

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA



ESCUELA DE QUÍMICA  
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE MATERIALES DE DESECHO COMO MEDIO  
FILTRANTE EN FILTROS ANAEROBIOS DE FLUJO  
ASCENDENTE**

INFORME DE PROYECTO FINAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Abraham Armando Alvarado Arce

Enero, 2011

# EVALUACIÓN DE MATERIALES DE DESECHO COMO MEDIO FILTRANTE EN FILTROS ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE

Abraham Armando Alvarado Arce\*

## RESUMEN

En sistemas de FAFA, la piedra volcánica es el material más comúnmente utilizado como medio filtrante, también llamado medio de soporte, además de ser un material de alto costo, también aumenta considerablemente el peso del sistema, dicha característica encarece el diseño y construcción del sistema por la necesidad de estructuras más complejas y reforzadas. Por lo que se consideró de gran importancia evaluar la factibilidad del uso de materiales de desecho, ligeros y de bajo costo como alternativas para la sustitución de piedra por materiales como tapas plásticas de botellas y cilindros de espuma utilizados en el embalaje de artículos electrónicos. Ambos son materiales que comúnmente representan desechos, además de no ser reciclables en el caso de los cilindros de espuma, es muy importante que puedan ser reutilizados. La evaluación se realizó en un sistema experimental instalado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la urbanización Iztarú ubicada en el ITCR para aprovechar parte de las aguas residuales y así tener una evaluación en condiciones lo más reales posibles. El sistema utilizado constó de un tanque sedimentador del que se distribuía su efluente hacia los tres FAFAs colocados en paralelo, un FAFA con piedra utilizado para la comparación con los dos materiales filtrantes en evaluación en los otros dos FAFAs. Para evaluar la calidad del agua tratada por cada uno de los FAFAs se realizaron muestreos durante ocho semanas a la entrada y a la salida de cada uno, dando como resultado la comprobación de la factibilidad del uso de las tapas plásticas obteniendo eficiencias de %31,97 en remoción de DBO y %72,95 en remoción de DQO y cilindros de espuma reportando eficiencias de %42,06 en remoción de DBO y %52,40 en remoción de DQO. Concluyendo en la factibilidad técnica del uso de estos materiales como sustitutos de la piedra como medios de soporte en sistemas FAFA.

## PALABRAS CLAVE

Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente, tratamiento anaerobio de aguas residuales, materiales alternativos.

---

\* INFORME DE PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN, Escuela de Química, ingeniería Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2011.

# ASSESSMENT OF WASTE MATERIALS AS A FILTER MEDIA IN UPFLOW ANAEROBIC FILTER SYSTEM

Abraham Armando Alvarado Arce\*

## ABSTRACT

At Upflow Anaerobic Filters Systems, volcanic rock is the most commonly used as a filter medium, besides being an expensive material, it also increases the weight of the system, this feature increases the cost of design and construction of the system by need for more complex structures and reinforced.

Reason is considered very important to experimentally evaluate the feasibility in the use of waste materials, lightweight, low cost alternatives for the replacement of stone materials such as plastic bottle caps and foam cylinders used for packaging electronic articles. Both are commonly represented waste materials, besides not being recycled in the case of the foam cylinders and it is very important that they can be reused.

The evaluation was performed on experimental system installed in the Wastewater Treatment System located in the ITCR to use their wastewater and infrastructure to carry out the assessment in conditions as realistic as possible. The system used consisted of a settling tank of the effluent was distributed to three UAFS placed in parallel with different filter materials, a FAFAs stone that was used for comparison with the two filter materials in assessment, contained in the other two UAFS.

To assess the quality of treated water each FAFAs were sampled for eight weeks at the entrance and exit of each, resulting in checking the feasibility of using plastic lids getting efficiencies of 31.97% in removal of BOD and 72.95% in COD removal and foam cylinders efficiencies reported in 42.06% removal of BOD and 52.40% in COD removal. Concluding the technical feasibility of using these materials as substitutes for the stone as a means of support UAFS.

## KEYWORDS

Upflow anaerobic filter, wastewater anaerobic treatment, alternative materials.

---

\* GRADUATION PROJECT REPORT, Chemistry School, Environmental Engineering, Costa Rican Institute Of Technology, Cartago, Costa Rica, 2011.

# **EVALUACIÓN DE MATERIALES DE DESECHO COMO MEDIO FILTRANTE EN FILTROS ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE**

## **ACREDITACIÓN**

Informe final presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica por Abraham Armando Alvarado Arce como requisito parcial para optar por el título de Licenciatura en Ingeniería Ambiental

## **MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR**

---

M.Sc. Alma Deloya Martínez  
Directora de Tesis

---

M.Sc. Jorge Calvo Gutiérrez  
Lector

---

Ing. Macario Pino Gómez  
Lector

## DEDICATORIA

A toda mi familia,  
Mis padres y hermanos,  
Únicas personas que han estado con migo en todo momento.

En especial a mis padres,  
Que con su confianza en mí, valor, esfuerzo, dedicación y amor  
Han hecho de mí, gran parte de la persona que soy.  
Gracias a ellos.

Abraham.

## AGRADECIMIENTOS

- M.Sc. Alma Deloya Martínez. Directora de Tesis
  - M.Sc. Jorge Calvo Gutiérrez. Lector
  - Ing. Macario Pino Gómez. Lector
- Ing. Liliana Gaviria Montoya. Coordinadora Carrera Ingeniería Ambiental
  - Lic. Walter Vargas Mena. Director de Escuela de Química
  - Dr. Jesús Mora Molina. Coordinador de COTRAFIG
- Marco Antonio Méndez López. Asistente de Laboratorio Ingeniería Ambiental
  - Joaquín Antonio Solano Rivera. Operador de Tractor
    - Freddy Angulo Ramírez. Asistente de CIPA
    - BQ. *Noemi Quirós* Bustos. CEQIATEC
    - Alejandro Córdoba Campos. CEQUIATEC
    - Edgardo Granados Thamez. CEQUIATEC

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	ii
PALABRAS CLAVE.....	ii
ABSTRACT .....	iii
KEYWORDS .....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE CUADROS .....	x
ABREVIATURAS.....	xi
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II: ANTECEDENTES.....	2
CAPITULO III: OBJETIVOS.....	3
Objetivo General .....	3
Objetivos Específicos.....	3
CAPITULO IV: ALCANCES.....	4
CAPÍTULO V: REVISIÓN DE LITERATURA .....	5
Principios del Tratamiento Anaerobio.....	5
Factores que influyen en el metabolismo anaerobio.....	6
Principios de Funcionamiento de Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente .....	8
Dimensiones Recomendadas.....	10
Medio Filtrante .....	10
Algunos materiales utilizados como medio filtrante en FAFAs: .....	11
Parámetros de diseño .....	11
CAPÍTULO VI: SISTEMA EXPERIMENTAL UTILIZADO.....	13
Características del sistema experimental: .....	13
CAPÍTULO VII: METODOLOGÍA.....	18
Arranque del sistema .....	18
Cronograma de fases del proyecto .....	18
Arranque .....	18
Evaluación .....	19
Evaluación de los materiales alternativos en el sistema experimental.....	19

CAPÍTULO VIII: RESULTADOS .....	22
Arranque .....	22
Alimentación e Inoculación en Bach .....	22
Recirculación .....	23
Evaluación .....	24
CAPÍTULO IX: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	27
Temperatura .....	28
pH .....	29
Alcalinidad.....	30
Turbiedad.....	31
Sólidos Suspendedos Totales .....	33
DQO.....	34
DBO .....	35
Eficiencia en remoción de DBO.....	36
Eficiencia en remoción de DQO .....	38
Valores Promedio.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Oxígeno Disuelto.....	40
Eficiencias en remoción de DBO Y DQO del sistema completo .....	40
CAPÍTULO X: CONCLUSIONES.....	42
CAPÍTULO XI: RECOMENDACIONES .....	44
CAPITULO XII: REFERENCIAS.....	46
ANEXO A: DIAGRAMA DE GRANT DE FASES DEL PROYECTO .....	49
Cronograma de fases del proyecto .....	49
ANEXO B: RESULTADOS DE LABORATORIO .....	50
ANEXO C: HOJA DE CÁLCULO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.....	54
ANEXO D: VALORES DE PARÁMETROS DE ENTRADA URBANIZACIÓN IZTARÚ .....	55
Valores de parámetros de entrada .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
ANEXO E: REGISTRO FOTOGRÁFICO .....	56



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapa de producción de metano a partir de materia orgánica (Imfia, 2002). .....	6
Figura 2. Diagrama estructural de Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente. ....	9
Figura 3. Diagrama del sistema experimental utilizado. ....	14
Figura 4. Sistema experimental. ....	15
Figura 5. FAFA 1. Medio filtrante: Piedra. ....	16
Figura 6. FAFA 2. Medio filtrante: Tapas Plásticas. ....	16
Figura 7. FAFA 3. Medio filtrante: Cilindros de Espuma. ....	17
Figura 8. Diagrama del sistema y puntos de muestreo. ....	20
Figura 9. Comportamiento de la temperatura durante la evaluación de tres sistemas FAFA con medios de soporte diferentes. ....	29
Figura 10. Comportamiento del pH durante la evaluación de tres sistemas FAFA con medios de soporte diferentes. ....	30
Figura 11. Comportamiento de la alcalinidad durante la evaluación de tres sistemas FAFA con medios de soporte diferentes. ....	31
Figura 12. Comportamiento de la turbiedad durante la evaluación de tres sistemas FAFA con medios de soporte diferentes. ....	33
Figura 13. Comportamiento de sólidos suspendidos totales durante la evaluación de tres sistemas FAFA con medios de soporte diferentes. ....	34
Figura 14. Disminución de DBO durante la evaluación de tres sistemas FAFA con medios de soporte diferentes. ....	35
Figura 15. Disminución de DQO durante la evaluación de tres sistemas FAFA con medios de soporte diferentes. ....	36

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características recomendadas para materiales utilizados como medio filtrante... 11	11
Cuadro 2. Caudal recomendado según tiempo de retención requerido. .... 12	12
Cuadro 3. Parámetros fisicoquímicos analizados durante la etapa de evaluación. .... 21	21
Cuadro 4. Características físicas y fisicoquímicas del efluente de los sistemas FAFA durante la fase de arranque, periodo de alimentación e inoculación Bach (10 de setiembre a 16 de setiembre) ..... 22	22
Cuadro 5. Características físicas y fisicoquímicas del efluente de los sistemas FAFA durante la fase de arranque, periodo de recirculación (17 de setiembre a 23 de setiembre). .... 23	23
Cuadro 6. Características físicas y fisicoquímicas del influente y efluente de los sistemas FAFA durante la primera semana de la fase de evaluación (27 de setiembre al 01 de octubre). .... 24	24
Cuadro 7. Características físicas y fisicoquímicas del influente y efluente de los sistemas FAFA durante la segunda semana de la fase de evaluación (04 de octubre al 08 de octubre). .... 24	24
Cuadro 8. Características físicas y fisicoquímicas del influente y efluente de los sistemas FAFA durante la tercera semana de la fase de evaluación (11 de octubre al 15 de octubre). .... 25	25
Cuadro 9. Características físicas y fisicoquímicas del influente y efluente de los sistemas FAFA durante la cuarta semana de la fase de evaluación (18 de octubre al 22 de octubre). 25	25
Cuadro 10. Características físicas y fisicoquímicas del influente y efluente de los sistemas FAFA durante la quinta semana de la fase de evaluación (25 de octubre al 29 de octubre). 26	26
Cuadro 11. Características físicas y fisicoquímicas del influente y efluente de los sistemas FAFA durante la sexta semana de la fase de evaluación (11 de noviembre al 15 de noviembre). .... 26	26
Cuadro 12. Eficiencia en remoción de materia orgánica expresada como DBO en tres sistemas FAFA con diferentes medios de soporte. .... 37	37
Cuadro 13. Eficiencia en remoción de materia orgánica expresada como DQO en tres sistemas FAFA con diferentes medios de soporte. .... 38	38
Cuadro 14. Valores promedio para todos los parámetros evaluados en tres sistemas FAFA con diferentes medios de soporte. .... 39	39
Cuadro 15. Eficiencias en remoción de DBO y DQO del sistema completo para tres sistemas FAFA con diferentes medios de soporte. .... 41	41

## ABREVIATURAS

ITCR	Instituto Tecnológico de Costa Rica
FAFA	Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente
SST	Sólidos Suspendidos Totales
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
OD	Oxígeno Disuelto
AGV	Ácidos Grasos Volátiles
pH	Potencial Hidrógeno
ABNT	Asociación Brasileira de Normas Técnicas
CEQIATEC	Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos del ITCR
CO	Carga Orgánica
COV	Carga Orgánica Volumétrica
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
Q	Caudal
V	Volúmen
CB	Carga Biológica
Tr	Tiempo de Retención

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico en Costa Rica se encuentra sumamente afectado por el mínimo tratamiento que se le da a las aguas residuales debido a la falta de sistemas de tratamiento de aguas residuales en zonas residenciales ya sean urbanas o rurales debido a su alto costo y grandes debilidades en la operación y mantenimiento. Razón por la que la posibilidad de implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales de bajo costo es una necesidad imperante en la actualidad para solventar parcialmente uno de los problemas ambientales más graves que sufre el país. El Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente es un proceso anaeróbico de uso común en sistemas simplificados de tratamiento de aguas residuales domésticas y con la gran ventaja de un muy bajo costo de operación. En este proyecto se presentan resultados comparativos producto de una investigación orientada a evaluar el efecto sobre remoción de contaminantes al utilizar, en Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente entre materiales alternativos como tapas plásticas y cilindros de espuma contra los medios tradicionales del uso de piedra.

La aplicación de dicho sistema ha estado orientado al sector doméstico, en donde se combina con un tanque séptico como pre tratamiento 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.

El agua residual fluye sobre o a través de una masa de sólidos biológicos, contenidos en un reactor con material de empaque. La biomasa en el reactor puede estar adherida a la superficie del medio en forma de biopelícula, o estar en suspensión en el líquido como un lodo granular que tiende a decantarse debajo del medio. Los compuestos orgánicos solubles del agua residual influente se difunden dentro de los sólidos biológicos, adheridos al medio o en suspensión, convirtiéndose en productos intermedios y productos finales, específicamente en metano y dióxido de carbono, logrando de esta manera remover la contaminación de tipo orgánico. (Castaño Rojas, M. Paredes Cuervo, D. Seminario - Taller Avances en la investigación sobre Guadua. Universidad de Pereira, Colombia. 2002)

## CAPÍTULO II: ANTECEDENTES

Actualmente la piedra volcánica es el material más comúnmente utilizado como medio filtrante en este tipo de sistemas, pero su utilización en FAFAs, además de ser un material de alto costo, también aumenta considerablemente el peso del sistema, dicha característica encarece el diseño y construcción de los FAFAs por la necesidad de estructuras más complejas y reforzadas.

