

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN AMBIENTAL Y SANITARIA DE DOS
SISTEMAS INDIVIDUALES DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE LA CONSTRUCCIÓN DE
PROTOTIPOS EN ESCALA NATURAL**

Informe de Trabajo de Graduación para obtener el grado de
Licenciatura en Ingeniería Civil

Preparado por:

Hazel A. Serrano Salas

AGOSTO, 2005

Serrano Salas, Hazel Adriana

Evaluación ambiental y sanitaria de dos sistemas individuales de tratamiento de aguas residuales por medio de la construcción de prototipos en escala natural.

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil, - San José, C.R.:

H.A.Serrano S., 2005

131h: ils. – 15 refs.

RESUMEN

Actualmente, el país enfrenta una carencia de alcantarillados sanitarios. Ésto provoca que en la mayor parte del territorio nacional, se utilice el sistema de tanque séptico y zanjas de drenaje, como solución al problema de tratamiento y disposición de las aguas residuales domésticas. Las deficiencias en el planeamiento, construcción, diseño, operación y mantenimiento de estos sistemas, provocan que exista una gran contaminación de cuerpos de agua y mantos acuíferos. El objetivo de este proyecto es, evaluar el funcionamiento y la eficiencia de dos sistemas de tanque séptico, mejorados con la adición de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) y un filtro percolador, para determinar la conveniencia de su implantación como solución al problema antes citado.

Para la realización del proyecto, se describieron los sistemas (estructura física y familias que los utilizan). Posteriormente, se realizó una revisión de las dimensiones y características de los prototipos finales, con base en una serie de normativas, nacionales y extranjeras. Para evaluar su desempeño, se realizó un proceso de toma de muestras del agua residual en ambos sistemas. Éstas fueron analizadas en laboratorio, con el fin de determinar el valor de una serie de parámetros físico – químicos, los cuales permiten conocer la calidad del agua. Los resultados obtenidos, fueron utilizados para determinar la eficiencia del tanque séptico y el biofiltro, en remoción de algunos de los contaminantes presentes en el agua residual. Posteriormente, los resultados así obtenidos, fueron analizados e interpretados. Con la información y experiencia adquirida, se elaboró un manual de operación y mantenimiento para el sistema con FAFA, por ser el más funcional.

Ambos sistemas presentan eficiencias sumamente bajas en sus filtros, mientras que los tanques sépticos se comportan de manera satisfactoria, tomando en cuenta su resiente construcción. Después de concluido el proyecto, no se recomienda el sistema con filtro percolador, debido a los problemas funcionales de desprendimiento y arrastre de material biológico con el efluente. Se recomienda en cambio, poner en práctica y evaluar la efectividad de las recomendaciones que se proponen para el sistema con FAFA. Se concluye, que las deficiencias encontradas se deben principalmente al material filtrante utilizado, cuyo tamaño máximo era superior a los 10 cm, con espacios vacíos muy amplios. Además, juega un factor muy importante el factor cultural en cuanto al uso del agua, ya que en los fines de semana, se produce un aumento considerable en el caudal de aguas residuales producido, el cual altera negativamente el funcionamiento de los sistemas.

TANQUE SÉPTICO MEJORADO; FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE, FAFA, FILTRO PERCOLADOR; TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.

Ing. Freddy Bolaños
Escuela de Ingeniería Civil

RECONOCIMIENTOS

A Dios

A Pablo, a la distancia eres el motor que me impulsa.

A mis padres.

A mi madre y a Luis, gracias por años de sacrificio, amor y paciencia.

A Leslye, más que hermana eres un ángel guardián.

Al Ing. Freddy Bolaños, gracias por confiar en mí, por su ayuda, cooperación, paciencia, comprensión y dedicación.

A Roy y Francinie, gracias por su apoyo, compañía y amistad.

A Jonathan, gracias por darme una mano y unas ruedas cuando más lo necesité.

A todos los que contribuyeron para que este proyecto se llevara a cabo: Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, Constructora Coto y Cía, María Elena Campos y familia, Rodolfo Aguilar y familia.

COMITÉ ASESOR

Director: Ing. Freddy Bolaños Céspedes

Ing. Ana Lorena Arias

Ing. Irene Campos

Ing. Elías Rosales

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Metodología.....	4
1.3.1 Descripción de las obras.....	4
1.3.2 Revisión de los diseños existentes.....	5
1.3.3 Desempeño de los sistemas de tratamiento.....	5
1.3.4 Análisis de resultados.....	5
1.3.5 Elaboración de manual de operación y mantenimiento.....	6
1.3.6 Elaboración del documento escrito.....	6
1.4 Alcances.....	7
1.4.1 Específicos.....	7
1.4.2 Temporales.....	7
1.5 Limitaciones.....	7
1.5.1 Temporales.....	7
1.5.2 De construcción.....	8
1.5.3 De representatividad de las muestras.....	8
1.6 Antecedentes.....	8
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Conceptos básicos de tratamiento de aguas residuales.....	10
2.1.1 Tratamiento primario.....	10
2.1.2 Tratamiento secundario.....	11
2.1.3 Tratamiento terciario.....	11
2.1.4 Desinfección.....	12
2.2 Tratamiento de aguas residuales domésticas: tanque séptico.....	12
2.3 Tanque séptico mejorado.....	18
2.3.1 Tanque séptico mejorado: "Manejo ambiental para países en desarrollo (Environmental management for developing countries)" del Instituto Asiático de Tecnología.....	18

2.3.2	Tanque séptico mejorado: "Tanques Sépticos" del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO).....	20
2.3.3	Tanque séptico mejorado: "Readecuación y sistemas complementarios de tratamiento de aguas residuales domésticas con tanque séptico", UCR.....	22
2.4	Filtros percoladores.....	22
2.4.1	Funcionamiento de los filtros percoladores.....	22
2.4.2	Ecuaciones de Diseño de Filtros Percoladores.....	24
2.4.3	Ventajas y desventajas de la utilización de filtros percoladores.....	26
2.5	Filtro anaerobio de flujo ascendente.....	27
2.5.1	Funcionamiento del filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA).....	27
2.5.2	Desempeño del filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA).....	27
2.5.3	Diseño del filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) con lecho de piedras.....	31
2.5.4	Ventajas y desventajas de la utilización del filtro anaerobio flujo ascendente.....	34
CAPÍTULO 3. MONTAJE DE LOS PROTOTIPOS.....		36
3.1	Ubicación.....	36
3.2	Diseño preliminar del filtro percolador.....	36
3.2.1	Cálculo del caudal a tratar.....	36
3.2.2	Cálculo de la carga orgánica esperada.....	37
3.2.3	Cálculo de la eficiencia requerida.....	37
3.2.4	Parámetros de diseño.....	38
3.2.5	Ecuaciones de la NRC.....	39
3.3	Descripción del sistema con filtro percolador.....	41
3.3.1	Caracterización de las familias que utilizan el sistema individual para el tratamiento de aguas residuales domésticas.....	41
3.3.2	Descripción general del sistema individual de tratamiento de aguas residuales domésticas.....	41
3.3.3	Caudal a tratar en el sistema.....	42
3.3.4	Descripción de la caja de registro donde se toma la muestra de aguas crudas.....	42
3.3.5	Dimensiones del tanque séptico.....	42
3.3.6	Características del filtro percolador.....	43

3.3.7	Dimensiones del drenaje.....	43
3.4	Descripción del sistema con filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA).....	47
3.4.1	Descripción de la familia que utiliza el sistema individual de tratamiento de aguas residuales domésticas.....	47
3.4.2	Descripción general del sistema individual de tratamiento de aguas residuales domésticas.....	47
3.4.3	Caudal a tratar en el sistema.....	48
3.4.4	Dimensiones del tanque séptico.....	48
3.4.5	Características del FAFA.....	49
3.4.6	Dimensiones del drenaje.....	49
CAPÍTULO 4. REVISIÓN DE LOS DISEÑOS FINALES.....		51
4.1	Revisión de los tanques sépticos.....	51
4.1.1	Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones.....	51
4.1.1	Tanques Sépticos: Conceptos teóricos, base y aplicaciones.....	54
4.1.3	Proyecto construcción y operación de sistemas de tanques sépticos, Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT).....	58
4.1.4	Diseño, construcción y operación de tanques sépticos: Normas de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB).....	61
4.2	Resumen de cumplimiento de normas.....	64
4.3	Caracterización del agregado utilizado como medio filtrante.....	66
4.3.1	Pesos específicos y absorción.....	66
4.3.2	Área de superficie específica.....	66
4.4	Evaluación de la capacidad hidráulica y sanitaria del filtro anaerobio de flujo ascendente.....	68
4.4.1	Evaluación de la capacidad sanitaria del filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA).....	68
4.4.2	Evaluación de la capacidad hidráulica del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA).....	71
4.5	Evaluación de la eficiencia del filtro percolador.....	72
CAPÍTULO 5. DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS.....		74
5.1	Plan de control del sistema.....	74
5.1.1	Funcionalidad sistema tanque – FAFA – drenaje.....	74

5.1.2	Funcionalidad del sistema tanque - filtro percolador - drenaje.....	75
5.2	Resultados promedio para los parámetros analizados.....	77
5.3	Variación de los parámetros en el tiempo.....	78
5.4	Eficiencia de los sistemas.....	81
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		82
6.1	Análisis estadístico de los datos.....	82
6.2	Revisión de diseños.....	82
6.3	Desempeño de los sistemas.....	83
6.3.1	Sistema tanque – FAFA – drenaje.....	84
6.3.2	Sistema tanque – filtro percolador – drenaje.....	85
CAPÍTULO 7. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA TANQUE – FAFA – DRENAJE.....		88
7.1	Introducción.....	88
7.2	Descripción de las aguas residuales afluentes.....	88
7.3	Proceso de Tratamiento.....	88
7.3.1	Tanque séptico.....	89
7.3.2	Filtro anaerobio de flujo ascendente.....	89
7.3.3	Zanjas de drenaje.....	89
7.4	Información básica de diseño.....	92
7.5	Personal.....	93
7.6	Equipo.....	94
7.7	Puesta en marcha.....	94
7.8	Actividades de operación y mantenimiento del sistema.....	94
7.8.1	Operación y mantenimiento del tanque séptico.....	94
7.8.2	Operación y mantenimiento del filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA)..	95
7.9	Cuadro resumen.....	96
7.10	Problemas comunes.....	97
7.11	Desechos.....	97
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		98
8.1	Conclusiones.....	98
8.1.3	Conclusiones generales.....	98
8.1.4	Conclusiones relacionadas con el sistema tanque - filtro percolador -- drenaje.....	98

8.1.2	Conclusiones relacionadas con el sistema tanque – FAFA – drenaje.....	100
8.2	Recomendaciones.....	101
8.2.1	Recomendaciones generales.....	101
8.2.2	Recomendaciones para el sistema tanque – FAFA – drenaje.....	102
8.2.3	Recomendaciones para el filtro percolador.....	102
	BIBLIOGRAFÍA	104
	ANEXOS.....	106
A.	Dotación de agua potable.....	A-1
B.	Extractos de los códigos extranjeros utilizados.....	B-2
C.	Pruebas fisico-químicas involucradas en el proyecto.....	C-1
D.	Caracterización del agregado utilizado como medio filtrante.....	D-1
E.	Análisis estadístico.....	E-1
F.	Rediseño del filtro anaerobio de flujo ascendente implementando recomendaciones propuestas.....	F-1

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Ante un continuo aumento en la población del país se genera un incremento en la producción de desechos. Estos desechos deben ser dispuestos de manera que se evite la contaminación ambiental, y poniendo en práctica nuevas tecnologías basadas en los principios de desarrollo sostenible. Es decir, tecnologías que busquen tratar los desechos y reducir su impacto en el medio ambiente, manteniendo el equilibrio y preservación de los recursos naturales.

En cuanto a las aguas residuales domésticas, históricamente se ha dado soluciones a problemas que éstas generan, evacuando las aguas por medio de alcantarillados, con un tratamiento posterior en plantas de purificación. En Costa Rica, se utiliza para este fin el sistema de alcantarillado sanitario y unidades de disposición a nivel domiciliar, es decir, tanques sépticos o letrinas.

En Costa Rica, sólo un pequeño porcentaje de las aguas residuales producidas recibe un tratamiento adecuado. Se cuenta con alcantarillado sanitario sólo en zonas urbanas, pero la cobertura del mismo no es total. El porcentaje de cobertura es de aproximadamente un 33.8% y adicionalmente de las aguas residuales recolectadas mediante este sistema, un 96% no reciben un tratamiento adecuado y en su lugar, son vertidas directamente a los ríos. (9)

En consecuencia, las cuencas de los Ríos Tárcoles y Reventazón reciben casi la totalidad de las aguas residuales recolectadas mediante alcantarillado sanitario en las ciudades de San José, Heredia, Alajuela y Cartago, lo cual representa aproximadamente un 70% de la población del país. Estos ríos, así como muchos otros en el país, se encuentran severamente contaminados. (9)

Además del problema de crecimiento poblacional, el concepto de ordenamiento territorial en Costa Rica es incipiente, lo cual limita considerablemente el planeamiento tanto en el espacio como en el tiempo de la infraestructura que requiere la población. Debido a esto, muchas viviendas o centros residenciales son construidos en sitios carentes de servicios de alcantarillado sanitario, aumentando así el uso del tanque séptico como solución a la disposición y tratamiento de las aguas residuales.

El tanque séptico como sistema de tratamiento y unido al uso de zanjas de infiltración como método de disposición de las aguas residuales, encuentra su principal limitante en el suelo. Esto se debe a que, después de la sedimentación y biodigestión que debe darse en el tanque séptico, el funcionamiento de las zanjas de drenaje se basa en la percolación del agua a través del suelo. De este modo, en presencia de un suelo arcilloso de baja o nula permeabilidad, las zanjas de drenaje no cumplen su propósito, o requieren de grandes áreas que en la mayoría de los casos no están disponibles.

En otros casos, a pesar de que el suelo presenta condiciones de permeabilidad aceptables, las deficiencias tanto en diseño como en la operación y mantenimiento del tanque séptico provocan el colapso del sistema.

Por otra parte, en muchos casos no existe un diseño formal, que busque cumplir las exigencias hidráulicas y sanitarias para estos sistemas y que garantice el cumplimiento de la normativa nacional. Debido a esto, se construye sin tomar en cuenta factores como la dotación de agua potable diaria por habitante y el factor de retorno aplicable, obteniéndose como resultado un dimensionamiento incorrecto, y por consiguiente un tiempo de retención insuficiente para el desarrollo adecuado de los procesos físicos y biológicos que deben darse en el tanque séptico.

En cuanto a operación y mantenimiento, no existe una conciencia entre los usuarios sobre la importancia de la eliminación periódica de lodos y el tratamiento posterior de los mismos.

Todo esto provoca, que el efluente del tanque séptico contenga grandes cantidades de sólidos en suspensión, que al llegar a las zanjas de drenaje, con el tiempo, obstruyen los vacíos del suelo, provocando una impermeabilización del mismo, y en consecuencia se presentan las dificultades antes mencionadas.

Para evitar esta problemática, frecuentemente el usuario se ve obligado a conectar ilícitamente la salida del tanque séptico al sistema de aguas pluviales, conduciendo las aguas residuales directamente a los ríos.

Existen otros casos en los cuales el tanque séptico se utiliza en zonas en las cuales el suelo posee alta permeabilidad, pero el nivel freático se encuentra muy cerca de la superficie. En estos casos, la percolación del agua con altas cargas de contaminantes a través del suelo puede provocar la contaminación del agua subterránea.

Con relación a todas estas problemáticas, se han llevado a cabo una serie de estudios, los cuales han generado como resultado un prototipo de tanque séptico modificado mediante la incorporación adicional de dos posibles tipos de biofiltro, de manera que se reduzcan las concentraciones de los contaminantes en efluente del mismo. Se trata de un Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente así como un Filtro Percolador (Álvarez, G et al. *Readecuación y Sistemas Complementarios de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas con Tanque Séptico*. Rosales, E. Tanques Sépticos: Conceptos Teóricos y Aplicaciones).

Existen dos sistemas mejorados de este tipo construidos en la urbanización Vistas del Este en Tres Ríos del Cantón de la Unión de la Provincia de Cartago.

El presente proyecto de graduación, busca evaluar la eficiencia de estos dos sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas a escala real. Además, determinar el cumplimiento de las normas de vertido de aguas residuales vigentes en el país, ya sea que este efluente sea vertido en el alcantarillado sanitario, en cuerpos de agua superficial o infiltrado en el suelo.

Con la implantación de estos sistemas, se prevendría la contaminación, no sólo de los cuerpos de agua superficial, sino de los mantos acuíferos por sustancias persistentes y tóxicas.

La protección de estos mantos acuíferos es de gran importancia para el país. Esto en vista de que los mismos son fuente importante de agua potable para la población nacional. Al año 2002, por ejemplo, el consumo de agua potable de un 20% de la población nacional era suplido solamente por los acuíferos de Barva y Colima, los cuales fueron definidos como la fuente de agua potable de Heredia y el Área Metropolitana de San José para los próximos quince años.

Estos acuíferos ya sufren las consecuencias de la contaminación proveniente de la infiltración de aguas residuales y el uso de agroquímicos. En el caso de los acuíferos Colima se ha notado un crecimiento en las concentraciones de Nitrógeno, que de persistir podría significar la pérdida del acuífero en menos de quince años. (9)

Determinar a nivel experimental la funcionabilidad y eficiencia de los sistemas antes mencionados es el objetivo primordial de este proyecto. De obtenerse resultados aceptables se estaría brindando una posible medida de mitigación a los impactos que se producen debido a la generación y mala manipulación de las aguas residuales domésticas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el funcionamiento de dos sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas para condiciones unitarias (unifamiliares), mediante análisis de prototipos construidos a escala natural y utilizando pruebas físico químicas.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Realizar una descripción detallada de los sistemas física y funcionalmente.
2. Identificar las variables de funcionamiento de los sistemas.
3. Realizar una revisión de las dimensiones y características de los sistemas con respecto a diferentes documentos que establecen metodologías de diseño.
4. Determinar las eficiencias de remoción de contaminantes de ambos sistemas, mediante el desarrollo de un proceso de muestreo y análisis físico-químico de las aguas residuales que circulan en los mismos
5. Elaborar un manual de operación y mantenimiento en función de la experiencia adquirida en el transcurso de este proyecto, para cada uno de los sistemas.
6. Definir medidas para el mejoramiento del desempeño de ambos sistemas.

1.3 Metodología

La metodología que se utilizará para la realización del proyecto es del tipo práctica-experimental. Como se ha dicho anteriormente, se cuenta con sistemas ya construidos, de modo que se comprobará la eficiencia en el desempeño del tanque séptico unido a un tratamiento complementario (filtro percolador o filtro anaeróbico de flujo ascendente más zanjas de infiltración).

Las etapas del proyecto se pueden observar en la figura 1 y son las siguientes:

1.3.1 Descripción de las obras existentes:

Esta etapa consiste en realizar una descripción detallada y generar esquemas de los sistemas existentes física y funcionalmente.

1.3.2 Revisión de los diseños existentes:

En esta etapa se realiza una revisión bibliográfica de los principios teóricos que rigen el diseño de este tipo de sistemas. Con base en el conocimiento de estas bases teóricas se evalúan los sistemas construidos y se determinará las eficiencias teóricas esperadas.

1.3.3 Desempeño de los sistemas de tratamiento:

Esta etapa consiste en el muestreo tanto del influente como del efluente del tanque, así como del efluente de los filtros, con el objetivo de determinar los porcentajes de remoción de cada componente del sistema y la eficiencia global del sistema.

Partiendo del hecho de que se espera que la remoción de contaminantes en el agua sea suficiente para que la misma pudiera ser vertida en cuerpos receptores, las pruebas a realizar para el análisis del influente y del efluente del tanque séptico son las que se exigen en el Reglamento de Reuso y Vertido de Aguas Residuales del Ministerio de Salud. Estas pruebas son las siguientes:

- a. Demanda Bioquímica de Oxígeno ($DBO_{5,20}$)
- b. Potencial hidrógeno (pH)
- c. Grasas y aceites (GyA)
- d. Sólidos sedimentables (SSed)
- e. Sólidos suspendidos Totales (SST)

Además, se practican las siguientes pruebas: Demanda Química de Oxígeno (DQO) Fósforo, Nitrógeno Amoniacal.

Todas estas pruebas se practican en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, así como en un laboratorio acreditado (Laboratorio Químico Lambda).

Los aspectos teóricos de estas pruebas se muestran en el anexo C.

Se realizan los cálculos pertinentes para obtener la caracterización del agua residual en cada punto de muestreo así como la eficiencia de los sistemas.

1.3.4 Análisis de resultados:

En esta etapa, se analizan los resultados obtenidos con el fin de emitir un juicio acerca del desempeño, fortalezas y deficiencias de cada sistema. Con base en esto, es

posible establecer las recomendaciones mediante las cuales se puede mejorar el funcionamiento y desempeño de ambas unidades de tratamiento.

1.3.5 Elaboración de manual de operación y mantenimiento:

Este manual deberá ser elaborado tomando en cuenta los resultados que se han obtenido mediante las pruebas realizadas. El mismo debe contener los procedimientos o acciones que debe tomar el usuario del sistema para lograr un funcionamiento correcto del mismo; además de obtener una eficiencia óptima en remoción de contaminantes.

1.3.6 Elaboración del Documento Escrito.

En esta etapa, se deben desarrollar los temas tratados en las etapas anteriores, además, se deberán plantear las conclusiones a las cuales se ha llegado finalizado el proyecto y las recomendaciones necesarias para la mejora de los sistemas.

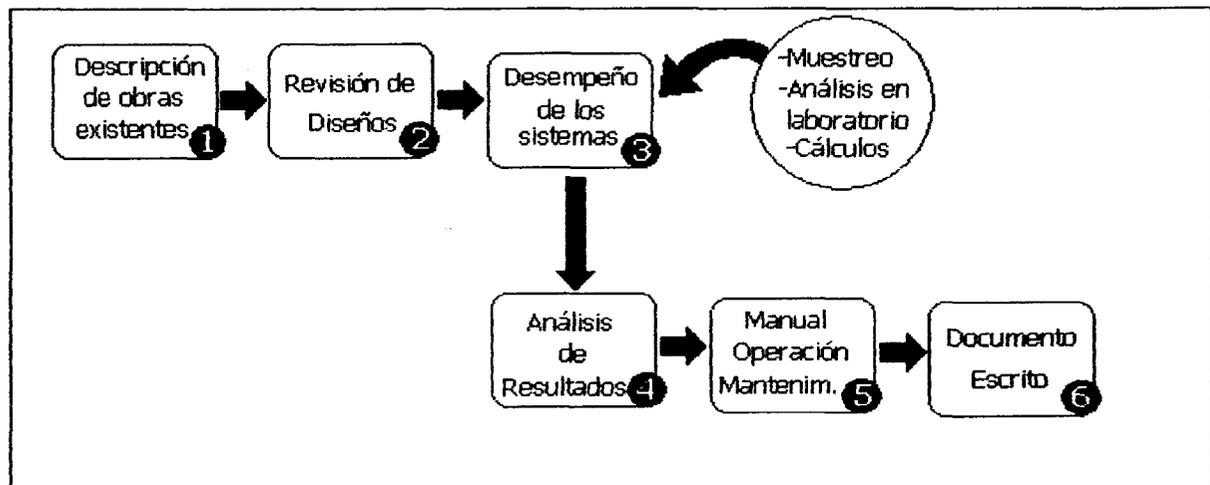


Figura Nº 1. Etapas del proyecto

1.4 Alcances

Se clasificarán los alcances de la siguiente manera:

1.4.1 Específicos.

- El proyecto que se propone se realizará en sistemas que ya han sido construidos, de manera que los cambios que se considere sean necesarios para la mejora de los mismos únicamente podrán ser propuestos para la implantación de los sistemas en adelante, mas no probados en los sistemas en análisis.
- Se generarán esquemas de los sistemas en los que se mostrará cada componente y sus dimensiones.
- Al concluir el proyecto se obtendrá información suficiente para determinar la conveniencia del uso de éstos sistemas como solución al tratamiento de las aguas residuales domésticas.

1.4.2 Temporales.

El proyecto será desarrollado durante los meses de noviembre y diciembre del año 2004 y el primer semestre del año 2005. El período de control se llevará a cabo de Diciembre del 2004 a Marzo del 2005.

1.5 Limitaciones

Las limitaciones con las que cuenta el proyecto se muestran a continuación:

1.5.1 Temporales.

Se requiere que los sistemas lleguen a un estado estacionario en la producción de microorganismos, solamente después de alcanzado este estado, puede esperarse que los

resultados obtenidos sean representativos y estables. Por las limitaciones temporales se corre el riesgo de que el período de control no logre abarcar esta etapa de crecimiento.

1.5.2 De construcción

Los sistemas han sido construidos de acuerdo con la experiencia y disponibilidad de materiales de la empresa constructora de la urbanización en la cual se localizan los sistemas, como consecuencia, el material filtrante, utilizado en ambos filtros del estudio, es de un tamaño máximo mucho mayor que el que se recomienda para este tipo de sistemas. Esto puede alterar el funcionamiento de los filtros, con respecto al funcionamiento teórico esperado.

1.5.3 De representatividad de las muestras

Para buscar la representatividad de las muestras se debe realizar un muestreo compuesto. El período dentro del cual se realiza este muestreo se limitó de acuerdo con la disponibilidad de las familias y sus actividades diarias.

1.6 Antecedentes

El proyecto que se propone está basado en dos investigaciones anteriores, las cuales aportan bases teóricas de diseño para los sistemas.

La primera investigación se concentró en la Readecuación a nivel teórico de tanque séptico y la inclusión de un sistema complementario de tratamiento. Este estudio brinda el modelo de tanque séptico modificado para que sea capaz de tratar las aguas residuales domésticas, reduciendo las concentraciones de contaminantes a niveles aceptables. Este documento proporciona algunas bases teóricas del funcionamiento de los biofiltros y del tanque séptico; además, aspectos teóricos relacionados con las pruebas fisicoquímicas usuales para la caracterización de las aguas residuales domésticas.

