodo presente en el lecho filtrante para utilizarlo en la inoculación del filtro, esto no fue posible debido a que el lodo se encontraba adherido a la guadua y limpiar aro por aro no era factible, debido a su tediosa labor, gran porosidad y además el gran periodo de tiempo que se requeriría, podría afectar sus características microbiológicas o muerte celular es por ello que se tomó la decisión de inocular nuevamente el sistema.

Inoculación. Con el fin de adecuar el filtro a los parámetros establecidos con el medio de soporte en guadua, se realizó la inoculación del medio de soporte en grava con 50 Litros de lodo proveniente de la PTAR Río Frío, esta cantidad la brindaron los operarios de la planta. A este lodo se le realizó un análisis de actividad metanogénica, las cuales arrojaron los siguientes resultados.

Tabla 12. Características del lodo de la inoculación.

EXTRACCIÓN DE LODO	PARÁMETRO	VALOR EN MG/LT
PTAR Río Frío	Sólidos Suspendidos Totales	76400
	Sólidos Suspendidos Volátiles	54200

Fuente: Los autores

Actividad metanogénica. Este parámetro se evalúa mediante el método Botella de Mariotte, el cual permite determinar la capacidad del lodo anaerobio de convertir el sustrato en metano. Mediante la siguiente ecuación:

$$AM = \frac{V * 24}{FC * T * 360}$$

Donde:

V : Tasa de producción acumulada en ml de CH₄/h

FC : Factor de conversión en g DQO/L de ml de CH₄. Se obtiene de la relación de las condiciones físico-ambientales estables del laboratorio de acuerdo a la ley de Boyle.

T : Establecido para 28 horas en la primera alimentación.

SSV : Concentración de sólidos suspendidos volátiles del lodo.

Figura 15. Montaje actividad metanogénica



Fuente: Los autores

El dato obtenido de la actividad metanogénicas es de 0.16 m³ CH₄/ m³ (Reactor/Día) lo cual indica que el lodo posee una población microbiana con una capacidad alta de convertir el sustrato en metano. Un inóculo adecuado, bajo condiciones óptimas de operación, podría reducir el tiempo de puesta en marcha a cerca de 40 días (Young y McCarty, 1969); aproximadamente 3 semanas fueron requeridos en esta investigación.

Descripción del funcionamiento del Filtro anaerobio. El agua que alimenta el sistema proviene del RAP N°1 de la PTAR UPB, el cual vierte al tanque de bombeo, donde se encuentra la bomba sumergible Pedrollo TOP 1 que suministra

agua residual a el filtro de forma ascendente a través de una tubería de ¾ “ que culmina en la flauta giratoria teniendo como función la distribución uniforme del flujo, el agua residual pasa por la grava como medió filtrante con un tiempo de retención de 10.85 minutos, y sale hacia el tanque sedimentador encargado de almacenar y distribuir el agua hacia el tanque de bombeo, después comienza el proceso recirculación.

4.4 FASE 4. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUIMICOS DE EFICIENCIA DEL FILTRO.

4.4.1 Evaluación de las cargas aplicadas al filtro. El Laboratorio de Análisis Químico de Aguas Residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana realizó un monitoreo a la PTAR de la UPB, los datos reportados sirvieron para hallar un promedio de las concentraciones de DBO aplicadas al filtro.

Tabla 13. Monitoreo realizado efluente del Reactor N° 1 por el laboratorio de Análisis químico.

ANÁLISIS	VALOR	MÉTODO
DQO	364.8 mg/L	5220 – B
DBO	206.8 mg/L	5210 – B
Sólidos suspendidos	186.8 mg Sólido s/L	2540 – D
Sólidos sedimentables	0.1ml Sólido sed/ L	2540 – F
Temperatura y pH.	24.5 / 8.02	4500 H+B
Caudal promedio	0.62 L/s.	Volumétrico

Fuente: Laboratorio de Análisis Químico de la Universidad Pontificia Bolivariana.13/08/08.

Se tomaron los datos obtenidos de la DBO en el afluente, que es agua residual proveniente del RAP 1, para determinar la carga orgánica que se aplica en el filtro.

Tabla 14. Datos de DBO en el afluente del filtro, para determinar la eficiencia con cada tiempo de recirculación.

T RECIRCULACIÓN	ANÁLISIS	VALOR (mg/L)	METODO
24	DBO	285.00	5210-B
36	DBO	317.00	5210-B
48	DBO	360.00	5210-B

Fuente: Los autores

El promedio del la DBO es de 292.2 mg/L, teniendo la concentración del vertimiento, y el caudal hallado por medio del aforo, se puede determinar la carga aplicada al sistema mediante la ecuación expuesta en el Artículo 75, del Decreto 1594 de Junio 26 del 1984.

$$B = (Q)(CV)(0.0864)$$
$$B = (0.2785)(292.2)(0.0864) = 0.604 \text{ KgDBO /dia}$$

Donde:

Q: Caudal promedio del vertimiento, l/seg.

B: Carga en el vertimiento, kg/día.

CV: Concentración en el vertimiento, mg/l.

0.0864: Factor de conversión.

4.4.2 Evaluación de los parámetros de eficiencia del filtro. La evaluación realizada en el sistema con medio de soporte grava, fue dividida en parámetros de control y parámetros de eficiencia, los cuales se aplicaron en diferentes tiempos de recirculación con los que opero el sistema.

Parámetros de control evaluados:

- AGV
- Alcalinidad
- pH
- Temperatura °C

Parámetros de eficiencia evaluados:

- DQO mg/L
- DBO mg/L
- SST mg/L

Parámetros de control

Acidos grasos volátiles (AGV): este parámetro de control se evaluó diariamente con el fin de verificar que el filtro funcione con las condiciones óptimas, pues una

variación en estos datos puede indicar una alteración de las condiciones anaerobias ideales para el funcionamiento del sistema, la muestra fue tomada en la salida del filtro, refrigerada y llevada al laboratorio de aguas residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana donde se realizó el montaje.

Alcalinidad. Este parámetro fue determinado diariamente debido a que una alteración en este puede indicar falencias en la operación, pues la alcalinidad es la encargada de neutralizar los ácidos, por consiguiente evita una caída en el pH, esta muestra fue tomada en el tanque sedimentador a la salida del filtro refrigerada y transportada al laboratorio de aguas residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana.

pH. La determinación del pH, fue realizada diariamente in situ, este parámetro es de gran importancia pues un cambio brusco puede alterar las condiciones del medio, produciendo una acidificación dada las condiciones operacionales de un sistema anaerobio generando muerte de los microorganismos, la muestra fue tomada en el tanque sedimentador por ser el efluente del filtro

Figura 16. Determinación del pH



Fuente: Los autores

Temperatura. Este parámetro es de gran importancia pues afecta la velocidad de las reacciones bioquímicas, así mismo se debe controlar pues las bacterias son sensibles a la variación de temperaturas, este fue analizado diariamente in situ en la el efluente de filtro con el fin de asegurar que tenga los parámetros óptimos

Parámetros de eficiencia

DQO. Las muestras fueron tomadas teniendo en cuenta los tiempos de recirculación establecidos para el funcionamiento del sistema, las muestras fueron recolectadas en el tanque de bombeo que corresponde al afluente del sistema y en el tanque sedimentador que corresponde al efluente del sistema estas muestras fueron refrigeradas y transportadas al laboratorio de aguas residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana donde se realizó el montaje a través del método de refluo abierto, para determinar las remociones efectuadas por el filtro anaerobio con medio filtrante en grava.

DBO. La muestra de DBO se tomo para cada tiempo de recirculación, estas muestras fueron tomadas en el tanque de bombeo antes de tener contacto con el medio filtrante y en el tanque sedimentador, con el objeto de determinar las remociones de DBO producidas en el sistema.

SST. En cada uno de los tiempos utilizados en la operación del filtro se tomaron muestras en el efluente del sistema, estas fueron transportadas al laboratorio de aguas residuales de la UPB donde se realizó el análisis con el fin de determinar los porcentajes de remoción y poder determinar la eficiencia del sistema anaerobio.