Por las razones anteriores, la adquisición de este tipo de sistemas es difícil por su alto costo, por lo que muy pocas empresas, industrias y comunidades tienen los recursos para dar tratamiento adecuado a sus aguas residuales con la implementación de estos sistemas y la prevención de la contaminación de las aguas se lleva a cabo en una proporción muy pequeña.

Los sistemas anaerobios tienen un bajo costo de operación, por lo que una reducción en su costo de construcción podría llevarlo a ser un sistema de tratamiento de aguas económicamente más accesible.

El uso de materiales significativamente más ligeros que la piedra cuarta usualmente utilizada como medio filtrante implica cambios en el diseño de los FAFAs, ya que el gran peso que aporta el uso de piedra volcánica implica requerimientos en el diseño y la construcción que implican un alto costo.

Algunos factores que reducen significativamente en los costos de los sistemas son los siguientes:

- No se utilizará piedra volcánica, la cual tiene un alto costo.
- No será necesario que el tanque sea reforzado.
- No es necesaria la construcción de viguetas pretensadas.
- No es necesaria la construcción de un fondo falso.

Todos los elementos anteriormente mencionados encarecen de una manera significativa la construcción de los FAFAs comúnmente diseñados y construidos, por lo que la implementación de materiales más ligeros como medio filtrante podrá reducir significativamente sus costos de construcción.

## **CAPITULO III: OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

- Encontrar materiales alternativos para ser utilizados como medio filtrante en Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente para la reducción de costos en el sistema.

### **Objetivos Específicos**

- Evaluar los materiales alternativos basados en criterios técnicos y experimentación.
- Comprobar la viabilidad de sustitución de la piedra comúnmente utilizada por materiales alternativos.

## **CAPITULO IV: ALCANCES**

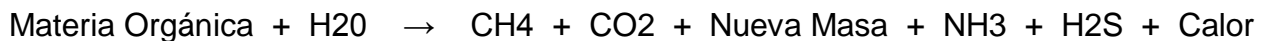
Los alcances del proyecto abarcan:

- Evaluación del funcionamiento de los materiales alternativos como medio filtrante en Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.
- Analizada la viabilidad en la sustitución de la piedra cuarta, comúnmente utilizada como medio filtrante en Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente, por los materiales alternativos evaluados.

## CAPÍTULO V: REVISIÓN DE LITERATURA

### Principios del Tratamiento Anaerobio

La digestión anaerobia es un proceso biológico donde microorganismos, en ausencia de oxígeno, descomponen y estabilizan la materia orgánica por conversión a metano, dióxido de carbono y otros productos inorgánicos. La materia orgánica pasa de ser un complejo compuesto a otros más simple producto de complejas interacciones simbióticas e inhibitoras entre diferentes grupos bacterianos (Kiely, 1999).



La degradación anaerobia implica cuatro etapas metabólicas diferentes relacionadas con la producción del biogás, que son:

- Hidrogénesis: los polímeros complejos como proteínas, carbohidratos, lípidos, grasas y aceites que no pueden asimilar las bacterias, son hidrolizadas por la acción de enzimas extracelulares en productos solubles más sencillos de tamaño tal que les permita pasar a través de la pared celular de las bacterias. La hidrogénesis es llevada a cabo por la acción de bacterias fermentativas hidrolíticas.
- Acidogénesis: los compuestos sencillos y solubles producidos tales como aminoácidos, azúcares, ácidos grasos y alcoholes de fermentación en ácidos grasos de cadena corta (volátiles), alcoholes, amoníaco, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub> por las bacterias fermentativas acidogénicas.
- Acetogénesis: los compuestos producidos en la acidogénesis se transforman en sustratos adecuados para la metanogénesis. Así, los ácidos grasos volátiles (propiónico, butírico entre otros) que no se encuentran en la forma de acetatos se convierten en acetato, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. El crecimiento de las bacterias acetogénicas está



ligado al crecimiento de bacterias metanogénicas hidrogénicas, pues necesitan que éstas consuman el H<sub>2</sub> producido.

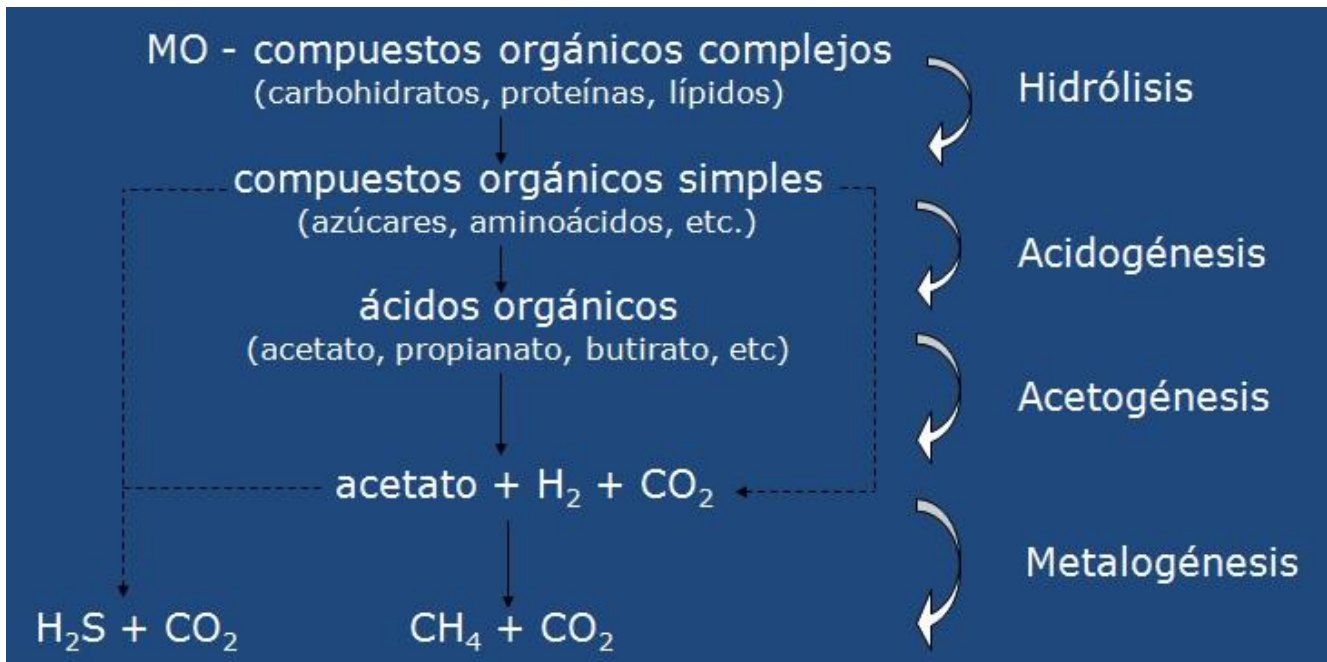


Figura 1. Etapa de producción de metano a partir de materia orgánica (Imfia, 2002).

### Factores que influyen en el metabolismo anaerobio

Existen varios factores que influyen en la digestión anaerobia, dentro de los cuales podemos encontrar: pH, temperatura, composición del sustrato, ácidos grasos volátiles (AGV's), alcalinidad, presencia de inhibidores, tóxicos, entre otros.

- **pH**

El desarrollo de microorganismos se encuentra muy ligado con un pH óptimo. De acuerdo a algunos autores, el rango ideal se sitúa entre los 6,2 y 8, según otros de 6,5 a 7,5, lo que implica, en el caso de necesidad, una corrección anticipada en el influente con un ácido o una base, según lo requiera. La máxima actividad metabólica se inhibe a valores inferiores a 6 o superiores a 8,5. Si el pH desciende de 4,5 las bacterias fermentativas se ven inhibidas y la digestión se detiene (Zamora, 2001; Hernández, 1993).

- **Temperatura**

La temperatura afecta directamente la cinética bioquímica de las bacterias anaerobias. Los microorganismos formadores de metano y los fermentadores hidrolíticos son termosensibles, por tanto, al aumentar la temperatura, a un rango adecuado, las reacciones químicas y procesos biológicos de éstos se aceleran. El proceso anaerobio mesofílico es el más utilizado en la digestión anaerobia, cuyo intervalo de temperatura está entre los 25-45°C, con un ideal entre los 33-38°C (Hernández, 1993; Schleenstein, 2002).

- **Composición del sustrato**

Los microorganismos requieren del sustrato para usarlo como fuente de energía y sintetizar de él material celular.

DBO5 y DQO: La concentración del sustrato puede indicarse en términos de sólidos totales o por medida de la materia orgánica a través de indicadores tales como DBO5 o DQO. Entre mayor concentración de DQO biodegradable, mayor es la actividad metanogénica.

- **Nutrientes**

Se requiere la presencia de macro nutrientes (C, N, P) y micronutrientes en proporciones adecuadas. En un rango de 15-30 Kg de DBO debe añadirse 1 Kg de Nitrógeno y por una entrada de 80-150 Kg de DBO debe haber 1 Kg de Fósforo (Deloya, 2008)

- **Tóxicos / Inhibidores**

Amoniaco: Concentraciones de nitrógeno amoniacal superiores a 3000 mg/L son totalmente tóxicas y entre los 1500-2000 mg/L resultan inhibitorios (Hernández, 1993).

Azufre: En altas concentraciones en el afluente, sea como sulfatos, sulfito o azufre orgánico, se convierte en ácido sulfúrico ( $H_2S_{(g)}$ ) por la acción de las bacterias sulfato reductoras, dichas bacterias ganan en la competencia por el consumo del sustrato contra las bacterias metanogénicas, razón por la cual dicho compuesto es inhibitorio para la actividad

metanogénica. Como medida se recomienda suministrar hierro en forma de  $\text{FeCl}_3$  por su carácter de micronutriente, coagulante e interceptor de  $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$ . Además, el hierro provee el color negro característico en el lodo anaerobio. Por otro lado se debe aumentar el pH a valores cercanos a la neutralidad para evitar su formación. Cuando son altas las cargas de azufre en el afluente, no es recomendado proceso anaerobio (Zamora, 2001; Giraldo, 1993).

Oxígeno: Las bacterias metanogénicas son estrictamente anaerobias, por lo cual sólo algunas conservan su viabilidad luego de ser expuestas a una entrada masiva de  $\text{O}_2$  (Arango, 2001).

- **Ácidos grasos volátiles**

Cuando el pH se sale del rango óptimo, las bacterias metanogénicas se ven inhibidas, sin embargo las bacterias acidogénicas continúan actuando de manera normal, actividad que genera gran cantidad de ácidos grasos volátiles, causando acidificación del reactor (Imfia, 2002). Bajo condiciones óptimas, el contenido de los AGV's en el lodo oscila generalmente entre 50-250 mg/L, en su mayoría ácido acético (Sawyer et al, 2001).

- **Alcalinidad**

La alcalinidad representa la capacidad que tiene el fango o lodo para resistir cambios en pH. La alcalinidad es resultado de la presencia de bicarbonatos, carbonatos, hidróxidos y sales. Para una adecuada digestión anaerobia, se espera una alcalinidad entre 1000-5000 mg/L  $\text{CaCO}_3$ . La relación AGV's/alcalinidad debe ser menor a 1, de no ser así, se deben tomar medidas correctivas (Sawyer et al, 2001).

## **Principios de Funcionamiento de Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente**

Los Filtros Anaerobio de Flujo Ascendente son usualmente utilizados como tratamientos secundarios de aguas residuales domésticas, para poblaciones pequeñas, no más de 500 personas. Son precedidos comúnmente por fosas sépticas, digestores o sedimentadores, y son utilizados para complementar y aumentar el rendimiento del sistema completo.

La estructura principal que constituye dicho sistema es un tanque cuyas dimensiones de diseño dependerán de las características del afluente, principalmente su caudal y carga orgánica, pues de dicho factor dependerá el tiempo de retención del afluente dentro del sistema. La principal característica de un FAFA es que disponen de medio de soporte dentro del tanque, el cual tiene como objetivos garantizar una mayor retención de sólidos, promover la proliferación bacteriana sobre su superficie, favoreciendo a la oxidación anaerobia de materia orgánica por parte de los microorganismos presentes.

El principio físico de su funcionamiento radica en su característica de Flujo Ascendente, pues el afluente ingresa al filtro por su parte inferior y el proceso de llenado lo lleva a cruzar la totalidad del medio filtrante en forma ascendente, en el cual ocurren los procesos físicos, químicos y microbiológicos que realizan la depuración del afluente. Por último, el efluente tiene salida por la parte superior del filtro a aproximadamente 0,30 m sobre el medio filtrante.

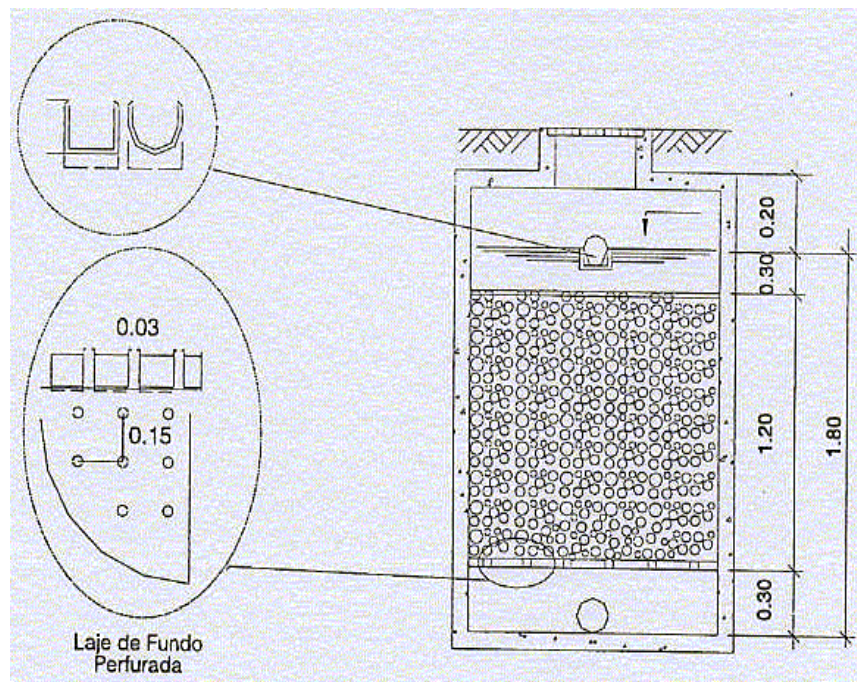


Figura 2. Diagrama estructural de Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente.

La combinación tanque séptico – filtro anaerobio requiere de un mantenimiento periódico, principalmente orientado a la remoción de los sólidos retenidos en la primera unidad y un retro lavado en la segunda a fin de eliminar posibles obstrucciones en los

espacios o poros por donde circula el agua residual. La ausencia de este mantenimiento ocasiona taponamiento del medio filtrante, que conlleva a su vez a represamientos en las tuberías de conducción de las aguas residuales al sistema (red de alcantarillado) y disminución de las eficiencias de remoción de contaminantes.