Además de este proyecto de investigación, se cuenta con la publicación del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción, "Tanques Sépticos: Conceptos Teóricos y Aplicaciones", febrero del 2003. En esta publicación, se plantea el concepto de un

tanque séptico mejorado que permita mejorar la calidad del agua mediante la introducción de un filtro anaerobio de flujo ascendente, antes de que entre en contacto con el medio inmediato de descarga. Además se presenta una recopilación de información técnica previamente verificada, con el objetivo de mejorar una técnica sanitaria muy utilizada en el país, como lo es el tanque séptico.

Se cuenta también, con documentos como el "Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias de Edificaciones" del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, "Proyecto Construcción y Operación de Sistemas de Tanques Sépticos", Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT), documento "Diseño, Construcción y Operación del Tanques Sépticos, Normas de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá". Estos documentos proporcionan algunos lineamientos de diseño, los cuales permiten la revisión de la capacidad de las unidades construidas bajo la reglamentación nacional y de estos otros países.

El artículo "Diseño de Proyectos de Tratamiento de Desechos Rurales" (Design of Rural Waste Treatment Schemes) del Instituto Asiático de Tecnología, es el texto del cual nace el concepto de tanque séptico modificado, con la implementación de un filtro anaerobio de flujo ascendente.

El texto "Tratamiento de Aguas Residuales – Parte 2" (Wastewater Treatment – Part 2), del Instituto Internacional para la Ingeniería de Infraestructura, Hidráulica y Ambiental de Holanda, proporciona las bases teóricas del funcionamiento de los filtros percoladores.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptos básicos de tratamiento de aguas residuales

2.1.1 Tratamiento primario

El tratamiento primario, tiene como objetivo eliminar el material que presenta menor resistencia a la eliminación, como lo son los sólidos de gran tamaño como palos, trapos y otros, sólidos sedimentables de menor tamaño y grasas.

Los lodos formados por el material removido deben recibir un tratamiento biológico adicional en un reactor.

Las aguas que han pasado por este tratamiento primario, son enviadas a las siguientes etapas de tratamiento.

2.1.2 Tratamiento secundario

Luego de pasar por el tratamiento primario, las aguas residuales son sometidas al tratamiento secundario. El tratamiento secundario o tratamiento biológico, tiene como objetivo remover la materia orgánica disuelta en las aguas residuales.

El tratamiento biológico consiste en poner el agua residual en contacto con una población de microorganismos, compuesta principalmente por bacterias. Estos microorganismos se alimentan de la materia orgánica transformándola en compuestos estables como lo son agua, dióxido de carbono, metano, minerales y nuevas células entre otros.

Los microorganismos encargados de la depuración del agua residual, pueden realizar el proceso de digestión en presencia de oxígeno o en ausencia del mismo. Los microorganismos que necesitan la presencia de oxígeno se conocen como aerobios; mientras que los que actúan en ausencia de oxígeno, se conocen como organismos anaerobios. Existen también microorganismos que crecen con o sin oxígeno, estos se conocen como facultativos.

- **Procesos aerobios**

En los procesos aerobios (en presencia de oxígeno) las bacterias heterótrofas (las que obtienen carbono de compuestos orgánicos) oxidan alrededor de un tercio de la materia

orgánica coloidal y disuelta a productos finales estables ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) y transforman los dos tercios restantes en nuevas células microbianas susceptibles de eliminarse de las aguas residuales por sedimentación.(8)

A través del tiempo, los procesos biológicos aerobios han sido los más utilizados para el tratamiento de los residuos orgánicos líquidos. Esto se debe a la sencillez del proceso, su estabilidad y la eficiente y rápida conversión de los contaminantes orgánicos en células microbianas, y su operación relativamente libre de olores.(8)

Procesos anaerobios

En los procesos biológicos anaerobios (esto es, en ausencia de oxígeno) dos grupos de bacterias heterótrofas, en un proceso de licuefacción/gasificación en dos etapas, convierten más del 90% de la materia orgánica presente, primero en intermediarios (productos finales parcialmente estabilizados que incluyen ácidos orgánicos y alcoholes) y después en metano y dióxido de carbono gaseosos.(8)

Dos ventajas importantes de los procesos anaerobios respecto a los aerobios, son que suministran energía útil en forma de metano y que la producción de lodos es de sólo el 10% de la que tiene lugar en los procesos aerobios para transformar la misma cantidad de materia orgánica. Esto representa una ventaja en el tratamiento de residuos muy concentrados, en donde el manejo de grandes volúmenes de lodos sería un problema.(8)

2.1.3 Tratamiento terciario

Los tratamientos terciarios tienen como objetivo eliminar ciertos componentes específicos contenidos en las aguas residuales efluentes del tratamiento secundario. Es frecuente que se utilicen tratamientos terciarios para eliminación de nutrientes como fósforo y nitrógeno en el agua residual, antes de que la misma sea infiltrada en el suelo o vertida en cuerpos de agua. Esto se debe, a que estos nutrientes tienen efectos negativos sobre los cuerpos de agua, pudiendo ocasionar crecimiento desmedido de especies de flora acuática o muerte de algunas especies. Algunos tratamientos terciarios, utilizan la capacidad de diferentes tipos de plantas para proporcionar un medio adecuado para la formación de películas biológicas, así como la adsorción de los nutrientes presentes en el agua. Este es el caso de los humedales artificiales, por ejemplo.

Otros tratamientos terciarios son zanjas rellenas con arena, lechos de capas de piedra, sistemas de rellenos, sistema de montículo, sistemas de evapotranspiración, estanques de evaporación y filtros (intermitentes o de recirculación, de arena, grava u otros materiales como espuma o con materiales sintéticos como geotextiles, filtros percoladores).(2)

2.1.4 Desinfección

La desinfección es el último paso en el tratamiento de aguas residuales antes de verter el efluente en un cuerpo receptor. Este paso es necesario cuando este efluente no cumple con las normas establecidas, en cuanto a la presencia de organismos patógenos, los cuales pudieran representar un riesgo potencial para la salud.

El producto más utilizado para la desinfección es el cloro, esto por ser económico y de fácil aplicación. A pesar de esto, a la utilización del cloro se le achacan ciertas desventajas en cuanto a la producción de ciertos compuestos orgánicos clorados que son producto de la combinación del cloro con la materia orgánica presente en el agua, algunos de los cuales se conocen como cancerígenos (que son capaces de producir cáncer). Además de esto el cloro puede llegar a ser tóxico para ciertas especies de peces.

Existen otros métodos de desinfección como la radiación ultravioleta, ozono y otros.

2.2 Tratamiento de aguas residuales domésticas: tanque séptico

El tanque séptico, es un sistema individual utilizado en zonas donde no se cuenta con otros sistemas colectivos de recolección y tratamiento de aguas residuales. Esta es una condición predominante en Costa Rica, por lo cual el sistema de tanque séptico se ha convertido en la técnica para el tratamiento de aguas residuales domésticas de uso más frecuente en el país.

De acuerdo con estudios realizados por el Ingeniero Elías Rosales, a través del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), en su documento Tanques Sépticos; tanto en Costa Rica, como en varios de los países vecinos, las prácticas que se siguen para la difusión y en consecuencia construcción de soluciones sanitarias bajo la modalidad del sistema conocido como tanque séptico, carecen de un seguimiento técnico apropiado.

Es por este motivo, que es de importancia analizar los principios básicos que rigen el correcto funcionamiento del tanque séptico.

El sistema de tanque séptico está conformado por tres etapas. La primera de éstas es el sedimentador primario de las partículas de mayor tamaño, las cuales se acumulan en el fondo del mismo. A la vez este tanque se convierte en un reactor anaerobio. Esto debido a la acumulación de materia orgánica y la biodigestión que se da en el fondo.

Como segunda etapa, se tiene el drenaje, en el cual se da una biodegradación de la materia orgánica presente en el efluente del tanque. Esta biodegradación, es producto de la acción de las bacterias adheridas a las piedras con que se construyen las zanjas de drenaje. Además, se da la infiltración del agua en el suelo, en la cual es de suma importancia la capacidad de absorción del terreno existente.

La tercera etapa consiste en la remoción, tratamiento y correcta disposición de los lodos.

El sistema completo se ilustra en la figura 2.

En cuanto al tanque séptico, este debe ser diseñado con un tiempo de retención hidráulica para sedimentación de al menos 24 horas. Este tiempo de retención mínimo, permite que las partículas sólidas más gruesas y pesadas se sedimenten en el fondo del tanque y que las grasas y aceites se queden en la superficie formando una capa conocida como nata. En el tanque estos sólidos sufren una ligera compactación y como se dijo anteriormente, una descomposición anaerobia, para lo cual se debe considerar otro tiempo de retención propio de la biodegradación, de acuerdo con la temperatura del agua bajo tratamiento. El tiempo de retención total debe considerar la cantidad de lodos que se pretende acumular en el fondo del tanque. Este tiempo de retención puede variar entre 1 y 3 días. (12)

Los lodos en el fondo del tanque deben ser extraídos periódicamente para que el tiempo de retención del tanque, necesario para sus diferentes funciones, no disminuya. (12)

De acuerdo con el documento publicado por el CIVCO, mencionado anteriormente, existe una serie de recomendaciones que deben seguirse para lograr un buen funcionamiento de los tanques sépticos, es decir, lograr un adecuado proceso de sedimentación de los sólidos, así como favorecer la digestión anaeróbica de la materia orgánica. Entre estas recomendaciones, se encuentra el guardar una relación ancho: largo de 1:3, proveer una profundidad de líquidos mínima de 1 m así como una superficie

impermeable y resistente a la acidez y al ataque de sulfatos, contar con una estructura hermética que asegure el proceso de digestión anaerobia, asegurar que los gases producidos durante la digestión anaerobia sean dirigidos hacia la línea de ventilación de la edificación o hacia la zona de drenaje y por último que los dispositivos de entrada y salida del tanque son T`s que se prolonguen bajo el nivel máximo de líquidos hasta la zona de sedimentación.

Estos dispositivos, permiten la elevación momentánea del líquido durante la descarga al tanque y dirigen el agua residual entrante hacia el fondo del tanque.

En Costa Rica, el diseño de tanques sépticos es realizado bajo los lineamientos establecidos en el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones (C.I.H.S.E) del Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de 1991.

Este reglamento, establece una metodología de cálculo del volumen del tanque y recomienda una serie de combinaciones de dimensiones para tanques sépticos rectangulares. Además, establece que la mínima dimensión en planta permitida, es de 60 cm y que la profundidad de líquidos debe ser mayor que 0.75 m y menor que 1.75 m.

Se exige un espacio libre sobre el nivel de líquido del 20% de la profundidad del líquido para permitir la flotación de las natas, que la T de entrada debe prolongarse al menos 15 cm bajo el nivel del agua, mas nunca bajo el nivel de la T de salida, la cual debe penetrar bajo el líquido al menos un 40% de la profundidad del líquido para tanques rectangulares. Esta T de salida, debe prolongarse sobre el nivel del agua hasta unos 5 cm bajo el nivel de la losa superior del tanque.

Los lodos acumulados en el fondo del tanque séptico, deben ser removidos periódicamente. El tiempo entre limpiezas puede variar de 1 a 5 años.

Es importante recalcar que cuando se efectúa una limpieza, no deben ser removidos el total de los lodos, ya que esto eliminaría por completo la población de microorganismos y aumentaría el tiempo que tarda en restablecerse el proceso de digestión anaerobia. Según el documento Tanques Sépticos del CIVCO, al menos un 20% de los lodos deben permanecer en el tanque después de la limpieza.

EL tanque séptico doméstico, como es planteado en el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones se muestra en la figura 3.

En cuanto a los drenajes, según el Ingeniero Elías Rosales en su documento Tanques Sépticos, "...los mismos se deben construir con piedra en tamaños entre 7 y 10 cm (aportan mayor superficie de contacto y menos vacíos que la "piedra bruta" o de gran tamaño

tradicionalmente usada) y sin la colocación de plásticos, con el propósito de permitir la evapotranspiración, producto de la interacción de esta etapa con los rayos solares que podrían incidir en la esa zona.

Así, al utilizarse este sistema individual para el tratamiento de desechos líquidos o tanques sépticos se deben asegurar varios aspectos fundamentales:

- Que los sólidos y las grasas se queden en el tanque (Tiempo de retención hidráulica por sedimentación).
- Que se provea del tiempo de retención hidráulico suficiente como para que un proceso de biodigestión haga su parte (Tiempo de retención hidráulica por biodigestión)
- Que el material en el drenaje provea suficiente superficie para el desarrollo de la mayor cantidad de bacterias.
- Que al infiltrarse el agua tratada en el terreno no se provoque contaminación de mantos subterráneos de agua.
- Que se realice la remoción, recolección, tratamiento y disposición responsable de los lodos...”

Es importante que se conciba este sistema de manera correcta, tomando en cuenta todas sus partes. Por este motivo la capacidad de absorción del suelo es un aspecto que debe tomarse en cuenta para el diseño apropiado de las zanjas de drenaje. Para esto deben llevarse a cabo las pruebas de infiltración de acuerdo con los procedimientos establecidos, tanto por el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, en el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones como los procedimientos (mas detallados) explicados en el documento Tanques Sépticos del CIVCO.

El Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias establece en su apartado 7.10.3, todos los lineamientos necesarios para el diseño de zanjas de absorción, así como los requerimientos que estas deben cumplir. En la figura 4 se muestra el detalle de los drenajes como son planteados en este código.

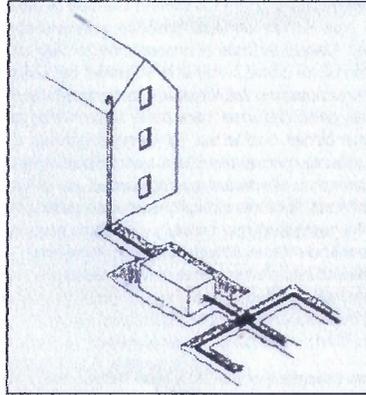


Figura N° 2. Sistema de tanque séptico para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Fuente: Rosales E. Febrero, 2003.

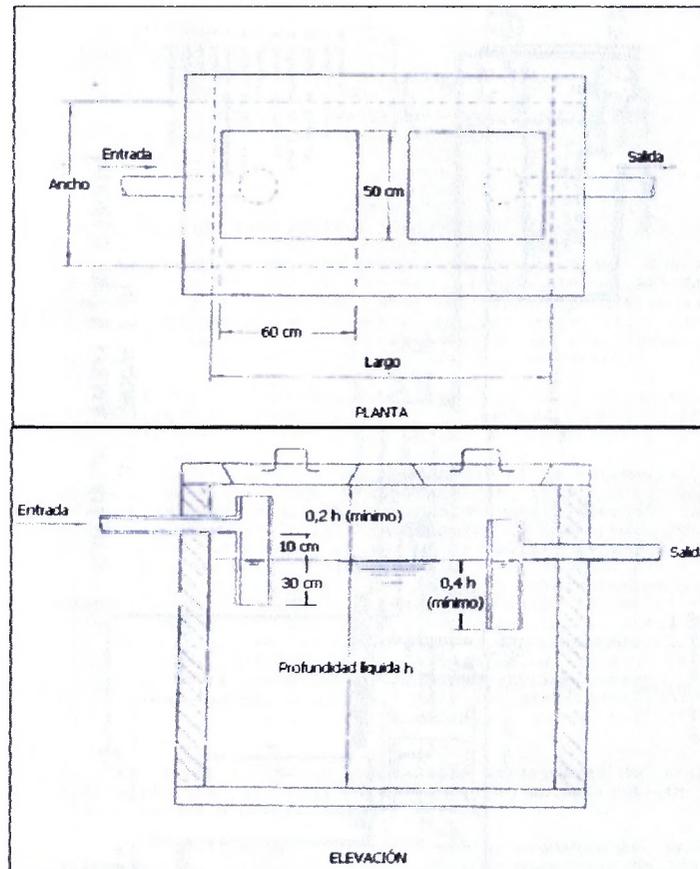


Figura N° 3. Tanque séptico doméstico.

Fuente: Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones.

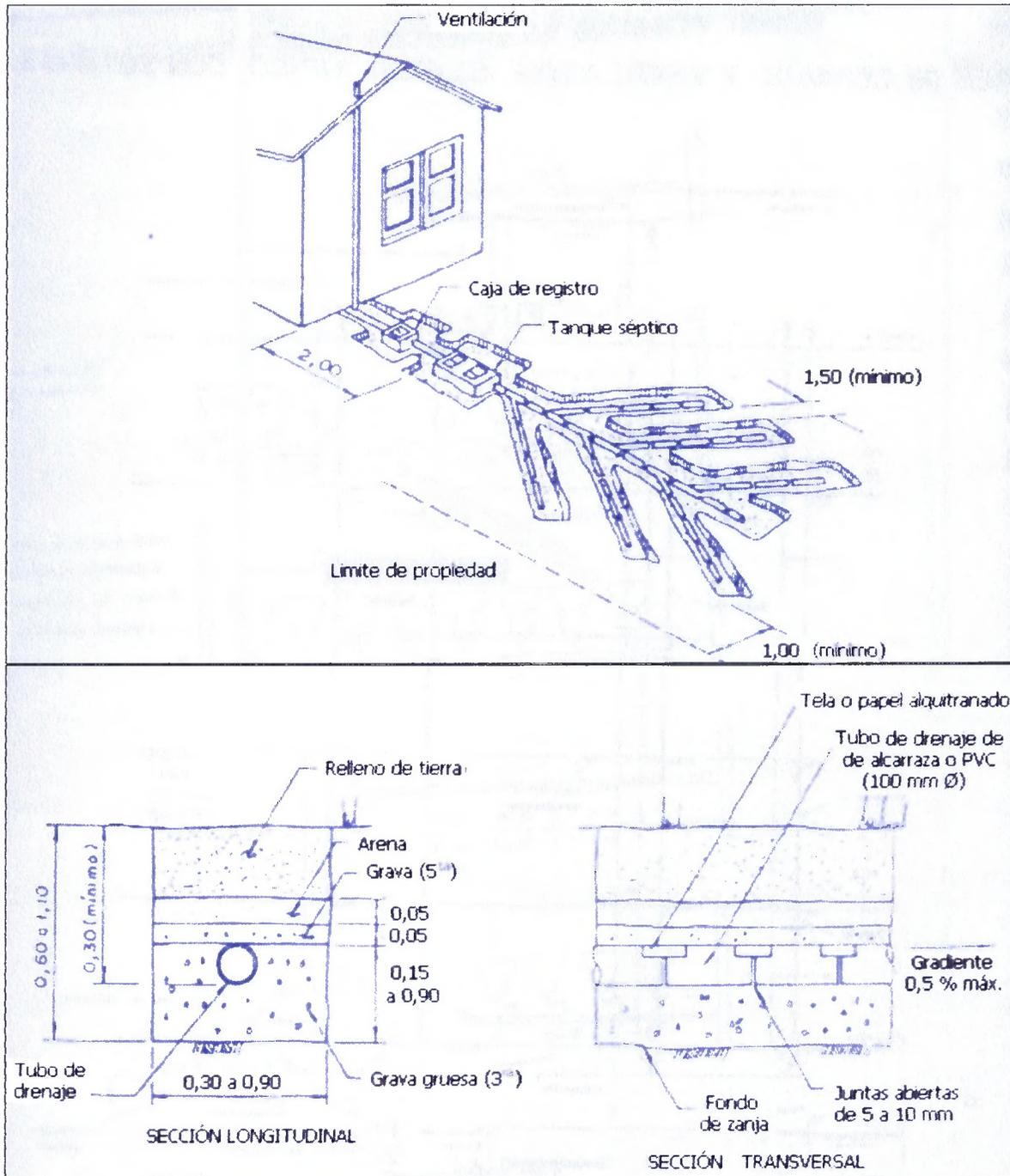


Figura N^o 4. Detalle de drenajes en zanjas de absorción.
 Fuente: Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones.

2.3 Tanque séptico mejorado

A raíz de toda la problemática que se ha expuesto con respecto al funcionamiento del sistema de tanque séptico en condiciones de suelos difíciles, donde no se tiene una suficiente capacidad de absorción, o en zonas donde el peligro de contaminación de acuíferos es alto, existen una serie de documentos en los cuales se proponen nuevas tecnologías para resolver el problema del tratamiento de las aguas residuales domésticas, utilizando un sistema compuesto básicamente de un tanque séptico complementado con un biofiltro. A continuación, se muestra un pequeño resumen de lo que se propone en algunos de estos documentos.

2.3.1 Tanque séptico mejorado: "Manejo ambiental para países en desarrollo (Environmental management for developing countries)" del Instituto Asiático de Tecnología.

En este documento se propone la incorporación de un Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA) al tanque séptico común como un tratamiento secundario que mejore la calidad del efluente. En la figura 5 se muestra el esquema del tanque propuesto en este texto.

Como se puede ver en esta figura, se propone un tanque séptico con un FAFA incorporado dentro de la misma estructura. Se trata de un filtro con un "fondo falso" con perforaciones de 1.5 cm.

Se proponen tres capas de grava colocadas en orden descendente de tamaño. La primera capa de 35 cm de espesor es de grava con un tamaño de 12,7 mm a 19,0 mm (piedra cuartilla), la segunda capa de 22 cm de espesor de grava con tamaño de 6,4 a 12,7 mm (piedra quinta) y la tercera capa de 8 cm de espesor de grava con tamaño de 1,6 a 6,4 mm (quintilla).

La tubería de salida está colocada 10 cm por encima de la última capa de grava, de manera que se permite una acumulación de efluente de 10 cm, con lo que se mantienen las condiciones anaerobias dentro del filtro.

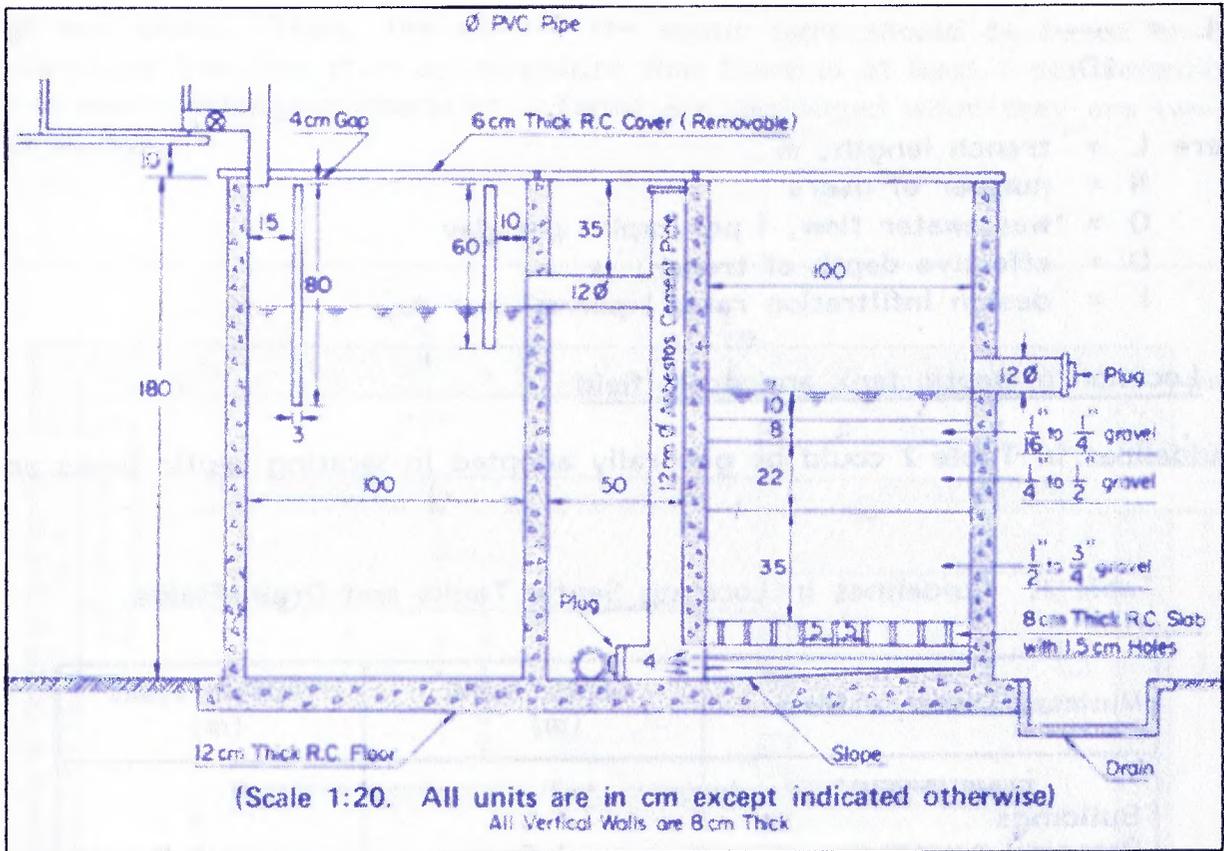


Figura Nº 5. Tanque séptico modificado adicionando FAFA.

Fuente: Asian Institute of Technology, 1989.

2.3.2 Tanque séptico mejorado: "Tanques Sépticos" del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO).

Este documento toma como una de sus bases el documento anteriormente mencionado. A partir de este y otros documentos, el CIVCO del ITCR ha desarrollado una investigación y recopilación de información procedente de varios países como Tailandia, Brasil, Colombia, y otros. Esto con el fin de adaptar y adoptar tecnologías que permitan el tratamiento individual de las aguas residuales domésticas.

De esta manera se han recopilado metodologías de cálculo basadas en las cargas contaminantes de las aguas residuales domésticas para el diseño de un sistema compuesto de dos unidades de tratamiento que trabajan de manera consecutiva. Con esto, se busca mejorar la calidad del efluente, reduciendo así su riesgo contaminante, de manera que pueda ser descargado en el mismo terreno en época seca o en quebradas o cursos permanentes de agua.

Se debe tener en claro que estos sistemas, han sido propuestos para situaciones individuales, en familias cuyo volumen de agua residual producido por día sea menor a los 2 m³. Por lo tanto, los flujos tratados son mucho menores que los que se manejan en una planta de tratamiento convencional. Además, se debe resaltar la necesidad de un compromiso real y responsable de las personas que están produciendo los desechos. (12)

El sistema adoptado por el CIVCO en el documento mencionado, consiste entonces de un tanque séptico convencional el cual se ha complementado con otra unidad secundaria, la cual consiste en un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA).