Figura 17. SST



Fuente: Los autores

Nitrógeno y Fósforo. Estas muestras fueron tomadas en el afluente y el efluente del sistema con el fin de determinar las concentraciones de entrada y salida para obtener los datos de remoción, estas pruebas fueron realizadas por el laboratorio de análisis químico de la Universidad Pontificia Bolivariana pues el laboratorio de aguas residuales no cuenta con los reactivos y equipos necesarios para el

desarrollo de las muestras. El monitoreo se realizo con el mismo afluente del RAP N°1 y se sacaron muestras puntuales para 24, 36 y 48 horas, que son los tiempos de recirculación aplicados en el filtro

Reporte de los datos obtenidos y comparación de resultados con el medio de soporte de aros de guadua.

Las remociones obtenidas usando como medio de soporte la gava con sus respectivos tiempos de recirculación se pueden ver en la Tabla 15.

Tabla 15. Reporte de los datos obtenidos con el medio de soporte en grava.

TIEMPOS DE RECIRCULACIÓN (H)	% REMOCIÓN DQO	% REMOCIÓN SST	% REMOCION DBO
24	13 – 50	27 – 57	36
36	37 – 71	52 – 76	57
48	60 – 82	67 – 82	78

Fuente: Los autores

Los datos obtenidos en la tabla 15; utilizando la grava como medio de soporte se compararan con los datos reportados en la investigación que utilizó la guadua como lecho filtrante. Los datos reportados con medio de soporte en guadua se ven en la tabla 16.

Tabla 16. Remociones con guadua como lecho filtrante

TIEMPOS DE RECIRCULACIÓN (H)	% REMOCIÓN DQO	% REMOCIÓN SST	% REMOCION DBO
24	15 – 90	33 – 84	77
36	79 – 95	80 – 88	89
48	81 – 95	80 – 88	89

Fuente: Los autores

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 RELACIÓN DBO/DQO

El calculo de relación DBO/DQO afluente del sistema evaluado arrojó un valor de 0.56 resultado que de acuerdo a recopilación bibliográfica, permite que el agua residual de la institución presenta residuos que se consideran fácilmente tratables mediante procesos biológico como es caso del filtro anaerobio de flujo ascendente evaluado en el presente documento, Véase la Tabla 16.

Tabla 17. Parámetro de relación

PARAMETRO	VALOR
DBO ₅ / DQO	> 0.5 Tratamiento biológico
DBO ₅ /DQO	< 0.3 No se realiza tratamiento biológico

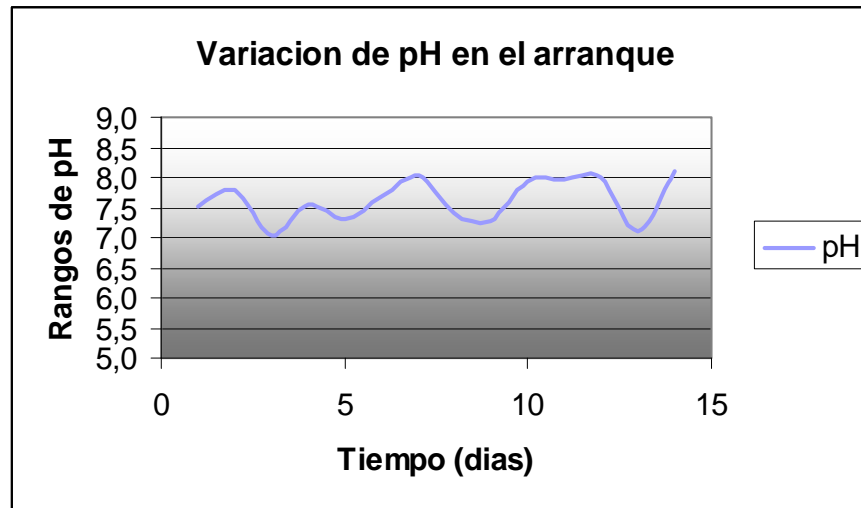
Fuente: Los autores

5.3 Carga orgánica. La materia orgánica soluble y particulada aplicada al filtro por unidad de área se denomina carga orgánica, esta se determino aplicando el Decreto 1594 de Junio 26 de 1984, Artículo 75. El valor hallado es de 0.604kg DBO/día. Aunque no se han establecido valores puntuales de carga orgánica para estos sistemas, los valores mas usuales según la literatura recomendada se encuentran en el rango de 0.01a 0.04 Kg DBO/m² día, al aplicar la tasa de carga por unidad de área el filtro se obtiene una carga de 0.769 Kg DBO/m² día. Este valor se encuentra por encima del rango establecido por la literatura, pero no afecto el comportamiento del sistema, demostrando que este puede trabajar con cargas superiores, ya que los microorganismos presentes en la capa biológica cuenta con la capacidad de degradar la materia orgánica.

5.4 Arranque del filtro anaerobio. Durante la puesta en marcha del filtro anaeróbico fue importante monitorear durante 3 semanas condiciones de pH, alcalinidad, AGVS y temperatura, parámetros de control que permiten determinar el crecimiento y actividad bacteriana dentro del filtro. La tabla de los datos reportados se puede apreciar en el Anexo c. A continuación se evaluarán los parámetros de control que se registraron durante el desarrollo de la investigación:

Análisis pH. En la figura 18, se muestra comportamiento del pH, durante el arranque del filtro.

Figura 18. Variación pH etapa de arranque



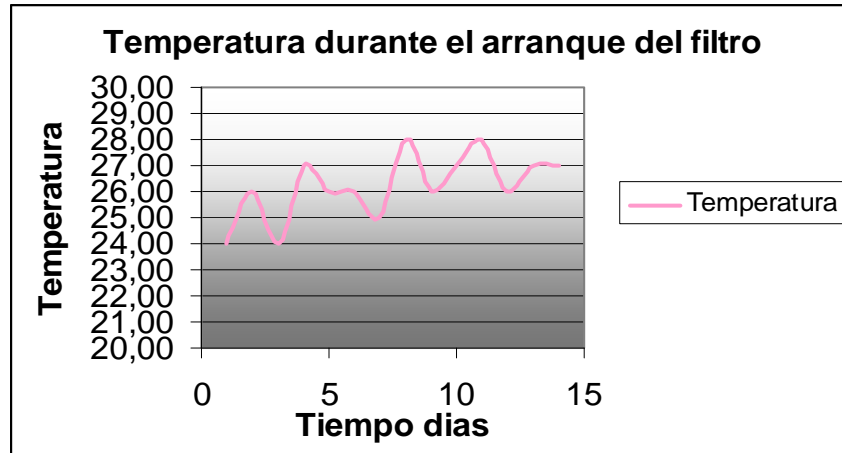
Fuente: Los autores

El pH es considerado uno de los factores más importantes, pues se encuentra relacionado directamente con la eficiencia de los sistemas anaerobios.

Este parámetro durante la investigación estuvo dentro de los rangos establecidos por la literatura, 6.5-8.5, según Romero Rojas (2000), las condiciones óptimas para el crecimiento de vida microbiana. Durante el arranque del filtro anaerobio con medio de soporte en grava se estableció que el pH presentó valores entre 7.0 – 8.1 indicando que en el sistema cuenta con condiciones óptimas para el desarrollo de microorganismo necesarios para efectuar la remociones en sistemas anaerobios, en la operación del sistema no se presentaron variaciones bruscas de pH que pudieran afectar la actividad biológica.

Análisis de Temperatura. El comportamiento de la temperatura durante el arranque del filtro, se puede apreciar en la figura 19.