Cuando esta situación se presenta la única solución viable es remover y limpiar el medio filtrante, labor esta que aparte de dispendiosa (y costosa) presenta un alto riesgo sanitario. En teoría un medio en forma de anillos disminuiría considerablemente este problema puesto que, sin perjuicio del área de contacto requerida para el tratamiento, es espacio filtrante (porosidad) es mayor.

### **Dimensiones Recomendadas**

- Profundidad útil: 1,80 m
- Ancho: 0,85 – 5,40 m, pero dependerá de las necesidades de diseño
- Volumen útil mínimo.: 1,25 m<sup>3</sup>, el máximo dependerá de las necesidades de diseño
- Altura del medio soporte: 1,2 m
- Falso fondo: 0,60 m sobre el fondo
- Salida del efluente: mantener nivel de líquido mínimo de 30 cm sobre el lecho (Deloya, A. 2008).

### **Medio Filtrante**

Debe promover la uniformización del flujo en el reactor, mejorar el contacto entre el líquido afluente y los sólidos biológicos en el reactor, permitir acumulación de gran cantidad de biomasa y actuar como barrera física evitando la salida de sólidos con el efluente.

Cuadro 1. Características recomendadas para materiales utilizados como medio filtrante.

<b>Requisito</b>	<b>Objetivo</b>
Estructuralmente resistente	Soporte de peso propio más sólidos biológicos
Biológica y químicamente inerte	Ausencia de reacciones lecho- microorganismos
Alta área específica	Adherencia de mayor cantidad de sólidos biológicos
Elevada porosidad	Baja posibilidad de colmatación
Forma no achatada o lisa	Garantizar porosidad elevada
Bajo costo	Viabilizar económicamente el sistema

Fuente: Deloya, A. 2008. Curso de Tratamiento de Aguas Residuales.

#### Algunos materiales utilizados como medio filtrante en FAFAs:

- Piedra cuarta, el más comúnmente utilizado
- Cuarzo
- Granito
- Bloques cerámicos o de PVC
- Esferas de polietileno
- Bambú
- Etc.

#### Parámetros de diseño

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales como Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente general mente se diseñan en función del tiempo de retención (Tr), el cual depende del caudal y varía en cuanto a las cargas de contaminantes del agua residual del influente y de la eficiencia que se quiere obtener luego de dicho tratamiento.

Cuadro 2. Caudal recomendado según tiempo de retención requerido.

Q(l/d)	Tr (d)	
	15 – 25 °C	< 15 °C
< 1500	1	1,17
1501 – 3000	0,92	1,08
3001 – 4500	0,83	1
4501 – 6000	0,75	0,92
6001 – 7500	0,67	0,83
7501 – 9000	0,58	0,75
> 9000	0,50	0,75

Fuente: Deloya, A. 2008. Curso de Tratamiento de Aguas Residuales.

Carga orgánica: se limita a un valor máximo de 16 kg DQO/m<sup>3</sup>.d, pero en general se trabaja no superando los 12 kg DQO/m<sup>3</sup>.d

Velocidad superficial: se limita a valores inferiores de 1.0 m/h para evitar el arrastre de sólidos con el efluente.

Volumen útil: De acuerdo a la norma ABNT:

$$V = 1.60 \times N \times C \times Tr$$

V = volumen total del filtro (m<sup>3</sup>)

N = habitantes contribuyentes al sistema (hab)

C = contribución por habitante (l/hab.d)

Tr= tiempo retención hidráulica (d)

Área horizontal:  $A = V/H$  con H = profundidad útil del filtro (1.8m)

Eficiencia: Pueden esperarse eficiencias de entre 75 - 95% cuando se usan como post-tratamiento de efluentes de fosas sépticas.

$$E = 100 (1 - 0.87 \times TDH^{0.50}) \text{ ajuste a partir de datos experimentales}$$

TDH = Tiempo de Retención Hidráulica = V/Q

## CAPÍTULO VI: SISTEMA EXPERIMENTAL UTILIZADO

Durante esta fase del proyecto se realizó la construcción del sistema experimental en el cual llevaron a cabo la experimentación para la evaluación de los materiales alternativos.

El Sistema Experimental que se utilizó en la evaluación de los materiales filtrantes alternativos consta de tanques prefabricados, construidos en fibra de vidrio, los cuales fueron instalados dentro de la zona de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del ITCR de Cartago.

Los tanques que forman parte del sistema, tanto los FAFAs, como el sedimentador y el distribuidor de caudal fueron prefabricados en fibra de vidrio. Dichos tanques fueron instalados y conectados con tubería PVC de 75 mm de diámetro en la zona de la planta de tratamiento de aguas residuales en el ITCR.

### Características del sistema experimental:

- Caudal del tanque sedimentador: 1 m<sup>3</sup>/día
- Caudal de cada FAFA: 0,75 m<sup>3</sup>/día
- Profundidad de cada FAFA: 1,6 m
- Volumen de la zona de medio filtrante: 0,6 m<sup>3</sup>
- Bomba sumergible de caudal aproximadamente de 4 m<sup>3</sup>/día



Esquema sistema de tratamiento de 1.2 m<sup>3</sup>

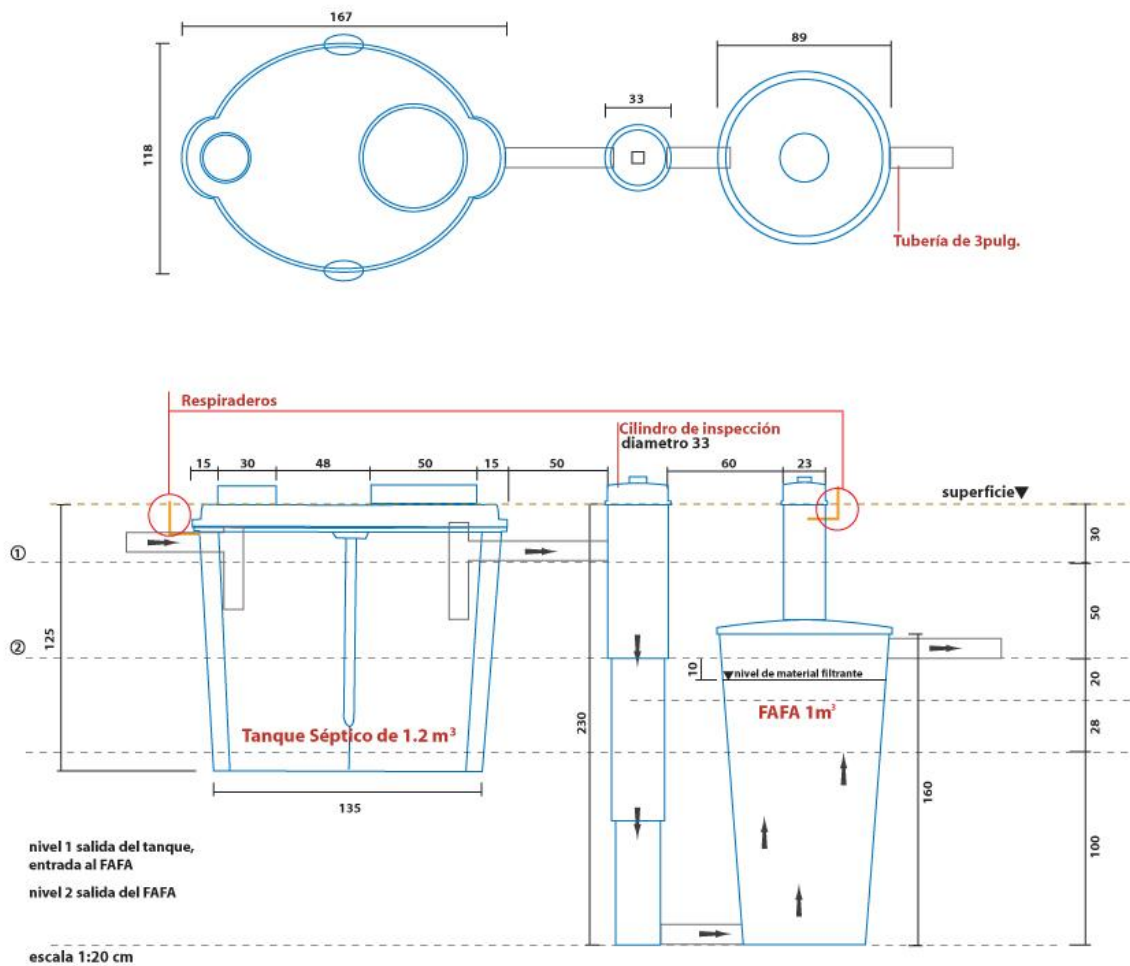


Figura 3. Diagrama del sistema experimental utilizado.

El sistema se alimentó por el mismo afluente de agua residual cruda que entra a las lagunas de oxidación del ITCR.

En la entrada a la primera laguna de estabilización cuenta con una caja de registro en la que se instaló una bomba sumergible de caudal aproximadamente de 4 m<sup>3</sup>/día distribuidos en los tres FAFAs, 1,33 m<sup>3</sup>/día en cada uno y con un Tiempo de Retención (Tr) de aproximadamente 1 día. La bomba sumergible se instaló para alimentar el sistema experimental con agua residual cruda cuya primera fase es un tanque sedimentador que funcionará como tratamiento primario para reducir la concentración de sólidos y evitar problemas de saturación en los FAFAs, luego será dirigida hacia un tanque que funciona como distribuidor de caudal hacia los tres FAFAs colocados en paralelo.



Figura 4. Sistema experimental.

Los tres FAFAs fueron rellenos con  $0.6 \text{ m}^3$  de los medios filtrantes que se pretendían evaluar en dicha fase, los materiales utilizados como media filtrante fueron:

- FAFA 1: Piedra cuarta utilizada en construcción (Figura 5).
- FAFA 2: Tapas Plásticas (Figura 6).
- FAFA 3: Cilindros de Espuma (Figura 7).



Figura 5. FAFA 1. Medio filtrante: Piedra.



Figura 6. FAFA 2. Medio filtrante: Tapas Plásticas.





Figura 7. FAFA 3. Medio filtrante: Cilindros de Espuma.

Finalmente, la salida de los FAFAs se descarga en el canal de salida de la Planta de Tratamiento del ITCR (Anexo D. Figura 6).

## CAPÍTULO VII: METODOLOGÍA

### Arranque del sistema

A partir de viernes 20 de agosto de 2010 se inicia la etapa de arranque del sistema, etapa que comprendió actividades como inoculación de lodos a los FAFAs, el llenado de agua residual cruda, su recirculación y monitoreo, dicha fase se extiende por un mes hasta el 24 de setiembre de 2010, día en que se inicia la alimentación y circulación continua de agua residual a través del sistema experimental completo. A lo largo de este período se realizan las siguientes actividades (Diagrama del cronograma en Anexo A):

### Cronograma de fases del proyecto

#### Arranque

- **Recolección de Lodos (20/08-02/09):** Con el fin de acelerar el proceso de proliferación bacteriana dentro de los sistemas, se recolectó lodo proveniente del fondo de una de las lagunas del sistema de tratamiento de aguas residuales del ITCR, a los cuales se les adicionaron los nutrientes necesarios y fueron reposados durante dos semanas durante el ensamblaje del sistema experimental.
- **Agregado de lodos (03/09-09/09):** Los lodos fueron vertidos en cantidades iguales a cada uno de los FAFAs y reposados a lo largo de una semana para permitir la adherencia del lodo a los materiales filtrantes. En esta fase se tomaron observaciones de las características del agua en los FAFAs
- **Alimentación e Inoculación en Bach (10/09-16/09):** Los tres FAFAs fueron alimentados con agua residual cruda y reposada (proceso llamado Bach) por período de una semana en la cual se llevó a cabo un monitoreo del pH hasta observar una estabilización con valores entre 7 y 8 antes de arrancar la alimentación del sistema

completo. En esta fase también se tomaron observaciones de las características del agua en los FAFAs y se monitorearon parámetros como pH y temperatura.

- **Recirculación (17/09-23/09):** Para favorecer el contacto entre la biomasa de los lodos agregados y el material filtrante. Se colocó una bomba sumergible de succión en el fondo de los cilindros de inspección para extraer lodos del fondo de cada FAFA y agregarlo por la parte superior del mismo. Esto para realizar una recirculación y mezcla del agua residual y lodo para favorecer la proliferación de biomasa bacteriana sobre el medio filtrante. Durante esta fase se llevó a cabo un monitoreo de parámetros de pH, temperatura y se efectuaron observaciones en cuanto la evolución de las características del agua que se encontraba en reposo dentro de los FAFAs, después de la recirculación.

## Evaluación

- **Evaluación (24/09-05/11):** Se arrancó la bomba para iniciar la alimentación del sistema y durante las seis semanas posteriores se realizaron análisis de laboratorio para monitorear el progreso del sistema y su eficiencia en la depuración de agua residual.

## Evaluación de los materiales alternativos en el sistema experimental

Se realizaron muestreos de aguas en los puntos de muestreo establecido para efectuar los análisis correspondientes, los cuales estarán ubicados de la siguiente manera (Figura 8):

- A la salida del tanque sedimentador (Punto de Muestreo 0).
- A las salida de cada uno de los FAFAs (Puntos de Muestreo 1, 2 y 3).

En el Punto de Muestreo 0, justo a la salida del Tanque Sedimentador, se realizarán análisis para conocer las características físico-químicas del agua residual antes de que esta

ingrese a los FAFAs, para así contar con parámetros de referencia iniciales de la calidad del agua antes de ser tratada por los FAFAs.

En los Puntos de Muestreo 1, 2 y 3, ubicados a la salida de cada uno de los FAFAs posicionados en forma paralela, se tomará muestras del agua tratada por los sistemas y poder comparar su eficiencia en depuración del agua tratada para determinar la factibilidad del uso del material alternativo con respecto a su eficiencia.