Se busca con esto mejorar la calidad del efluente, de manera que se acerque a límites establecidos en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales del Ministerio de Salud para el vertido en causes y que este efluente no tenga una influencia negativa en el medio.

El sistema propuesto por el Ingeniero Elías Rosales está compuesto por las siguientes etapas:

Tanque Séptico: en esta etapa, el agua residual recibe tratamiento primario, sedimentación en este caso. Además recibe un primer tratamiento secundario, gracias a la biodigestión en el fondo del tanque.

Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente: en esta etapa las aguas residuales reciben un segundo tratamiento secundario gracias a la acción de los microorganismos anaerobios en forma de película biológica adherida al medio.

Zanjas de infiltración: es el último paso del tratamiento y en éste, se da un tratamiento secundario final, gracias al crecimiento de microorganismos en la superficie del material, utilizado para rellenar las zanjas. Además, el efluente es dirigido al suelo para su infiltración.

En época de lluvia, cuando el terreno se encuentra saturado, se considera, además, la posibilidad de descargar el efluente tratado en causes cercanos. Esto bajo el supuesto de que se cumple con el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales.

Es necesario resaltar, que lo propuesto con este esquema de tratamiento para desechos líquidos se complementa con la evacuación periódica y disposición correcta de lodos del tanque séptico y del filtro. Así como, por líneas de evacuación de los gases que se formen en cada una de las unidades, dirigiéndolos hacia el techo de las casas o por zanjas preparadas para su filtrado y purificación.(12)

En la figura 6 se muestra el esquema en planta de estas unidades de tratamiento.

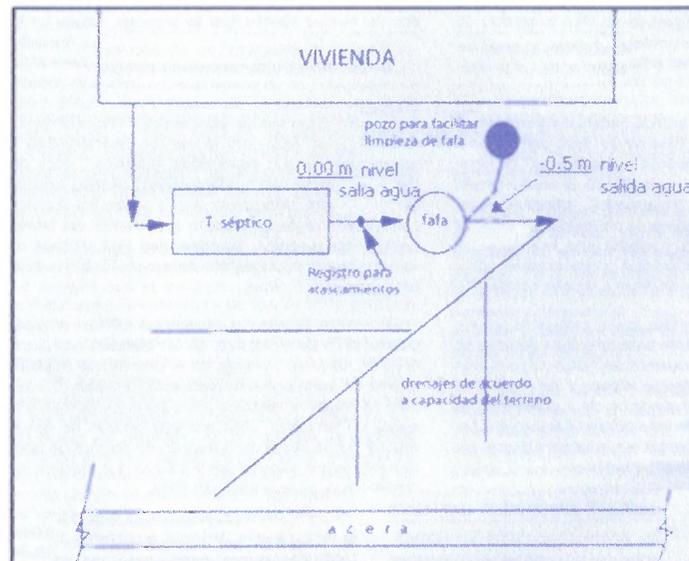


Figura 6. Esquema general del sistema mejorado para el tratamiento individual de desechos líquidos domésticos. Fuente: Rosales E. Febrero, 2003.

2.3.3 Tanque séptico mejorado: "Readecuación y sistemas complementarios de tratamiento de aguas residuales domésticas con tanque séptico", UCR.

En este documento elaborado en el año 2003 por los estudiantes Gloriana Álvarez, Greivin Mora y Eddy Pérez plantean "tanque séptico, el cual presenta una serie de variaciones con el fin de aproximarse a su comportamiento ideal. En primera instancia, se adecua al tanque una mampara longitudinal, con el fin de mejorar el flujo del agua en el mismo. Dicho elemento garantiza, con un alto grado de confianza, flujo laminar, lo cual reduce los cortos circuitos y las zonas muertas que generalmente afectan el funcionamiento adecuado de un tanque séptico convencional"

Estos autores, han calculado que el tanque que proponen llega a un porcentaje de 69% en remoción de DBO y Sólidos Totales.

Además, proponen agregar al tanque séptico un compartimiento adicional donde se coloca un filtro anaerobio de flujo ascendente, con el cual se le da un tratamiento secundario al efluente del tanque. De acuerdo a los cálculos que se realizan en dicho documento, este filtro cuenta teóricamente con porcentajes de remoción del 53% en DBO, 55% en DQO, 35% en Sólidos Totales, 6% en Nitrógeno Amoniacal y de 10 a 30% en Fósforo.

Como se puede ver, el sistema propuesto es similar al propuesto en el apartado 2.3.1, agregando la modificación mencionada al tanque séptico, con el fin de mejorar el desempeño del tanque séptico.

2.4 Filtros percoladores

Este tipo de filtros fue ideado a partir de la observación de otros sistemas que se utilizaban con anterioridad en los que se hacía pasar el agua residual por un estanque relleno con material granular, generalmente piedra machacada. Después del filtrado, del agua el lecho se dejaba reposar antes de volver a iniciar el proceso.(7)

2.4.1 Funcionamiento de los filtros percoladores.

Actualmente, los filtros percoladores constan de un medio filtrante cuyas características primordiales son su permeabilidad y su área superficial por unidad de volumen, ya que de estas depende la capacidad del filtro de albergar una cantidad suficiente

de microorganismos en forma de película adherida a su superficie. El material que se utiliza como medio filtrante es variable y va desde piedras hasta materiales plásticos de diferentes formas, los cuales se pueden conseguir en el mercado.

Cuando el lecho filtrante está formado por piedras el tamaño de las mismas oscila entre 2,5 y 10 cm. Este tamaño debe ser tal que los espacios vacíos permitan el tránsito del líquido a través de ellos, pero a la vez debe ser un tamaño que proporcione un área superficial suficiente para albergar una población biológica grande.

La profundidad del filtro es variable de acuerdo con el volumen y características del agua a tratar. Estos filtros normalmente tienen forma circular.

Cuando los filtros cuentan con un medio filtrante formado de material plástico la forma puede variar desde circular hasta cuadrado, rectangular u otras formas. Los materiales plásticos utilizados como medio filtrante se clasifican en tres grupos principales: rellenos de flujo transversal, relleno de flujo vertical, y otras distribuciones de rellenos a granel. (7)

En este tipo de filtros, es de suma importancia que el agua residual penetre el medio filtrante de manera uniforme, para lo cual debe contar con un dispositivo distribuidor rotatorio.

El agua residual filtrada, es recolectada en la parte inferior del filtro mediante un fondo falso que además permite la evacuación de sólidos biológicos desprendidos del medio y arrastrados por el agua. Este fondo falso permite además la circulación del aire dentro del filtro, con lo que se mantienen las condiciones aeróbicas.

Dentro del filtro se da un proceso de ventilación que obedece a la diferencia de temperatura existente entre el agua residual y el ambiente. Al producirse un intercambio de calor dentro del lecho filtrante, se produce una corriente de convección. La dirección del flujo de aire depende de la relación relativa entre las temperaturas del agua y el ambiente, siendo descendente si la temperatura del aire es mayor que la del agua residual y ascendentes cuando la temperatura del ambiente es menor que la del agua residual, lo cual ocurre en épocas o climas fríos.(14)

Debe proveerse a estos filtros de chimeneas que provean una adecuada ventilación.

Cuando el agua residual circula a través del medio filtrante, entra en contacto con la película biológica que se encuentra adherida a la superficie del material filtrante. Esta película está compuesta por microorganismos aerobios que degradan la materia orgánica presente en el agua. Sin embargo, con el paso del tiempo, el espesor de esta película aumenta y el

oxígeno presente en el medio es consumido antes de penetrar todo el espesor de la película. Esto provoca que en la capa de la película que se encuentra próxima a la superficie del medio se desarrollen microorganismos anaeróbicos (ver figura 7).

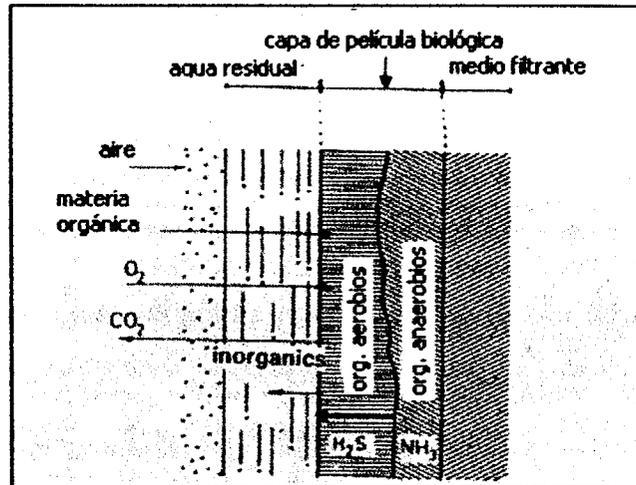


Figura N° 7. Desarrollo de película biológica en la superficie del filtro

Fuente: Instituto Internacional para Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 1998).

Al aumentar el espesor de la película, la materia orgánica es consumida por los microorganismos externos, agotándose antes de que todo el espesor de la película entre en contacto con la misma. En consecuencia, los microorganismos próximos a la superficie del medio no logra obtener carbono celular, con lo que entran en una fase de crecimiento endógena, en la cual su capacidad de adherencia al medio desaparece. De este modo la biopelícula es arrastrada por el líquido y se inicia la formación de una nueva capa.

La ocurrencia de este fenómeno, conocido como arrastre, depende de parámetros como la carga hidráulica y orgánica del filtro. Esto porque la carga hidráulica determina la velocidad de arrastre del líquido dentro del medio y la carga orgánica influye en la velocidad de crecimiento de la película biológica. Por este motivo en el diseño de filtros percoladores, debe mantenerse una carga hidráulica regulada para asegurar un espesor uniforme de la película biológica. Un esquema del filtro percolador típico se muestra en la figura 8.

2.4.2 Ecuaciones de Diseño de Filtros Percoladores

Los principales parámetros para el diseño de filtros percoladores son las cargas orgánica e hidráulica, así como la eficiencia necesaria. Diversos investigadores han propuesto

ecuaciones para determinar la eficiencia en remoción, entre estos se encuentran Atkinson, Bruse y Merckens, Eckenfelder, Fairall, Galler y Gotas, Germain, Logen et al, el National Research Council, Schultz, y Velz. (7)

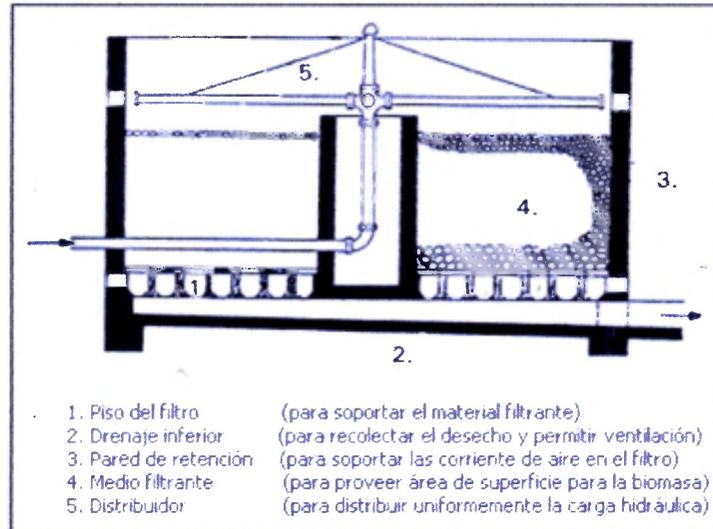


Figura Nº 8. Corte transversal de un Filtro Percolador típico.

Fuente: Instituto Internacional para Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 1998).

El enfoque que aquí se desarrolla es el desarrollo de modelos a partir de análisis de datos experimentales. En este sentido el NRC (National Research Council) propone una serie de ecuaciones experimentales de gran utilidad en el diseño de este tipo de filtros. Esto debido a que la irregularidad de las piedras y escorias empleadas como medio filtrante impide la obtención de expresiones teóricas que predigan de manera confiable el funcionamiento y rendimiento de los filtros. (7)

Estas fórmulas son especialmente recomendadas, para filtros con materiales pétreos de una o varias fases con relaciones de recirculación diversas. Para un filtro de material pétreo de un proceso de filtración que conste de un solo filtro, o para el primer filtro de un proceso de doble etapa, la ecuación es la siguiente. (7)

$$E_1 = \frac{100}{1 + 0.4425 \sqrt{\frac{W}{VF}}} \quad (2-1)$$

donde

E_1 = rendimiento de eliminación de la DBO a la temperatura de 20 °C, incluyendo los efectos de la recirculación y la sedimentación, porcentaje.

W = carga de DBO aplicada al filtro, kg/día.

V = volumen del medio filtrante.

F = Factor de recirculación.

El factor de recirculación se calcula empleando la ecuación:

$$F = \frac{1 + R}{(1 + R/10)^2} \quad (2-2)$$

donde

R = tasa de recirculación, Q_r/Q

Q_r = caudal de recirculación.

Q = caudal de agua residual.

El factor de recirculación representa el número medio de veces que circula a través del filtro la materia orgánica del afluente. El término $R/10$ pretende tener en cuenta el hecho, observado experimentalmente, de que la eliminación de la materia orgánica disminuye conforme aumenta el número de pasos de aquella a través del filtro.(7)

2.4.3 Ventajas y desventajas de la utilización de filtros percoladores

- Ventajas

Entre las ventajas del uso de los filtros percoladores se encuentra la estabilidad del efluente independientemente de la variabilidad de la calidad del afluente. Además de esto el funcionamiento de estos filtros es sencillo y seguro. (14)

Debido a la amplia utilización de los mismos en el tratamiento secundario de las aguas residuales la operación se ha tornado sencilla y poco influenciada por el personal operador.

Debido a que el flujo del líquido se da por gravedad, los costos de operación disminuyen. (14)

Poseen una alta resistencia a la variación en la carga orgánica debido a la presencia tanto de microorganismos aerobios como anaerobios y facultativos. (14)

El costo se ve disminuido cuando no se hace necesaria la utilización de mecanismos adicionales para suministrar ventilación forzada. (14)

- Desventajas

Una de las principales desventajas de los filtros percoladores son los olores, especialmente si el agua es séptica y en climas cálidos. Pueden producirse moscas a menos que se tomen medidas al respecto. (14)

Se producen grandes cantidades de lodo que pueden llegar a obstruir el filtro, con lo cual se producen acumulaciones de agua en la superficie del filtro. (14)

Cuando el lecho es muy profundo el oxígeno que se obtiene por medios naturales puede no ser suficiente lo que obligaría a instalar sistemas de oxigenación que aumentan los costos de construcción del sistema. (14)

2.5 Filtro anaerobio de flujo ascendente

2.5.1 Funcionamiento del filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA)

En los filtros anaeróbicos de flujo ascendente (FAFA), los compuestos orgánicos solubles son transformados por la biomasa en productos intermedios o finales, metano y dióxido de carbono.

En estos filtros la biomasa se encuentra adherida a un relleno que se encuentra contenido dentro del reactor y ocupa la mayor parte del volumen del mismo. (15)

Los materiales que se utilizan como medio filtrante son muy variados, cantos rodados, piedra caliza, granito, trozos de ladrillo, conchas y gran variedad de anillos plásticos. En el FAFA se da una combinación entre sistema con biomasa suspendida y biomasa fija, ya que en la superficie del medio filtrante se forma una película biológica mientras que en los espacios vacíos la biomasa puede quedar suspendida. (13)

De acuerdo con el Ingeniero Elías Rosales en su publicación "Tanque Sépticos" donde se analiza el funcionamiento de filtros con medio compuesto por piedras, el funcionamiento del filtro está basado en el acomodo de los materiales en orden descendente de su tamaño. Esto obedece a que de esta manera las partículas se irán quedando en un espacio donde han tenido mejores posibilidades de viajar y donde la capacidad del medio filtrante para dejarlas acumuladas es mayor. Esto reduce las posibilidades de obstrucción del filtro.

2.5.2 Desempeño del filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA)

Los factores que afectan el rendimiento del FAFA se pueden dividir en tres categorías según Young en su artículo "Factores que afectan el diseño y rendimiento de los filtros

anaeróbicos de flujo ascendente (Factor affecting the desing and performance of upflow anaerobic filters)”: Factores físicos, factores de rendimiento y factores hidráulicos.

- Factores físicos

Los dos factores físicos más importantes en el desempeño del FAFA son la configuración del reactor y la colocación del medio.

En cuanto a la configuración del reactor estos filtros incluyen tanques cilíndricos y rectangulares con diámetros y alturas que varían de acuerdo con el volumen a tratar.

La altura del lecho filtrante puede variar desde la totalidad hasta un 50 a 70% de la altura del reactor. El material que se utiliza como medio filtrante es variado e incluyen anillos y bloques modulares formados por hojas de plástico corrugado, las cuales pueden tienen canales que pueden permitir o no el flujo lateral, estos medios se muestran en la figura 9.

El área superficial promedio para estos medios filtrantes se encuentra alrededor de los 100 m²/m³.

Según este autor pruebas de laboratorio han mostrado que se obtienen mayores eficiencias cuando se utilizan medio con flujo lateral; sin embargo, aclara que en la elección del medio otros factores podrían ser determinantes como consideraciones de campo, económicas y factores de operación.

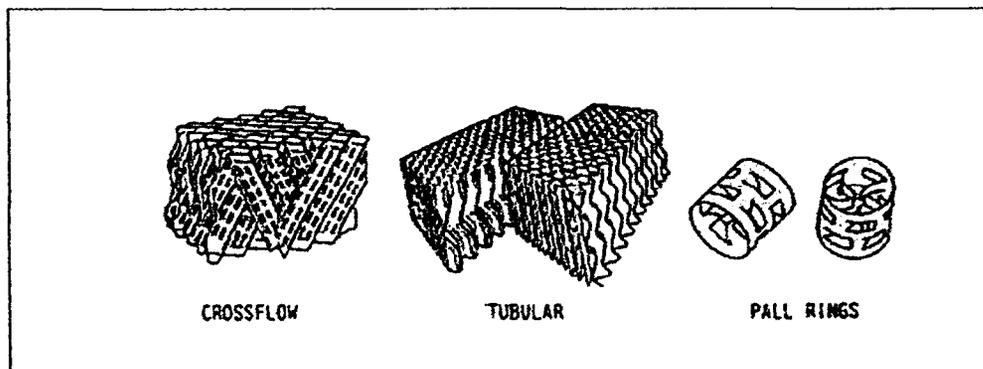


Figura 9. Medio filtrante plástico para biofiltros anaeróbicos.

Fuente: James C. Young, 1991

De acuerdo con lo expuesto por Young es este artículo, el objetivo del medio es retener los sólidos biológicos dentro del reactor como una película unida al medio o suspendida dentro de los espacios vacíos o debajo del medio como una masa de lodos granulada o floculada .

Además, el medio actúa como separador entre sólido y gas, ayuda a proveer flujo uniforme a través del reactor, mejora el contacto entre los componentes del desecho y la biomasa contenida en el reactor y permite la acumulación de grandes cantidades de biomasa necesaria para producir tiempo de retención hidráulica largos.

De acuerdo con este artículo, el área de superficie específica parece tener un efecto menor en el rendimiento, ya de acuerdo con las pruebas dirigidas por el autor (James C. Young) se obtiene un aumento de sólo 5% de mejora en la remoción de DQO al aumentar al doble el área superficial del medio.(15)

Cuando se utiliza medio filtrante compuesto por rocas, es de suma importancia la realización de limpiezas periódicas para evitar la obstrucción del filtro.

- Factores de rendimiento

Con el objetivo de realizar una selección de los parámetros cuya influencia en la eficiencia y rendimiento de los filtros fuera mayor, Young realizó un análisis de los resultados de pruebas realizadas por él y otros autores.

Este análisis mostró que el tiempo de retención hidráulica es el parámetro con efecto más importante sobre la remoción de DQO.

Además se demostró, que factores como la concentración del afluente y el área superficial del medio no son factores determinantes en el desempeño del filtro, siendo de mayor importancia factores como el tamaño de los poros y la geometría del medio. Por otro lado, se analizó la importancia de la pendiente de los canales cuando se utilizó medio modular (ver figura 9) se observó una mejora en la correlación con la eficiencia en remoción de DQO. Esto puede reflejar el aumento en la retención de sólidos cuando la pendiente de los canales disminuye.

- Factores hidráulicos

Como ya se ha dicho anteriormente, el tiempo de retención hidráulico es el factor más determinante en la eficiencia en remoción de DQO en los filtros anaeróbicos de flujo

ascendente, lo cual es apoyado por resultados obtenidos por Young de los cuales concluye que para un tiempo de retención hidráulica dado, la carga orgánica y la intensidad del desecho afluente no son parámetros de rendimiento principales.

La recirculación del efluente es uno de los factores hidráulicos tomados en cuenta por Young. De acuerdo con los estudios realizados, este parámetro tiene poco beneficio en la eficiencia en la remoción de DQO. No obstante, la recirculación del efluente reduce la alcalinidad y los requerimientos de nutrientes, mejora la distribución del desecho a través del reactor y reduce la concentración de ácidos orgánicos en contacto con los microorganismos en la zona de lodos. Estos beneficios son mayores durante el período de arranque del filtro, cuando la eficiencia es baja y la concentración de ácidos orgánicos es alta.

Debe tomarse en cuenta que altas tasas de recirculación, pueden causar también altas velocidades en el flujo ascendente y una consecuente pérdida excesiva de biomasa.

Otros factores hidráulicos son la velocidad del flujo ascendente y las variaciones en el caudal y la carga orgánica. Debido a que no se cuenta con datos suficientes que permitan determinar los valores óptimos para estos parámetros, Young recomienda que las tasas de recirculación y la carga de desecho sean limitadas para obtener una velocidad de flujo ascendente bajo los 10 m/d durante el arranque. En este período, es importante mantener bajas velocidades para evitar la pérdida de biomasa, que apenas comienza a formarse. Las tasas de recirculación pueden ser aumentadas gradualmente mientras el reactor madura, pero velocidades por encima de los 25 m/d causan excesiva pérdida de sólidos.

En cuanto a la variación de carga y caudal, es reconocido que los filtros anaeróbicos aceptan grandes variaciones en el caudal de desecho y carga orgánica sin colapsar y que el tiempo requerido para la recuperación aumenta conforme aumenta la magnitud y la duración del cambio.

En filtros a gran escala, se utilizan tanques para disminuir estas variaciones de carga y de caudal.

- Otros factores

Otros factores como la temperatura, el pH y la concentración de nutrientes deben ser considerados. Los valores óptimos para estos parámetros deben ser los que sean adecuados para el crecimiento anaerobio. Además, se deben excluir los componentes tóxicos o inhibidores, de lo contrario deben incluirse métodos para neutralizar el efecto de estos componentes.

2.5.3 Diseño del filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) con lecho de piedras

El proceso de diseño que se desarrolla a continuación, está basado en la publicación "Tanques Sépticos" del Ingeniero Elías Rosales.

Partiendo del hecho de que el sistema que se propone está orientado a complementar uso que se ha venido dando en el país del sistema de tanque séptico, debe recalcarse el hecho de que el sistema debe cumplir con la característica básica de poseer dimensiones que permitan ser construido dentro del espacio reducido que usualmente se destina para este fin en el país. De esta manera, se busca que la implantación del FAFA no sea un obstáculo para el usuario en cuanto a costo y espacio.

Se debe analizar el espacio disponible, así como los materiales a utilizar y definir dimensiones convenientes para la unidad. Las dimensiones tanto del reactor como de las capas de material a utilizar, deben dar como resultado un tiempo de retención hidráulica que se encuentre dentro del rango recomendado.

En este caso de acuerdo con el texto mencionado este tiempo de retención hidráulica debe estar entre 6 y 12 horas. Esto se debe a que como ya fue antes mencionado, se ha demostrado ampliamente que este es el parámetro determinante en el desempeño de estos filtros.

Deben conocerse inicialmente las características físicas de los materiales a utilizar. Estas características son: peso volumétrico, densidad aparente, relación de vacíos, tamaño máximo, tamaño mínimo, tamaño promedio, superficie específica.

El siguiente paso es determinar la cantidad de agua que se tratará en el filtro, para esto debe conocer la dotación de agua por persona por día, de acuerdo con la zona en la cual se localizará el filtro, la cantidad de usuarios de la unidad de tratamiento y el factor de retorno a utilizar.

De acuerdo con los datos anteriores se procede a calcular el volumen disponible en el filtro para albergar los líquidos a tratar, de acuerdo con la ecuación 2-3. Para esto se consideran tres etapas: el líquido ubicado en los espacios vacíos entre el medio filtrante (ruta de flujo), el líquido libre después del medio filtrante y el volumen de líquido definido por el ducto que soporta al medio filtrante.

Para calcular el volumen de agua que puede ser albergada dentro de un volumen dado de piedra debe multiplicarse el volumen total de la capa por la razón de vacíos del material.

Cuando se cuenta ya con la capacidad del filtro se calcula el tiempo de retención hidráulica de la unidad como sigue:

$$TRH = \frac{V_{\text{liquido}}}{Q} \quad (2-3)$$

donde:

TRH = Tiempo de retención hidráulica en días.

V_{liquido} = capacidad del filtro en m^3 .

Q = caudal de líquido a tratar en $m^3/\text{día}$.

Como ya se dijo anteriormente este tiempo de retención hidráulica debe encontrarse entre 6 y 12 horas, para asegurar la capacidad sanitaria del filtro, es decir la eficiencia en remoción de materia orgánica.

Además, se debe garantizar la funcionalidad hidráulica del filtro. Para esto se debe comprobar que la resistencia total al flujo del medio filtrante sea menor que la carga hidráulica en el filtro, esto es, la diferencia de nivel entre la salida del líquido del tanque séptico y la salida del líquido tratado en el FAFA.

El cálculo de la resistencia al flujo de una capa de material se realiza como sigue:

$$H_m = \frac{\gamma_f - \gamma_w}{\gamma_m} \cdot (1 - \rho) \cdot L \quad (2-4)$$

donde:

γ_f = peso volumétrico del material (kg/m^3)

γ_w = peso volumétrico del agua ($1000 kg/m^3$)

ρ = razón de vacíos del material

L = Espesor de la capa (m)

En los casos en los cuales el espacio no es un factor en extremo limitante, es posible fijar un tiempo de retención hidráulica conveniente de acuerdo con la remoción deseada. A

partir de este tiempo de retención, se procede a fijar el volumen necesario de la siguiente manera:

$$V_{\text{liquido}} = TRH \cdot Q \quad (2-5)$$

donde:

V_{liquido} = capacidad del filtro en m^3 .