Figura 19. Temperatura en la etapa de arranque

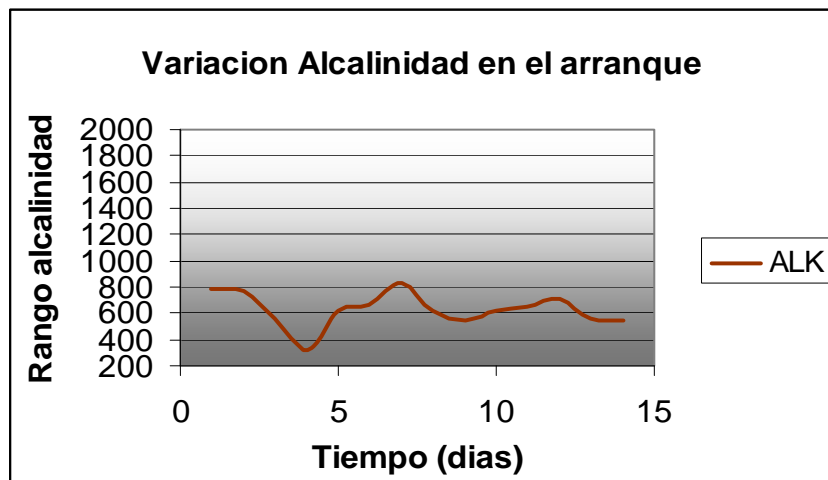


Fuente: Los autores

La temperatura óptima para la actividad bacteriana, según Romero Rojas(2000) está entre 25°C a 35°C, durante el arranque y operación del filtro la temperatura mantuvo valores óptimos para el crecimiento bacterias de mesofílicas, microorganismos predominantes en sistemas anaerobios.

Análisis alcalinidad. El comportamiento de la alcalinidad durante el arranque del filtro se muestra en la Figura 20.

Figura 20. Alcalinidad en etapa de arranque



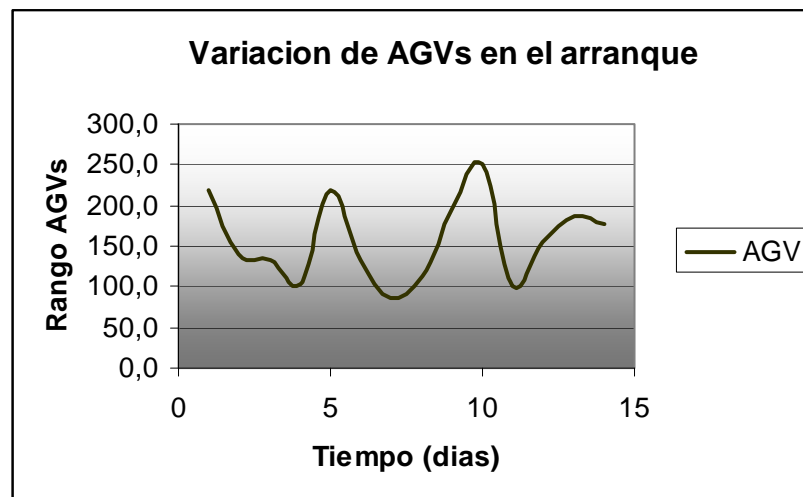
Fuente: Los autores

Durante el arranque del filtro la alcalinidad presentó un comportamiento estable rangos entre (320 – 830mg/lit), Rittmann y McCarty (2001), establecen que los valores óptimos de alcalinidad en sistemas anaerobios deben estar en el rango (600 – 2000 mg/lit), esto nos indica que se cumple con el parámetro, ayudando a no generar desestabilización en el sistema, en consecuencia las concentraciones ácidos grasos volátiles fueron bajas para poder ser neutralizados por la alcalinidad y no alterar el proceso de inoculación.

La alcalinidad se controló durante todo el funcionamiento del sistema, pues posee la capacidad de neutralizar los ácidos, impidiendo las reducciones bruscas de pH, y evitando finalmente que las bacterias metanogénicas sean afectadas.

Análisis AGV. El comportamiento de los AGV durante el arranque se muestra en la figura 21.

Figura 21. AGV en la etapa de arranque



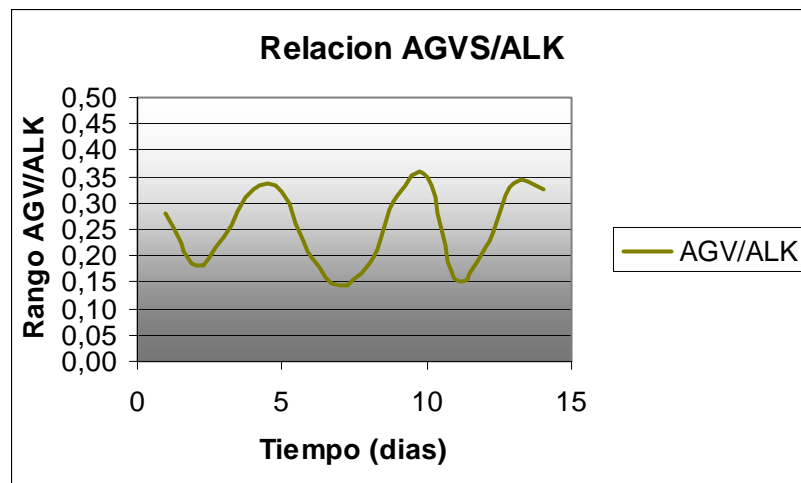
Fuente: Los autores

Los ácidos grasos volátiles son un parámetro que determina la alteración de las condiciones óptimas del funcionamiento del sistema anaerobio, estas alteraciones pueden ser producidas en fases de Acidogénesis y producción de biogás, siendo detectadas por el aumento de las concentraciones de ácidos grasos volátiles; en el sistema evaluado no se presentaron aumentos bruscos en las concentraciones de AGV, estos mantuvieron un comportamiento estable lo cual ayudó a que la

alcalinidad del medio pudiera neutralizar los ácidos producidos evitando una caída de pH.

Análisis Relación AGV/ALK. El comportamiento de la relación AGVS/ ALK durante el arranque del filtro se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Relación AGV/ALK etapa de arranque



Fuente: Los autores

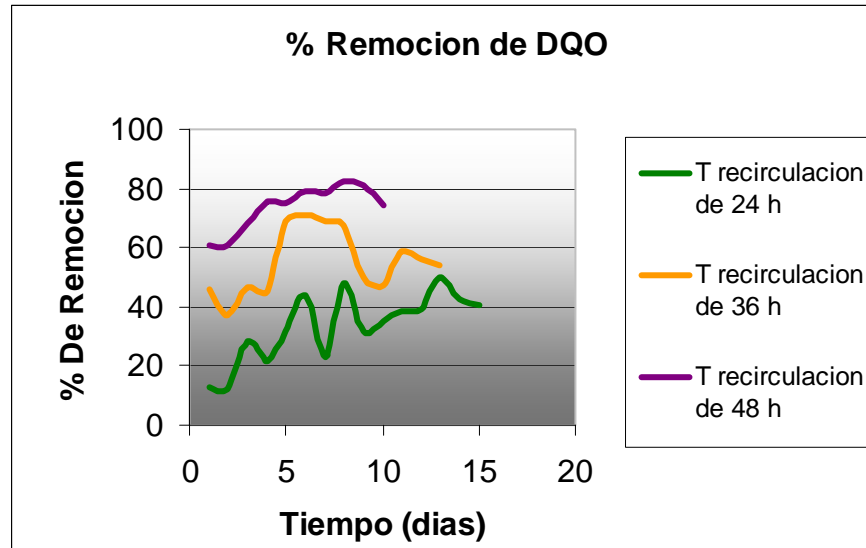
La relación AGVS/Alcalinidad permite controlar el estado del filtro, de acuerdo con los datos teóricos, según Borja (1989) cuando dicha relación tiene un valor mayor de 0,4, indica una condición de falla debido a posibles sobrecargas en el sistema. El filtro durante el arranque se mantuvo por debajo del valor indicado según la literatura, por este motivo el filtro en la etapa de arranque operó bajo condiciones adecuadas, lo cual indica que la carga orgánica afluente de 0,769 Kg DBO/m² día y la carga hidráulica, aplicada al sistema fueron adecuadas para no alterar el crecimiento de los microorganismos.