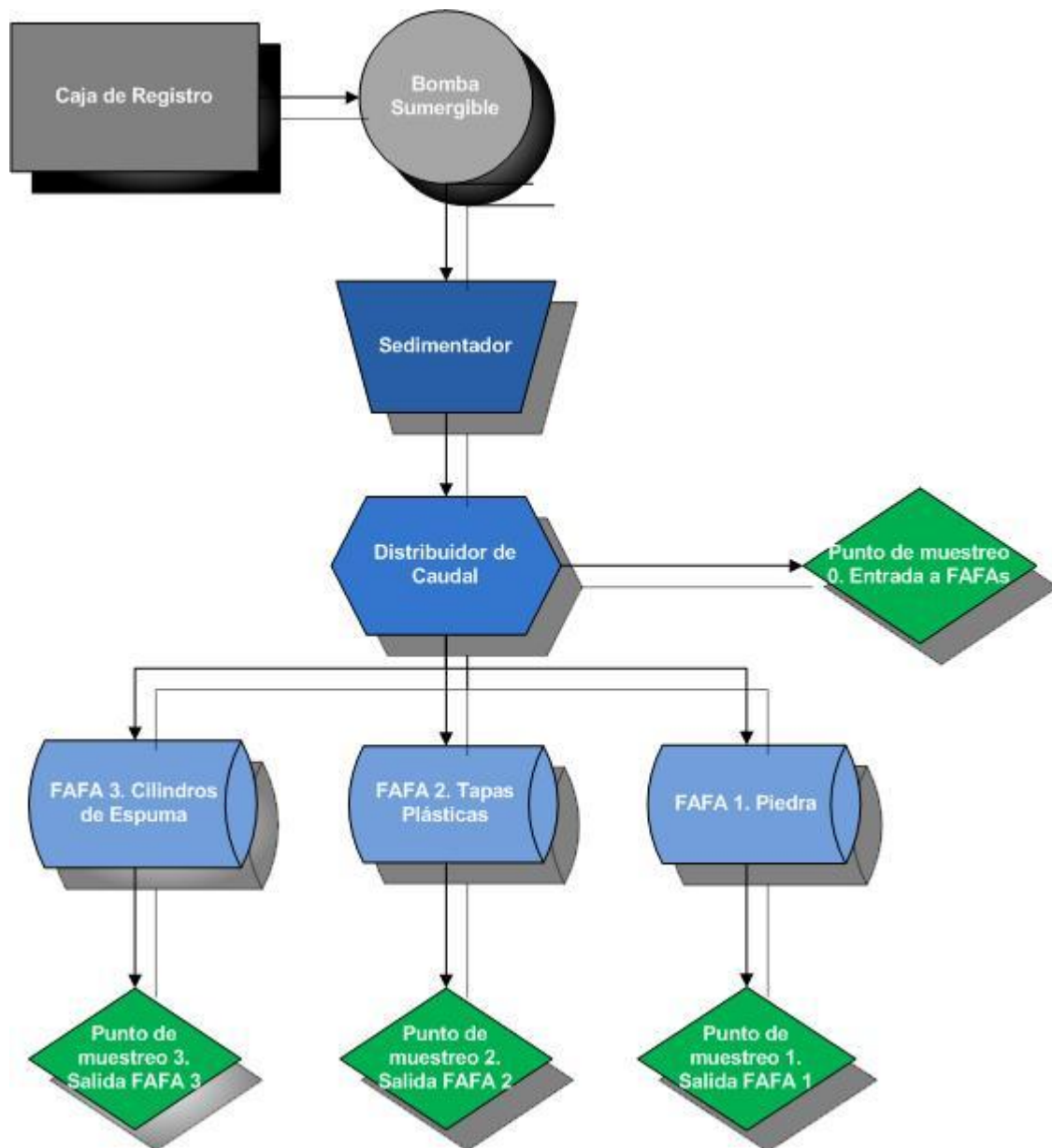


Figura 8. Diagrama del sistema y puntos de muestreo.

Para el control del correcto funcionamiento y medir el progreso del sistema durante y después de su arranque, se efectuaron monitoreos y análisis de diversos parámetros a lo largo de la fase de funcionamiento del sistema experimental. Los a parámetros analizados y su frecuencia se describen en el siguiente cuadro:

Cuadro 3. Parámetros físico-químicos analizados durante la etapa de evaluación.

<b>3 veces por semana</b>	<b>1 vez por semana</b>
Potencial Hidrógeno	Demanda Bioquímica de Oxígeno
Turbiedad	Demanda Química de Oxígeno
Temperatura	Alcalinidad
	Sólidos Suspendidos Totales

Los análisis de los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) fueron realizados en el Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos del ITCR, CEQIATEC. Los análisis de pH, turbiedad, temperatura, DQO y alcalinidad se realizaron en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Ambiental.



## CAPÍTULO VIII: RESULTADOS

A continuación se presentan los cuadros con los resultados del arranque y monitoreo de los tres sistemas con diferentes medios de soporte (piedra, tapas plásticas y cilindros de espuma) de las fases de Arranque que comprende Alimentación e Inoculación en Bach y Recirculación y la fase de Evaluación:

### Arranque

#### Alimentación e Inoculación en Bach

Cuadro 4. Características físicas y físico-químicas del efluente de los sistemas FAFA durante la fase de arranque, periodo de alimentación e inoculación Bach (10 de septiembre a 16 de septiembre)

Semana 10/09-16/09	Parámetro	Entrada	Salida Piedra	Salida Tapas	Salida Espumas
Día1	pH	-	7,58	7,78	7,36
	Temperatura (°C)	-	28,6	27,5	25,5
	Observaciones	-	Color de agua: gris Olor: agua residual cruda	Color de agua: gris Olor: agua residual cruda	Color de agua: gris Olor: agua residual cruda
Día2	pH	-	7,56	7,73	7,10
	Temperatura (°C)	-	27,3	28,9	29,3
	Observaciones	-	Color de agua: gris Olor: agua residual cruda	Color de agua: gris Olor: agua residual cruda	Color de agua: gris Olor: agua residual cruda
Día3	pH	-	7,60	8,10	7,43
	Temperatura (°C)	-	21,1	21,4	21,6
	Observaciones	-	Color de agua: gris Olor: agua residual cruda	Color de agua: gris Olor: agua residual cruda	Color de agua: gris Olor: agua residual cruda

Fuente: Elaboración propia. Alvarado, A.

## Recirculación

Cuadro 5. Características físicas y físico-químicas del efluente de los sistemas FAFA durante la fase de arranque, periodo de recirculación (17 de septiembre a 23 de septiembre).

<b>Semana</b> <b>17/09-23/09</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Entrada</b>	<b>FAFA</b> <b>Piedra</b>	<b>Salida</b> <b>Tapas</b>	<b>Salida</b> <b>Espumas</b>
<b>Día1</b>	pH	-	8,60	9,94	7,50
	Temperatura (°C)	-	21,7	24,9	24,8
	Observaciones		Color de agua: negro Olor: lodo anaerobio	Color de agua: negro Olor: lodo anaerobio	Color de agua: negro Olor: lodo anaerobio
<b>Día2</b>	pH	-	8,66	9,90	7,54
	Temperatura (°C)	-	22,9	24,0	24,7
	Observaciones		Color de agua: negro Olor: lodo anaerobio	Color de agua: negro Olor: lodo anaerobio	Color de agua: negro Olor: lodo anaerobio
<b>Día3</b>	OD (mg/L)		1,51	1,91	1,46
	pH	-	8,63	9,86	7,54
	Temperatura (°C)	-	22,1	24,4	24,6
	Observaciones		Color de agua: negro Olor: lodo anaerobio	Color de agua: negro Olor: lodo anaerobio	Color de agua: negro Olor: lodo anaerobio

Fuente: Elaboración propia. Alvarado, A.

## Evaluación

Cuadro 6. Características físicas y físico-químicas del influente y efluente de los sistemas FAFA durante la primera semana de la fase de evaluación (27 de setiembre al 01 de octubre).

<b>Semana 1 27/09-01/10</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida Piedra</b>	<b>Salida Tapas</b>	<b>Salida Espumas</b>
<b>Día1</b>	pH	7,34	7,72	8,16	7,52
	Temperatura (°C)	24,0	20,4	20,8	20,9
	Turbiedad (NTU)	59,1	16,0	22,6	31,1
<b>Día2</b>	pH	7,36	7,64	8,04	7,43
	Temperatura (°C)	22,4	20,1	22,1	22,3
	Turbiedad (NTU)	50,0	14,4	20,3	28,8
<b>Día3</b>	pH	7,20	7,60	8,10	7,43
	Temperatura (°C)	24,2	21,1	21,4	21,6
	Turbiedad (NTU)	44,0	14,6	18,6	28,1

Fuente: Elaboración propia. Alvarado, A.

Cuadro 7. Características físicas y físico-químicas del influente y efluente de los sistemas FAFA durante la segunda semana de la fase de evaluación (04 de octubre al 08 de octubre).

<b>Semana 2 04/10-08/10</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida Piedra</b>	<b>Salida Tapas</b>	<b>Salida Espumas</b>
<b>Día1</b>	pH	7,04	7,72	8,16	7,52
	Temperatura (°C)	24,2	22,2	22,4	22,2
	Turbiedad (NTU)	75,0	18,2	28,1	42,0
<b>Día2</b>	pH	7,78	7,61	8,00	7,15
	Temperatura (°C)	23,2	22,8	22,5	22,4
	Turbiedad (NTU)	59,2	16,6	23,9	36,1
	DQO (mg/L)	112,0	48,0	32,0	26,0
	Alcalinidad	214,6	221,5	228,4	209,9
	DBO (mg/L)	148,0	75,0	78,0	77,0
	SST (mg/L)	346,0	360,0	363,0	334,0
<b>Día3</b>	pH	7,26	7,88	7,97	7,59
	Temperatura (°C)	24,4	24,1	23,5	23,9
	Turbiedad (NTU)	56,3	12,2	20,9	30,0

Fuente: Elaboración propia. Alvarado, A.

Cuadro 8. Características físicas y físico-químicas del influente y efluente de los sistemas FAFA durante la tercera semana de la fase de evaluación (11 de octubre al 15 de octubre).

<b>Semana 3 11/10-15/10</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida Piedra</b>	<b>Salida Tapas</b>	<b>Salida Espumas</b>
<b>Día1</b>	pH	7,40	7,46	7,79	7,44
	Temperatura (°C)	23,7	22,8	23,4	23,2
	Turbiedad (NTU)	30,1	18,1	18,9	21,1
<b>Día2</b>	pH	7,53	7,67	8,28	7,66
	Temperatura (°C)	23,7	22,8	23,4	23,2
	Turbiedad(NTU)	38,7	20,4	22,3	34,3
	DQO (mg/L)	274,0	26,0	19,0	46,0
	Alcalinidad	234,3	241,4	248,4	212,0
	DBO (mg/L)	144,0	71,1	75,0	74,0
	SST (mg/L)	389,0	394,0	398,0	366,0
<b>Día3</b>	pH	7,98	7,67	7,98	7,88
	Temperatura (°C)	22,7	23,0	23,1	23,4
	Turbiedad (NTU)	44,3	23,2	23,6	41,8

Fuente: Elaboración propia. Alvarado, A.

Cuadro 9. Características físicas y físico-químicas del influente y efluente de los sistemas FAFA durante la cuarta semana de la fase de evaluación (18 de octubre al 22 de octubre).

<b>Semana 4 18/10-22/10</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida Piedra</b>	<b>Salida Tapas</b>	<b>Salida Espumas</b>
<b>Día1</b>	pH	7,47	7,52	7,66	7,50
	Temperatura (°C)	23,6	22,1	22,6	23,8
	Turbiedad (NTU)	35,5	19,1	20,2	25,4
<b>Día2</b>	pH	7,47	7,50	7,63	7,39
	Temperatura (°C)	23,4	22,7	25,4	24,4
	Turbiedad (NTU)	44,0	19,6	18,7	29,2
	DQO (mg/L)	105,0	19,0	24,0	61,0
	Alcalinidad	218,4	244,4	265,2	286,0
	DBO (mg/L)	23,0	40,0	52,5	53,0
	SST (mg/L)	380,0	310,0	295,0	330,0
<b>Día3</b>	pH	7,36	7,70	7,90	7,73
	Temperatura (°C)	22,7	22,8	23,4	23,6
	Turbiedad (NTU)	26,4	39,0	20,4	30,9

Fuente: Elaboración propia. Alvarado, A.

Cuadro 10. Características físicas y físico-químicas del influente y efluente de los sistemas FAFA durante la quinta semana de la fase de evaluación (25 de octubre al 29 de octubre).

<b>Semana 5 25/10-29/10</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida Piedra</b>	<b>Salida Tapas</b>	<b>Salida Espumas</b>
<b>Día1</b>	pH	7,31	7,49	7,64	7,38
	Temperatura (°C)	26,1	27,2	26,3	26,8
	Turbiedad (NTU)	38,2	41,4	28,4	59,3
<b>Día2</b>	pH	7,40	7,53	7,76	7,53
	Temperatura (°C)	24,0	23,8	24,7	25,0
	Turbiedad (NTU)	22,0	16,6	15,6	16,8
	DQO (mg/L)	93,0	44,0	25,0	88,0
	Alcalinidad	213,2	213,2	239,2	249,6
	DBO (mg/L)	54,0	36,4	37,0	36,4
	ST (mg/L)	317,0	288,0	291,0	123,5
<b>Día3</b>	pH	7,36	7,51	7,70	7,43
	Temperatura (°C)	25,2	25,4	25,5	25,4
	Turbiedad (NTU)	30,0	28,0	21,4	35,6

Fuente: Elaboración propia. Alvarado, A.

Cuadro 11. Características físicas y físico-químicas del influente y efluente de los sistemas FAFA durante la sexta semana de la fase de evaluación (11 de noviembre al 15 de noviembre).

<b>Semana 6 01/11-05/11</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida Piedra</b>	<b>Salida Tapas</b>	<b>Salida Espumas</b>
<b>Día1</b>	pH	7,55	7,89	8,46	7,73
	Temperatura (°C)	22,4	22,5	24,5	23,2
	Turbiedad (NTU)	56,4	21,6	23,5	62,9
<b>Día2</b>	pH	7,35	7,80	8,16	8,00
	Temperatura (°C)	22,3	22,3	23,3	22,3
	Turbiedad (NTU)	41,6	42,1	24,0	54,2
	DQO (mg/L)	106,0	38,0	53,0	48,0
	Alcalinidad	171,1	254,8	265,2	218,4
	DBO (mg/L)	35,0	24,3	29,0	15,5
	ST (mg/L)	213,0	309,0	138,0	320,0
<b>Día3</b>	pH	7,25	7,92	7,77	7,71
	Temperatura (°C)	22,2	22,8	23,4	21,8
	Turbiedad (NTU)	38,0	14,6	13,2	34,2

Fuente: Elaboración propia. Alvarado, A.

## CAPÍTULO IX: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante el desarrollo del proyecto se monitorearon distintos parámetros en el agua tanto del influente como del efluente del sistema experimental para evaluar el comportamiento durante las diferentes fases. A lo largo de todas las fases del proyecto y sobretodo en el arranque del mismo, fue necesario prestar especial atención a parámetros de control operacional como los son la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y la alcalinidad, los cuales dan las condiciones ideales para el desarrollo de los microorganismos.

Los parámetros para evaluar el comportamiento de los materiales filtrantes alternativos propuestos fueron los indicadores de calidad de agua como los son la turbiedad, sólidos totales, pH, alcalinidad, DQO y DBO.

A lo largo de todas las diferentes fases del proyecto se efectuaron inspecciones visuales en las cuales se prestó especial atención a las características como el olor y apariencia de las aguas dentro cada uno de los FAFAs para el debido control del progreso del sistema principalmente en las primeras semanas de arranque

Durante la primera semana de arranque, que comprendió del 10 de septiembre al 16 de septiembre, y en la que se realizó la alimentación e inoculación en Bach de los tres FAFAs con agua residual, usando como inóculo lodos anaerobios. No se observaron cambios significativos en el color del agua en ningunos de los FAFAs, el color del agua siempre fue el mismo color gris característico de las aguas residuales domésticas crudas, y el olor característico.