TRH = Tiempo de retención hidráulica en días.

Q = caudal de líquido a tratar en $m^3/\text{día}$.

Con base en este volumen, se procede entonces a dimensionar el filtro y comprobar su funcionabilidad hidráulica como se mostró anteriormente.

Es importante tomar en cuenta algunas recomendaciones al diseñar los diferentes elementos del filtro.

- Medio filtrante

Las características a tomar en cuenta en cuanto al medio filtrante son el material mismo y su área superficial. Como se explicó anteriormente, el área superficial del material filtrante debe ser suficiente para albergar la película biológica. Esta área superficial debe ser igual o superior a $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$; sin embargo, como se indicó antes, no se obtienen grandes mejoras en la eficiencia al aumentar el área superficial del medio. El material utilizado debe ser inerte y resistente a la erosión. La profundidad del lecho suele situarse entre 0,8 y 2,0 metros. La forma puede variar dependiendo de la disponibilidades constructivas y de espacio (14)

- Sistema de fondo falso y drenaje

Este sistema debe ser de un material que facilite el proceso constructivo, y debe tener perforaciones con un espaciamiento no mayor que 2 cm. El material del que esté compuesto este fondo falso, debe ser resistente a la corrosión que causa el contacto constante con el agua residual. Además, debe estar apoyado de manera que soporte el peso del lecho filtrante. El sistema cuenta con un drenaje en la parte superior en el que se recoge el agua filtrada y se envía a la siguiente etapa del tratamiento o al alcantarillado sanitario, si es el caso.(2)

- Ventilación

Los gases producidos en el proceso de digestión anaerobia deben tener una vía para ser evacuados del filtro.

- Potencial Hidrógeno (pH)

La producción de hidrógeno y su utilización puede afectar el curso de la fermentación en los sistemas anaerobios, además de la dinámica de formación de gránulos en los reactores anaerobios. El pH óptimo para este tipo de proceso oscila entre 6.5 y 7.5, por esto es necesario vigilar este parámetro periódicamente. (2)

- Temperatura

Se debe mantener una temperatura entre 25 y 35°C para lograr un correcto funcionamiento del sistema. (2)

- Concentraciones y cargas orgánicas

La variación de la carga orgánica depende de la concentración de materia orgánica y del caudal. Se recomienda para el diseño una carga comprendida en un rango de 0,1 kgDBO₅/m³d a 0,5 kgDBO₅/m³d.(2)

- Sistema de retrolavado

Con el fin de solucionar problemas de obstrucción del filtro, se debe proveer de un sistema que permita un lavado a presión desde la parte superior provocando un flujo contrario y evacuando así el exceso de biomasa.

2.5.4 Ventajas y desventajas de la utilización del filtro anaerobio flujo ascendente.

- Ventajas

Entre las ventajas de la utilización de estos filtros se encuentra la baja cantidad de lodos generados y con un mayor grado de mineralización en comparación con los procesos aerobios, por lo que los lodos requieren poco tratamiento. (13)

Permiten la operación con tiempos de retención menores, lo que significa menores volúmenes de instalación, disminuyendo los costos. (13)

Por otro lado, estos sistemas producen biogás que podría ser aprovechado como fuente de energía. (13)

Estos filtros pueden tratar cargas orgánicas mayores y soportan mayores variaciones de carga. (13)

- Desventajas

Entre las desventajas de los filtros anaerobios está la formación de rutas de flujo preferenciales en el lecho filtrante y la posibilidad de obstrucción debido a la acumulación de sólidos. (13)

Además, la calidad del efluente en los procesos anaerobios es menor que en procesos aerobios. (13)

El proceso es sensible a la inhibición por sustancias que usualmente se encuentran en aguas residuales industriales como metales pesados, hidrocarburos clorados y detergentes aniónicos. (13)

Por último se puede producir ácido sulfhídrico, el cual es muy tóxico y corrosivo; por lo cual es necesario que el pH no sea inferior a 6. (13)

CAPÍTULO 3. MONTAJE DE LOS PROTOTIPOS

3.1 Ubicación

Ambos sistemas están ubicados en la Urbanización Montes del Este, la cual se encuentra en el Distrito Tres Ríos del Cantón de la Unión a 200 m al Este de la Subestación de electricidad de Tres Ríos.

3.2 Diseño preliminar del filtro percolador

La empresa constructora de la urbanización antes mencionada (Coto y Compañía S.A) tiene experiencia en la construcción de filtros anaerobios; sin embargo, no había construido, hasta el momento de realizado este proyecto, filtros percoladores. Por este motivo, se realiza un diseño preliminar con base en el cual se construye el filtro percolador. Por motivos constructivos, y de disponibilidad de materiales, algunas de las características que este diseño preliminar incluye fueron modificadas. En la sección siguiente se presentan las características finales de este sistema, y además en el capítulo siguiente, se realiza una revisión de las características del sistema para determinar si cumple con las pautas marcadas en diferentes documentos elegidos para este fin.

El diseño del filtro percolador, se realizó con base en las ecuaciones de la NRC (The National Research Council) y el texto Tratamiento de Aguas Residuales, Parte I del Instituto Internacional para Ingeniería Hidráulica y Ambiental de los Países Bajos.

3.2.1 Cálculo del caudal a tratar

- Dotación Promedio: 309 l/hab-día (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Análisis Sectorial de Agua Potable y Saneamiento en Costa Rica, 2002). Aunque éste es un valor muy general, que podría no describir el comportamiento de la población de la zona específica donde se localizan los sistemas, en cuanto a consumo de agua potable, no se cuenta con información más específica; sin embargo, la consecuencia de esto es un diseño con una capacidad mayor que la necesaria para el numero de habitantes considerados, lo cual puede verse como un factor de seguridad ante un posible aumento en el numero de habitantes o el tamaño de la vivienda.

- Viviendas de 3 dormitorios: 5 personas.

$$Q = 309 \frac{l}{hab \cdot día} \cdot 5 hab \cdot 0,85 = 1\,313 \frac{l}{día}$$

3.2.2 Cálculo de la carga orgánica esperada

$$a) 250 \frac{mgDBO}{l} \rightarrow 250 \frac{mg}{l} \cdot 1\,313 \frac{l}{día} \cdot \frac{1g}{1\,000mg} = 328 \frac{g}{día}$$

$$b) 300 \frac{mgDBO}{l} \rightarrow 300 \frac{mg}{l} \cdot 1\,313 \frac{l}{día} \cdot \frac{1g}{1\,000mg} = 394 \frac{g}{día}$$

Como se observa, se realizarán los cálculos para un rango de DBO de entrada entre 250 y 300 mg/l (caso a y b respectivamente).

3.2.3 Cálculo de la eficiencia requerida

- DBO permitido: 50 mg/l (de acuerdo con el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales del Ministerio de Salud)
- Carga orgánica permitida:

$$50 \frac{mg}{l} \cdot 1\,313 \frac{l}{día} \cdot \frac{1g}{1\,000mg} = 65,7 \frac{g}{día}$$

- Remoción de DBO esperada en el tanque séptico: 30% de acuerdo con el documento "Tanques Sépticos" del Ing. Elías Rosales. (12)
- DBO del agua de entrada al filtro:

$$a) DBO_{\text{entrada filtro}} = 328 - \left(\left(328 \frac{g}{día} \right) \cdot 0,30 \right) = 229,6 \frac{g}{día}$$

$$b) DBO_{\text{entrada filtro}} = 394 - \left(\left(394 \frac{g}{día} \right) \cdot 0,30 \right) = 275,8 \frac{g}{día}$$

- Eficiencia requerida en el filtro:

$$\text{a) } \%E = \left(\frac{229,6 - 65,7}{229,6} \right) \cdot 100 = 71,4\%$$

$$\text{b) } \%E = \left(\frac{275,8 - 65,7}{275,8} \right) \cdot 100 = 76,2\%$$

3.2.4 Parámetros de diseño

- Tasa de carga volumétrica:

$$\text{a) } L_v = \frac{0,2296 \frac{\text{kg DBO}}{\text{día}}}{(1,2\text{m})^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D} = \frac{0,203 \text{ kg}}{D \text{ m}^3 \text{ día}}$$

$$\text{b) } L_v = \frac{0,2758 \frac{\text{kg DBO}}{\text{día}}}{(1,2\text{m})^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D} = \frac{0,244 \text{ kg}}{D \text{ m}^3 \text{ día}}$$

- Tasa de carga hidráulica

$$HSLR = \frac{1,02 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{\left((1,20\text{m})^2 \cdot \frac{\pi}{4} \right)} = 0,902 \frac{\text{m}}{\text{día}} = 0,038 \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

- Tasa de carga superficial: calculada asumiendo un área específica del medio filtrante de $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$

$$\text{a) } OSLR = 1000 \cdot \frac{0,203 \frac{\text{kg}}{D \text{ m}^3 \text{ día}}}{100 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}} = \frac{2,03 \text{ g DBO}}{D \text{ m}^2 \text{ día}}$$

$$b) OSLR = 1\ 000 \cdot \frac{0,244 \text{ kg}}{100 \frac{m^2}{m^3}} \cdot \frac{D \text{ m}^3 \text{ día}}{D \text{ m}^2 \text{ día}} = \frac{2,44 \text{ g DBO}}{D \text{ m}^2 \text{ día}}$$

donde D es la profundidad del lecho filtrante.

3.2.5 Ecuaciones de la NRC

$$a) E = \frac{100}{1 + a\sqrt{L_v}} = \frac{100}{1 + 0,44\sqrt{\frac{0,203}{D}}} = 71,4\% \rightarrow D = 0,24m$$

$$b) E = \frac{100}{1 + a\sqrt{L_v}} = \frac{100}{1 + 0,44\sqrt{\frac{0,244}{D}}} = 76,2\% \rightarrow D = 0,48m$$

De esta manera se obtiene que el espesor del lecho debe estar entre 0,24 m y 0,48 m. Se elige entonces un espesor de 0,60 m, constructivamente cómodo y mayor que el teórico, para tomar en cuenta las posibles variaciones en las características del medio filtrante, el caudal y la carga orgánica. Además de esto, se siguen los lineamientos recomendados para el diseño de este tipo de filtros, expuestos en el capítulo anterior. El filtro diseñado se muestra en la figura 10, en la siguiente página.

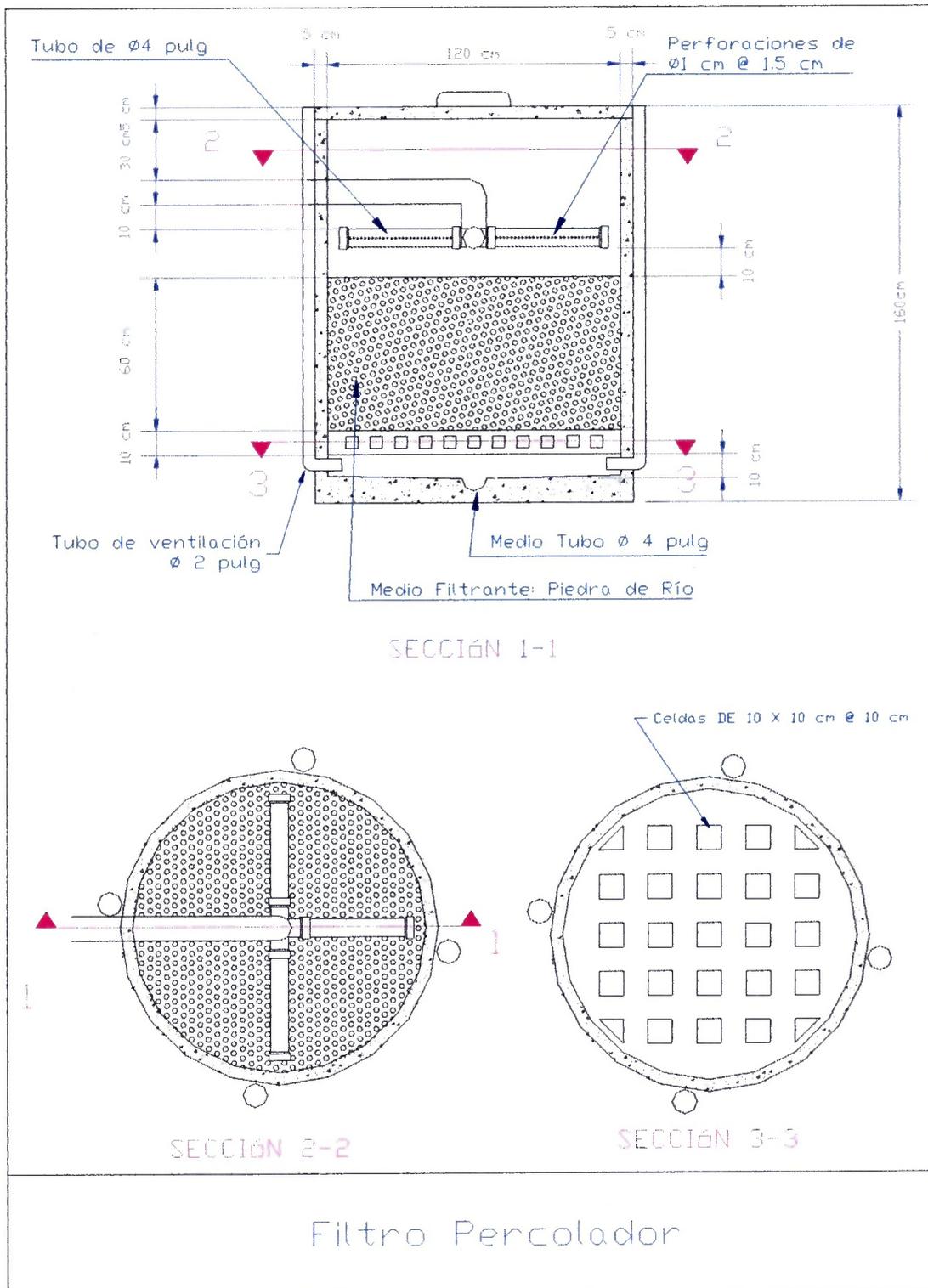


Figura N° 10. Diseño preliminar de Filtro Percolador

3.3 Descripción del sistema con filtro percolador

3.3.1 Caracterización de las familias que utilizan el sistema individual para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

La familia que ocupa esta vivienda está compuesta de dos adultos y tres menores, es decir cinco personas en total. Esta vivienda se encuentra habitada la mayor parte del tiempo, por lo cual la producción de agua residual no cesa por largos períodos.

La estructura de la familia es bastante tradicional: un padre que trabaja fuera del hogar, una madre que trabaja en el hogar y tres hijos estudiantes. Debido a esto, las actividades en las cuales se consume agua potable obedecen al patrón de consumo promedio del país. Esto es, un mayor consumo en la mañana, al medio día y al inicio de la noche, horas a las cuales las personas realizan actividades de limpieza personal o preparan los alimentos.

Las actividades relacionadas con la limpieza de la vivienda, se realizan a diario, y son prácticamente las mismas, con algunas excepciones, como el riego de jardines, lavado de ventanas y lavado de automóvil, las cuales son usualmente realizadas los fines de semana. El lavado de ropa se realiza normalmente dos veces por semana, en días que pueden variar y que usualmente no se encuentran dentro del fin de semana.

Los fines de semana el consumo aumenta debido a que todos los miembros se encuentran en la vivienda, además las horas en las cuales se da el mayor consumo pueden variar.

Un aspecto que cabe resaltar es que la familia acostumbra depositar el papel de baño dentro del servicio sanitario, lo cual puede afectar el desempeño del sistema de tratamiento de aguas residuales, y reducir los períodos entre limpiezas del tanque séptico.

3.3.2 Descripción general del sistema individual de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Las aguas residuales producidas en la vivienda son enviadas a una caja de registro construida especialmente para la toma de muestras del agua de entrada al tanque séptico. Antes de esta caja se construyó una desviación (by-pass) que permite que las aguas sean enviadas directamente al tanque séptico sin pasar por esta caja, si se desea. Esto permite realizar las limpiezas de la caja previas al muestreo, necesarias para asegurar que la muestra tomada es reciente (ver figura 11).

Las aguas residuales pasan luego a una caja de registro para luego pasar al tanque séptico, donde recibe el tratamiento primario por medio de sedimentación, así como una primera biodigestión de la materia orgánica. Seguidamente pasan al filtro percolador y por último a los drenajes, o zanjas de infiltración. Existe una caja de registro entre las zanjas de infiltración y el filtro percolador destinada a la extracción de muestras del efluente del filtro.

3.3.3 Caudal a tratar en el sistema

- Dotación Promedio: 309 l/hab-día (Análisis Sectorial de Agua Potable y Saneamiento en Costa Rica, 2002).
- Factor de Retorno: 85%
- Cantidad de usuarios: 5 personas.

$$Q = 309 \frac{l}{hab \cdot día} \cdot 5hab \cdot 0,85 = 1\,313 \frac{l}{día}$$

3.3.4 Descripción de la caja de registro donde se toma la muestra de aguas crudas.

- Sección: 0,45 x 0,45 m.
- Profundidad: 0,50 m.
- Volumen: 0,101 m³.

3.3.5 Dimensiones del tanque séptico

- Ancho: 0,82 m.
- Largo: 2,46 m.
- Profundidad: 1,43 m.
- Profundidad de líquidos: 1,06 m.
- Volumen Total: 2,9 m³.
- Volumen Efectivo: 2,14 m³.
- Tiempo de retención hidráulica :1,6 días.
-

3.3.6 Características del filtro percolador

- Diámetro: 1,20 m
- Profundidad: 1.90 m.
- Profundidad del lecho de piedra: 1,25 m.
- Diámetro afluente: 0,102 m.
- Material del reactor: concreto reforzado.
- Distribuidor de carga orgánica: cuatro brazos formados por tubo de 0,102 m de diámetro cortados longitudinalmente por la mitad colocados directamente sobre el medio filtrante. Orificios de forma alargada irregularmente espaciados como se muestra en la figura 14.
- Medio filtrante: piedra quebrada con un tamaño máximo de aproximadamente 10 cm.
- Fondo falso: losa de concreto de 10 cm de espesor con perforaciones cilíndricas de 5 cm de diámetro (ver figura 16)
- Ventilación: 4 tubos de PVC que conectan el drenaje inferior con la parte superior del filtro, permitiendo el flujo de aire. Además existe una chimenea de evacuación de gases mediante la cual éstos son dirigidos hacia el nivel de techo de la vivienda.

3.3.7 Dimensiones del drenaje

- Sección: 0,70 m x 0,70 m
- Longitud: 13 m.

En la figura 11 se puede observar un esquema en planta del sistema donde se muestran todos sus componentes así como la dirección del flujo de agua residual en el sistema, en la figura 12 se muestra un esquema transversal resumido en el cual se muestran los elementos más importantes del sistema, la figura 13 muestra una fotografía del Filtro Percolador en etapa constructiva, la figura 14 muestra el filtro percolador construido y se puede ver el distribuidor, la figura 15 muestra una fotografía del las zanjas de drenaje en construcción y la figura 16 muestra el fondo falso antes de su instalación.

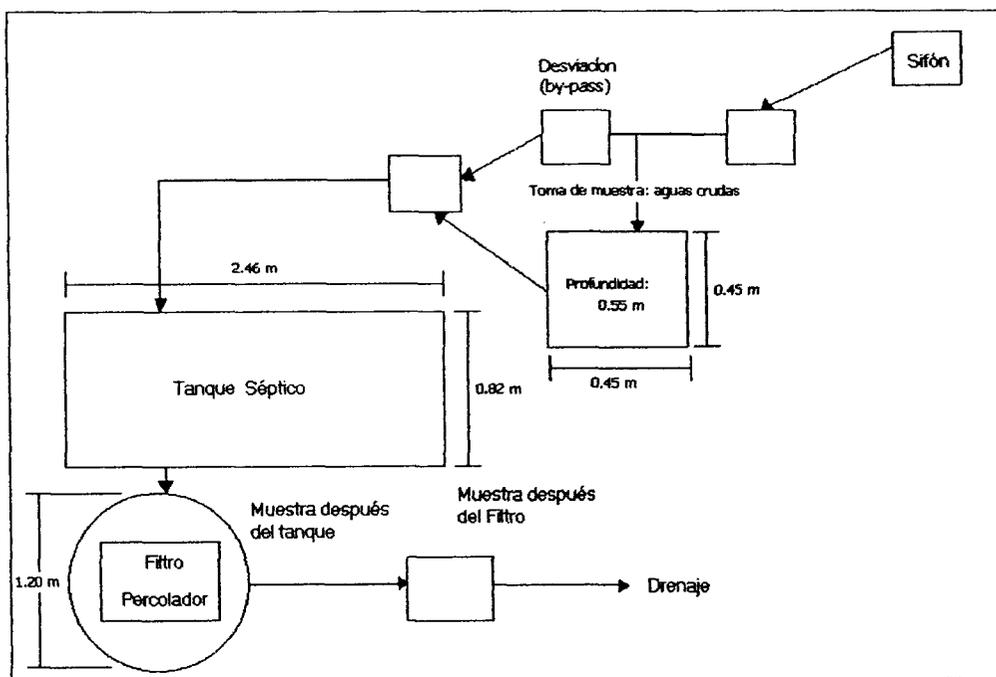


Figura N° 11. Esquema en planta del sistema con Filtro Percolador.

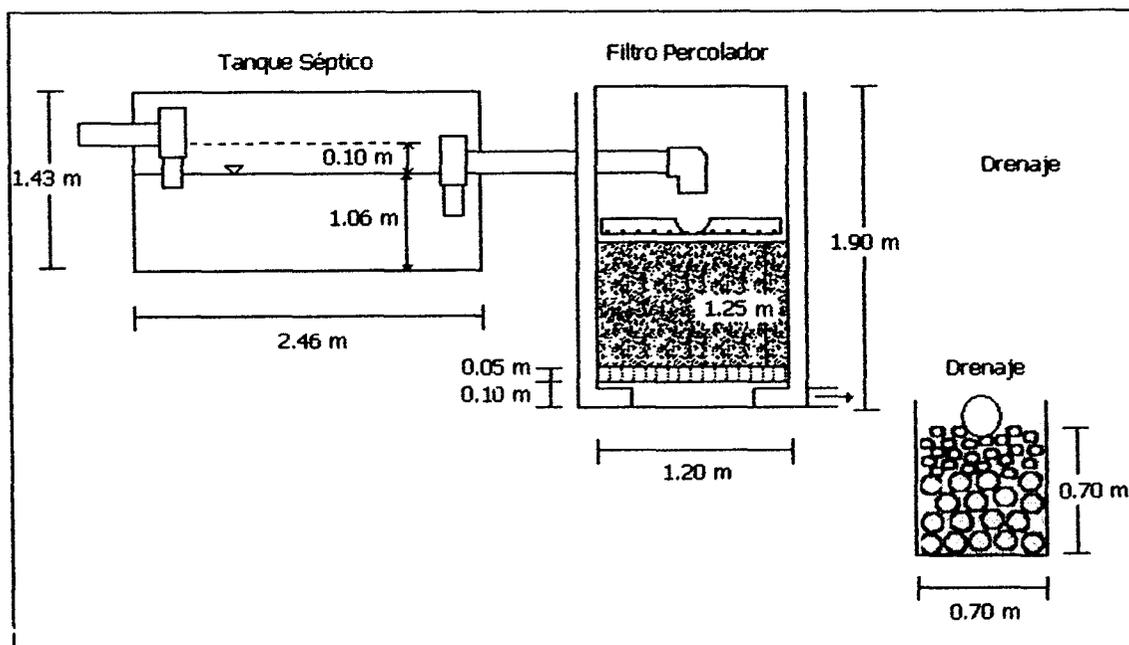


Figura N° 12. Esquema transversal del sistema con Filtro Percolador.



Figura N° 13. Filtro Percolador en etapa de construcción



Figura N° 14. Sistema de distribución del Filtro Percolador



Figura N° 15. Drenaje en proceso constructivo



Figura N° 16. Fondo falso empleado en ambos filtros

3.4 Descripción del sistema con filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA)

3.4.1 Descripción de la familia que utiliza el sistema individual de tratamiento de aguas residuales domésticas.

La familia que habita esta vivienda está compuesta por un adulto y un niño. Esta vivienda, al contrario de la anterior, se encuentra deshabitada la mayor parte del día de lunes a viernes.

La producción de agua residual entre semana se da de 6:00 a.m a 7:30 a.m aproximadamente, período en el cual ambas personas utilizan la ducha, el servicio sanitario y toman el desayuno. Después de las 6:00 p.m en adelante ambos vuelven a la casa y preparan alimentos.

Los fines de semana ambos habitantes se encuentran en la vivienda, por lo que la producción de agua residual, proveniente del servicio sanitario y la preparación de comidas, aumenta. Además, en estos dos días se realizan las actividades de mayor consumo de agua en la semana. Estas actividades son el lavado de ropa, el riego de jardines, limpieza general de la vivienda y lavado de automóvil.

En un sábado típico, las aguas residuales que entran en el sistema de tratamiento de aguas residuales, tienen una apariencia jabonosa y coloración celeste debido al detergente utilizado en el lavado de ropa.

En esta vivienda también se deposita el papel higiénico dentro del servicio sanitario, lo que, como se indicó antes, afecta el desempeño del sistema y puede provocar que se requieran limpiezas más frecuentes en el tanque séptico.

3.4.2 Descripción general del sistema individual de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Las aguas residuales producidas en esta vivienda, son enviadas a un tanque de un metro cúbico (ver figura 17) construido para la toma de muestras. Este tanque fue construido de este tamaño para lograr acumular agua residual de un período representativo de tiempo, tomando de igual manera una muestra representativa de los residuos producidos en ese período.

Después de este tanque, el líquido pasa a una caja de registro para luego llegar al tanque séptico donde se da la sedimentación y la primera biodigestión de la materia orgánica.

Seguidamente las aguas residuales llegan al FAFA y por último a las zanjas de infiltración.

En la figura 17 se puede observar un esquema en planta del sistema, en este esquema se muestran todos los elementos del sistema, así como la dirección del flujo de agua residual.