5.3 Parámetros de evaluación de eficiencia del sistema.

- DQO mg/L
- DBO mg/L
- SST mg/L

Análisis DQO. Las remociones obtenidas de DQO durante la operación del filtro con medio de soporte en grava se muestran en la Figura 23.

Figura 23. % de remoción de DQO con medio filtrante en grava



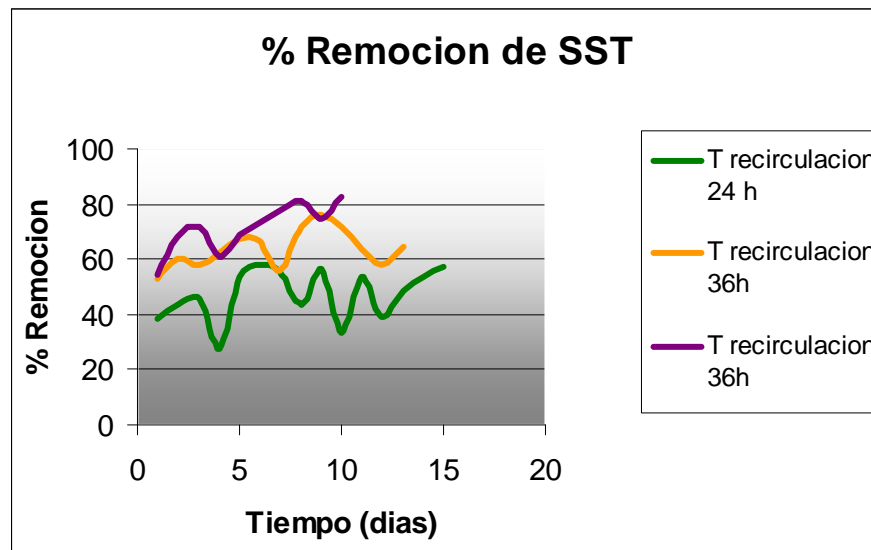
Fuente: Los autores

La DQO es un parámetro importante a evaluar en los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales, debido a que cuantifica el oxígeno necesario para realizar la oxidación de materia orgánica, este parámetro fue evaluado con los tiempos de recirculación de 24,36 y 48 horas.

En el tiempo de recirculación de 24 horas se obtuvo un porcentajes entre 13 y 48% de remoción estos valores no fueron muy altos a pesar que los parámetros de control determinaran que el filtro contaba con las condiciones ideales para el funcionamiento. Durante el tiempo de recirculación de 36 horas se obtuvieron remociones mejores entre rangos de 37 a 71 %, y estas fueron aumentando, al aplicar el último tiempo de recirculación de 48 h, arrojando resultados entre 60 y 82 % de remoción, el aumento de los porcentajes de remoción con respecto al tiempo de recirculación se esperaba, debido a que el numero de veces que el cuerpo de agua entra en contacto con el medio filtrante es mayor, a pesar que se obtuvo una mayor remoción en el tiempo de recirculación de 48h no es viable aplicar este tiempo a condiciones reales dado que no se operó bajo flujos continuos y los sistemas preliminares de almacenamiento demandaría aumentar costos operativos y civiles

Análisis de SST. Las remociones obtenidas de SST durante la operación del filtro con medio de soporte en grava se muestran en la Figura 24.

Figura 24. % de remoción de SST con medio de soporte en grava

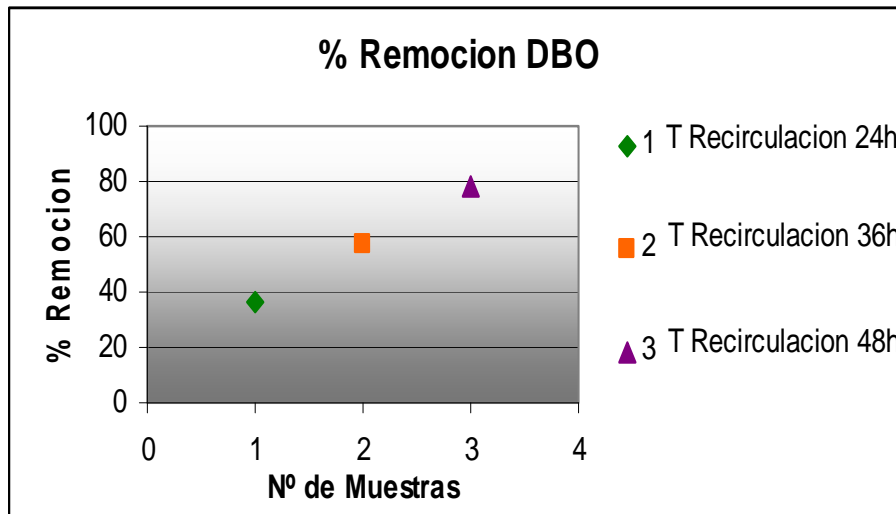


Fuente: Los autores

Los SST son un parámetro importante para la determinación de la eficiencia de los sistemas biológicos pues depende directamente de la carga orgánica aplicada, este parámetro se determinó con tiempos de recirculación de 24, 36 y 48 horas, los datos arrojados fueron constantes en cada tiempo y no se presentaron arrastres de sólidos debido a las bajas velocidades ascendentes, los resultados obtenidos durante el primer tiempo de recirculación se encuentran entre 27 - 58%, en el segundo tiempo se presentó una remoción entre 52 - 76% y en el último se obtuvo una remoción entre 54 - 82%, lo cual demuestra que entre más contacto exista entre el agua residual y el medio filtrante aumentan progresivamente los porcentajes de remoción de sólidos suspendidos totales. Se puede apreciar una similitud entre los porcentajes de remoción de DQO y SST, pues los microorganismos al encargarse de oxidar la materia orgánica contribuyen a la remoción de SST. Así mismo las condiciones hidráulicas de velocidad favorecieron dicho proceso de remoción

Análisis de DBO₅. Las remociones obtenidas de DBO₅ durante la operación del filtro con medio de soporte en grava se muestran en la Figura 25.

Figura 25. % de remoción de DBO₅ con medio de soporte en grava



Fuente: Los autores

Este parámetro permite determinar la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente la materia orgánica en el agua residual, y evalúa la eficiencia en el proceso de tratamiento, que en esta investigación oscila entre 40 - 80%.

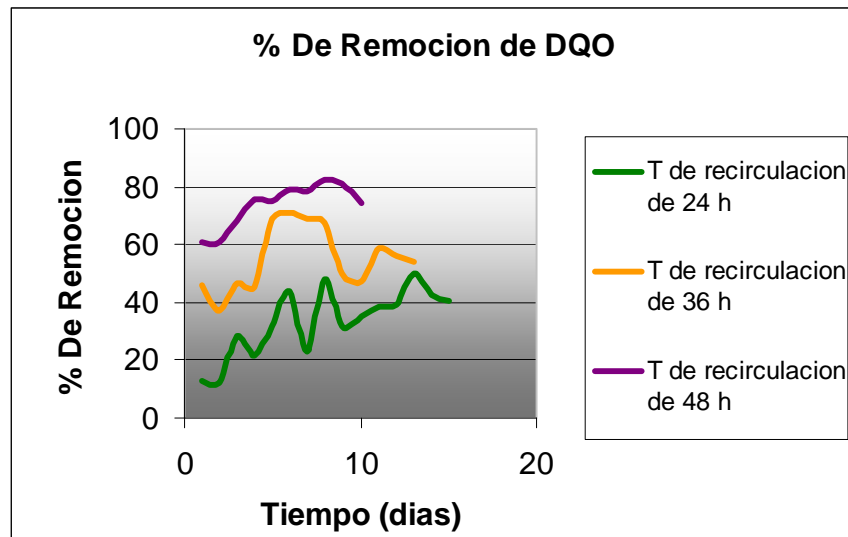
Los datos obtenidos en los tres parámetros de evaluación del sistema arrojan remociones de 80% cuando el tiempo de recirculación es de 48 h, logrando cumplir con la condiciones estipuladas en el Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984 artículo 72 para descargue a fuentes hídricas, sin embargo este sistema no es aplicable a condiciones reales debido a que el tiempo de recirculación es muy grande y la planta necesitaría construir unidades de almacenamiento de agua residual con gran capacidad. Durante todo el funcionamiento del filtro se revisaron los parámetros de control, con el fin de evitar fallas en el sistema, estos parámetros estuvieron todo el tiempo entre los rangos recomendados por la literatura, y a medida que avanzaba el proyecto se fueron estabilizando.