Luego de la recirculación del agua residual que se efectuó a principios de la segunda semana del arranque, que comprendió del 17 de septiembre al 23 de septiembre, se observó un cambio significativo en el color del agua en los tres FAFAs, pasando de color gris a color negro. El proceso de recirculación se realizó para obtener un mayor contacto entre los microorganismos y los materiales filtrantes contenidos en cada FAFA y de esta manera inducir a la formación de la película bacteriana en los tres medios, posterior a la recirculación se observó un color negro característico de lodos y aguas tratadas por digestión anaerobia, además de percibirse un cambio de olor característico de sistemas anaerobios.

Durante la etapa de evaluación se mantuvieron las mismas características de color y olor características de un efluente anaerobio. Durante de la fase de monitoreo se observó la

presencia de alga verdes en el espejo de agua en el FAFA 1 (Anexo E, Figura 9) que contenía piedra como medio filtrante, y la aparición de gran cantidad de bacterias del azufre debido a la presencia de  $H_2S$  producto de la digestión anaerobia en el FAFA 3, con cilindros de espuma como medio filtrante (Anexo E, Figura 10), el cual contenía cilindros de espuma como medio filtrante. Es posible que dichos organismos influyeran de manera importante en los resultados de turbiedad de los efluentes.

## Temperatura

La temperatura fue uno de los parámetros de control operacional más monitoreado junto con el pH por su alta importancia. La temperatura afecta directamente la cinética bioquímica de las bacterias anaerobias. Los microorganismos formadores de metano y los fermentadores hidrolíticos son termosensibles, por tanto, cambios en la temperatura, en una medida inadecuada, directamente pueden afectar el comportamiento bacteriano dentro del sistema y por consiguiente alterar las reacciones químicas y procesos biológicos de manera que reduzcan la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales. Cambios abruptos en la temperatura, o en gran escala, pueden acelerar o inhibir la actividad bacteriana y afectar la totalidad del proceso.

El intervalo de temperatura recomendado está entre los 25-45°C, con un ideal entre los 33-38°C (Hernández, 1993; Schleenstein, 2002). En este caso, se observó que la temperatura se mantuvo en el mayor porcentaje de las mediciones entre los 22-26°C, resultados que pueden ser atribuidos a las condiciones climáticas del sitio donde se instaló el sistema experimental de estudio así como la época del año en la que se realizó, la cual presentó temperaturas ambiente promedio entre 15,5-25,2°C en el mes de setiembre, 15,8-24,6°C en el mes de octubre y 15,2-22,9°C en noviembre. Para una temperatura promedio de 23,58°C en el influente, 23,11°C en el FAFA 1 de piedra, 23,87°C en el FAFA 2 de tapas plásticas y 23,75°C en el FAFA 3 de cilindros de espuma.

Además se pudieron observar pronunciadas fluctuaciones en la temperatura así como en los demás parámetros medidos en las primeras semanas de funcionamiento, comportamiento común durante la etapa de arranque y estabilización de un sistema.

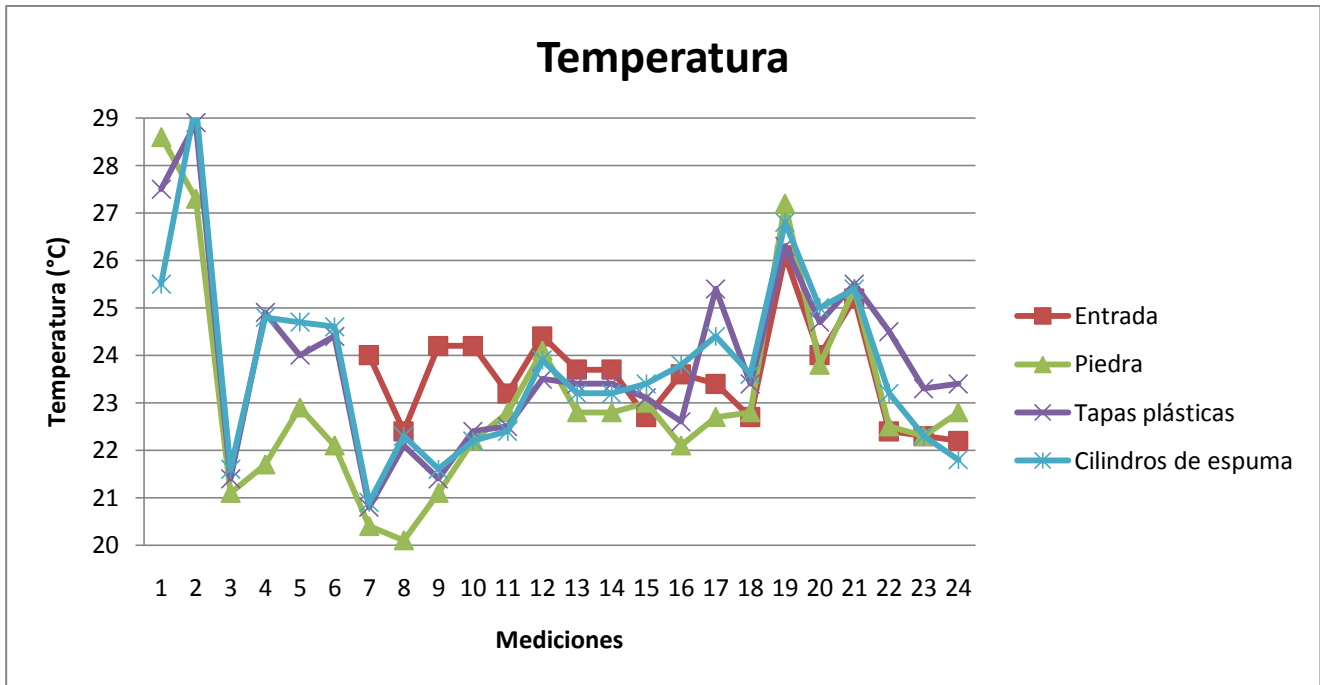


Figura 9. Comportamiento de la temperatura durante la evaluación de tres sistemas FAFA con medios de soporte diferentes.

## pH

El desarrollo de microorganismos y su actividad se encuentran muy ligados con un pH óptimo del medio en que se encuentran. De acuerdo a algunos autores, el rango ideal se sitúa entre los 6,2 y 8, según otros de 6,5 a 7,5. La máxima actividad metabólica se inhibe a valores inferiores a 6 o superiores a 8,5. Si el pH desciende de 4,5 las bacterias fermentativas se ven inhibidas y la digestión se detiene (Zamora, 2001; Hernández, 1993).

Durante el funcionamiento del sistema experimental el pH del agua, tanto del influente como del efluente presenta leves fluctuaciones normales durante la fase de arranque de sistemas anaerobios. Generalmente manteniéndose entre los valores de 7-8 tanto en ambos FAFA como en el agua residual cruda durante la etapa de evaluación.

La mayor fluctuación observada en el pH durante el arranque del sistema fue luego de la recirculación del contenido de los FAFA y el inóculo agregado, para aumentar el contacto de este último con los medios filtrantes y acelerar el proceso de formación de película bacteriana sobre estos. En este caso el pH llegó hasta valores de 9,94 en el FAFA 2 de tapas plásticas, hasta 8,66 en el FAFA 1 de piedra, mientras que en el FAFA 3 de cilindros



de espuma se mantuvo en 7,5. Los valores tan altos de pH alta basicidad de  $\text{CaCO}_3$  como nutriente y de la soda caustica agregada al inoculo para aportar la suficiente alcalinidad para favorecer los procesos de acidogénesis y acetogénesis que ocurren durante el proceso de digestión anaerobia (Kiely, 1999).

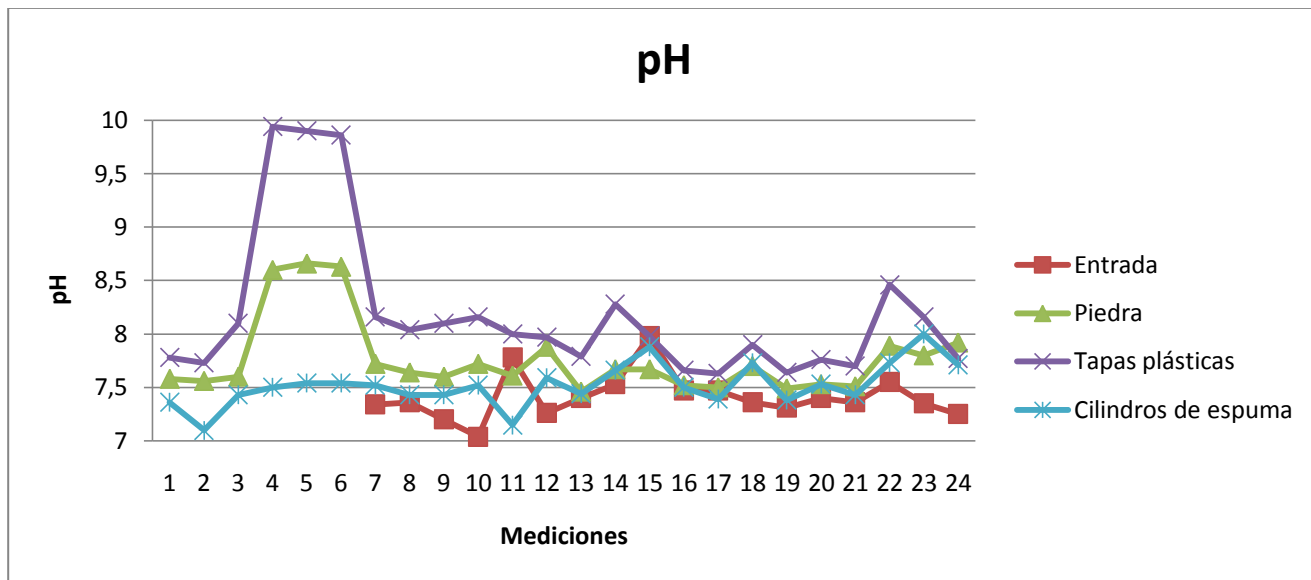


Figura 10. Comportamiento del pH durante la evaluación de tres sistemas FAFA con medios de soporte diferentes.

## Alcalinidad

La alcalinidad es un parámetro importante en el control operacional tanto en el arranque como en la operación normal del sistema, pues amortigua los cambios de pH consumiendo los AGVs que se generan normalmente en el proceso anaerobio, el cual como ha sido mencionado anteriormente, es fundamental en cuanto al desarrollo de microorganismos en condiciones óptimas para que sus actividades no se vean inhibidas por cambios bruscos de pH del medio.

Los buenos resultados obtenidos en el funcionamiento de los FAFA, se atribuye a la alcalinidad adicionada durante la fase de arranque.

Los valores de alcalinidad que alcanzan apenas un máximo de 286, en el FAFA 3 de cilindros de espuma ni si quiera se acercan a los valores recomendados en la literatura, que sugieren que para una adecuada digestión anaerobia, se espera una alcalinidad entre 1000-

5000 (Sawyer et al, 2001). Sin embargo, estos valores tan bajos se deben probablemente a que la alcalinidad fue consumida por los AGVs generados durante la oxidación de la materia orgánica en las fases de acidogénesis y acetogénesis en el proceso anaerobio, amortiguando los posibles cambios en el pH.

Si bien es cierto fue un parámetro de control operacional que no cumplió con los valores óptimos, durante el funcionamiento del sistema no se tomaron medidas para aumentarlo, pues el pH del sistema completo siempre se mantuvo estable debido al tipo de agua residual que recibía, pues las aguas residuales de tipo domestico no tienden a tener cambios pronunciados en el pH como se puede notar en el comportamiento de dicho parámetro en el punto de muestreo de entrada, el cual siempre se mantuvo en valores entre 7-8 (Sawyer et al, 2001).

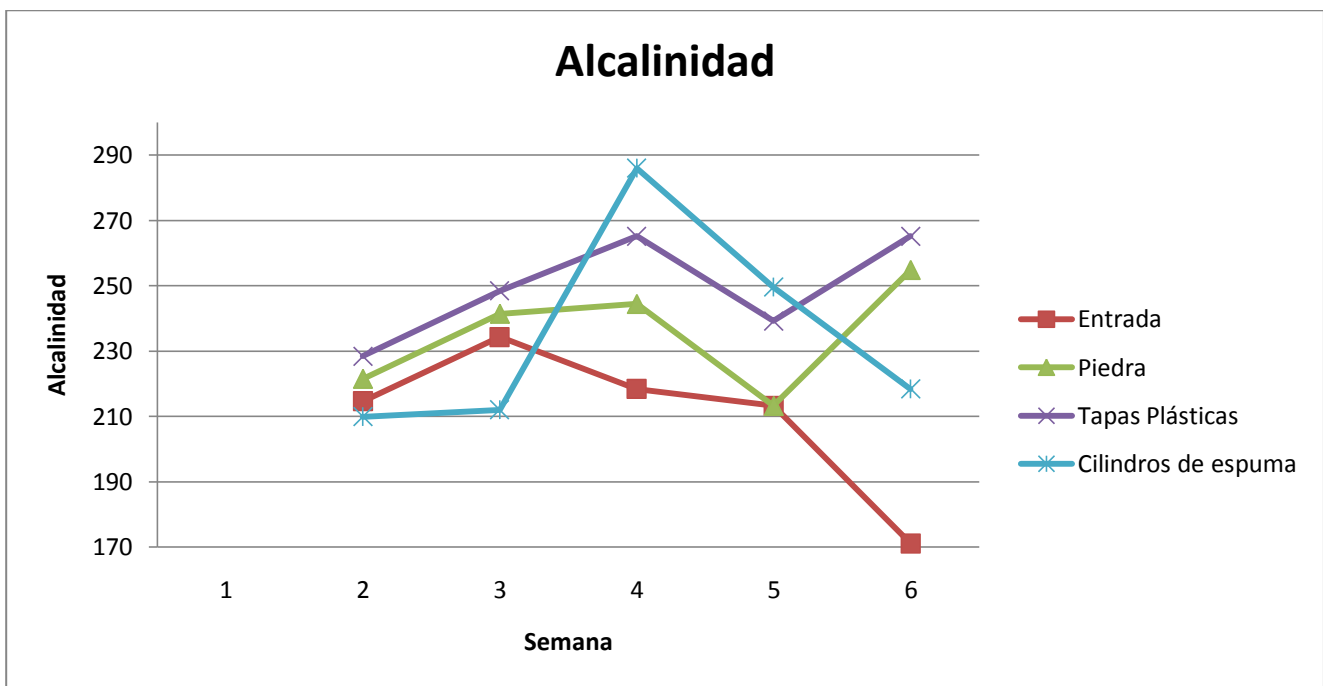


Figura 11. Comportamiento de la alcalinidad durante la evaluación de tres sistemas FAFA con medios de soporte diferentes.