A continuación, se resumen las características más importantes de los principales elementos del sistema

3.4.3 Caudal a tratar en el sistema

- Dotación Promedio: 309 l/hab·día (Análisis Sectorial de Agua Potable y Saneamiento en Costa Rica, 2002).
- Factor de Retorno: 85%
- Cantidad de usuarios: 2 personas.

$$Q = 309 \frac{l}{hab \cdot dia} \cdot 2hab \cdot 0.85 = 525 \frac{l}{dia}$$

3.4.4 Dimensiones del tanque séptico

- Ancho: 0,82 m.
- Largo: 2,46 m.
- Profundidad: 1,43 m.
- Profundidad de líquidos: 1,06 m.
- Volumen Total: 2,88 m³.
- Volumen Efectivo: 2,14 m³.
- Tiempo de retención hidráulica: 4,1 días.

3.4.5 Características del FAFA

- Diámetro: 1,20 m.
- Profundidad: 1,90 m.
- Profundidad del lecho de piedra: 1,25 m.
- Material del reactor: concreto reforzado.
- Medio filtrante: piedra quebrada con un tamaño máximo de aproximadamente 10 cm.
- Fondo falso: losa de concreto de 10 cm de espesor con perforaciones cilíndricas de 5 cm de diámetro (figura 16)

3.4.6 Dimensiones del drenaje

- Sección: 0,70 m x 0,70 m
- Longitud: 13 m.

En la figura 18, se muestra un esquema transversal resumido en el cual se muestran los elementos más importantes del sistema.

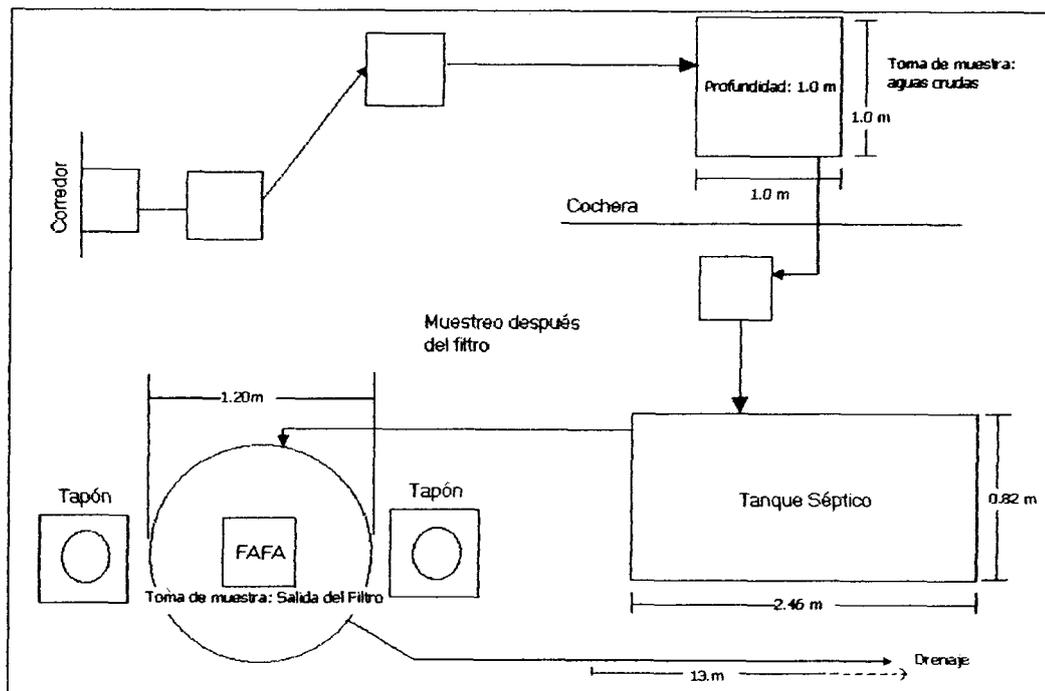


Figura N° 17. Esquema en planta del sistema con FAFA

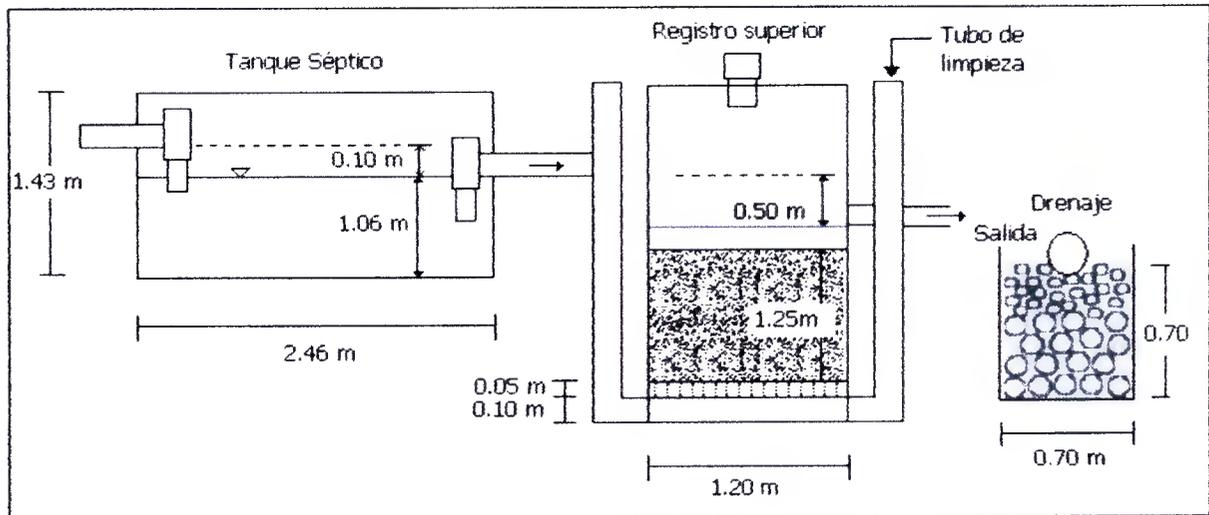


Figura Nº 18. Esquema transversal del sistema con FAFA.

En la siguiente fotografía, se muestra el FAFA en su etapa de construcción. En esta fotografía se observa además los tubos laterales que están conectados a la parte inferior del filtro y mediante los cuales el mismo se alimenta. Estos tubos permitirían además el retrolavado del filtro en caso de obstrucción del lecho filtrante.



Figura Nº 19. Filtro Anaerobio en etapa de construcción.

CAPÍTULO 4. REVISIÓN DE LOS DISEÑOS FINALES

Las siguientes revisiones de las estructuras construidas se realizan tomando como base el caudal a tratar calculado en la sección 3.2.1. Para el cálculo de este caudal se ha tomado como base una dotación promedio de 309 l/hab.día que es el valor reportado para Cartago en el Análisis Sectorial de Agua Potable y Saneamiento en Costa Rica. (ver anexo A).

Debe aclararse que en el caso del sistema con FAFA se efectúan algunos cálculos tanto para la situación actual de dos habitantes utilizando el sistema, como para la situación hipotética en que la vivienda estuviera ocupada por cuatro habitantes, dado que la misma consta con tres habitaciones.

4.1 Revisión de los tanques sépticos

Se han elegido varias normativas con base en las cuales se realiza la revisión de los tanques:

- Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 1991.
- Tanques Sépticos: Conceptos teóricos, base y aplicaciones del ingeniero Elías Rosales del CIVCO (ITCR), 2003.
- Proyecto Construcción y Operación de Sistemas de Tanques Sépticos de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT), 1997.
- Diseño Construcción y Operación del Tanques Sépticos Normas de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 1987.

Un extracto de los dos últimos códigos se presenta en el anexo B.

4.1.1 Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones

- Caudal a tratar en el sistema con filtro percolador: 1313 l/día = 1,313 m³/día
- Caudal a tratar en el sistema con FAFA: 0,525 m³/día

Artículo 7.132 Según este artículo se deberá calcular el volumen mínimo para un tanque séptico como sigue:

$$V = 1,5 \cdot Q \quad \text{Si } V < 5680 \text{ litros.} \quad (4-1)$$

$$V = 0,75 \cdot Q + 4\,260 \quad \text{Si } V > 5680 \text{ litros.} \quad (4-2)$$

Dado que el volumen de los tanques (2 900 l) es menor que 5 680 litros se tiene entonces:

Para el sistema con Filtro Percolador:

$$V = 1,5 \cdot 1\,313 \text{ l} = 1\,970 \text{ l}$$

Para el sistema con FAFA, ocupación actual (2 habitantes):

$$V = 1,5 \cdot 525 \text{ l} = 788 \text{ l}$$

Para el sistema con FAFA, 4 habitantes:

$$V = 1,5 \cdot 1\,050 \text{ l} = 1\,575 \text{ l}$$

Como se puede ver, tanto el volumen total de los tanques como el volumen efectivo son mayores que el volumen mínimo establecido arriba, y además es mayor que 1 200 litros, como se exige.

El tiempo entre limpiezas para el volumen calculado de acuerdo con la fórmula anterior es de 1 año. Dado que el volumen de los tanques es mayor que éste, se procede a calcular el período entre limpiezas como sugiere el código. En el caso del sistema con FAFA se calcula para la situación actual de la vivienda, es decir con dos habitantes, y una situación supuesta con 4 habitantes, de acuerdo con la capacidad de la vivienda (3 habitaciones).

$$V = (1 + 0,5n)Q \rightarrow n = 2 \cdot \left(\frac{V}{Q} - 1 \right) \quad (4-3)$$

Para el sistema con filtro percolador:

$$n = 2 \cdot \left(\frac{2,14}{1,313} - 1 \right) = 1,3 \text{ años}$$

Para el sistema con FAFA, ocupación actual (2 habitantes):

$$n = 2 \cdot \left(\frac{2,14}{0,525} - 1 \right) = 6,2 \text{ años}$$

Para el sistema con FAFA, para 4 habitantes:

$$n = 2 \cdot \left(\frac{2,14}{1,05} - 1 \right) = 2,1 \text{ años}$$

La tabla 7.17 establece dimensiones recomendadas para tanques sépticos de sección rectangular. Para un número de personas servidas menor que 6, se recomienda un ancho de 0,85 m, un largo de 1,60 m, un hondo líquido de 1,10 m y un hondo total de 1,45. Además, se recomienda un volumen neto de 1,5 m³.

Aunque las dimensiones del tanque son diferentes a las recomendadas, se cumple con el volumen mínimo establecido.

Artículo 7.133: Se revisa a continuación, el cumplimiento de las recomendaciones que se hacen en este artículo:

- a. En este punto, se recomienda que la menor dimensión en planta sea de 0,60 m. Los tanques cumplen con este requerimiento pues la menor dimensión en planta es de 0,82 m.
- b. La profundidad del líquido en los tanques es de 1,06 m, con lo que se cumple con este punto, ya que se recomienda que esta dimensión esté entre 0,75 y 1,50 m.
- c. El espacio libre sobre el nivel del líquido en el tanque es de 37 cm, el cual está por encima del mínimo establecido en este punto que es de 20% del la profundidad total del tanque, es decir 29 cm.
- d. El tubo de entrada penetra el tanque a 10 cm por encima del nivel del líquido, con lo que se cumple con el mínimo de 7,5 cm que se establece en este punto. Además, se cumple con la colocación de una T ventilada en la entrada, la cual se encuentra por

encima del nivel al que se encuentra la T de salida. Además se pide que esta penetre al menos 15 cm bajo el nivel de líquidos, lo cual se cumple.

- e. Este artículo exige que el dispositivo de salida penetre bajo el nivel del líquido una profundidad de al menos 40% de la profundidad del líquido. De acuerdo con las dimensiones de los tanques, el 40% de la profundidad del líquido (1.06 m) es 42 cm; sin embargo, la profundidad a la que penetra el dispositivo de salida es de 40 cm bajo el nivel del líquido. Dado que la diferencia es mínima (2 cm), se puede decir que sí se cumple con este artículo.

Artículo 7.134. Los tanques sépticos están contruidos en concreto, lo cual cumple con los requerimientos de este artículo, además presenta el repello de mortero de arena y cemento Pórtland para la impermeabilización.

4.1.2 Tanques Sépticos: Conceptos teóricos, base y aplicaciones

- Revisión del Diseño

Este documento define los siguientes criterios básicos para el análisis de un sistema individual para el tratamiento de aguas residuales domésticas:

→ Caudal de Diseño:

1 313 l/día para el sistema con filtro percolador

525 l/día para el sistema con FAFA

1 051 l/día para el sistema con FAFA con 4 habitantes

→ Las cantidades de materia orgánica que llegan a un sistema de tratamiento de desechos líquidos de origen doméstico, generalmente se consideran:

DBO = 220 mg/lit

SS = 300 mg/lit

→ Remoción esperada:

DBO: 70%

SS: 80 %

DBO = $220 - (220 \cdot 0.70) = 66,0$ mg/lit

SS = $300 - (300 \cdot 0.80) = 60,0$ mg/lit

→ Recomendaciones en cuanto a sedimentación:

Relación 1:3 entre ancho y longitud.

Profundidad mínima de líquidos de 1,0 m.

Como puede verse, ambas recomendaciones se cumplen en los tanques construidos, los cuales cuentan con relación 1:3 entre ancho y longitud y una profundidad de líquidos de 1,06 m.

→ Las paredes del tanque deben ser impermeabilizadas; así mismo, deben resistir el ataque de ácidos y sulfatos acarreados por el agua o formados en el proceso de tratamiento. El material del que están construidos los tanques cumplen con estas disposiciones.

→ El ancho mínimo debe ser de 70 cm. Los tanques cumplen con esta disposición con un ancho de 82 cm.

▪ Método racional para definir las dimensiones de un tanque sedimentador/biodigestor:

a. Volumen para sedimentación

$$V_s = (P)(q)t_h \quad (4-3)$$

Para sistema con filtro percolador:

$$V_s = 5h \cdot (309 \cdot 0,85 \frac{l}{h.día}) \cdot 1 día \cdot \frac{1 m^3}{1 000 l} = 1,31 m^3$$

Para el sistema con FAFA, ocupación actual:

$$V_s = 2h \cdot (309 \cdot 0,85 \frac{l}{h.día}) \cdot 1 día \cdot \frac{1 m^3}{1 000 l} = 0,525 m^3$$

Para el sistema con FAFA, 4 habitantes:

$$V_s = 4h \cdot (309 \cdot 0,85 \frac{l}{h.día}) \cdot 1 día \cdot \frac{1 m^3}{1 000 l} = 1,05 m^3$$

Donde:

P: cantidad de personas a atender.

q: caudal de aguas a tratar (m³/hab día)

t_h: tiempo de retención hidráulica a considerar para este proceso (1 día).

b. Volumen para biodigestión:

$$Vd = (0,5)10^{-3} (Pt_d) \quad (4-4)$$

$$t_d = 28(1.035)^{35-T} \quad (4-5)$$

Donde:

P: cantidad de personas a atender.

t_d : tiempo de retención hidráulica a considerar para este proceso (días)

T: Temperatura estimada del agua a tratar (°C).

$$t_d = 28(1,035)^{35-22} = 43,8 \text{ días}$$

Para el sistema con filtro percolador:

$$Vd = (0,5) \frac{1}{1\,000} (5 \cdot 43,8) = 0,1095 \text{ m}^3$$

Para el sistema con FAFA, ocupación actual:

$$Vd = (0,5) \frac{1}{1\,000} (2 \cdot 43,8) = 0,0438 \text{ m}^3$$

Para el sistema con FAFA, 4 habitantes:

$$Vd = (0,5) \frac{1}{1\,000} (4 \cdot 43,8) = 0,0876 \text{ m}^3$$

c. Volumen para el almacenamiento de lodos digeridos si se realizan limpiezas cada 2 años:

$$Va = 10^{-3} \cdot r \cdot P \cdot \left(n - \left(\frac{t_d}{365} \right) \right) \quad (4-6)$$

Donde:

r: factor que caracteriza las aguas y en consecuencia los lodos que se producirán. Cuando se llevan al tanque séptico solo las aguas de inodoros, $r = 30$ lt/pers-año; cuando se envían todos los desechos líquidos de una vivienda, $r = 40$ lt/pers-año.

P: cantidad de personas a atender.

N: período entre limpiezas o remoción de lodos (2 años).

td: tiempo de retención para biodigestión, calculado anteriormente.

Para el sistema con filtro percolador:

$$V_a = 10^{-3} \cdot 40 \frac{lt}{pers - año} \cdot 5 \cdot \left(2 - \left(\frac{43,8}{365} \right) \right) = 0,376 m^3$$

Para el sistema con FAFA, ocupación actual:

$$V_a = 10^{-3} \cdot 40 \frac{lt}{pers - año} \cdot 2 \cdot \left(2 - \left(\frac{43,8}{365} \right) \right) = 0,150 m^3$$

Para el sistema con FAFA, 4 habitantes:

$$V_a = 10^{-3} \cdot 40 \frac{lt}{pers - año} \cdot 4 \cdot \left(2 - \left(\frac{43,8}{365} \right) \right) = 0,300 m^3$$

d. Volumen total:

Para el sistema con filtro percolador:

$$V_T = V_s + V_d + V_a = 1,31 + 0,1095 + 0,376 = 1,80 m^3$$

Para el sistema con FAFA, ocupación actual

$$V_T = V_s + V_d + V_a = 0,525 + 0,0438 + 0,150 = 0,719 m^3$$

Para el sistema con FAFA, 4 habitantes:

$$V_T = V_s + V_d + V_a = 1,05 + 0,0876 + 0,300 = 1,44 m^3$$

Al comparar ambos valores con el volumen real de los tanques, se cumple con los requerimientos de espacio para sedimentación, biodigestión y almacenamiento de lodos digeridos.

Se puede calcular el período entre limpiezas real de los tanques, recalculando el volumen de almacenamiento, como la diferencia del volumen disponible en los tanques y los otros volúmenes ya calculados.

Volumen disponible para el almacenamiento de lodos:

Para el sistema con filtro percolador:

$$V_a = 2,14 - (1,31 + 0,1095) = 0,7205 \text{ m}^3$$

Para el sistema con FAFA, ocupación actual

$$V_a = 2,14 - (0,525 + 0,0438) = 1,57 \text{ m}^3$$

Para el sistema con FAFA, 4 habitantes:

$$V_a = 2,14 - (1,05 + 0,0876) = 1,00 \text{ m}^3$$

De acuerdo con la fórmula anotada anteriormente para calcular este volumen se puede calcular el período entre limpiezas:

$$n = \frac{V_a}{10^{-3} \cdot r \cdot P} + \left(\frac{t_d}{365} \right) \quad (4-7)$$

Para el sistema con filtro percolador:

$$n = \frac{0,7205}{10^{-3} \cdot 40 \cdot 5} + \left(\frac{43,8}{365} \right) = 3,7 \text{ años} = 45 \text{ meses}$$

Para el sistema con FAFA, estado actual:

$$n = \frac{1,57}{10^{-3} \cdot 40 \cdot 2} + \left(\frac{43,8}{365} \right) = 20 \text{ años}$$

Para el sistema con FAFA, 4 habitantes:

$$n = \frac{1}{10^{-3} \cdot 40 \cdot 4} + \left(\frac{43,8}{365} \right) = 6,4 \text{ años}$$

4.1.3 Proyecto construcción y operación de sistemas de tanques sépticos, Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT)

- Contribución de desechos

Para el sistema con filtro percolador: 1 313 l/día

Para el sistema con FAFA: 525 l/día

- Materiales

Se cumple con el requerimiento de esta norma en cuanto a materiales, ya que el concreto reforzado posee resistencia mecánica y resistencia al ataque químico de sustancias contenidas en el agua residual o producidas durante la digestión.

- Período de retención

Esta norma define un período de retención mínimo para un tanque séptico con una contribución diaria menor que 1 500 litros de 1 día. Los períodos de retención hidráulica de los sistemas con filtro percolador y FAFA son respectivamente de 1,6 y 4,1 días. De esta manera ambos tanques cumplen con este mínimo.

- Contribución de lodo fresco

Este artículo remite a la tabla B-1 para la determinación de la contribución diaria en lodo fresco por persona, la tabla no incluye dotaciones mayores que 160 l/hab día, como es el caso de la que se utiliza de 263 l/h día (0,85 * 309 l/h.día). Sin embargo, para todos los casos residenciales se da un valor de 1 litro por persona diario, de modo que se utilizará este valor para cálculos posteriores.

- Tasa de acumulación de lodo fresco

De acuerdo con la tabla B-3, para un período entre limpiezas de 2 años y temperaturas mayores a 20 °C, se obtiene un valor de K de 97, que se utilizará en adelante.

- Dimensionamiento del tanque séptico

El volumen útil total del tanque séptico debe ser calculado por la fórmula:

$$V = 1000 + N(CT + KLf) = 1000 + NCT + NKLf \quad (4-8)$$

Donde:

V= Volumen útil en litros.

N= Número de personas o unidades de contribución.

C= Contribución de desecho, en litros/persona x día o en litros/unidad x día (según la tabla B-1).

T= Período de retención en días (según tabla B-2).

K= Tasa acumulación de lodo digerido en días, equivalente al tiempo de acumulación de lodo fresco, según la tabla B-3).

Lf= Contribución de lodo fresco, en litros/persona x día (según tabla B-1).

Para el sistema con filtro percolador:

$$V = 1\,000 + 1\,313 \cdot 1,6 + 5 \cdot 97 \cdot 1 = 3\,586 \text{ l} \approx 3,6 \text{ m}^3$$

Para el sistema con FAFA:

$$V = 1\,000 + 525 \cdot 4,1 + 2 \cdot 97 \cdot 1 = 3\,586 \text{ l} \approx 3,3 \text{ m}^3$$

Al comparar este volumen, con el volumen efectivo de los tanques construidos (2,14 m³) se observa que no se cumple con esta exigencia.

- Medidas Internas Mínimas

De acuerdo con este artículo, las medidas internas que los tanques deben cumplir lo que sigue:

- a) Profundidad útil mínima: 1,20 m
- b) Profundidad útil máxima: 2,20 m
- c) Largo interno mínimo 0,80 m.
- d) Relación ancho/largo (para tanques prismáticos rectangulares): mínimo 2:1, máximo 4:1.

Como puede verse, los tanques construidos cumplen con éstos lineamientos, a excepción de la profundidad útil mínima de 1,06 m lo cual es menor que el mínimo de 1,20 m establecido.

- Dispositivos de entrada y salida

- a) La parte superior del dispositivo de entrada debe tener una longitud de por lo menos 5 cm y la parte inmersa debe llegar a una profundidad de 5 cm por encima del nivel inferior del dispositivo de salida. Se cumple con ambas dimensiones mínimas.
- b) La parte superior del dispositivo de salida debe estar nivelada con el de entrada, esto no se cumple en el tanque construido. Además, se exige que la parte inmersa penetre

en el líquido al menos un tercio de la profundidad del mismo. Esto se cumple, ya que se penetra 40 cm, lo cual es mayor que un tercio de la profundidad del líquido (35 cm).

- Aberturas de Inspección
 - a) Todo tanque debe tener por lo menos una abertura con una dimensión mínima de 0,60 m que permita el acceso directo al dispositivo de entrada del agua residual.
 - b) El máximo radio horizontal permisible para efectos de limpieza es de 1,50 m, a partir del cual otra abertura es necesaria.
 - c) La menor dimensión en las aberturas secundarias es de 0.2 m.

De acuerdo con las dimensiones de los tanques, éstos no cumplen estos requerimientos.

4.1.4 Diseño, construcción y operación de tanques sépticos: Normas de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB)

- Diseño

Tiempo de retención:

Este apartado recomienda 3 días como tiempo de retención. Esto no se cumple para el tanque del sistema con filtro percolador, cuyo tiempo de retención estimado es de 1,6 días. En el caso del sistema con FAFA sí se cumple este requerimiento, ya que este tanque cuenta con un tiempo de retención de 4,1 días.

Volumen del tanque séptico:

→ Fórmula de Función del Número de Habitantes Servidos:

$$V = 180P + 2\ 000 \quad (4-9)$$

En donde:

V: Volumen del tanque en litros.

P: Número de habitantes (con un valor mínimo de 4 personas)

Para el sistema con filtro percolador:

$$V = 180 \cdot 5 + 2\ 000 = 2\ 900 \text{ litros}$$

Para el sistema con FAFA:

$$V = 180 \cdot 4 + 2\,000 = 2\,720 \text{ litros}$$

Como se puede ver ambos cumplen con estos volúmenes mínimos.

→ Fórmula en función del tiempo de retención:

$$V = Q \cdot P \cdot t \quad (4-10)$$

En donde:

V: Volumen del tanque en litros.

P: Número de habitantes servidos.

Q: Caudal de diseño en litros/hab/día

T: tiempo de retención en días.

Para el sistema con filtro percolador:

$$V = 1\,313 \frac{l}{día} \cdot 1,6 \text{ día} = 2\,101 l$$

Para el sistema con FAFA:

$$V = 525 \frac{l}{día} \cdot 4,1 \text{ días} = 2\,152 l$$

Al comparar estos valores con el volumen total de los tanques, que es de 2900 litros, ambos cumplen con el volumen resultante de esta fórmula.

- Dimensiones

En este apartado se propone una relación largo/ancho de 1:3 y una profundidad efectiva mínima de 1.5 m.

Los tanques cumplen con este lineamiento en cuanto a la relación largo/ancho, mas no en la profundidad mínima ya que tienen una profundidad de 1.06 m, la diferencia; sin embargo, es mínima.

- Período de limpieza

El período que se recomienda en este apartado es de entre 2 y 5 años, pero además se propone el cálculo del mismo de la siguiente manera:

$$T = \frac{V}{3 \cdot P \cdot A} \quad (4-11)$$

En donde:

T: Período de limpieza en años.

V: Volumen efectivo del tanque séptico en litros.

P: Número de habitantes servidos.

A: Tasa de acumulación en litros/hab/año.

Para el sistema con filtro percolador:

$$T = \frac{2,14 \text{ m}^3}{3 \cdot 5 \text{ hab} \cdot 0,04 \text{ m}^3 / \text{hab} / \text{año}} = 3,6 \text{ años}$$

Para el sistema con FAFA:

$$T = \frac{2,14 \text{ m}^3}{3 \cdot 2 \text{ hab} \cdot 0,04 \text{ m}^3 / \text{hab} / \text{año}} = 8,9 \text{ años}$$

Este valor es mucho mayor que el período recomendado por el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. Debe aclararse que se ha utilizado la tasa de acumulación de lodos recomendada por el código mediante el cual se hace la presente revisión (tabla B-1).