5.4 Comparación de los datos obtenidos con el medio de soporte en aros de guadúa.

Determinación de la eficiencia de los sistemas, con su respectivo medio de soporte.

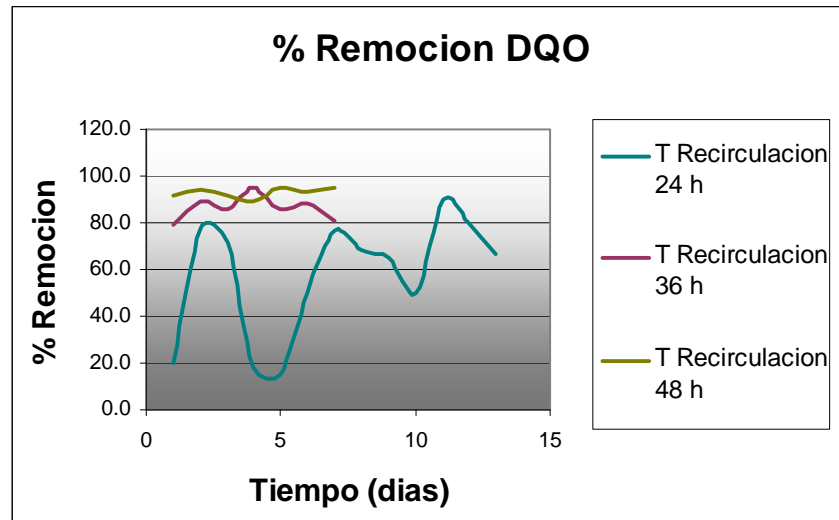
Comparación de DQO. Las siguientes figuras (26 y 27) muestran el resultados de DQO obtenidos en la evaluación del filtro anaerobio de flujo ascendente con sus respectivo medio de soporte.

Figura 26. % de remoción de DQO con medio filtrante en grava.



Fuente: Los autores

Figura 27. % de remoción de DQO con medio filtrante en guadua



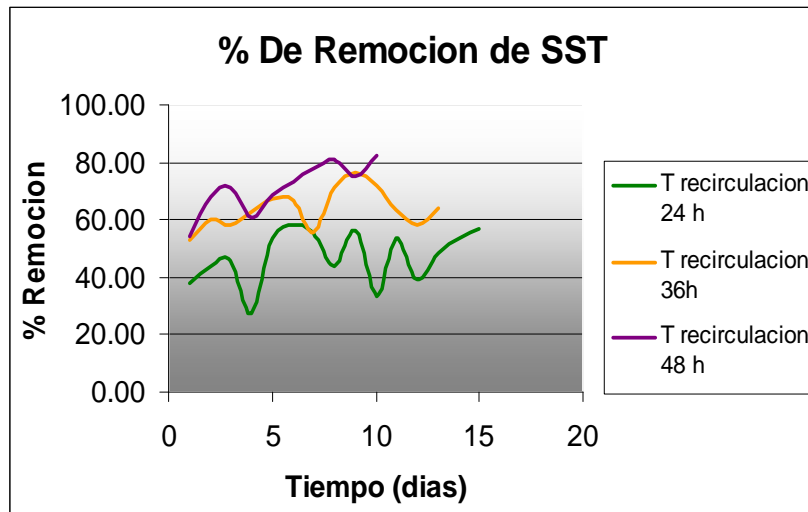
Fuente: Los autores

Al comparar el parámetro de DQO en la evaluación de cada medio de soporte utilizado en el Filtro anaerobio, se puede deducir que la guadua posee un porcentaje de remoción mayor con respecto a la grava, sin embargo demostró inestabilidad que afecta los resultados de remoción. La inestabilidad que presentó la guadua como lecho filtrante en el tiempo de recirculación de 24 horas, se debió a que el parámetro de control relación AGV/ ALK era mayor de 0.4 previendo una posible falla en el sistema anaerobio, que afectó directamente el pH. El sistema se estabiliza cuando el tiempo de recirculación es de 36 h, éste alcanza remociones del 95% de DQO, sin embargo, no hay mayor diferencia con el tiempo de recirculación de 48 h, que también registra de remoción del 95%.

La grava como medio de soporte no superó las remociones obtenidas con la guadua, sin embargo el sistema demostró una mayor estabilidad y un comportamiento lógico durante las fases evaluadas, ya que los parámetros de control se encontraban en los rangos estipulados por la literatura, las remociones mas representativas son del 60 al 82% de remoción y se obtienen cuando el tiempo de recirculación es de 48 h, esto se esperaba debido a que hay mayor contacto con el lecho filtrante.

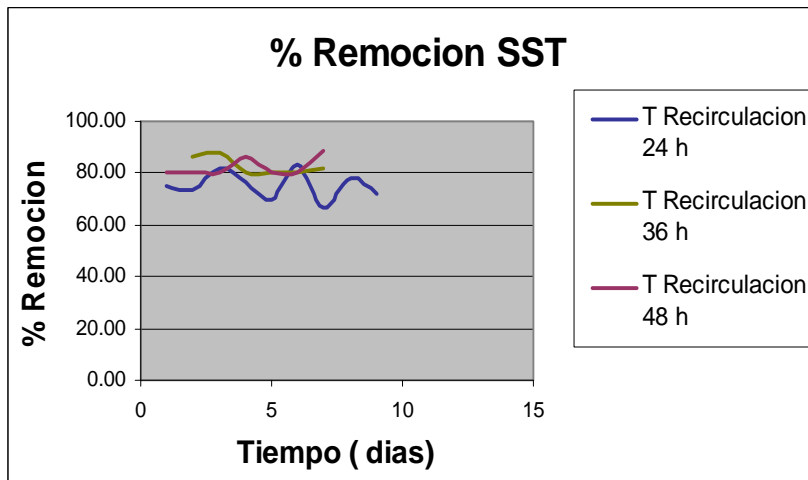
Comparación de SST. Las siguientes figuras (28 y 29) muestran el resultados de SST obtenidos en la evaluación del filtro anaerobio de flujo ascendente con sus respectivo medio de soporte.

Figura 28. % de remoción de SST con medio filtrante en grava



Fuente: Los autores

Figura 29. % de remoción de SST con medio filtrante en guadua



Fuente: Los autores

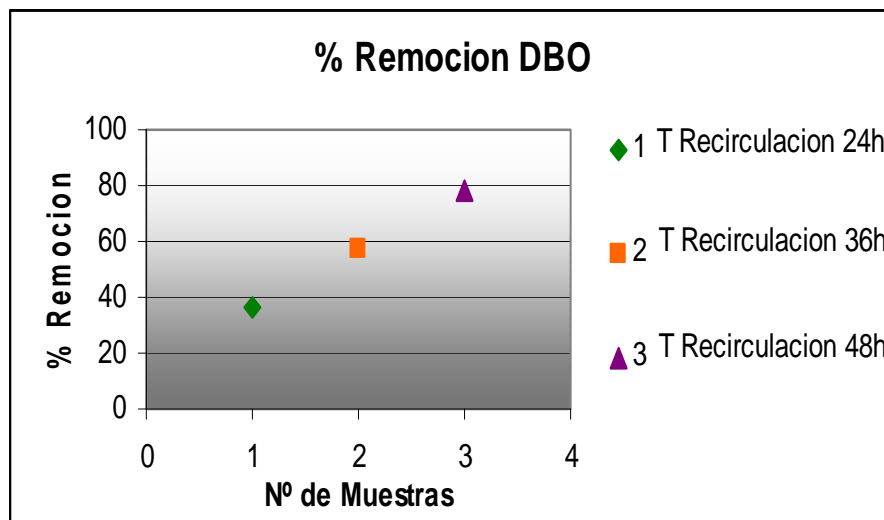
Al comparar el parámetro de SST en la evaluación de cada medio de soporte utilizado en el Filtro anaerobio, se aprecia que los dos lechos tuvieron porcentajes similares de remoción.