## Turbiedad

El parámetro de turbiedad en el influente es un indicador de la carga de orgánica que tiene el agua residual cruda que entra al sistema, en especial la presencia de sólidos. En el

efluente representa la eficiencia física que posee el FAFA para remover material sólido y microbiológica en oxidación de materia orgánica. Es un claro indicador de DBO y DQO removida por el sistema, sin embargo, puede ser alterado por diversos factores como la presencia de ciertos microorganismos y características propias de los materiales filtrantes utilizados en el filtro (Deloya, A. 2008).

El FAFA 1 con piedra, presentó turbiedades muy bajas en el efluente durante las primeras semanas de evaluación, fue hasta las últimas tres semanas que la turbiedad de su efluente se vio aumentada considerablemente por la aparición de gran cantidad de algas que dieron un tono verde al agua, aún presentando esta indicadores de DBO y DQO bajos.

En cuanto al FAFA 2 con tapas plásticas mantuvo constante y en valores máximos de 28,4 NTU durante todo el funcionamiento de sistema, esto debido a las características de mayor resistencia al agua de las tapas plásticas por su dureza, así como el factor favorable de que en éste FAFA no hubo aparición de algas ni bacterias del azufre que aumentarían la turbiedad de su efluente como sucedió en los otros FAFAs.

Por último, el FAFA 3 con cilindros de espuma fue el que obtuvo los valores más altos de turbiedad en el efluente durante la fase de evaluación, aún así durante las primeras cuatro semanas la turbiedad del efluente de este FAFA se mantuvo en valores entre 21,1 NTU hasta 42 NTU, siempre menores a la turbiedad del influente. Durante las últimas dos semanas por la proliferación de bacterias rojas del azufre en el sistema, el parámetro de turbiedad llegó hasta valores de 62,9 NTU, inclusive por encima de la turbiedad del influente de 56,4 NTU.

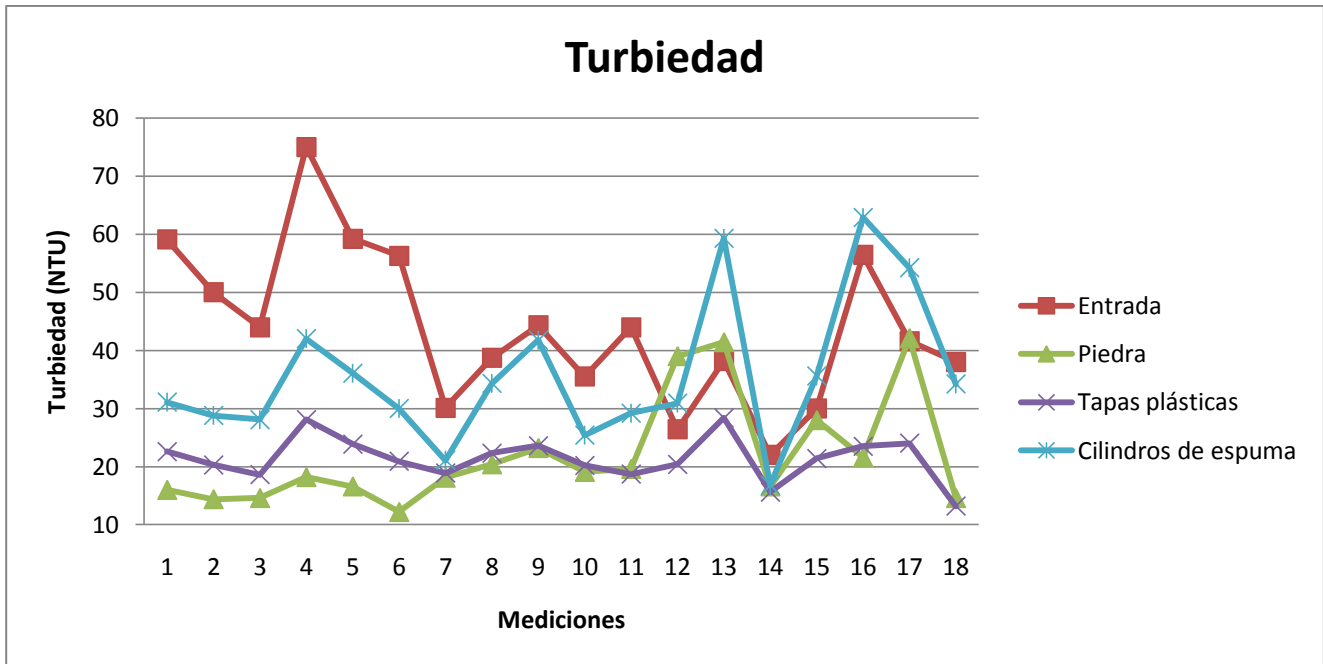


Figura 12. Comportamiento de la turbiedad durante la evaluación de tres sistemas FAFA con medios de soporte diferentes.

### Sólidos Suspendidos Totales

En el influente es un parámetro que permite tener una proyección de la cantidad de sustrato de materia orgánica para la digestión anaerobia que contiene el agua residual cruda, la cual reportó un valor máximo de 389 mg/L durante la segunda semana y un mínimo de 213 mg/L en la sexta y últimas semana de funcionamiento. Como es de esperarse en el agua residual cruda, tanto los sólidos suspendidos totales, como otros parámetros como DBO y DQO, presentan variaciones por la diferencia en la carga orgánica. Sin embargo, los valores reportados de sólidos suspendidos totales para el influente representan la disponibilidad de sustrato para los microorganismos en el sistema.

Los sólidos suspendidos totales se encuentran directamente relacionados al DBO y DQO, razón por la que en el efluente es un indicador importante que representa la capacidad microbiológica en oxidación de materia orgánica del FAFA.

En los tres FAFA's la remoción de sólidos suspendidos totales fue siempre menor a la cantidad de sólidos suspendidos totales en el influente, en el caso del FAFA 3 con cilindros de espuma, fue el que obtuvo el valor más bajo de éste parámetro con 123,5 mg/L en la

quinta semana, es decir, una remoción de 193,5 mg/L , sin embargo en tan solo una semana aumentó hasta 320 mg/L, atribuido a la rápida proliferación de bacterias rojas del azufre en las últimas semanas.

En cuanto al menor resultado reportado en la última semana de evaluación en cuanto a sólidos totales, se puede destacar el FAFA 2 con tapas plásticas que durante todo el proceso siempre reportó la menor cantidad de sólidos y en la última semana obtuvo el valor más bajo de 138 mg/L. Dado este resultado, se considera de mayor eficiencia en reducción de sólidos suspendidos totales al medio filtrante constituido por tapas plásticas.

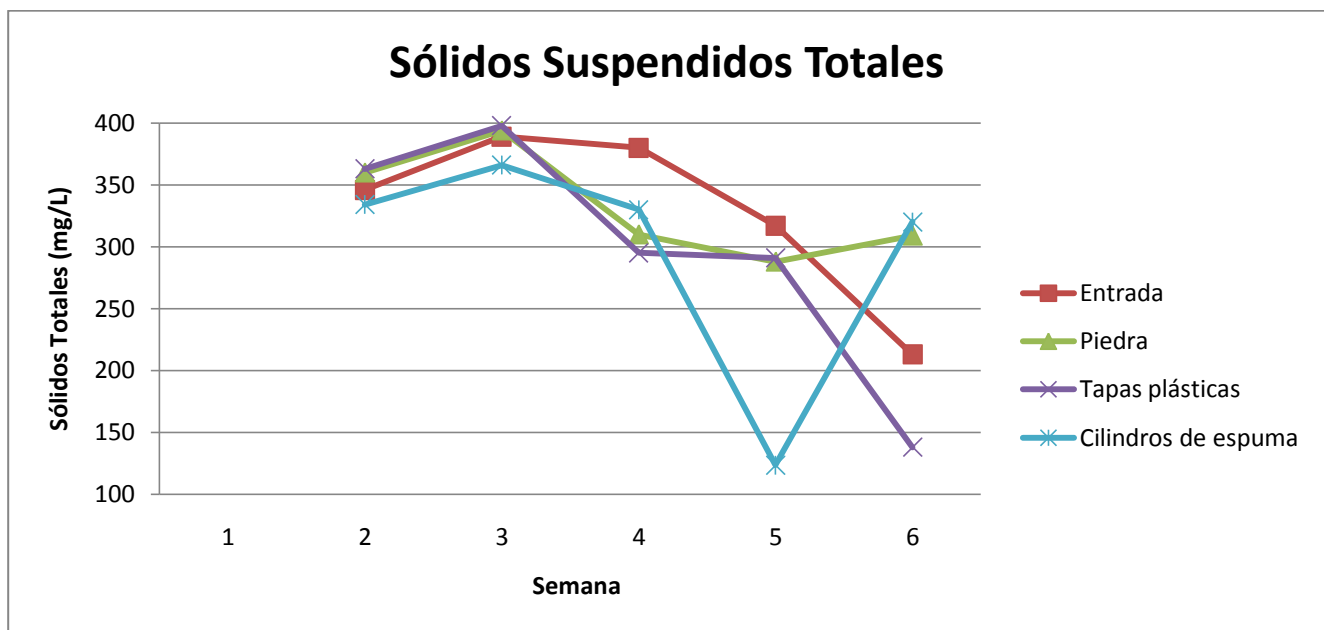


Figura 13. Comportamiento de sólidos suspendidos totales durante la evaluación de tres sistemas FAFA con medios de soporte diferentes.

## DQO

En cuanto a la remoción de DQO también se obtuvieron resultados muy positivos en los tres FAFAs, con valores reportados siempre por debajo del DQO de entrada y también menores al máximo de 150 mg/L exigido por la normativa legal. Ambos materiales filtrantes en evaluación, tanto las tapas plásticas como los cilindros de espuma, tuvieron comportamientos favorables y muy similares a la piedra comúnmente utilizada para este propósito.

En una comparación detallada de los dos materiales filtrantes en evaluación, se puede constatar una menor DQO en el efluente correspondiente al FAFA 2 de tapas plásticas, por consiguiente, una mayor eficiencia en su remoción. Respecto a este mismo material, también cabe destacar la estabilidad que mantiene el parámetro de DQO durante todo el periodo de evaluación, con un valor mínimo de 19,0 mg/L y mayor de 53 mg/L, convirtiéndolo en el material más deseable en cuanto a disminución de DQO se refiere.

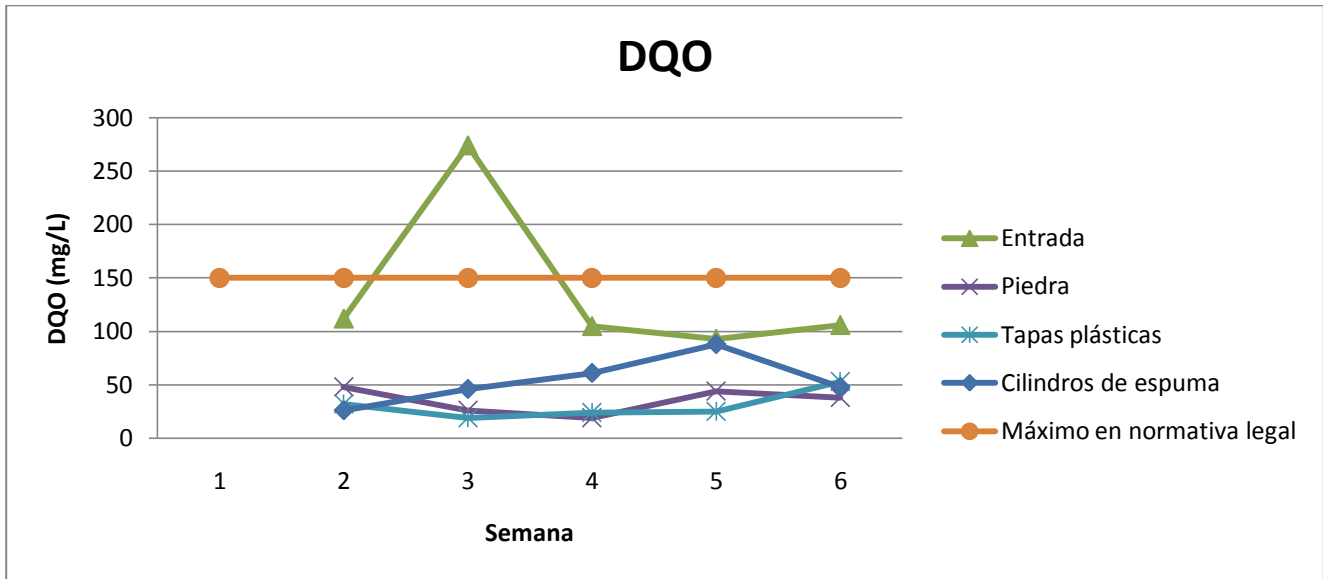


Figura 14. Disminución de DBO durante la evaluación de tres sistemas FAFA con medios de soporte diferentes.

## DBO

Durante la etapa de arranque de un sistema de tratamiento de aguas residuales es común observar fluctuaciones en indicadores de calidad del agua, tal y como ocurrió con la DBO que presentó cambios importantes en tiempos de tan solo una semana, más comúnmente en el agua residual cruda, aspecto común por la variabilidad de la carga contaminante en aguas domésticas.

No obstante, pese a los cambios bruscos en el influente, se pudo observar un comportamiento constante y positivo con el transcurso del tiempo, en el cual, la DBO en efluentes de los tres FAFA se redujo progresivamente con el paso del tiempo, demostrando una estabilización progresiva en el sistema que llegó a su punto más estable a partir de la

cuarta semana y se mantuvo similar durante las siguientes dos semanas. Los tres FAFAs siempre obtuvieron eficiencias aceptables en remoción de DBO, aun mayor de la que se espera de este tipo de sistemas que se aproxima a valores entre 30-50% (De Lemos Cherincharo. 1997).

Es de gran importancia destacar, que a partir de las cuarta semana, no solo se observa el alcance de una estabilidad en la remoción de DBO, sino también, que se registran valores siempre por debajo de 50 mg/L, máximo exigido por la normativa legal nacional.

En cuanto a los dos materiales en evaluación, con respecto a remoción de DBO, se comportan de manera casi exacta, obteniendo valores muy similares durante el periodo de prueba.