Consideraciones de construcción

a. Materiales

El material del que están contruidos los taques cumplen con las especificaciones que se realizan en este apartado en cuanto a susceptibilidad a la corrosión y deterioro.

b. Accesos

Los tanques cuentan con acceso de acuerdo con las exigencias del código, se ha proporcionado una tapa, ya que el tanque es superficial

c. Dispositivos de entrada y salida

Este artículo exige que el dispositivo de entrada penetre bajo en nivel del líquido al menos 15 cm. Esto se cumple, pues el dispositivo de entrada penetra 40 cm bajo el nivel del líquido. Además, se exige que el dispositivo de salida penetre bajo el nivel del líquido una profundidad de al menos 40% de la profundidad del líquido. De acuerdo con las dimensiones del tanque, el 40% de la profundidad del líquido (1,06 m) es 42 cm; sin embargo, la profundidad a la que penetra el dispositivo de salida es de 40 cm bajo el nivel del líquido, por lo cual no se cumple en este aspecto, aunque la diferencia es mínima.

4.2 Resumen de cumplimiento de normas

A continuación se resumen las principales características que se toman en cuenta en los códigos utilizados para la revisión de ambos tanques.

Tabla Nº 1. Cumplimiento de normas para el tanque del sistema

Tanque – Filtro Percolador - Drenaje

Requisito	C.I.H.S.E (CFIA)		Tanques Sépticos (CIVCO)		ABNT (Brasil)		EAAB (Colombia)	
	Mín	Rev	Mín	Rev	Mín	Rev	Mín	Rev
Volumen Mínimo (m ³)	1,97	Sí	1,80	Sí	3,6	No	2,9	Sí
n (años)	1,3	-	3,7	-	-	-	3,6	-
Dimensión mín. en planta (m)	0,60	Sí	0,70	Sí	0,80	Sí	-	-
Profundidad mínima efectiva (m)	0,75-1,75	Sí	1,0	Sí	1,20	No	1,50	No
Espacio libre sobre líquidos (m)	0,29	Sí	0,25-0,30	Sí	0,10	Sí	0,25	Sí
Penetración Tee Entrada (m)	0,15	Sí	0,40-0,55	Sí	-	-	0,15	Sí
Penetración Tee Salida (m)	0,42	No	0,40-0,55	Sí	35	Sí	0,42	No
Diferencia entrada/salida (m)	>0	Sí	0,075	Sí	5	Sí	-	-
Relación ancho: largo	1:2 ⁽²⁾	-	1:3	Sí	2:1 - 4:1	Sí	1:3	Sí
TRH (días)	1,5	Sí	1	Sí	1	Sí	3	No
Accesos	2	No	2	No	2	No	1	Sí
Material	⁽¹⁾	Sí	⁽¹⁾	Sí	⁽¹⁾	Sí	⁽¹⁾	Sí

Nota ⁽¹⁾ Consultar en la sección correspondiente a cada código. ⁽²⁾ Aproximadamente.

Tabla N° 2. Resumen de cumplimiento de normas del tanque séptico del sistema Tanque – FAFA – Drenaje para la ocupación actual (2 habitantes)

Requisito	C.I.H.S.E (CFIA)		Tanques Sépticos (CIVCO)		ABNT (Brasil)		EAAB (Colombia)	
	Mín	Rev	Mín	Rev	Mín	Rev	Mín	Rev
Volumen Mínimo (m ³)	0,79	Sí	0,719	Sí	3,3	No	2,72	Sí
n (años)	6,2	-	20	-	-	-	8,9	-
Dimensión mín. en planta (m)	0,60	Sí	0,70	Sí	0,80	Sí	-	-
Profundidad mínima efectiva (m)	0,75-1,75	Sí	1,0	Sí	1,20	No	1,50	No
Espacio libre sobre líquidos (m)	0,29	Sí	0,25-0,30	Sí	0,10	Sí	0,25	Sí
Penetración Tee Entrada (m)	0,15	Sí	-	-	-	-	0,15	Sí
Penetración Tee Salida (m)	0,42	No	0,40-0,55	Sí	35	Sí	0,42	No
Diferencia entrada/salida (m)	>0	Sí	0,075	Sí	5	Sí	-	-
Relación ancho: largo	1:2 ⁽²⁾	Sí	1:3	Sí	1:2 – 1:4	Sí	1:3	Sí
TRH (días)	1,5	Sí	1	Sí	1	Sí	3	No
Accesos	2	No	2	No	2	No	1	Sí
Material	(¹)	Sí	(¹)	Sí	(¹)	Sí	(¹)	Sí

Nota (¹) Consultar en la sección correspondiente a cada código. (²) Aproximadamente.

4.3 Caracterización del agregado utilizado como medio filtrante

4.3.1 Pesos específicos y absorción

Una muestra del agregado utilizado como medio filtrante fue llevado al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), donde se le practicó la prueba: Pesos Específicos y Absorción para Agregados Gruesos Según la norma ASTM C-127 (ver anexo D).

Tabla N° 3. Resultados experimentales

Parámetro	Valor
Peso específico aparente	2,64
Peso específico saturado superficie seca	2,55
Peso específico bruto seco	2,50
Absorción	2,10%
Razón de vacíos	152%
Porosidad	58%
Peso Volumétrico	1 047 kg/m ³

4.3.2 Área de superficie específica

Debido a la carencia de un procedimiento de laboratorio para determinar el área de superficie específica (A_s) de un agregado grueso, se ideó un método empírico, con el cual se obtuvo una aproximación del área de superficie específica de 10 piedras elegidas al azar dentro de la muestra.

La prueba básicamente consistió, en envolver las piedras con un trozo de papel, amoldándolo al máximo a la superficie y recortando los sobrantes. El área del papel resultante, fue obtenida mediante la aplicación de una regla de tres, comparando su peso con el peso y área de un rectángulo del mismo tipo de papel. Adicionalmente, se obtuvo el volumen de cada piedra por diferencia de volumen, al introducir las en un recipiente graduado que contenía agua.

4.4 Evaluación de la capacidad hidráulica y sanitaria del filtro anaerobio de flujo ascendente.

Para evaluar la capacidad hidráulica y sanitaria del FAFA se utilizará el documento Tanques Sépticos: Conceptos teóricos, base y aplicaciones del ingeniero Elías Rosales del CIVCO (ITCR).

Como han sido expuestas anteriormente, las características del FAFA son:

- Caudal a tratar: 525 l/día
- Diámetro: 1,20 m
- Profundidad: 1,90 m.
- Profundidad del lecho de piedra: 1,30 m.
- Material del reactor: concreto reforzado.
- Medio filtrante: piedra quebrada con un tamaño máximo de aproximadamente 10 cm.
- Fondo falso: losa de concreto de 5 cm de espesor con perforaciones cilíndricas de 5 cm de diámetro (figura)

4.4.1 Evaluación de la capacidad sanitaria del filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA)

Esta revisión se realizará tanto para el escenario actual del sistema (dos usuarios y una dotación de agua potable de 309 l/hab-día) como para el escenario que se tendría la casa estuviese ocupada de acuerdo con su capacidad (cuatro personas en promedio para viviendas de tres habitaciones) y con la misma dotación.

- Caudal actual

$$Q = 525 \frac{l}{día} = 0,525 \frac{m^3}{día} = 0,006 \frac{l}{seg}$$

- Caudal con casa completamente ocupada

$$Q = 1\,051 \frac{l}{día} = 1,051 \frac{m^3}{día} = 0,012 \frac{l}{seg}$$

- Determinación del volumen libre para líquido dentro del filtro.

Este volumen está compuesto por el volumen de agua en el ducto que soporta el medio filtrante (V_1), el volumen dentro del medio filtrante (V_2) y el volumen de agua libre sobre el lecho (V_3). Este volumen se muestra en la figura 20.

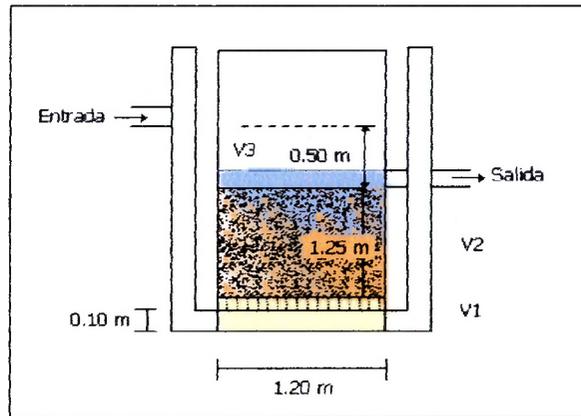


Figura N° 20. Volúmenes de agua dentro del FAFA

- Volumen en la zona de drenaje inferior y dentro de los orificios del fondo falso que soporta el medio filtrante (aproximadamente 29 orificios de 5 cm de diámetro)

$$V_1 = \left((1,2m)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,10m \right) + \left(29 \cdot 0,05^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,05 \right) = 0,116m^3$$

- Volumen dentro del medio filtrante (ruta de flujo)

$$V_2 = A \cdot D \cdot p \quad (4-12)$$

donde

A: área transversal del filtro (m^2)

D: Espesor del medio filtrante (m)

p: porosidad del material filtrante (58%).

$$V_2 = (1,2m)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 1,25m \cdot 0,58 = 0,820m^3$$

- Volumen de agua libre

$$V_2 = (1,2m)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,10m = 0,113m^3$$

- Volumen total de agua a filtrar

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 = 0,116 + 0,820 + 0,113 = 1,05m^3$$

- Tiempo de retención hidráulica

$$TRH = V_T \cdot \frac{24}{Q} \quad (4-13)$$

Para el escenario actual:

$$TRH = 1,05m^3 \cdot \frac{24 \text{ h/día}}{0,525 m^3/\text{día}} = 48 \text{ horas}$$

Con la casa completamente ocupada:

$$TRH = 1,05m^3 \cdot \frac{24 \text{ h/día}}{1,050 m^3/\text{día}} = 24 \text{ horas}$$

De acuerdo con la recomendación que se da en este texto, el tiempo de retención hidráulica debe estar entre 6 y 12 horas. Por lo tanto el FAFA cumple con este requerimiento en ambos escenarios analizados. Sin embargo, tiempos de retención tan altos pueden indicar que hay un sobredimensionamiento del filtro. Puede notarse del calculo anterior, que incluso con la vivienda plenamente ocupada el tiempo de retención hidráulica es el doble del máximo recomendado por el texto "Tanques Sépticos" del Ing. Elías Rosales.

Se puede; sin embargo, calcular cual es la capacidad del filtro para un tiempo de retención hidráulica recomendado de 9 horas, como sigue:

$$Q_{ideal} = \frac{1,1m^3}{9h/24} = 2,9 \frac{m^3}{día}$$

Para la dotación con la que se ha trabajado, esto corresponde a un total de 8 habitantes. Este valor está por encima de la capacidad de la vivienda, por lo cual se puede notar que las dimensiones del filtro en efecto están excedidas. De acuerdo con esto y lo dicho antes, se puede notar que podría realizarse un diseño variando las dimensiones del filtro de manera que éste puede ser aún más económico.

4.4.2 Evaluación de la capacidad hidráulica del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)

Esta evaluación depende de la carga hidráulica disponible en el sistema, así como la resistencia máxima al flujo del material filtrante.

- Resistencia máxima al flujo del material filtrante:

$$H_m = \frac{\gamma_f - \gamma_w}{\gamma_w} (1 - p) L \quad (4-14)$$

donde

γ_f = peso volumétrico del medio filtrante (kg/m³)

γ_w = peso volumétrico del agua (1 000 kg/m³)

p = porosidad del material

L = espesor del lecho filtrante

$$H_m = \frac{1\ 047 - 1\ 000}{1\ 000} (1 - 0,58) 1,25 = 0,025m < 0,5m$$

Como se pudo ver en la figura 20, la carga hidráulica en el sistema es suficiente para el correcto funcionamiento del filtro.

Según el texto Tanques Sépticos de Ing. Elías Rosales, estas pérdidas de carga aumentarán con el tiempo y el uso del filtro, debido a la modificación de la superficie del medio por el crecimiento de la película biológica.

4.5 Evaluación de la eficiencia del filtro percolador

Esta evaluación se realizará con base en las ecuaciones de la NRC y el texto Tratamiento de Aguas Residuales, Parte I del Instituto Internacional para Ingeniería Hidráulica y Ambiental de los Países Bajos.

De acuerdo con ese, y como ya se había mencionado en la sección 2.4.2, la eficiencia del filtro percolador esta dada por la ecuación:

$$E = \frac{100}{(1 + a\sqrt{L_v})}$$

donde

a: factor que depende de la temperatura y la concentración de DBO del afluente.

L_v : razón de carga volumétrica.

- Razón de carga volumétrica

$$L_v = \frac{c \arg a \left(\frac{kgDBO}{día} \right)}{V_r (m^3)}$$

Como se verá más adelante la concentración promedio de DBO en el afluente al filtro es de 218 mg/l.

- Carga

$$c \arg a = 218 \frac{mg}{l} \cdot 1.313 \frac{l}{día} \cdot \frac{1kg}{10^6 mg} = 0,286 \frac{kgDBO}{día}$$

- Razón de carga volumétrica

$$L_v = \frac{0,286 \frac{kgDBO}{día}}{1,41 m^3} = 0,202 \frac{kgDBO}{m^3 día}$$

- Eficiencia teórica del filtro

Se utilizará un valor de "a" de 0,30, que es el valor que se da en la tabla 3.3 del texto mencionado para aguas residuales con un DBO de 200 mg/l y a una temperatura de 20 °C, que es la mayor posible dentro de la tabla.

$$E = \frac{100}{(1 + 0,30\sqrt{0,202})} = 88\%$$

De esta manera, la eficiencia en remoción de DBO esperada para el Filtro Percolador es de 88%. Esta eficiencia en remoción de DBO es aceptable. Si por ejemplo se cuenta con un afluente típico con una concentración de DBO de 250 mg/l el efluente del filtro sería de 30 mg/l, lo cual cumpliría con el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, que exige una DBO máxima de 50 mg/l para vertido en cuerpos de aguas.

CAPÍTULO 5. DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS

5.1 Plan de control del sistema

Con el fin de determinar el desempeño de los sistemas se elabora un plan de muestreo mediante el cual sea posible determinar el valor de una serie de parámetros elegidos de acuerdo con el Reglamento de Reuso y Vertido de Aguas Residuales.

Se fijan tres puntos de muestreo en ambos sistemas. En la entrada, después del tanque séptico y después del filtro. Esto con el fin de determinar la eficiencia de ambos elementos de los sistemas, tanque séptico y biofiltro.

Las muestras se procesan en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Costa Rica. Además, se toman muestras para ser procesadas en un laboratorio externo acreditado. Este laboratorio es el Laboratorio Químico Lambda.

Los parámetros analizados son los mencionados en la sección 2.6. El proceso de toma y análisis de muestras comprende el período entre el 28 de Noviembre del 2004 al 18 de marzo del 2005.

Los muestreos se tornan más constantes a partir del mes de febrero del 2005 pues se realiza un muestreo semanal.

Se realizan muestreos compuestos. Tomando sub-volúmenes de aproximadamente 250 ml cada media hora.

5.1.1 Funcionalidad sistema tanque – FAFA – drenaje

La extracción de muestras en este sistema, se realiza sin mayores dificultades. Los puntos de extracción de muestras están bien definidos y son de fácil acceso.

La vivienda en la cual se encuentra este sistema, como ya se ha mencionado con anterioridad, se encuentra habitada por dos personas: un adulto y un niño. Por este motivo, la producción de aguas residuales en esta vivienda es muy baja, principalmente en los días laborables pues estos días la vivienda sólo es ocupada en las noches, limitando así la producción de aguas residuales a las horas de la noche y primeras horas de la mañana. Por otro lado, ésto impide los muestreos entre semana y obliga a que sean realizados en los fines de semana.

La producción de agua residual en los fines de semana es significativamente mayor, debido a que en estos días se realizan actividades de alto consumo de agua como lavado de ropa, riego de jardines, etc. De acuerdo con las mediciones realizadas, el caudal producido en estos días oscila entre 400 y 460 (l/hab.día).

El tanque construido en esta vivienda para la toma de muestras de aguas crudas tiene un volumen de 1 m³. Por este motivo el agua residual con mayor concentración de materia orgánica, proveniente de los servicios sanitarios, se encuentra combinada los fines de semana con grandes cantidades de agua provenientes del lavado de ropa y limpieza en general. Esto causa que el agua residual de entrada en este sistema tenga apariencia jabonosa, coloración azulada y una cantidad de materia fecal menor que en el sistema con filtro percolador.

En general el sistema Tanque – FAFA - Drenaje funcionalmente tiene un muy buen desempeño. No presenta problemas de malos olores, obstrucciones u otros.

5.1.2 Funcionalidad del sistema tanque - filtro percolador - drenaje.

El muestreo en este sistema presenta un poco más de dificultades, principalmente en la toma de muestras del efluente del tanque séptico. No es posible la extracción de la muestra directamente del tubo de entrada, debido a que la salida de líquido del tanque hacia el percolador no es constante y el espacio libre entre el distribuidor y el tubo de salida es reducido. Por este motivo la extracción de esta muestra se realiza en la T de salida del tanque séptico.

La dificultad consiste en que el acceso al interior del tanque séptico consta de una tapa de cemento y su ubicación coincide con el paso del vehículo familiar. De este modo, es frecuente el atascamiento de esta tapa.

El muestreo del agua de entrada, se realiza en una caja de registro prevista para este fin. El tamaño de esta caja es reducido (0.111 m³), por este motivo, deben realizarse muestreos compuestos, de manera que se aumente la representatividad de la muestra. Esto es, que la muestra tomada sea representativa del agua residual que se produce regularmente en la vivienda, y no la de un momento específico.

La cantidad de usuarios en esta vivienda es de 5 personas, dos adultos y tres menores. De esta manera la producción de agua residual es mayor y mucho más constante que en sistema con FAFA.

A diferencia del sistema con FAFA, las aguas crudas de este sistema tienen un apariencia bastante turbia, y presenta malos olores característicos de la materia fecal. La presencia de materia orgánica es apreciable.

Después de dos meses y medio de que esta vivienda es habitada y el sistema está operando, se observa un cambio drástico en el efluente del filtro. Se observa una gran acumulación de sedimento en la caja de registro donde se toma esta muestra.

Al extraer el líquido, se observa que el mismo tiene una apariencia coloidal y una coloración oscura.

Todo esto indica que se ha dado un desprendimiento de la película biológica y ésta ha sido arrastrada por el líquido.

A partir de este punto el efluente del filtro continúa teniendo una apariencia turbia, aunque pareció estar en vías de estabilizarse hacia el final del período de muestreo.

Una fotografía de este material desprendido se muestra en la figura 21.



Figura N° 21. Película biológica desprendida del filtro percolador

5.2 Resultados promedio para los parámetros analizados

Como resultado de un período de muestreo de aproximadamente cuatro meses se obtiene una serie de datos para los diferentes parámetros analizados en el agua residual que circula en el ambos sistemas.

El número de datos es variable para cada parámetro. Esto se debe a que se realizó un análisis estadístico, que se explicará con más detalle en la sección 6.1, mediante el cual se eliminaron los datos sesgados que distorsionaban los promedios; sin embargo, el número de datos oscila entre 6 y 17.

Tabla N° 5. Resultados promedio para el sistema tanque – FAFA – drenaje

Parámetro	Entrada	Efluente Tanque Séptico	Efluente Filtro
DQO (mg/l)	525	222	267
DBO _{5,20} (mg/l)	169	103	92,7
PH	7,69	7,38	7,5
NH ₄ (mg/l)	53,4	20,8	20,0
Sólidos Totales (mg/l)	690	503	495
Sólidos Disueltos (mg/l)	462	368	380
Sólidos Sedimentables (ml/l)	0,51	0,09	0,10
Fósforo (mg/l)	13,6	8,87	8,97
Grasas y Aceites (mg/l)	24,3	13,1	11,00

Tabla N° 6. Resultados promedio para el sistema tanque – filtro percolador - drenaje

Parámetro	Entrada	Efluente Tanque Séptico	Efluente Filtro
DQO (mg/l)	456	375	417
DBO _{5,20} (mg/l)	224	218	199
pH	8.32	7,02	7.31
NH ₄ (mg/l)	70,1	41,6	40,8
Sólidos Totales (mg/l)	718	553	783
Sólidos Disueltos (mg/l)	483	377	412
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1,02	0,10	0,21
Fósforo (mg/l)	0,79	9,49	8,90
Grasas y Aceites (mg/l)	28,9	20,0	23,2

5.3 Variación de los parámetros en el tiempo

A continuación, se muestra el valor menor, promedio y mayor que tomó cada uno de los parámetros a lo largo del proceso de muestreo; además, se muestra la desviación estándar. Con esto es posible darse una idea del comportamiento de los parámetros. Se observa el comportamiento gráfico de los datos, en el anexo F.

Tabla N° 7. Descripción estadística de los parámetros analizados para el sistema tanque – FAFA - drenaje

Aguas de entrada				
Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv. Estandar
DQO (mg/l)	260	525	1550	350
DBO5,20 (mg/l)	105	169	270	52
PH	6	8	9	0,6
NH4 (mg/l)	6	53	220	55
Sólidos Totales (mg/l)	500	690	1270	228
Sólidos Disueltos (mg/l)	238	462	726	117
Sólidos Sedimentables (ml/l)	0,2	0,5	0,8	0,2
Coloides (mg/l)	35,0	107,5	232,0	85,2
Fósforo (mg/l)	11	14	19	4
Grasas y Aceites (mg/l)	16	24	38	8
Efluente del Tanque				
Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv. Estandar
DQO (mg/l)	100	222	320	63
DBO5,20 (mg/l)	78	103	141	21
PH	6,6	7,4	7,7	0,3
NH4 (mg/l)	14	21	34	5
Sólidos Totales (mg/l)	444	503	600	42
Sólidos Disueltos (mg/l)	254	368	492	84
Sólidos Sedimentables (ml/l)	0	0,09	0,2	0,1
Coloides (mg/l)	140	178	216	30
Fósforo (mg/l)	7,2	8,9	11,0	1
Grasas y Aceites (mg/l)	12	13	16	2
Efluente del Filtro				
Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv. Estandar
DQO (mg/l)	160	267	460	93
DBO5,20 (mg/l)	19,7	93	180	48
PH	6,76	7,5	8,0	0,4
NH4 (mg/l)	16	20	24	3
Sólidos Totales (mg/l)	370	495	590	60
Sólidos Disueltos (mg/l)	264	380	488	85
Sólidos Sedimentables (ml/l)	0	0,1	0,2	0,1
Coloides (mg/l)	117	156	218	42
Fósforo (mg/l)	8,4	9,0	10	0,6
Grasas y Aceites (mg/l)	8	11	14	1,9

Tabla N° 8. Descripción estadística de los parámetros analizados para el sistema tanque – filtro percolador – drenaje

Aguas de entrada				
Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv. Estandar
DQO (mg/l)	100	456	1030	264
DBO5,20 (mg/l)	90	224	484	122
PH	6,8	8,3	9,1	0,6
NH4 (mg/l)	10	70	220	52
Sólidos Totales (mg/l)	296	718	1270	230
Sólidos Disueltos (mg/l)	199	483	748	162
Sólidos Sedimentables (ml/l)	0,2	1,0	2,5	0,7
Coloides (mg/l)	35	108	232	85
Fósforo (mg/l)	0,5	0,8	1,2	0,3
Grasas y Aceites (mg/l)	20	29	38	7
Efluente del Tanque				
Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv. Estandar
DQO (mg/l)	150	375	550	119
DBO5,20 (mg/l)	160	218	298	43
PH	6,3	7,0	7,4	0,3
NH4 (mg/l)	24	42	62	11
Sólidos Totales (mg/l)	432	553	750	106
Sólidos Disueltos (mg/l)	294	377	448	49
Sólidos Sedimentables (ml/l)	0,0	0,1	0,2	0,1
Coloides (mg/l)	73	114	172	38
Fósforo (mg/l)	6	9	14	3
Grasas y Aceites (mg/l)	16	20	24	3
Efluente del Filtro				
Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo	Desv. Estandar
DQO (mg/l)	73	417	830	240
DBO5,20 (mg/l)	95	199	287	53
PH	6,2	7,3	7,8	0,5
NH4 (mg/l)	29	41	58	10
Sólidos Totales (mg/l)	380	783	1490	352
Sólidos Disueltos (mg/l)	282	412	572	99
Sólidos Sedimentables (ml/l)	0,0	0,2	0,7	0,3
Coloides (mg/l)	67	152	216	77
Fósforo (mg/l)	6	9	19	5
Grasas y Aceites (mg/l)	16	23	34	6

5.4 Eficiencia de los distemas

A partir de los datos de entrada del tanque, así como los del efluente del tanque séptico, se obtienen las eficiencias promedio del tanque. De igual forma a partir de los datos del efluente del tanque y del filtro se obtienen las eficiencias promedio de los filtros para cada parámetro. Es decir el promedio de las eficiencias que presentan los sistemas en cada muestreo.

Tabla N° 9. Eficiencias promedio para el sistema tanque – FAFA – drenaje

Parámetro	Eficiencia (%) Tanque Séptico	Eficiencia (%) FAFA
DQO (mg/l)	42	9
DBO _{5.20} (mg/l)	38	21
NH ₄ (mg/l)	36	2
Sólidos Totales (mg/l)	19	6
Sólidos Disueltos (mg/l)	22	1
Sólidos Sedimentables (ml/l)	68	0
Fósforo (mg/l)	0	4
Grasas y Aceites (mg/l)	43	15

Tabla N° 10. Eficiencias promedio para el sistema tanque – filtro percolador - drenaje

Parámetro	Eficiencia (%) Tanque Séptico	Eficiencia (%) Percolador
DQO (mg/l)	24	13
DBO _{5.20} (mg/l)	19	19
NH ₄ (mg/l)	0	0
Sólidos Totales (mg/l)	21	5
Sólidos Disueltos (mg/l)	19	0
Sólidos Sedimentables (ml/l)	79	0
Fósforo (mg/l)	0	0
Grasas y Aceites (mg/l)	27	0

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Análisis estadístico de los datos

Como es bien sabido en el desarrollo de pruebas de laboratorio, existen una serie de parámetros que influyen el resultado obtenido. Entre éstos factores se encuentra el factor humano, la falla en equipos y el azar.