Se podría pensar que existe inconsistencia en las remociones obtenida con la guadua como medio filtrante, ya que se espera que los valores de remoción de SST sean igual de altos o en relación definidas a los de la DQO, pues los microorganismos al oxidar la materia orgánica, realizan remociones de SS, en los tres tiempos de recirculación se apreciaron valores de 80 a 88% de remoción, evaluando las tendencias de remoción en DQO se puede deducir que los valores hallados no presentan un comportamiento esperado.

Con el medio filtrante en grava al aplicar los tiempos de recirculación, aumentaba gradualmente los porcentajes de remoción de igual forma, cuando se implementó el tiempo de remoción de 48 h los valores de remoción fueron los mas altos con un rango del 64 al 82%.

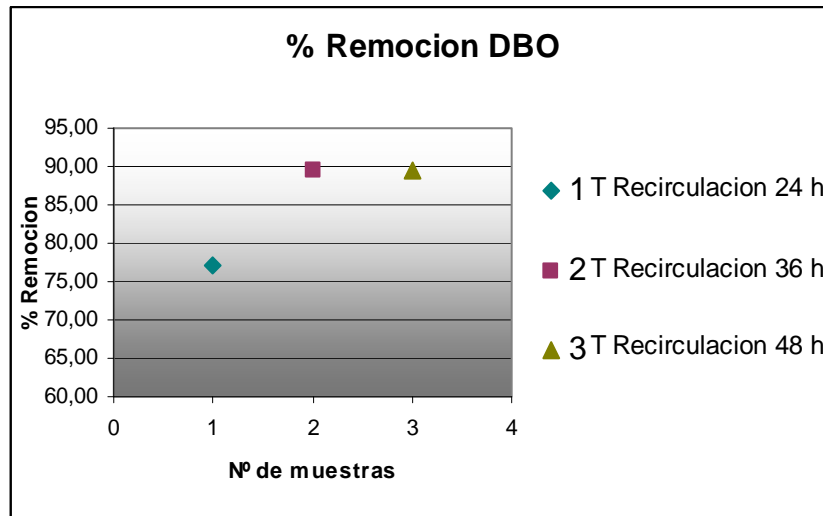
Comparación de DBO. En las figuras 30 y 31, se muestran los resultados de DBO obtenidos en la evaluación del filtro anaerobio de flujo ascendente con sus respectivo medio de soporte.

Figura 30. % de remoción de DBO con medio filtrante en grava



Fuente: Los autores

Figura 31. % de remoción de DBO con medio filtrante en guadua.



Fuente: Los autores

Al comparar el parámetro de DBO_5 en la evaluación de cada medio de soporte utilizado en el Filtro anaerobio, se aprecia que la guadua obtuvo mayores porcentajes de remoción con respecto a la grava.

En la guadua como medio filtrante el primer tiempo de recirculación obtiene un porcentaje de remoción del 78%, se podría decir que es un porcentaje alto si se tiene en cuenta que en la DQO con este tiempo de recirculación no se había estabilizado y presentó un 19 % de remoción en el sistema. Cuando se aplica el tiempo de recirculación de 36 se estabiliza el sistema y presenta un porcentaje de remoción de 90% que se mantiene con el tiempo de recirculación de 48h.

Los porcentajes de remoción con grava fueron más bajos, sin embargo aumentaban a medida que aumentaban los tiempos de recirculación llegando a una remoción de 80% con un tiempo de recirculación de 48 h.

Los medios filtrantes cumplen con las remociones establecidas en el Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984 que indican remociones de DBO mayores al 80% y SST mayores al 80%, a un cuerpo de agua para usuarios nuevos que realizan vertimientos, la grava cumple esta ley cuando los tres parámetros operan con un tiempo de recirculación de 48h, mientras la guadua consigue cumplir con los

parámetros estipulados por el decreto cuando opera con un tiempo de recirculación de 36 h.

Se puede afirmar que la guadua obtuvo mayores resultados de remoción, comparados con la grava, pero en los dos medios filtrantes las mayores remociones se establecieron en el tiempo de recirculación más alto de 48 horas, la condición ideal es que el filtro anaerobio de flujo ascendente opere sin recirculación, o se aconseja cuando la DQO del residuo es mayor a 8000mg/L (Romero Rojas, 2000). Pues no es viable aplicar en un tratamiento de agua residual recirculación de 48 h, si el caudal que entra a la planta es constante.

5.5 Ventajas y desventajas de los dos medios de soporte, con el fin de establecer similitudes y diferencias entre los dos sistemas.

El medio filtrante debe establecer condiciones adecuadas para la adherencia de microorganismos, con este fin se realiza la comparación de los dos medios de soporte con respecto a los parámetros más importantes del lecho, la tabla 18 que se presenta a continuación determina cual medio de soporte posee mayores ventajas dependiendo de los parámetros de diseño hallados por los autores.

Tabla 18. Parámetros importantes del medio de soporte

PARÁMETRO	OBJETIVO	GRAVA	GUADUA
Porosidad	Disminuye la posibilidad de colmatación.	Menor	Mayor
Biológica y químicamente inerte	Para evitar que hallan reacciones entre el lecho y microorganismos	Mayor	Menor
Forma no achatada o lisa	Ayuda a garantizar una porosidad elevada	Menor	Mayor
Área específica	Posee una mayor área específica, permitiendo mayor cantidad de sólidos biológicos.	Menor	Mayor
Bajos costos	Grandes estructuras punto de vista económico	Mayor	Menor

Fuente: Los autores

La guadua posee más ventajas pues tiene valores que favorecen al crecimiento y cantidad de microorganismos debido a sus características físicas (porosidad, área

superficial). El comportamiento de los medios de soporte con respecto a los parámetros evaluados anteriormente durante la operación del filtro se describe en la tabla 19.

Tabla 19. Comparación de los parámetros del medio de soporte con el funcionamiento del filtro

GRAVA	GUADUA
<p>Durante el funcionamiento del filtro no se presento colmatación en el sistema.</p> <p>La grava se consigue dependiendo el diámetro que se le desee agregar al sistema, y se puede disponer de ella inmediatamente.</p> <p>Al ser biológica y químicamente inerte no necesita ser sometida a ningún proceso y puede ser utilizada inmediatamente.</p> <p>La forma rugosa y no achatada favorecen el crecimiento de microorganismos y ayuda a garantizar una porosidad elevada.</p> <p>En cuanto a la estructura se realizaron dos cambios, que son adaptación de agarraderas con el fin de realizar una fuera en las paredes que contiene al filtro. Y la segunda un refuerzo en la rejilla que soporta el peso del medio filtrante.</p>	<p>No hay registros que indique la colmatación en la ejecución del proyecto.</p> <p>La guadua antes de ser incorporada al filtro debe ser cortada con las dimensiones requeridas.</p> <p>Después de ser cortados los aros, entran a una fase de secado durante 1 mes. Para este trabajo se dispone de dos meses de ejecución.</p> <p>La textura fibrosa permite una buena porosidad a pesar de que pareciera no contar con las características para un medio de soporte.</p> <p>Las paredes del filtro eran en acrílico a el cual no se le realizó ningún accesorio que permitiera aumentar la vida útil del sistema.</p>

Fuente: Los autores

6. CONCLUSIONES

La carga orgánica evaluada en el sistema es de 0.769 Kg DBO/m²día, esta presenta condiciones favorables en la operación y funcionamiento del tratamiento, debido al aumento gradual de remoción en carga y a la velocidades ascendentes calculadas las cuales evitaron arrastre de sólidos en el medio filtrante.