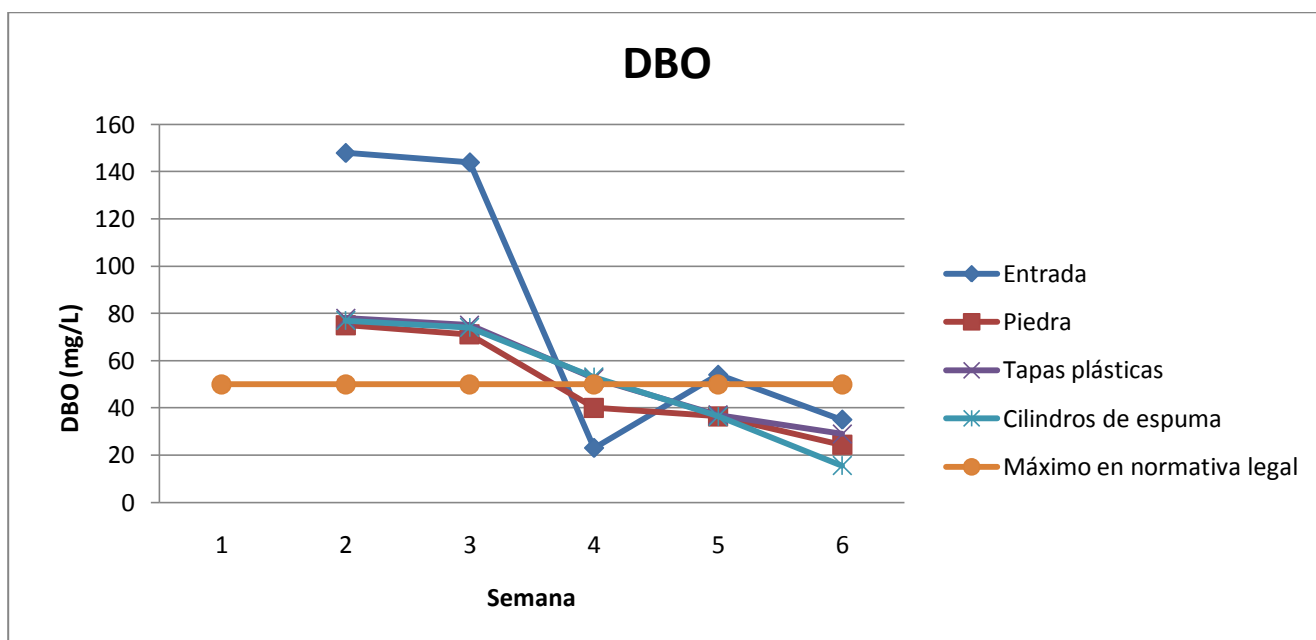


Figura 15. Disminución de DQO durante la evaluación de tres sistemas FAFA con medios de soporte diferentes.

### Eficiencia en remoción de DBO

Según la literatura, al ser los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente generalmente tienen eficiencias en remoción de DBO de 30-50% (De Lemos Cherincharo. 1997), valores que respaldan con una gran aproximación los resultados obtenidos durante el proyecto,

incluso a partir de la segunda semana de evaluación, presentando algunas leves fluctuaciones durante las semanas siguientes pero manteniéndose en valores dentro de ese intervalo. Siendo utilizados estos sistemas como tratamientos secundarios de aguas residuales domésticas, tanto la piedra, como los materiales en evaluación presentan eficiencias en remoción de DBO aceptables para ser utilizados como medios filtrantes en Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente, con promedios en remoción de DBO de 37,55% en el FAFA 1 con piedra, 31,97% en el FAFA 2 con tapas plásticas y 42,06% en el FAFA 3 con cilindros de espuma.

Correspondiente a los datos obtenidos en la cuarta semana, se reportaron eficiencia negativas en los tres FAFAs, es decir, la DBO de los tres efluentes fue mayor que la del influente, que se atribuye a la presencia de tóxicos en el agua residual cruda como lo son detergentes, y en este caso, según los Informes de control operacional de la Planta de tratamiento de aguas residuales de la Urbanización Iztarú, en el ITCR correspondientes a los meses de septiembre y octubre de 2010, se reportan valores de detergentes entre 4,1 y 10,1 mg/L. Por esta razón se decidió eliminar los datos de esta semana.

Las altas eficiencias obtenidas en remoción de DBO se deben al buen arranque producto de la inoculación de lodo anaerobio y agregados de agentes como soda cáustica y  $\text{CaCO}_3$  para aumentar la alcalinidad en los sistemas que propiciaron el rápido desarrollo de microorganismos durante el arranque.

Cuadro 12. Eficiencia en remoción de materia orgánica expresada como DBO en tres sistemas FAFA con diferentes medios de soporte.

<b>Eficiencia en remoción de DBO (%)</b>	<b>Semana 1</b>	<b>Semana 2</b>	<b>Semana 3</b>	<b>Semana 4</b>	<b>Semana 5</b>	<b>Semana 6</b>
<b>Piedra</b>	-	36,44	50,62	-*	32,59	30,57
<b>Tapas Plásticas</b>	-	31,36	47,92	-*	31,48	17,14
<b>Cilindros de Espuma</b>	-	31,35	48,61	-*	32,59	55,71

Fuente: Elaboración propia. Alvarado, A.

\* Dato eliminado



## Eficiencia en remoción de DQO

Tal y como sucedió con las eficiencias en remoción de la DBO, las altas eficiencias obtenidas en remoción de DQO se deben al buen arranque producto de la inoculación de lodo anaerobio y agregados de agentes como soda cáustica y  $\text{CaCO}_3$  para aumentar la alcalinidad en los sistemas que propiciaron el rápido desarrollo de microorganismos durante el arranque. Alcanzando eficiencias sumamente altas en remoción de DQO de hasta 93,07% en el FAFA 2 con tapas plásticas.

Respecto a la remoción de DQO en los tres FAFAs se reportaron eficiencias altas, con promedios de 69,28% en el FAFA 1 con piedra, 72,95% en el FAFA 2 con tapas plásticas y 52,40% en el FAFA 3 con cilindros de espuma.

Cuadro 13. Eficiencia en remoción de materia orgánica expresada como DQO en tres sistemas FAFA con diferentes medios de soporte.

<b>Eficiencia en remoción de DQO (%)</b>	<b>Semana 1</b>	<b>Semana 2</b>	<b>Semana 3</b>	<b>Semana 4</b>	<b>Semana 5</b>	<b>Semana 6</b>
<b>Piedra</b>	-	57,14	90,51	81,90	52,69	64,15
<b>Tapas Plásticas</b>	-	71,43	93,07	77,14	73,12	50,00
<b>Cilindros de Espuma</b>	-	76,79	83,21	41,90	-*	54,72

Fuente: Elaboración propia. Alvarado, A.

\* Dato eliminado

## Características del el efluente de los FAFAs

A continuación se presenta un cuadro resumen en el que se comparan los valores promedio de todos los parámetros evaluados para los tres FAFAs del sistema con diferentes medios filtrantes.

Cuadro 14. Características del el efluente y remoción de materia orgánica en tres sistemas FAFA con diferentes medios de soporte.

Promedio / FAFA	Piedra	Tapas plásticas	Cilindros de espuma
Temperatura (°C)	23,11	<u>23,87</u>	23,75
pH	7,77	<u>8,19</u>	7,52
Alcalinidad	235,06	<u>249,28</u>	235,18
Turbiedad (NTU)	21,98	<u>21,37</u>	35,66
SST (mg/L)	332,2	297	<u>294,7</u>
DBO (mg/L)	<u>49,36</u>	54,30	51,18
Eficiencia DBO (%)	37,55	31,97	<u>42,06</u>
DQO (mg/L)	35,0	<u>30,6</u>	53,8
Eficiencia DQO (%)	69,28	<u>72,95</u>	52,40

Fuente: Elaboración propia. Alvarado, A.

Al ser comparados los valores promedios de los resultados reportados por cada parámetro, para los tres FAFAs con diferentes medios filtrantes durante todo el proceso de evaluación, se logra observar que en los FAFAs de ambos materiales en evaluación, FAFA 2 con tapas plásticas y FAFA 3 con cilindros de espuma se obtuvieron resultados muy similares al medio tradicional de piedra utilizado en estos sistemas. Incluso las tapas plásticas obtuvieron mejores resultados de los tres materiales en 6 de los 9 parámetros evaluados, los cilindros de espuma en 2 de los 9 parámetros evaluados y las piedras tan solo en 1 de los 9 parámetros evaluados obtuvo los mejores resultados.

No obstante las diferencias de los promedios de los resultados en todos los parámetros evaluados fueron muy similares entre los tres FAFAs con diferentes medios de soporte, lo que demuestra un comportamiento y una funcionalidad similar o mejor de los materiales alternativos en evaluación que el medio tradicional de piedra. Lo cual indica un potencial de factibilidad para ser utilizados como medios de filtrantes o de soporte en sistemas FAFA.

## Oxígeno Disuelto

Las bacterias metanogénicas son estrictamente anaerobias, por lo cual sólo algunas conservan su viabilidad luego de ser expuestas a una entrada masiva de O<sub>2</sub> (Arango, 2001). Razón por la que se consideró un parámetro importante de control operacional para procurar las condiciones óptimas para que el proceso de metanogénesis, fundamental en la digestión anaerobia.

Lo más recomendable es que el proceso se desarrolle en ausencia de oxígeno, si bien es cierto, en este caso se monitoreó el Oxígeno Disuelto desde el arranque, el valor más bajo reportado fue de 0,19 mg/L, sin embargo, el más alto fue de 0,36 mg/L, dichos valores pueden ser levemente inhibidores pero aún así, son suficientemente bajos para no influir de manera importante en el proceso de metanogénesis.

## Eficiencias en remoción de DBO Y DQO en el tratamiento físico, tratamiento biológico del sistema completo

El sistema completo utilizado en el proyecto consta de un sedimentador como tratamiento primario seguido de un FAFA, a continuación se presenta un cuadro resumen que muestra la eficiencia que se puede conseguir por el sistema completo y en cada uno de sus dos fases, tratamiento primario o físico que es el tanque sedimentador y tratamiento secundario o biológico que es el FAFA, tal y como se usa comúnmente este tipo de sistemas.

Si bien es cierto, las eficiencias en remoción de materia orgánica son bajas, se ven complementadas con buenas eficiencias reportadas en el tratamiento secundario.

Las eficiencias en remoción de DBO reportadas para cada FAFA en cuanto al sistema completo son de 54,00% en el FAFA con piedra, 49,39% en el FAFA con tapa plásticas y 52,30% en el FAFA con cilindros de espuma como medio de soporte, valores relativamente bajos para la eficiencia esperada al menos un 60% (Castaño Rojas, M. Paredes Cuervo, D., 2002), resultados que se atribuyen a la alta presencia de tóxicos como detergentes en el agua residual del influente.

En cuanto a las eficiencias en remoción de DQO reportadas en cuanto al sistema completo, se obtienen valores mucho más favorables que los de remoción de DBO, obteniendo valores de 78,30% en el FAFA con piedra, 81,03% en el FAFA con tapa plásticas y 66,65% en el FAFA con cilindros de espuma como medio de soporte. En este caso los tres FAFA reportan eficiencias muy superiores al 60% esperado.

Cuadro 15. Eficiencias de remoción en DBO y DQO correspondientes al tratamiento físico, tratamiento biológico y al sistema completo para tres sistemas FAFA con diferentes medios de soporte.

	Tratamiento Físico		Tratamiento Biológico		Sistema Completo	
	Eficiencia DBO (%)	Eficiencia DQO (%)	Eficiencia DBO (%)	Eficiencia DQO (%)	Eficiencia DBO (%)	Eficiencia DQO (%)
<b>Piedra</b>	24,70	14,45	37,55	69,28	54,00	78,30
<b>Tapas plásticas</b>	24,70	14,45	31,97	72,95	49,39	81,03
<b>Cilindros de espuma</b>	24,70	14,45	42,06	52,40	52,30	66,65

Fuente: Elaboración propia. Alvarado, A.

## CAPÍTULO X: CONCLUSIONES

- Siendo utilizados estos sistemas como tratamientos secundarios de aguas residuales domesticas, los materiales en evaluación, tanto las tapas plásticas como los cilindros de espuma, presentan eficiencias en depuración de agua, similar o mejor que el medio tradicional de piedra en el caso de las tapa plásticas. Por lo que se comprueba que su uso como medio de soporte en Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente es viable técnicamente.
- El mayor factor por el cual se obtuvieron eficiencias elevadas en los sistemas FAFA fue el buen arranque, las eficiencias obtenidas en remoción de DBO y DQO se deben al buen arranque producto de la inoculación de lodo anaerobio y agregados de agentes como soda caustica y  $\text{CaCO}_3$  para aumentar la alcalinidad en los sistemas que propiciaron el rápido desarrollo de microorganismos.
- El hecho de que el caudal entrante al sistema fuera constante fue un factor influyente en las altas eficiencias de los sistemas FAFA, además de la presencia del tanque distribuidor de caudal, pues dicha unidad funcionó como un tanque de compensación, regulando el caudal entrante a cada FAFA, lo que evita choques hidráulicos dentro de dichos sistemas, evitando así alterar factores como el tiempo de retención ( $T_r$ ), además de homogenizar el agua antes de entrar a los FAFAs lo que reduce los choques de carga orgánica.
- Las eficiencias de los FAFAs, tanto en DQO como DBO empezaron a reducirse en las últimas semanas posiblemente por el aumento en la eficiencia del tanque sedimentador, dicho factor es causante de la reducción de sustrato entrante a los FAFAs, reduciendo así su carga biológica, carga orgánica, y carga orgánica volumétrica, afectando así la eficiencia de dichos sistemas.
- Para tener un buen arranque nunca debe permitirse la acidificación del sistema, que no bajen de un pH de 5 (Zamora, 2001; Hernández, 1993). Como puede observarse

en los resultados del cuadro 04 y 05 de la fase de arranque, incluso siendo siempre superiores a 6. Y esto se logró aumentando la alcalinidad del sistema agregando soda caustica y  $\text{CaCO}_3$ . Esta alcalinidad propició el consumo de AGVs que se generan principalmente durante el periodo de arranque evitando que estos inhibieran el proceso de digestión anaerobia (Sawyer et al, 2001).

- El pH no menor a 5, propició las condiciones óptimas para el crecimiento de las bacterias anaerobias metanogénicas, acidogénicas, acetogénicas e hidrolíticas que son fundamentales en todas las fases de la digestión anaerobia (Kiely, 1999).

## CAPÍTULO XI: RECOMENDACIONES

- A causa del corto periodo de evaluación realizado durante el desarrollo del proyecto, es recomendable continuar con la evaluación de los materiales alternativos, para observar su comportamiento a largo plazo y luego de haber llegado los sistemas a una mayor estabilización.
- Luego de comprobada la viabilidad técnica del uso de ambos materiales como medio filtrante o de soporte en sistemas FAFAs, se recomienda como siguiente paso el análisis de costos de este tipo de sistemas con la implementación de los nuevos materiales para comprobar su factibilidad económica.
- Es recomendable realizar análisis de laboratorio para determinar la concentración de detergentes en el influente, pues se considera uno de los causantes de la reducción de eficiencia en remoción de DBO del sistema, siendo estos tóxicos y nocivos para los microorganismos anaerobios.
- Según los resultados obtenidos, se recomienda incluir un tanque de compensación que regule el caudal entrante al sistema y evite choques hidráulicos y de carga orgánica, para así mejorar la eficiencia del sistema.
- Por ser la digestión anaerobia un proceso termosensible, se recomienda que este tipo de sistemas se encuentren enterrados para favorecer a mantener la temperatura óptima para el proceso de metanogénesis de 33-38°C.
- En FAFAs contruidos de fibra de vidrio como en este caso, debe cuidarse la temperatura aún más que en FAFAs contruidos de concreto.