Por este motivo, una vez concluido el proceso de muestreo se realiza un análisis estadístico para depurar las muestras. Esto es, determinar por vías estadísticas cuáles datos no siguen la tendencia de la muestra.

Con esto se logra evitar que los promedios sean distorsionados por datos que se alejan en extremo de los demás.

Para lograr determinar cuáles datos podrían ser eliminados debido a la evidencia estadística de ser datos sesgados, se realiza primeramente un análisis de bondad de ajuste por medio de la prueba χ^2 (chi-cuadrado).

Esto con el fin de determinar si las muestras se ajustan a una distribución normal, ya que como se puede observar en el anexo F, en los diferentes parámetros los datos se agrupan cerca del promedio, característica que cumplen las muestras con una distribución normal. Los aspectos teóricos relacionados con esta prueba se muestran en el anexo C. Además, en el anexo D se muestra una hoja de cálculo como ejemplo del proceso.

Una vez eliminados estos datos sesgados, se calculan los promedios y eficiencias para los diferentes parámetros. Estos se mostraron en el capítulo 5.

6.2 Revisión de diseños

Como se mostró en el capítulo 4 se eligieron cuatro documentos, para la revisión de los diseños de los tanques sépticos. Dos documentos nacionales y dos extranjeros. Como se muestra en las tablas 1 y 2 los tanques cumplen en la mayoría de los requerimientos de estas normas, en cuanto a dimensionamiento y construcción. Como única deficiencia en los tanques se encuentra la dificultad en el acceso de los dispositivos de entrada y salida, dado que los dos tanques cuentan únicamente con un acceso. En el caso del sistema Tanque –

FAFA – Drenaje el acceso no se encuentra en dirección de ninguno de los dos dispositivos, lo cual dificulta la limpieza y revisión de ambos. En el caso del sistema Tanque – Filtro Percolador – Drenaje el acceso se encuentra directamente sobre el dispositivo de salida del tanque, por lo menos en este se facilita la inspección y mantenimiento.

El volumen mínimo exigido por las normas para el sistema Tanque – Percolador – Drenaje se encuentra entre 1,80 y 3,6 m³ con un período entre limpiezas entre 0,72 y 3,3 años, mientras que para el sistema Tanque – FAFA – Drenaje el volumen mínimo está entre 0,72 y 3,3 m³ con un tiempo entre limpiezas de 6,2 a 20 años.

En el caso del sistema Tanque – FAFA – Drenaje se obtienen períodos entre limpiezas largos con todas las metodologías propuestas por las normas consultadas, lo cual se debe al bajo caudal de aguas residuales producido en la vivienda, que como se ha dicho, cuenta con únicamente dos habitantes.

6.3 Desempeño de los sistemas

En un sistema de tratamiento biológico es de esperarse que se observe un aumento en la eficiencia con el paso del tiempo, una vez que se concluye el período de arranque. De esta manera, se esperaría que la cantidad de materia orgánica en el efluente disminuyera con el tiempo; sin embargo, no es posible llegar a esta conclusión a partir de la observación del comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno y la Demanda Bioquímica de Oxígeno en el efluente de ambos sistemas, durante los cuatro meses que abarcó el proceso de muestreo.

Existen varias razones por las cuales no se observa esta mejora en la eficiencia de los sistemas:

La razón primordial es que los momentos en los cuales fue posible la toma de muestras (fines de semana), los sistemas se encontraban bajo el efecto de los altos caudales que se producen en estos días, como se indicó en las secciones 3.3.1 y 3.4.1.

Lo anterior puede producir, por ejemplo, un levantamiento de lodos dentro del tanque séptico, lo cual provocaría una elevación en parámetros como DBO, sólidos, grasas y aceites y otros, en la muestra el efluente del tanque.

Además, el aumento en el caudal dentro del sistema en estos días, puede elevar la velocidad del flujo a través del medio filtrante, lo cual puede producir lavado de cuerpos bacterianos en el filtro, disminuyendo así la eficiencia del filtro.

Por otro lado, sería conveniente contar con una reglamentación adecuada para la infiltración de aguas residuales tratadas en el suelo, con lo cual, estos sistemas requerirían cumplir con exigencias diferentes y posiblemente menores a las actualmente establecidas para el vertido de aguas residuales a cuerpos de agua y alcantarillado sanitario, en lo que respecta a carga orgánica.

6.3.1 Sistema tanque – FFA – drenaje

En general, como puede verse en la sección 5.4, las eficiencias en este sistema son extremadamente bajas, principalmente en el filtro. Las razones por las cuales esto sucede se explican a continuación.

Para el correcto funcionamiento de este tipo de sistemas, es necesario proveer al agua residual, tiempos de retención suficientes para que los diferentes procesos se desarrollen, estos tiempos de retención son:

Retención hidráulica para una apropiada sedimentación, adicionalmente a una correcta definición y proporción de dimensiones. En el tanque séptico de este sistema, esto se logra únicamente de lunes a viernes, cuando los consumos de agua potable son normales. Sin embargo, los fines de semana, cuando el sistema se ve sometido a un caudal mayor el tiempo que el agua residual permanece en el tanque, no es suficiente para que se logre una sedimentación correcta, además, se produce levantamiento de los lodos acumulados en el fondo del tanque. Esto provoca que una mayor cantidad de sólidos y materia orgánica pasen al filtro.

Además, se debe proveer un tiempo de retención suficiente para la correcta permanencia de biomasa y para que el proceso de biodigestión de la materia orgánica pueda desarrollarse.

Por razones de la nueva familia, las actividades modernas concentran acciones de lavado y limpieza general en dos días de la semana. Esto se traduce en un volumen total de agua residual circulando en el sistema en un tiempo muy corto, lo cual provoca un "lavado" de biomasa activa y en consecuencia, una reducción significativa de la eficiencia en los procesos de biodigestión.

Por lo anterior, la unidad de tratamiento en estudio, dentro del corto período de seguimiento, nunca lograron el punto correcto pretendido de una relación eficiente entre biomasa y materia orgánica, razón primordial para que no se lograran mejores resultados.

En cuanto al desempeño del tanque séptico de este sistema, como puede verse en la tabla 9, la eficiencia en remoción de DBO es de 38%, mientras que en remoción de DQO es de 42%. Ambas eficiencias se encuentran por encima del valor esperado de 30% para estas unidades (12). En general, el rendimiento del tanque en este sistema es más que satisfactorio en la mayoría de los parámetros, consiguiendo una remoción del 68% de los sólidos sedimentables y un 43% de las grasas y aceites.

La capacidad del tanque de muestreo en este sistema permite que la muestra que se tome abarque el agua residual producida en un período mayor. Esto hace que la muestra del agua residual de entrada sea más representativa, siempre y cuando se mezcle el contenido del tanque antes de tomar la muestra. Con esto se asegura que los resultados antes mencionados son confiables.

En cuanto al filtro, como puede verse en la tabla 9 el desempeño es deficiente. Se obtiene un porcentaje de remoción de tan solo 9% de la DQO, 21% de la DBO y 6% de los sólidos totales

Estos resultados dejan ver que el sistema, tal y como fue construido no puede ser utilizado para el tratamiento de aguas residuales domésticas, debido a las bajas eficiencias y que la concentración de materia orgánica no cumple con el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. La concentración de DBO en el efluente de este sistema es de 93 mg/l, valor que está por encima del exigido en este reglamento (50 mg/l) para el vertido en cuerpos de agua.

Existe una serie de mejoras que deben practicarse al sistema, específicamente al filtro. Debe estudiarse la eficiencia del sistema luego de estas mejoras, las cuales se expondrán adelante. A pesar de esto, por la ya comprobada funcionalidad del sistema, así como su facilidad de operación y mantenimiento el sistema de Tanque – FAFA - Drenaje es el que se recomienda después de concluido el estudio.

6.3.2 Sistema tanque – filtro percolador – drenaje

La eficiencia del tanque séptico de este sistema es menor que la del sistema anterior. En el caso de la DBO y la DQO los valores son respectivamente de 19% y 24%. Estos dos

valores son menores que la eficiencia de 30% esperada para estos dispositivos. Debe aclararse; sin embargo, que la correcta determinación de la eficiencia del tanque séptico está sujeta a la representatividad de la muestra de agua cruda que se tome.

En este sistema el tanque para muestreo de aguas crudas es de un tamaño mucho menor que en el sistema anterior como puede verse en la figura 17. De este modo la muestra que se toma no es representativa. Esto se intenta corregir realizando un muestreo compuesto, sin embargo, el período en el cual se realiza este muestreo no es suficientemente largo para asegurar representatividad.

Por este motivo, y por la indudablemente mayor carga orgánica presente en el agua residual producida en la vivienda con Filtro Percolador, es muy probable que la eficiencia real de este tanque séptico sea mayor que la que se reporta.

En cuanto al Filtro Percolador, este posee eficiencias muy bajas como puede verse en la tabla 10. La remoción promedio que se logra con esta unidad es de 13% en DQO, 19% en DBO y 5% en Sólidos Totales. Sin embargo debe recalcarse el hecho de que estas son eficiencias promedio, ya que en la mayor parte del período de control la eficiencia se mantuvo en cero o en valores muy bajos.

El efluente de este filtro no cumple con el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, ya que el valor de 199 mg DBO/l está muy por encima del valor exigido por este reglamento para el vertido en cuerpos de agua (50 mg/l).

Este sistema tiene, además de las marcadas deficiencias en su capacidad sanitaria, grandes deficiencias funcionales.

El hecho de que se haya dado un desprendimiento de la película biológica a sólo dos meses y medio de haber entrado en operación hace pensar, primero que el crecimiento de los microorganismos se está dando de manera satisfactoria y segundo, que las condiciones dentro del filtro no son las apropiadas para retener esta materia biológica.

Existen dos posibles motivos por los cuales se da este fenómeno tan anticipadamente:

El primero de ellos, es que el tamaño del material filtrante es excesivamente grande (mayor que 10 cm), lo cual provoca que el área superficial no sea suficiente para retener las cantidades de materia biológica que se producen dentro del filtro. No obstante, la mayor desventaja de este hecho es, que los espacios entre partículas son muy grandes, lo que provoca que al tener material biológico suspendido en estos espacios sea arrastrado fácilmente por el flujo del líquido gracias al espacio libre disponible.

El otro posible motivo es la deficiente ventilación del sistema, ya que, como se sabe, en los filtros percoladores este fenómeno de desprendimiento de la película biológica y arrastre de la misma con el efluente se da por el crecimiento del espesor de la capa biológica, el cual provoca que los microorganismos interiores, es decir, los más cercanos al medio filtrante, no obtengan oxígeno para la digestión aerobia.

Debido a esto, con el tiempo la digestión en esta zona de la película se torna anaerobia, entrando luego en la fase de pérdida de la capacidad de adherencia al medio debido a la falta de alimento y el subsecuente desprendimiento.

Si la ventilación en el sistema es deficiente, el oxígeno circulando dentro del filtro solo va a permitir el desarrollo de una capa muy delgada de microorganismos aerobios, con lo que el crecimiento de la zona anaerobia de la capa biológica se dará con mayor rapidez y por consiguiente se dará el desprendimiento con mayor prontitud, como sucedió en este caso.

Si estos aspectos se logran corregir, el desempeño del filtro podría mejorar considerablemente.

Sin embargo, tarde o temprano este fenómeno va a suceder, y el resultado es una cantidad considerable de sólidos biológicos y lodos saliendo del filtro hacia la zona de drenaje. Si estos lodos llegan a la zona de drenaje, el daño global para el sistema es mucho mayor, ya que es muy probable que la grava del drenaje se obstruya impidiendo la infiltración, lo cual puede conducir a un colapso del sistema, ya que el agua buscará salida hacia la superficie provocando malos olores, criaderos de mosquitos y otras molestias lógicas.

Para evitar que esto suceda, tendría que dotarse al sistema de un dispositivo de captura y extracción de lodos. Sin embargo debe tomarse en cuenta que por la configuración del filtro, los lodos se acumularían al nivel de salida del mismo, es decir, alrededor de 2 m de profundidad, lo cual dificulta la extracción y aumenta los costos del sistema.

Como se dijo en la primera parte de este estudio, lo que se busca es una solución al problema de tratamiento y disposición de efluentes domiciliarios que sea económica, pueda ser implantada en espacios reducidos y que además, las actividades de operación y mantenimiento sean sencillas.

Por estos motivos no se recomienda el uso de filtros percoladores como solución individual al tratamiento de aguas residuales domésticas.

CAPÍTULO 7. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA TANQUE – FAFA – DRENAJE

7.1 Introducción

El presente manual esta elaborado con base en las pautas marcadas por el Ministerio de Salud en el Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Trabajo de Aguas Residuales. Además, debe aclararse que se desarrolla este manual únicamente para el sistema Tanque – FAFA – Drenaje debido a que como se dijo en la sección 6.2.1 es el sistema que se recomienda debido a los problemas mencionados en el Filtro Percolador.

Este sistema cuenta con sencillas actividades de operación y mantenimiento, las cuales permiten que el funcionamiento del sistema se dé de manera adecuada y su desempeño sea óptimo.

7.2 Descripción de las aguas residuales afluentes

Las aguas residuales que se tratan en el sistema de tratamiento conformado por tanque séptico, filtro anaerobio de flujo ascendente y drenaje provienen de las actividades cotidianas realizadas en las viviendas. Esto es, agua de inodoros, duchas, lavamanos, y otros grifos. Además, las aguas producidas en actividades como el lavado de ropa, preparación de comidas y limpieza en general.

Estas aguas residuales contienen grandes cantidades de materia orgánica debido a la presencia de excrementos humanos, además contienen grasas y aceites provenientes de la cocina y algunos productos químicos utilizados para limpieza.

Las producidas son, según la clasificación del Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, "Aguas Residuales Ordinarias".

7.3 Proceso de Tratamiento

Este sistema de tratamiento consta de tres etapas, la primera de estas consiste en el tratamiento primario y secundario que se lleva a cabo en el tanque séptico, la segunda etapa

en el tratamiento secundario que se lleva a cabo en el filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) y una tercera etapa que consiste en la infiltración del efluente del filtro en el terreno por medio de zanjas de drenaje y en la cual se lleva a cabo básicamente una continuación del tratamiento secundario.

7.3.1 Tanque Séptico

En esta etapa se consigue la sedimentación de los sólidos de mayor tamaño. Además, en el tanque se consigue una primera remoción de materia orgánica, la cual se da gracias al proceso de digestión anaeróbica en el fondo del tanque debido a la acumulación de lodos. Esto sucede gracias a la acción de microorganismos que se alimentan de la materia orgánica presente en el agua, logrando así su depuración.

Adicionalmente, gracias a que las grasas son más livianas que el agua, estas se acumulan en la superficie de los líquidos contenidos en el tanque formando una capa conocida como nata, la cual puede ser fácilmente extraída.

7.3.2 Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA)

En esta etapa, el agua residual pasa a través del material contenido en el filtro, con lo cual se logra una reducción de los sólidos que aun se encuentran presentes en el agua. Además de esto en la superficie de este material filtrante se forma una película o capa de microorganismos los cuales al entrar en contacto con el agua residual logran reducir los niveles de materia orgánica.

7.3.3 Zanjas de drenaje

El objetivo primordial de las zanjas de drenaje, es dirigir las aguas efluentes del tanque al terreno de manera uniforme; sin embargo, dentro de estas zanjas se coloca grava, la cual al contacto con el agua residual efluente, que aunque en menor medida aun contiene material orgánico, con el paso del tiempo pueden también desarrollar una película de microorganismos. De ser así, se continúa con el tratamiento secundario, es decir con la remoción de materia orgánica por medios biológicos.

En las figuras 27 y 28 se puede observar un esquema del sistema completo en planta y un esquema transversal de los elementos principales del sistema.

A continuación se muestra un cuadro resumen con la función de las partes más importantes del sistema, las cuales se enumeran en la figura 23.

Tabla N° 11. Principales componentes del sistema

Dispositivo	Función
1. Tanque Séptico	Sedimentación de sólidos, separación de grasas, digestión anaerobia
2. Tee de entrada al Tanque Séptico	Recolección de aguas residuales para conducir las al tanque, permitir elevación del nivel de agua durante descargas
3. Tee de salida del tanque	Conducción del efluente del tanque al FAFA
4. FAFA	Remoción de materia orgánica, captura de sólidos flotantes
5. Tubería de entrada al FAFA	Dirigir el efluente del tanque al FAFA
6. Fondo falso del FAFA	Permitir la entrada de agua residual al filtro y distribuirla uniformemente en el medio
7. Registro Superior del FAFA	Permitir la inspección de la salida del FAFA
8. Tubería de limpieza del FAFA	Permitir extracción de lodos del fondo del FAFA y el retrolavado
9. Tubería de salida del FAFA	Dirigir el efluente del FAFA al drenaje
10. Drenaje	Transmitir el agua tratada al terreno, tratamiento biológico final
11. Cajas de registro	Permitir detección y eliminación de bloqueos en tuberías

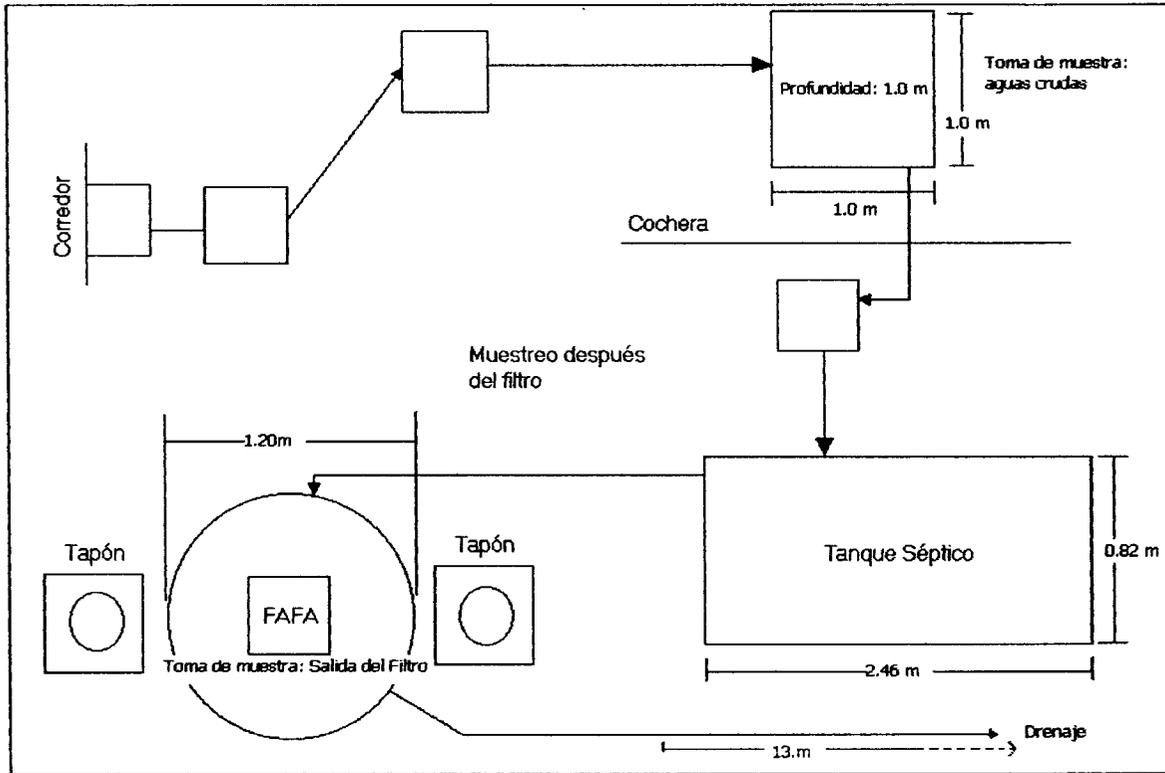


Figura N° 22. Esquema en planta del sistema: Tanque - FAFA - drenaje

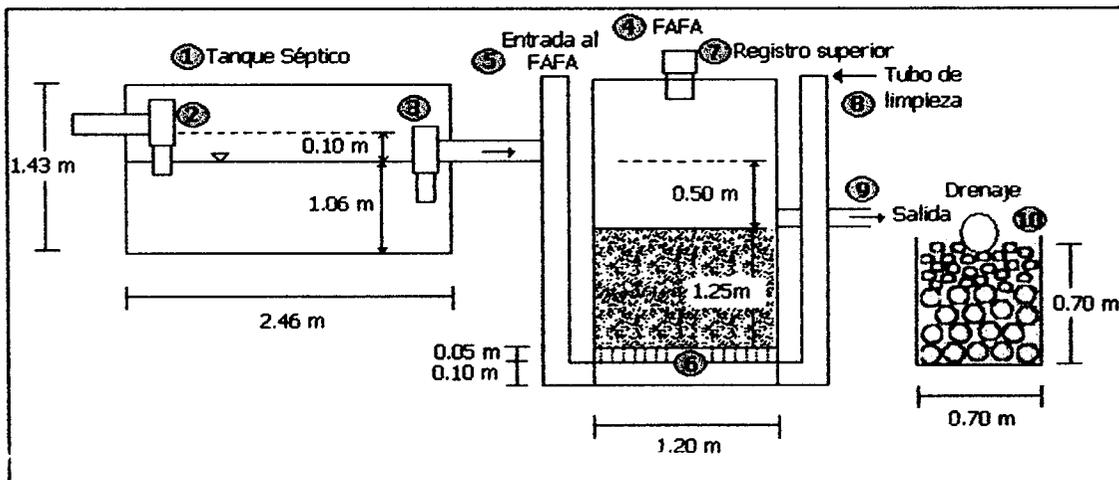


Figura N° 23. Esquema transversal del sistema: Tanque - FAFA - drenaje

7.4 Información básica de diseño

- Jornada de operación:

Este sistema de tratamiento de aguas residuales opera de manera continua recibiendo las aguas producidas en la vivienda en todo momento. Sin embargo, el caudal de aguas residuales no es constante durante el día. En nuestro país, se dan picos en el consumo de agua en las primeras horas de la mañana, a medio día y en las primeras horas de la noche. Por otro lado, de acuerdo con la forma de vida de los habitantes de esta vivienda, se produce un gran cambio en la producción de aguas residuales los fines de semana, aumentando el caudal producido debido a las actividades de limpieza y riego que se realizan en estos días.

- Características del sistema: se muestran en el siguiente cuadro.

Tabla N° 12. Características del sistema.

Etapa	Característica	Parámetro
General	Caudal actual (m ³ /día)	0,525
	Caudal 4 hab (m ³ /día)	1,05
Tanque Séptico	Volumen total (m ³)	2,9
	Volumen efectivo (m ³)	2,1
	TRH actual (días)	4
	TRH 4 hab (días)	2
FAFA	Volumen total (m ³)	2,1
	Volumen efectivo (m ³)	1,1
	TRH actual (horas)	50
	TRH 4 hab (horas)	25
Drenaje	Volumen total (m ³)	6,4
	Volumen efectivo (m ³)	3,7
	TRH actual (días)	7,0
	TRH 4 hab (días)	3,5

- Características del agua residual cruda: se muestran en el siguiente cuadro.

Tabla N° 13. Características del agua residual cruda.

Parámetro	Valor	Valor requerido en el efluente ⁽¹⁾
DQO (mg/l)	525	1 000 ⁽²⁾
DBO _{5,20} (mg/l)	169	50
pH	7,4	5-9
NH ₄ (mg/l)	53	-
Sólidos Totales (mg/l)	690	50
Sólidos Disueltos (mg/l)	462	1 500 ⁽²⁾
Sólidos Sedimentables (ml/l)	0,51	1
Fósforo (mg/l)	14	-
Grasas y Aceites (mg/l)	24	30

Nota: ¹ Características que deberá cumplir el efluente del sistema de tratamiento según el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales para vertido en cuerpos de agua. ²Valor exigido para el vertido en alcantarillado sanitario.

7.5 Personal

El sistema no requiere de personal especializado para su operación. Las labores de operación y mantenimiento pueden ser realizadas por miembros adultos de la familia. Es importante que estén definidas las personas que tendrán esta responsabilidad y que la necesidad de llevarlas a cabo esté siempre presente. Deben ser personas responsables de su salud y de la de los otros, de manera que tomen todas las previsiones para que al realizar estas labores no se perturbe negativamente el entorno. Son necesarias al menos dos personas para la realización de las actividades. Estas personas deben realizar una revisión de este documento de manera que comprendan el funcionamiento del sistema y la importancia de cada actividad que en este manual se explica.

7.6 Equipo

- Varillas largas con trapos o mechas en un extremo, para la inspección del nivel de lodos.
- Pascón para extracción de natas.
- Cono imhoff para medición de sólidos sedimentables.
- Equipo de protección: guantes, botas, ropa exclusiva para este fin.

7.7 Puesta en marcha

El sistema no requiere de ninguna actividad especial para este fin. El mismo entra en funcionamiento en el momento en que empieza a recibir las aguas residuales producidas en la vivienda.

7.8 Actividades de operación y mantenimiento del sistema

7.8.1 Operación y mantenimiento del tanque séptico

Las siguientes actividades son necesarias para la operación y mantenimiento del tanque:

- Inspección general de la estructura: debe inspeccionarse el estado del concreto para detectar cualquier problema de ataque de sustancias contenidas en el agua residual.
- Controlar el nivel de lodos y natas en el tanque: Para esto se deben introducir una vara por las Tees (numeradas con 2 y 3 en la figura 23) de entrada o salida de manera que se pueda observar el espesor de la capa de lodos. Para que esto sea posible la parte inferior de la vara debe ser forrada con tela o algún material similar que permita hacer la observación al sacar la vara.

- Extracción de natas: Deben extraerse las natas con un pascón y almacenarlas en un recipiente con tapa (balde o estañón) para que sean dispuestas de manera correcta por una empresa autorizada, como se indica adelante.

- Limpieza del tanque:

El período entre limpiezas para este tanque séptico, si la cantidad de usuarios continua siendo dos, es de 6 años. Si la ocupación de la vivienda aumenta las limpiezas deben realizarse con separaciones de entre 2 y 3.5 años. La limpieza del tanque se debe

realizar, en principio, concluido el período establecido para este fin. Sin embargo, si las inspecciones del nivel de lodos en el tanque dejan ver que este nivel se acerca al nivel de salida de las aguas en el tanque debe realizarse la limpieza en ese momento.