La carga orgánica se encuentra por encima del valor establecido por la literatura (0.01 – 0.04 Kg DQO/m²día), sin embargo el sistema arrojó porcentajes de remoción altos, debido a que la carga aplicada permitió que los microorganismos presentes en la capa biológica pudieran realizar el proceso de degradación, durante el tiempo de recirculación aplicado.

La evaluación del sistema con medio de soporte de grava fundamentó los datos obtenidos bajo la revisión preliminar y calculó los parámetros técnicos, como caudal de 0.278 L/s, tiempo de retención hidráulico 10.85 min, y un volumen útil de 181.75L con los cuales operó el sistema de tratamiento.

El inóculo del sistema evaluado (lodo anaerobio UASB), proveniente de la PTAR Río Frío, presentó una actividad apropiada de 0.16 m³ CH₄/ m³ (Reactor/Día) indicando que el lodo se caracteriza como un fluido maduro con una alta capacidad de transformar el sustrato presente en el filtro anaerobio en metano.

Durante el arranque y funcionamiento del filtro se mantuvieron todos los parámetros de control en un rango adecuado como lo indica la literatura, lo cual favoreció condiciones óptimas para el crecimiento bacteriano.

La grava como medio de soporte obtuvo remociones de DQO entre 60 y 82 % cuando el tiempo de recirculación era de 48 h, esto afirma que cuando el tiempo de recirculación aumenta los porcentajes de remoción son más altos, debido que el número de veces que el cuerpo de agua entra en contacto con el medio filtrante es mayor. Este comportamiento se vio reflejado de igual forma en la remoción de SST y DBO.

Los parámetros de tiempo de recirculación de 24, 36 y 48 horas establecidos por la investigación anterior, hacen que el sistema no sea viable a escala real, pues la condición ideal es que el filtro anaerobio de flujo ascendente opere sin recirculación, dado que las concentraciones del efluente son menores a 8000mg/L (Romero Rojas 2000).

Los medios filtrantes cumplen con las remociones establecidas en el Decreto 1594 del 26 de junio de 1986 que indican remociones de DBO mayores al 80% y SST mayores al 80%, la grava cumple esta ley cuando los tres parámetros operan con un tiempo de recirculación de 48h, mientras la guadua consigue cumplir con los parámetros estipulados por el decreto cuando opera con un tiempo de recirculación de 36 h.

La guadua arrojó porcentajes mayores de remoción de DBO, DQO y SST comparados con la grava, sin embargo la guadua demostró una inestabilidad debido a que los parámetros de control no cumplían los rangos óptimos, lo cual llevó a adicionar Cal al medio para estabilizar el pH, esto puede producir alteraciones que favorezcan las reacciones ocurridas dentro del filtro o remoción de la materia orgánica.

La investigación con guadua asumió cargas hidráulicas diferentes, para cada tiempo de recirculación sin embargo, el sistema no cuenta con una unidad reguladora de flujo, en consecuencia no se puede precisar diferentes cargas hidráulicas ya que el sistema opero bajo un mismo caudal de impulsión.

La guadúa posee mejores características como medio filtrante que la grava, pues esta posee mayor porosidad y área específica lo que asegura una mayor área de contacto entre los microorganismos y el medio, evitando la colmatación en el sistema.

7. RECOMENDACIONES

Para que el sistema pueda ser aplicable a condiciones operacionales de tratamientos de aguas residual, seria conveniente que el filtro trabajara con caudales continuos y no recirculando un volumen fijó durante largos periodos de operación.

La bomba sumergible Pedrollo TOP 1, según sus especificaciones, no es adecuada para funcionar con aguas residuales, debido al tamaño de las partículas suspendidas presentes en estas. Por este motivo es conveniente realizar mantenimientos periódicos a todas las unidades del sistema, verificando que estas se encuentren tapadas para evitar que agentes externos alteren la operabilidad de la bomba.

Realizar periódicamente análisis de actividad metanogénica, como parámetro indicador de la estabilidad anaerobia del sistema de tratamiento.

Los procedimientos analíticos en los laboratorios se realicen bajo condiciones estándar, que eviten alteraciones en los resultados de los parámetros fisicoquímicos evaluados en el sistema.

La evaluación de los parámetros de control se debe realizar diariamente, pues los sistemas biológicos de tratamiento son susceptibles a cambios repentinos en las condiciones de afluente del sistema.

Seria conveniente realizar un evaluación en la biopelícula con el fin de determinar que microorganismos se encuentran presentes en el lecho filtrante, para establecer puntualmente en la etapa de degradación en la que se encuentra el sistema y cuales microorganismos fueron los encargados de las remociones obtenidas por el filtro.

El filtro anaerobio de flujo ascendente de la institución es susceptible a la exposición de la luz solar debido a que las paredes son en acrílico transparente, originando la aparición de algas, que pueden generar el proceso de eutrofización alterando las condiciones del medio filtrante, para evitar que esto ocurra es necesario que el filtro este cubierto por un material plástico negro que lo aisle, y ayuda a mantener la temperatura.

BIBLIOGRAFÍA

- BORJA, R. (1989) Control de reactores anaerobios: Parámetros y procedimientos. Instituto de la grasa y derivados. Sevilla, España. 2003.
- CASTAÑO ROJAS, Juan Mauricio. Consideraciones sobre diseño, arranque, operación y mantenimiento de filtros anaerobios de flujo ascendente. Pereira, 2002, p. 15. Trabajo de investigación (Ingeniero Ambiental). Universidad Técnica de Pereira. Facultad de ciencias Ambientales.
- CELIS VARGAS, Silva Juliana y IBAÑES GOMEZ, Diana Lucia. Evaluación de la eficiencia de aros de guadua como medio de soporte para un filtro anaerobio de flujo ascendente a escala piloto en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga, 2008
- COX R. Charles. Práctica y vigilancia de las operaciones de tratamiento de agua. Cuba: Científico Técnica, 1979. p. 45
- GUERRA C., Sergio. Contaminación y depuración de aguas. Especialización en estudios de impacto ambiental. Bucaramanga: Corporación Escuela Tecnológica del Oriente, 2001.
- MADERA A, Carlos; SILVA P. Juan y PEÑA R, Miguel. Sistema combinado para el tratamiento de aguas residuales basados en tanques sépticos-filtro anaerobio y humedales superficiales. Cali: Universidad del Valle, 2005.
- METCALF y HEDÍ. Ingeniería de las aguas residuales: tratamiento vertido y reutilización. Tomo 3. México: Mc Graw Hill, 1996.
- LETTINGA, G.; VAN VELSEN, A.F.M.; HOBMA, S.W.; DE ZEEUW, W. y KLAPWIJK, A. (1980). Use of the Upflow Sludge Blanket (USB). Reactor Concept for Biological Wastewater Treatment, Especially for Anaerobic Treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, 22, 699
- PAREDES C., Diego y CASTAÑO C., Juan Mauricio. Uso de aros de guadua en filtro anaerobio para el tratamiento de aguas residuales. Pereira: Seminario – taller: avances en la investigación sobre Guadua, 2002.

Procesos biológicos aplicados al tratamiento de agua residual. Ingeniería hidráulica y ambiental, Vol XXII, No 4, 2001.

PUNTES B, Jairo. Introducción a la problemática ambiental. Especialización en estudios de impacto ambiental. Bucaramanga: Corporación Escuela Tecnológica del Oriente, 2001.

Reglamento técnico del sector agua potable y saneamiento básico, RAS. Sección II. Título E. Agua Residual. 2000.

RITTMANN, B.E.; STRUBLER, CE. y RUZICKA, T. (1982). Anaerobic-Filter Pretreatment Kinetics. J. of the Environmental Engineering Division of ASCE, 108, 900.

ROMERO R, Jairo A. Tratamiento de las aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería, Bogotá: 1999.

SAEZ R., Pablo. Filtros anaeróbicos: una forma de descontaminar y producir energía. Vol. II. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 1986.