- Debe analizarse y tomar las medidas necesarias en cuanto a características del suelo como compresibilidad y expansión por humedad antes de la instalación y enterrar el sistema.
- Evaluar los costos y requerimientos de operación y mantenimiento a mediano y largo plazo, dando énfasis a problemas de obstrucción y durabilidad de los materiales alternativos.
- Las características climáticas del sitio deben ser lo más cálidas posibles.



## CAPITULO XII: REFERENCIAS

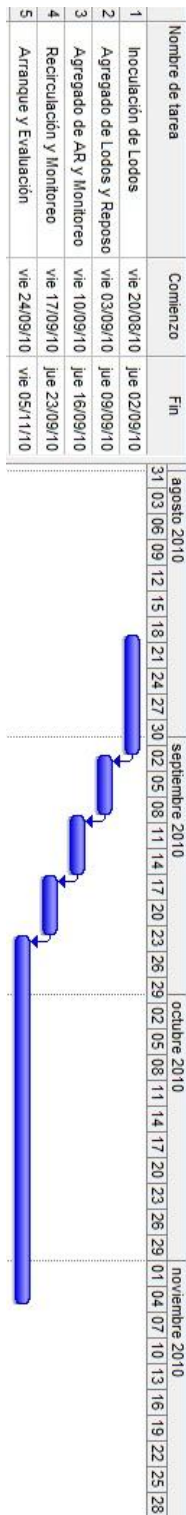
- De Lemos Cherincharo, C.: Reactores Anaerobios. Principio del Tratamiento Biológico de Aguas Residuales. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad de Minas Gerais, Belo Horizonte Brasil, 1997. p. 202 – 224.
- Arango, M. 2001. Universidad de Antioquia. Colombia. <http://ingenieria.udea.edu.co/grupos/microbiol/> (30/08/10).
- Deloya, A. 2008. Curso de Tratamiento de Aguas Residuales, II Semestre. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Giraldo, E. 1993. Tratamiento anaerobio de las aguas residuales domésticas. Revista Uniandes.
- Hernández, A. 1993. Tratamiento de aguas residuales, basuras, y escombros en el ámbito rural. Escuela de ingenieros de Caminos de Madrid. Editorial Agrícola Española, S.A. p 293.
- Castaño, J., Paredes, D. Uso de aros de guadua en filtros anaerobios para el tratamiento de aguas residuales. Seminario – Taller Avances en la investigación sobre Guadua, Pereira, 2002. p. 1- 6.
- Kiely, G. 1999. Fundamento, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. 1º Edición. España. McGraw Hill. p 720.
- Imfia. 2002. Tratamiento mediante reactores anaerobios. Universidad de la República de Montevideo. Uruguay.
- Sawyer, C. McCarty, P y Parking, G. 2001. Química para ingeniería ambiental. 4ta Edición. Bogotá. Colombia. Editorial McGraw Hill. p 715.

- Zambrano, D.: Tratamiento anaerobio de las aguas mieles del café. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Colombia, 1994. p. 13 – 28.
- Zamora, S. 2001. Análisis de factibilidad técnica para la utilización de un reactor UASB en las purgas de equipos de sedimentación utilizados en el tratamiento de aguas residuales avícolas. Trabajo Final de Graduación. Universidad de Costa Rica. p 96.
- Roussos, S., Licon, R., Gutiérrez, M.: Memorias: I Seminario Internacional sobre Biotecnología en la Agroindustria. Instituto Mexicano del Café, México, 1989. p. 103 – 119.
- Mejía, G.: Digestión Anaerobia. Universidad Autónoma de Yucatán, México, 1992. p. 17 – 35.
- Orozco, C., Cantarero, V., Rodríguez, J.: Manual Didáctico de Tratamiento de Residuos del Café. Seminario-Taller: Tratamiento Anaeróbico de los Residuos del Café: Una Alternativa Energética para la Disminución Impacto Ambiental del Sector. Promecafe, Matagalpa, 1989. P. 43 – 48.
- Súa Pastrana, J. Diagnóstico Optimización del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente de Laboratorios Griffith de Centroamérica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 2006.
- Marañón, E.: Generación de residuos de ganadería vacuna (purines) en Asturias. Problema y Tratamiento. Servicio de Publicaciones Universidad de Oviedo, Asturias, 1997. P. 61 – 81.
- FAO América Latina. Prevención de la Contaminación del Agua por la Agricultura y Actividades. FAO, Chile, 1992. p. 114 – 123.

- Paredes Cuervo, D.  
<http://www.utp.edu.co/investigacion/proyectos/detalleProyectoHTML.php?cod=239>.  
Seminario – Taller Avances en la investigación sobre Guadua, Pereira, 2002
- Mansur Aisse, M. <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt27/hdt027.html>. Cepis, 2000.
- Fair Gordon, M.: Ingeniería sanitaria y de aguas residuales. Editorial Limusa, México, 1980.
- Castaño Rojas, M. Paredes Cuervo, D. Uso de aros de guadua en Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente para el tratamiento de aguas residuales. Seminario - Taller Avances en la investigación sobre Guadua. Colombia. 2002.
- Labor.: Tratamiento y depuración de las aguas residuales. Barcelona, España, 1977.
- Gamrasni, M.: Aprovechamiento agrícola de aguas negras urbanas. . Editorial Limusa, México, 1980.
- Crites, R. & Tchobanoglous, G. Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones. McGraw Hill, Bogotá, 2000.
- Bellapart Vila, C.: Agricultura Biológica en Equilibrio con la Agricultura Química: Fertilización Natural, La Agricultura del Futuro. Aedos, Barcelona, 1988.
- Rittmann, B. Biotecnología del Medio Ambiente. McGraw Hill, Madrid, 2001.

# ANEXO A: DIAGRAMA DE GRANT DE FASES DEL PROYECTO

## Cronograma de fases del proyecto



## ANEXO B: RESULTADOS DE LABORATORIO

### RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO

<b>TIPO DE MUESTRA:</b> AGUA RESIDUAL <b>ESTADO DE LA MUESTRA:</b> LIQUIDA <b>PROCEDENCIA:</b>		<b>FECHA DE MUESTREO:</b> 11/10/10 <b>FECHA INICIO ANÁLISIS :</b> 15/10/10 <b>FECHA DE INFORME:</b> 19/11/10 <b>Nº DE INFORME:</b> 661010		
<b>OBJETIVO DEL ANÁLISIS:</b> <input checked="" type="checkbox"/> CONTROL <input type="checkbox"/> EVALUACIÓN				
ANALISIS	RESULTADOS			
	01	02	03	04
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L) *	(144±16)	(71,1±4,1)	(75,0±4,1)	(74,0±4,1)
Sólidos Totales (mg/L) *	(389,0±7,0)	(394,0±7,0)	(398,0±7,0)	(366,0±7,0)
-----Ultima línea-----				

1. Entrada a Filtros
2. Salida Filtros 1
3. Salida Filtros 2
4. Salida Filtros 3

## RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO

<b>TIPO DE MUESTRA:</b> AGUA RESIDUAL <b>ESTADO DE LA MUESTRA:</b> LIQUIDA <b>PROCEDENCIA:</b>	<b>FECHA DE MUESTREO:</b> 18/10/10 <b>FECHA INICIO ANÁLISIS :</b> 22/10/10 <b>FECHA DE INFORME:</b> 19/11/10 <b>Nº DE INFORME:</b> 731010			
<b>OBJETIVO DEL ANÁLISIS:</b> <input checked="" type="checkbox"/> CONTROL <input type="checkbox"/> EVALUACIÓN				
ANALISIS	RESULTADOS			
	01	02	03	04
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L) *	(23±16)	(40,0±4,1)	(52,5±4,1)	(53,0±4,1)
Sólidos Totales (mg/L) *	(380,0±7,0)	(310,0±7,0)	(295,0±7,0)	(330,0±7,0)
-----Ultima línea-----				

1. Entrada a Filtros
2. Salida Filtros 1
3. Salida Filtros 2
4. Salida Filtros 3

## RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO

<b>TIPO DE MUESTRA:</b> AGUA RESIDUAL <b>ESTADO DE LA MUESTRA:</b> LIQUIDA <b>PROCEDENCIA:</b>	<b>FECHA DE MUESTREO:</b> 25/10/10 <b>FECHA INICIO ANÁLISIS :</b> 29/10/10 <b>FECHA DE INFORME:</b> 19/11/10 <b>Nº DE INFORME:</b> 1011010			
<b>OBJETIVO DEL ANÁLISIS:</b> <input checked="" type="checkbox"/> CONTROL <input type="checkbox"/> EVALUACIÓN				
ANALISIS	RESULTADOS			
	01	02	03	04
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L) *	(54,0±2,0)	(36,4±1,0)	(37,0±1,0)	(36,4±1,0)
Sólidos Totales (mg/L) *	(317,0±7,0)	(288,0±7,0)	(291,0±7,0)	(123,5±7,0)
-----Ultima línea-----				

1. Entrada a Filtros
2. Salida Filtros 1
3. Salida Filtros 2
4. Salida Filtros 3

## RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO

<b>TIPO DE MUESTRA:</b> AGUA RESIDUAL <b>ESTADO DE LA MUESTRA:</b> LIQUIDA <b>PROCEDENCIA:</b>	<b>FECHA DE MUESTREO:</b> 01/11/10 <b>FECHA INICIO ANÁLISIS :</b> 05/11/10 <b>FECHA DE INFORME:</b> 19/11/10 <b>Nº DE INFORME:</b> 181110				
<b>OBJETIVO DEL ANÁLISIS:</b> <input checked="" type="checkbox"/> CONTROL <input type="checkbox"/> EVALUACIÓN					
ANALISIS	RESULTADOS				
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%; text-align: center;">01</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">02</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">03</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">04</td> </tr> </table>	01	02	03	04
01	02	03	04		
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L) *	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%; text-align: center;">(35,0±2,0)</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">(24,3±1,0)</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">(29,0±1,0)</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">(15,5±1,0)</td> </tr> </table>	(35,0±2,0)	(24,3±1,0)	(29,0±1,0)	(15,5±1,0)
(35,0±2,0)	(24,3±1,0)	(29,0±1,0)	(15,5±1,0)		
Sólidos Totales (mg/L) *	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%; text-align: center;">(213,0±7,0)</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">(309,0±7,0)</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">(138,0±7,0)</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">(320,0±7,0)</td> </tr> </table>	(213,0±7,0)	(309,0±7,0)	(138,0±7,0)	(320,0±7,0)
(213,0±7,0)	(309,0±7,0)	(138,0±7,0)	(320,0±7,0)		
-----Ultima línea-----					

1. Entrada a Filtros
2. Salida Filtros 1
3. Salida Filtros 2
4. Salida Filtros 3



## ANEXO C: HOJA DE CÁLCULO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

Cuadro 1. Valores promedio de parámetros operacionales y de diseño de entrada en los tres sistemas FAFA.

Parámetro	Valor
DQO (mg/L)	138,0
DBO (mg/L)	65,0
SST (mg/L)	79,0
SSV (mg/L)	56,0
Q (m <sup>3</sup> /día)	1,33
V (Volumen del FAFA) (m <sup>3</sup> )	1,0
Tr (días)	1,0
Carga Biológica (CB) (KgDQO/KgSSV)	2,50
CO (KgDQO/día)	0,30
COV (KgDQO/día * m <sup>3</sup> )	0,40

Fuente: Elaboración propia. Alvarado, A.

### CÁLCULOS

$$CO = \frac{DQO * Q}{1000} = \frac{138 \frac{mg}{L} * 1,33 \text{ m}^3/\text{día}}{1000} = 0,30 \text{ KgDQO/día}$$

$$COV = \frac{CO}{V} = \frac{0,30 \text{ KgDQO/día}}{1 \text{ m}^3} = 0,3 \text{ KgDQO/día * m}^3$$

$$Tr = \frac{V}{Q} = \frac{1 \text{ m}^3}{1,33 \text{ m}^3/\text{día}} = 0,75 \text{ días} \approx 1 \text{ día}$$

$$CHV = \frac{Q}{V} = \frac{1,33 \text{ m}^3/\text{día}}{1 \text{ m}^3} = 1,33 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$CB = \frac{DQO}{SSV} = \frac{138 \text{ mg/L}}{56 \text{ mg/L}} = 2,46 \text{ KgDQO/KgSSV}$$

## ANEXO D: CARACTERÍSTICAS DEL INFLUENTE DE URBANIZACIÓN IZTARÚ

### Características del influente

A continuación se presentan en el Cuadro 1 los valores promedio de parámetros de control operacional de interés para el proyecto. Dichos resultados fueron obtenidos de los Informes de control operacional. Planta Urbanización Iztarú en el ITCR y corresponden a siete semanas entre los meses de setiembre y octubre de 2010

Cuadro 1. Valores promedio del agua residual cruda influente proveniente de Urbanización Iztarú (Septiembre y octubre, 2010)

Parámetro/ Semana	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Promedio
DQO (mg/L)	319,0	160,0	102,3	174,0	128,0	136,0	110,0	161,3
DBO (mg/L)	163,0	130,0	86,0	116,0	83,0	95,0	78,0	107,3
SST (mg/L)	114,0	90,0	60,0	72,0	74,0	60,0	80,0	79,0
pH	7,87	8,03	7,60	8,00	7,19	7,03	6,96	7,53
Temperatura (°C)	28,3	25,2	25,6	24,2	25,0	24,3	25,8	25,5
SSed (mg/L)	6,0	2,0	2,1	5,0	6,0	-*	4,0	4,2
Detergentes (mg/L)	6,5	7,0	4,1	6,2	-*	10,1	8,1	7,0

Fuente: Informes de control operacional. Planta Urbanización Iztarú, ITCR (Septiembre y octubre, 2010)

\* Dato no reportado

## ANEXO E: REGISTRO FOTOGRÁFICO



Figura 1. Recipiente en el cual se reposó el lodo anaerobio.



Figura 2. Excavación de huecos para la instalación del sistema experimental.



Figura 3. Piezas prefabricadas del sistema experimental.



Figura 4. Alimentación de agua residual del sistema experimental. Entrada en tanque de sedimentación.





Figura 5. Caja de registro de la cual se bombeó el agua residual para la alimentación del sistema experimental.



Figura 6. Salida de efluentes de los tres FAFAs hacia el canal de salida de las lagunas.



Figura 7. Tanque bifurcador de caudal, distribuidor entre el tanque sedimentador y los FAFAs.



Figura 8. FAFA 1 con piedra como medio filtrante.





Figura 9. FAFA 2 con tapas plásticas como medio filtrante.



Figura 10. FAFA 3 con cilindros de espuma como medio filtrante.