TCHOBANOGLIOUS, G., CRITES, R. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Editorial Mc Graw Hill. Santa fé de Bogotá, 2000.

TORREZ LOZANO, Patricia. Asociación de Ingenieros Sanitarios de Antioquia. Control de una planta anaerobia. Medellín: 1993. p. 648-656

VALVES & CASTINGS, Inc. Filtros de arena y grava verticales. Manual de instalación y operación.

Decreto 1594 Junio de 1984. Vertimiento de aguas residuales domesticas e industriales.

VILLEGAS GOMEZ, Juan David; GUERRERO ERAZO, Jhonniars; CASTAÑO ROJAS, Juan Mauricio y PAREDES CUERVO, Diego. Variaciones al sistema

tanque séptico (TS) – filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) – humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSS) con Miras al tratamiento de aguas residuales en pequeños municipios de Colombia. En: Revista Técnica Ingeniería Universidad Zulia. Vol 29, No. 3.269 – 281 (2006).

YOUNG, J.C. y MCCARTY, P.L. (1969). The Anaerobic Filter for Waste Treatment. J. Water Pollution Control Federation, 41, R160.

ANEXOS

Anexo A. Tabla de Resultados

HORA	Trecirculacion (h)	pHfiltro	DQOa mg/lt	DQOe mg/lt	% DQOr	SSTa mg/ltr	SSTe mg/lt	% SSTr	ALK	AGVS	AGVS/ALK	DBOa	DBOe	%DBOr	Nitrogeno a	Nitrogeno e	Nitrogeno %r	Fosforo a	Fosforo e	Fosforo %r
8:00am.	24	7,56	380,00	330,00	13,16	420,00	260,00	38,10	760,00	144,00	0,19									
8:00am.	24	7,70	410,00	360,00	12,20	320,00	180,00	43,75	700,00	188,00	0,27									
8:00am.	24	7,87	420,00	300,00	28,57	440,00	240,00	45,45	790,00	140,00	0,18									
8:00am.	24	8,02	510,00	400,00	21,57	220,00	160,00	27,27	710,00	128,00	0,18									
8:00am.	24	7,46	440,00	300,00	31,82	260,00	120,00	53,85	770,00	128,00	0,17									
8:00am.	24	7,64	480,00	270,00	43,75	240,00	100,00	58,33	650,00	196,00	0,30	285,00	181,00	36,49	126,000	100,00	20,63	2,20	1,80	18,18
8:00am.	24	7,66	610,00	470,00	22,95	360,00	160,00	55,56	640,00	184,00	0,29									
8:00am.	24	7,02	560,00	290,00	48,21	320,00	180,00	43,75	600,00	140,00	0,23									
8:00am.	24	7,90	500,00	340,00	32,00	480,00	210,00	56,25	660,00	188,00	0,28									
8:00am.	24	7,12	400,00	260,00	35,00	240,00	160,00	33,33	620,00	100,00	0,16									
8:00am.	24	7,85	440,00	270,00	38,64	300,00	140,00	53,33	615,00	176,00	0,29									
8:00am.	24	7,90	460,00	280,00	39,13	330,00	200,00	39,39	665,00	104,00	0,16									
8:00am.	24	7,72	620,00	310,00	50,00	350,00	180,00	48,57	730,00	200,00	0,27									
8:00am.	24	7,97	520,00	300,00	42,31	260,00	120,00	53,85	650,00	152,00	0,23									
8:00am.	24	7,70	470,00	280,00	40,43	280,00	120,00	57,14	640,00	184,00	0,29									
7:00am.	36	8,00	500,00	270,00	46,00	380,00	180,00	52,63	600,00	148,00	0,25									
6:00pm.	36	7,75	480,00	300,00	37,50	250,00	100,00	60,00	660,00	188,00	0,28									
7:00am.	36	7,76	620,00	330,00	46,77	380,00	160,00	57,89	620,00	176,00	0,28									
6:00pm.	36	7,91	400,00	220,00	45,00	480,00	180,00	62,50	615,00	114,00	0,19									
7:00am.	36	8,28	610,00	190,00	68,85	430,00	140,00	67,44	775,00	266,00	0,34									
6:00pm.	36	7,41	520,00	150,00	71,15	360,00	120,00	66,67	776,00	292,00	0,38	317,00	136,00	57,10						
7:00am.	36	7,90	480,00	150,00	68,75	360,00	160,00	55,56	830,00	244,00	0,29									
6:00pm.	36	7,54	560,00	180,00	67,86	280,00	80,00	71,43	720,00	172,00	0,24									
7:00am.	36	7,88	560,00	280,00	50,00	420,00	100,00	76,19	730,00	148,00	0,20									
6:00pm.	36	8,02	740,00	390,00	47,30	500,00	140,00	72,00	690,00	160,40	0,23									
7:00am.	36	7,15	610,00	250,00	59,02	330,00	120,00	63,64	645,00	112,00	0,17									
6:00pm.	36	7,96	640,00	280,00	56,25	380,00	160,00	57,89	465,00	144,00	0,31									
7:00am.	36	8,10	520,00	240,00	53,85	420,00	150,00	64,29	790,00	140,00	0,18									
9:00am.	48	7,52	360,00	140,00	61,11	480,00	220,00	54,17	720,00	144,00	0,20									
9:00am.	48	7,07	460,00	180,00	60,87	560,00	180,00	67,86	760,00	180,00	0,24									
9:00am.	48	7,89	500,00	160,00	68,00	420,00	120,00	71,43	790,00	150,00	0,19									
9:00am.	48	7,25	620,00	150,00	75,81	360,00	140,00	61,11	690,00	188,00	0,27	360,94	76,38	78,59	126,000	68,00	40,03	2,20	1,30	40,9
9:00am.	48	8,06	520,00	130,00	75,00	480,00	150,00	68,75	750,00	266,00	0,35									
9:00am.	48	8,18	480,00	100,00	79,17	520,00	140,00	73,08	650,00	172,00	0,26									
9:00am.	48	7,12	560,00	120,00	78,57	450,00	100,00	77,78	795,00	224,00	0,28									
9:00am.	48	7,76	580,00	100,00	82,76	640,00	120,00	81,25	695,00	196,00	0,28									
9:00am.	48	7,25	640,00	120,00	81,25	360,00	90,00	75,00	700,00	140,00	0,20									
9:00am.	48	7,92	540,00	140,00	74,07	460,00	80,00	82,61	785,00	196,00	0,25									

Anexo B. Análisis de Resultados realizados por el laboratorio de Química de la Universidad Pontificia Bolivariana

Anexo c. Parámetros de control reportados en el arranque del filtro

Parámetros de control reportados en el arranque del filtro						
Fecha	Hora	pH	T°C	AGVS	ALK	AGVS/ALK
mar - 26 - 08	9:00 AM	7,5	24,00	220,00	790,00	0,28
mar - 27 - 08	9:00 AM	7,8	26,00	140,00	770,00	0,18
mar - 28 - 08	10:00 AM	7,0	24,00	132,00	560,00	0,24
mar - 31 - 08	9:00 AM	7,6	27,00	104,00	320,00	0,33
abr - 01 - 08	10:00AM	7,3	26,00	200,00	620,00	0,32
abr - 02 - 08	10:00 AM	7,7	26,00	132,00	665,00	0,20
abr - 03 - 08	10:00AM	8,0	25,00	120,00	830,00	0,14
abr - 04 - 08	9:00 AM	7,4	28,00	114,00	620,00	0,18
abr - 07 - 08	9:00AM	7,3	26,00	176,00	560,00	0,31
abr - 08 - 08	12:00 AM	7,9	27,00	215,00	615,00	0,35
abr - 09 - 08	10:00 AM	8,0	28,00	100,00	645,00	0,16
abr - 10 - 08	10:00AM	8,0	26,00	154,00	715,00	0,22
abr - 11 - 08	9:00 AM	7,1	27,00	188,00	560,00	0,34
abr - 14 - 08	9:00AM	8,1	27,00	176,00	540,00	0,33