Para realizar la limpieza del tanque es importante que se extraigan las natas acumuladas en la superficie y luego se mezcle el contenido, de manera que se extraigan igualmente los lodos antiguos y los recientes. Debido a que tanto el tratamiento como el transporte de lodos son actividades que solo pueden ser realizadas con autorización del Ministerio de Salud y del MOPT respectivamente, lo más conveniente en un caso domiciliar es contratar una empresa que cuente con estas autorizaciones.

Debe tomarse en cuenta que el artículo 39 del Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales prohíbe explícitamente el vertido de los lodos provenientes de tanques sépticos en cuerpos de agua.

Cuando se realiza la limpieza del tanque séptico es de suma importancia no retirar el total de los lodos dentro del tanque. Al menos un 20% del total debe permanecer en el tanque como "semilla biológica", de manera que el crecimiento bacteriano no se detenga. El espesor de la capa de lodos que debe permanecer en el tanque es de aproximadamente 20 cm.

7.8.2 Operación y mantenimiento del filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA)

Las actividades de operación y mantenimiento del FAFA son las siguientes:

- Inspeccionar frecuentemente (ver tabla N° 14) el nivel de agua en el ducto de entrada (con el número 5 en la figura 23). La diferencia entre este nivel y el nivel de salida no debe ser mayor que la carga hidráulica disponible en el filtro (0,5 m). Si esto ocurre es señal de que la tasa de salida del agua es menor que la de entrada, es decir que existe algún grado de obstrucción, ya sea en la entrada inferior del filtro o en el medio filtrante, lo cual indica que es necesaria una limpieza del filtro.

- Limpieza del filtro: Introducir agua por medio de una bomba por el ducto de entrada (con el número 5 en la figura 23) de manera que se laven los lodos acumulados en el fondo del filtro. Estos se deben recoger por el ducto de limpieza, que se observa en la figura 23 con el número 8, y ser dispuestos de igual modo que los lodos extraídos del tanque séptico.

- Limpieza parcial del medio filtrante: Se debe realizar para remover el exceso de material biológico, debe introducirse agua en la parte superior del tanque por el tubo de

registro que se muestra en la figura 23 con el número 7. Esto producirá un flujo en sentido contrario que arrastrará el exceso de material biológico. Este debe ser recogido por el tubo de limpieza y de ser posible llevado al tanque séptico, ya que contiene grandes cantidades de bacterias que pueden enriquecer el proceso de digestión en el tanque. De lo contrario pueden ser dispuestos junto con los lodos extraídos.

Esta limpieza del filtro debe hacerse como mínimo cada año.

7.9 Cuadro resumen

Tabla N° 14. Resumen de actividades de operación y mantenimiento del sistema tanque – FAFA – drenaje.

Actividad	Frecuencia
Inspección de lodos en tanque séptico	Cada 6 meses
Limpieza de tanque séptico	Cada 6 años (2 hab), cada 3 años (3 hab), cada 2 años (4 hab)
Inspección nivel de entrada FAFA	Mensual
Extracción de lodos en el fondo del FAFA	Anual
Retrolavado del medio filtrante en el FAFA	Anual

Es importante recordar, que las personas que realicen las actividades de limpieza y extracción de lodos deben tomar medidas higiénicas para proteger su salud. Entre estas está el uso de guantes, botas de hule y limpieza de la zona después de la actividad.

7.10 Problemas comunes

- Malos olores en el tanque séptico

Para solucionar este problema se debe revisar el acceso al tanque, y corroborar que la tapa esté bien colocada. Si lo está, debe verificarse que exista una apropiada tubería de ventilación en las tuberías de evacuación de la vivienda y que no haya obstrucciones en la misma.

- Líquidos subiendo a la superficie cerca del tanque séptico

Esto sólo puede deberse a una obstrucción en la salida del tanque, por lo tanto debe removerse la tapa y proceder a limpiar el dispositivo de salida. Probablemente sea necesaria una extracción de natas, o inclusive una limpieza del tanque. Además de esto debe realizarse una limpieza de la zona para evitar criaderos de mosquitos y terminar con los malos olores.

- Malos olores cerca del FAFA

Esto puede deberse a que el tapón en el acceso con el número 7 en la figura 23 esté mal colocado. Si no es así debe revisarse las líneas de evacuación de gases para detectar obstrucciones o roturas.

- Líquidos derramados sobre el filtro

Esto puede ser causado por obstrucciones en el filtro, ya sea en la zona de drenaje inferior o en el medio filtrante. Debe hacerse una revisión de los niveles de agua en la tubería de entrada y salida del filtro. Este debe compararse con la carga hidráulica disponible (50 cm), si esta diferencia de nivel es mayor que 25 cm, y esta condición se mantiene debe realizarse una limpieza del filtro, como se explico anteriormente.

7.11 Desechos

Los desechos producidos por este sistema son básicamente lodos y natas que deben ser dispuestos por una empresa autorizada.

La película biológica que se desprende del medio filtrante puede ser conducida al tanque séptico o dispuesta de igual modo que los lodos, como se dijo antes.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

8.1.1 Conclusiones generales

- No se recomienda el uso de los sistemas analizados en el presente proyecto de la manera como han sido construidos, debido a las bajas eficiencias presentadas en ambos filtros.
- Los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas evaluados no cumplen con la eficiencia teórica esperada, ni con las exigencias en el efluente, establecidas por el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales.
- Es de importancia que el sistema posea una planificación que permita definir y construir puntos de control, inspección y limpieza que permitan el la correcta operación y mantenimiento.
- El proyecto realizado, se ejecutó en casas recién habitadas, por lo que las unidades de tratamiento apenas iniciaban su arranque.
- Las familias en cada casa tienen costumbres diferentes respecto al uso el agua. Por este motivo, es difícil, con los datos obtenidos, caracterizar el proceso en cada caso.
- La capacidad de los filtros permite en ambos casos, una ocupación máxima de las viviendas de alrededor de 9 habitantes. Para un número de usuarios mayor se deben aumentar la capacidad del sistema u optar por la utilización de dispositivos ahorradores de agua en los grifos e inodoros.

8.1.2 Conclusiones relacionadas con el sistema tanque - filtro percolador – drenaje

- El sistema está compuesto por un tanque séptico de 2,9 m³ con una razón ancho: largo de 1: 3 y 1,04 m de profundidad de líquidos, un Filtro Percolador de 1,2 m de diámetro con

un lecho filtrante de 1.25 m compuesto por piedra de aproximadamente 10 cm de tamaño máximo. Por último zanjas de drenaje con una sección cuadrada de 0,70 m de lado y una longitud total de 13 m.

- El caudal de aguas residuales asumido para este sistema es de 1313 l/día, lo cual da como resultado una carga orgánica estimada en 0,286 kgDBO/día. El tiempo de retención hidráulica del tanque séptico, con base en este caudal producido, es de 1,6 días.
- El tanque séptico construido cumple con los códigos elegidos para su evaluación en requerimientos como volumen mínimo, dimensión mínima en planta, profundidad de líquidos mínima, estructura impermeabilizada y figuras de los dispositivos de entrada y salida, sin embargo no posee dos accesos superiores como se recomienda, sino uno sólo construido sobre el dispositivo de salida. Esto dificulta la inspección y limpieza del dispositivo de entrada.
- Las eficiencias en remoción de DBO obtenidas en el tanque séptico en los muestreos realizados se encuentran entre 0 y 85%, mientras que la eficiencia promedio a lo largo del período de control es de 19%. Esta eficiencia está por debajo del valor reportado en la bibliografía consultada, para los tanques sépticos de 30%. La eficiencia en remoción de Nitrógeno Amoniacal en este tanque es de 36% mientras que en grasas y aceites se obtiene una remoción de 43%, porcentajes aceptables.
- El Filtro Percolador presenta eficiencias en remoción de DBO entre 0 y 52%, aunque la mayoría del tiempo las eficiencias son bajas o cero. Estos resultados son sumamente deficientes en comparación con la eficiencia teórica calculada de un 88%.
- No se recomienda el uso del sistema con filtro percolador para el tratamiento de aguas residuales domésticas debido a la falta de un dispositivo para captura de lodos, medios que aseguren la correcta aireación, y las complicaciones de operación y mantenimiento que el proveer este dispositivo acarrearía además del aumento en el costo del sistema. La utilización del mismo estaría sujeta a que se pongan en práctica las recomendaciones que se dan adelante a pesar del consecuente aumento en el costo del sistema y el aumento en la dificultad de operación y mantenimiento.

8.1.3 Conclusiones relacionadas con el sistema tanque – FAFA – drenaje.

- El sistema está compuesto por un tanque séptico de 2,9 m³ con una razón ancho: largo de 1: 3 y 1,04 m de profundidad de líquidos, un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente de 1,2 m de diámetro con un lecho filtrante de 1,25 m compuesto por piedra de aproximadamente 10 cm de tamaño máximo. Por último zanjas de drenaje con una sección cuadrada de 0,70 m de lado y una longitud total de 13 m.
- El caudal de aguas residuales asumido para el sistema es de 525 l/día, el cual da como resultado una carga orgánica de 0.089 kgDBO/día. Los tiempos de retención hidráulica del tanque séptico y del filtro son de 4.1 días y 48 horas respectivamente, de acuerdo con el caudal producido supuesto.
- El tanque séptico construido cumple con los códigos elegidos para su evaluación en requerimientos como volumen mínimo, dimensión mínima en planta, profundidad de líquidos mínima, estructura impermeabilizada y figuras de los dispositivos de entrada y salida; sin embargo, no poseen dos accesos superiores como se recomienda, lo cual imposibilita la inspección de los dispositivos de entrada y salida. Los períodos entre limpiezas de este tanque son largos en vista de que la misma está habitada únicamente por dos personas, las cuales producen un bajo caudal de aguas residuales en la vivienda (supuesto en 525 l/día).
- Las eficiencias en remoción de DBO del tanque séptico obtenidas en los diferentes muestreos se encuentran entre 12 y 62% , mientras que la eficiencia promedio en todo el período de control es de 38%, valor que supera la eficiencia de 30%, usual en este tipo de dispositivos. La eficiencia en remoción de grasas y aceites en este tanque es de 27%.
- El Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente posee capacidad hidráulica de acuerdo con la metodología de revisión propuesta en el documento "Tanques Sépticos" del Ing. Elías Rosales.

- El tiempo de retención hidráulica del filtro es de 48 horas para el número de usuarios actual (2 habitantes) y 24 horas para una ocupación de 4 habitantes. Ambos valores se encuentran muy por encima del rango recomendado en el documento mencionado (entre 6 y 12 horas), lo cual indica que la capacidad volumétrica del filtro es más que la necesaria
- La eficiencia en remoción de DBO del FAFA está entre 0 y 83% con una gran inestabilidad a lo largo del período de muestreo. La eficiencia promedio es de 21%, valor que se encuentra muy por debajo de los valores pronosticados para este tipo de filtros, los cuales se encuentran entre 70 y 80%.
- Es de suma importancia para el correcto funcionamiento de este sistema que se dé el adecuado mantenimiento. Este debe ser hecho de acuerdo con el manual de operación y mantenimiento antes desarrollado.

8.2 Recomendaciones

8.2.1 Recomendaciones generales

- Después del período de observación y muestreo de los sistemas se observa que el sistema de tratamiento y disposición de aguas residuales de tanque, FAFA, drenaje es el más recomendable por su funcionalidad, sencillez en operación y mantenimiento y economía.
- El presente estudio representa un primer paso en el análisis de este tipo de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Se recomienda realizar estudios posteriores para poner en práctica acciones que se desprenden tanto de las conclusiones anotadas, como de las recomendaciones que a continuación se darán y otras que surjan en el futuro para la mejora en el desempeño de los sistemas individuales para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

8.2.2 Recomendaciones para el sistema tanque – FAFA – drenaje

- Sustituir el lecho filtrante por dos capas de piedra cuarta y cuartilla. Con esto se aumenta el área de superficie específica disponible para la adherencia de la película biológica y se disminuyen los espacios entre partículas. Adicionalmente, al disminuir los espacios entre partículas mejora el proceso de retención de los sólidos flotantes en el agua, que en este momento es deficiente.
- Se debe aumentar la cantidad de orificios en el fondo falso y disminuir su diámetro. Con esto se busca distribuir más uniformemente la carga orgánica dentro del medio filtrante. Ésto pues como se puede observar en la figura 22, los orificios en el fondo falso instalado son amplios y muy espaciados.
- Las dimensiones de los filtro pueden ser disminuidas, ya que como se demostró anteriormente, poseen una capacidad mayor de la que se necesita para el nivel de ocupación esperado de acuerdo con la capacidad de las viviendas.
- Se recomienda entonces un filtro de 1,75 m de profundidad, con una capa de piedra cuarta de 60 cm y una de cuartilla de 40 cm, como se diseña en el anexo G. Con estas dimensiones se obtiene un tiempo de retención hidráulica de 12 horas, el cual se encuentra dentro del rango recomendado en el documento "Tanques Sépticos". Como se muestra en este anexo se esperara una eficiencia cercana al 76%.

8.2.3 Recomendaciones para el filtro percolador

- Se debe aumentar la ventilación dentro del filtro, colocando un ventilador eléctrico en la chimenea. Con esto se logra que las condiciones dentro del filtro sean más propicias para la digestión aerobia y se retarda el desprendimiento de la película biológica.
- Al igual que en el sistema con FAFA se debe aumentar la cantidad de orificios en el fondo falso y disminuir su diámetro. Ésto pues como se puede observar en la figura 22, los orificios en el fondo falso instalado son amplios y muy espaciados. Con esto se logra obtener un

drenaje más uniforme, ya que como se observa en la figura 22, los orificios en el fondo falso instalado están muy irregularmente distribuidos.

- Se recomienda un cambio en el distribuidor, de acuerdo con el diseño que se presenta en la figura 13, con lo que se mejoraría la distribución de la carga orgánica en el medio filtrante.
- Se debe construir una trampa de lodos a la salida del filtro para extraer la película biológica que se desprenda del medio filtrante y evitar así la obstrucción tanto del material en las zanjas de drenaje como del suelo bajo las mismas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACODAL. *Diseño, Construcción y Operación del Tanques Sépticos Normas de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá*. Publicación N° 129, 1987.
2. Álvarez, G et al. *Readecuación y Sistemas Complementarios de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas con Tanque Séptico*. Trabajo de Investigación del curso Taller de Diseño IC-905, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, 2003.
3. Arias, A. *Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental*. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, 2004.
4. Asian Institute of Technology. *Environmental Management for Developing Countries. Volume 1: Waste and Water Pollution Control*, 1983.
5. Asociación Brasileña de Normas Técnicas. *Proyecto, construcción y operación de sistemas de tanques sépticos*. NBR. 7229, 1997.
6. Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. *Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones*. San José, Febrero 1996.
7. Crites, T. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Mc Graw Hill, Santa Fé de Bogotá, Colombia, 2000.
8. Glynn, H et al. *Ingeniería Ambiental*. Segunda Edición. Prentice Hall, México, 1996.
9. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. *Análisis Sectorial del Agua Potable y Saneamiento en Costa Rica*, 2002.
10. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering. *Wastewater Treatment, Part I*. Netherlands, 1996.
11. Ministerio Nacional del Ambiente y Energía. *Reglamento de Vertido y Reuso del Agua Residuales*. Decreto No 26042-s. La Gaceta Diario Oficial # 117, Jueves 19 de Junio de 1997.
12. Rosales, E. *Tanques Sépticos: Conceptos Teóricos y Aplicaciones*. Centro de Investigación en Vivienda y Construcción, Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2003.
13. Ruiz, I et al. *El potencial de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales urbanas y efluentes de baja carga orgánica*. Universidad de Coruña, 1997

14. Víquez, E. *Evaluación preliminar de dos tipos de biofiltro utilizados como tratamiento secundario de aguas residuales domésticos*. Informe de trabajo de graduación para obtener el grado de licenciado en Ingeniería Civil: Universidad de Costa Rica, 1999.
15. Young , J. *Factors affecting the design and performance of upflow anaerobic filters*. Water Science and Technology, Vol 24, N° 8, 1991.

ANEXOS

A. DOTACIÓN DE AGUA POTABLE

La dotación utilizada para el presente estudio se obtuvo de la siguiente tabla proveniente del Análisis Sectorial del Agua.

Tabla A-1. Consumo doméstico y no doméstico de agua potable en algunas localidades

Localidad	Consumo neto domiciliario (l/hab-día)	Consumo neto no domiciliario (l/hab-día)	Consumo neto no domiciliario (% del consumo neto domiciliario)	Consumo neto total (l/hab-día)
Miramar	260	24	9.3	284
Cartago	267	42	15.7	309
Paraíso	203	54	26.6	257
E.S.P.H	188	48	25.6	237
AMSJ AyA (a)	181	64	35.4	245
Alajuela El Pasito	191	23	11.9	213
Santiago de Puriscal	197	44	22.2	241
Atenas	204	27	13.1	231
Ciudad Colón	223	24	10.6	246
Palmares	226	24	10.5	250
San Ramón	190	38	20.0	228

(a) Los consumos unitarios que se indican para el AMSJ corresponden a promedios calculados para la totalidad de los usuarios de la Región Metropolitana de A y A, independientemente de la tarifa utilizada para la facturación de los servicios.

Fuente: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Análisis Sectorial de Agua Potable y Saneamiento en Costa Rica, 2002.

B. EXTRACTO DE LOS CÓDIGOS EXTRANJEROS UTILIZADOS

B.1 Proyecto Construcción y Operación de Sistemas de Tanques Sépticos de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT)

- Distancias Mínimas

Los tanques sépticos deben guardar las siguientes distancias horizontales mínimas.

- a) 1.50 m de construcciones, límites de terreno, sumideros, zonas infiltración y extensiones de agua.
- b) 3.0 m de árboles y de cualquier punto de red pública de abastecimiento de agua.
- c) 15.0 m de pozos freáticos y de cuerpos de agua de cualquier naturaleza.

- Contribución de Desechos

En el cálculo de contribución de desechos debe ser considerado lo siguiente:

- a) Número de personas a ser atendidas.
- b) 80% del consumo local de agua. En casos plenamente justificados pueden ser adoptados porcentajes diferentes de 80% y, a falta de datos locales, relativos al consumo son adoptados los valores de la tabla B-1.

- Período de Retención de Desechos

Los tanques sépticos deben ser proyectados para períodos mínimos de retención, conforme la tabla B-2.

- Contribución de Lodo Fresco

La contribución de lodo fresco es estimada conforme la tabla B-1. Para los casos de desechos no domésticos, de acuerdo con este código la contribución debe ser fijada a partir de observaciones de campo o en laboratorio, para los indicadores menos favorables.

- Tasa de acumulación de lodo fresco

La tasa de acumulación total de lodo, es obtenida en función de:

- a) Volúmenes de lodo digerido y en digestión, producidos pro cada usuario, en litros.
- b) Temperatura ambiente (media del mes más frío, en graúos Ceisius).
- c) Intervalo entre limpiezas, en años.

Tabla B-1. Contribución diaria de desechos (C) y lodo fresco (Lf) por tipo de recinto y ocupante.

Recinto	Unidad	Contribución de desechos (C) y lodo fresco (Lf)	
1. Ocupantes permanentes			
- residencia			
consumo alto	Persona	160	1
consumo medio	Persona	130	1
consumo bajo	Persona	100	1
- hotel (excepto lavandería y cocina)	Persona	100	1
- alojamiento provisional	persona	80	1
2. Ocupantes Temporales			
- fabrica en general	Persona	70	0.30
-escritorio	Persona	50	0.20
-edificios públicos y comerciales	Persona	50	0.20
-escuelas	Persona	50	0.20
-bares	Persona	6	0.10
-restaurantes y similares	"refeição"	25	0.10
-cinemas, teatros y locales de corta permanencia	Lugar	2	0.02
-sanitarios públicos	sanitario	480	4.0

Tabla B-2. Período de retención de desechos por contribución diaria

Contribución diaria (L)	Tiempo de retención	
	Días	Horas
Menos de 1500	1.00	24
De 1501 a 3000	0.92	22
De 3001 a 4500	0.83	20
De 4501 a 6000	0.75	18
De 6001 a 7500	0.67	16
De 7501 a 9000	0.58	14
Más que 9000	0.50	12

Las tasas resultantes son las de la tabla B-3. Para acumulación en períodos superiores a 5 años, deben ser estudiadas las condiciones particulares de contribución, acumulación y "densificación" de lodo en cada caso.

Tabla B-3. Tasa de acumulación total de lodo (K) en días, por intervalo entre limpiezas y temperatura del mes más frío

Intervalo entre limpiezas (años)	Valores de K por temperatura ambiente (t) en °C		
	t ≤ 10	10 ≤ t ≤ 20	t > 20
1	94	65	57
2	134	105	97
3	174	145	137
4	214	185	177
5	254	225	217

- Dimensionamiento del Tanque Séptico

El volumen útil total del tanque séptico debe ser calculado por la fórmula:

$$V = 1000 + N(CT + KLf) \quad (B-1)$$

Donde:

V= Volumen útil en litros.

N= Número de personas o unidades de contribución.

C= Contribución de desecho, en litros/persona x día o en litros/unidad x día (según la tabla 1).

T= Período de retención en días (según tabla 2).

K= Tasa acumulación de lodo digerido en días, equivalente al tiempo de acumulación de lodo fresco, según la tabla 3).

Lf= Contribución de lodo fresco, en litros/persona x día (según tabla 1).

- Geometría de los tanques

Los tanques sépticos pueden ser cilíndricos o prismáticos regulares. Los cilíndricos son empleados en situaciones donde se pretende minimizar el área útil a favor de la profundidad,

los prismáticos rectangulares se usan cuando se desea mayor área superficial y menor profundidad.

- **Medidas Internas Mínimas**

Las medidas internas de los tanques deben observar lo que sigue:

- a) Profundidad útil: varía entre los valores mínimos y máximos recomendados en la tabla siguiente, de acuerdo con el volumen útil obtenido mediante la fórmula anterior.
- b) Diámetro interno mínimo: 1.10 m.
- c) Largo interno mínimo 0.80 m.
- d) Relación ancho:largo (para tanques prismáticos rectangulares): mínimo 2:1, máximo 4:1.

B-4. Profundidad útil mínima y máxima, por volumen útil.

Volumen útil (m ³)	Profundidad útil Mínima (m)	Profundidad útil Máxima (m)
Menor que 6	1.20	2.20
De 6.0 a 10.0	1.50	2.50
Mas que 10.0	1.80	2.80

- **Dispositivos de entrada y salida**

Los dispositivos de entrada y salida deben observar las siguientes relaciones de medidas:

- a) Dispositivo de entrada: la parte superior, por lo menos 5 cm sobre el tubo de entrada, y parte inmersa a una profundidad de 5 cm por encima del nivel inferior del dispositivo de salida.
- b) Dispositivo de salida: la parte superior debe estar nivelada con la del dispositivo de entrada, y la parte inmersa a una profundidad de un tercio de la profundidad del líquido.

- c) Entre las extremidades superiores de los dispositivos de entrada y salida y el plano inferior de la losa de cobertura del tanque, debe ser preservada una distancia mínima de 5 cm.

- **Aberturas de Inspección**

Las aberturas de inspección de los tanques sépticos deben tener un número y disposición tales que permitan la remoción del lodo y la espuma acumulados, así como la eliminación de obstrucciones de los dispositivos internos. Las siguientes relaciones de distribución e medidas deben ser observadas:

- a) todo tanque debe tener por lo menos una abertura con una dimensión mínima igual o superior a 0,60 m, que permita acceso directo al dispositivo de entrada de las aguas residuales al tanque;
- b) el máximo radio de alcance horizontal, admisible para efectos de limpieza, es de 1,50 m, a partir del cual debe ser necesaria una nueva abertura;
- c) la menor dimensión de las demás aberturas debe ser igual o superior a 0,20 m;
- d) los tanques construidos con losas removibles en segmentos no necesitan aberturas de inspección, siempre que las piezas removibles que las sustituyan tengan área igual o inferior a 0,50 m²;
- e) los tanques prismáticos rectangulares de cámaras múltiples deben tener por lo menos una abertura por cámara;
- f) los tanques cilíndricos pueden tener una única abertura, independientemente del número de cámaras, siempre que sea observado el radio de cobertura dispuesto en el punto b que la distancia entre el nivel de líquido y la parte inferior del tapón de cierre sea igual o superior a 0,50 m.

- **Mantenimiento**

Procedimiento de limpieza de los tanques

1. El lodo y la espuma acumulados en los tanques deben ser removidos a intervalos equivalentes al período de limpieza del proyecto.
2. Cuando se remueve el lodo digerido, aproximadamente 10% de su volumen deben ser dejados en el interior del tanque.

3. Una remoción periódica de lodo y espuma debe ser hecha por profesionales especializados que dispongan de equipos adecuados, para garantizar el no contacto directo entre personas y lodo. Es obligatorio el uso de botas y guantes. En caso de remoción manual, es obligatorio el uso de máscara adecuada de protección.
4. Anteriormente a cualquier operación dentro de los tanques, las tapas deben ser mantenidas abiertas por tiempo suficiente para la remoción de gases tóxicos o explosivos (mínimo 5 min).

B.2 Diseño, Construcción y Operación del Tanques Sépticos Normas de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

POZOS O TANQUES SÉPTICOS

B.2.1 Guía de Diseño

a. Generalidades:

Con un solo tanque séptico se podrá tratar el efluente sanitario producido por 300 habitantes.

El sistema podrá ser ampliado cuando el aumento de la población servida así lo requiera, mediante la construcción de tanques adicionales y la ampliación de los tratamientos complementarios del efluente.

b. Tiempo de Retención:

Con el objeto de obtener un aquietamiento del líquido de suficiente duración como para permitir la sedimentación de la mayor parte de los sólidos suspendidos, el período de retención recomendado es de 3 días, este valor deberá tenerse en cuenta en la evaluación de la capacidad del tanque.

c. Volumen del Tanque Séptico:

El volumen de las unidades podrá ser estimado por medio de las fórmulas que se presentan a continuación. La capacidad finalmente seleccionada será la correspondiente al mayor valor obtenido.

1. Fórmula de Función del Número de Habitantes Servidos:

$$V = 180P + 2000 \quad (B-2)$$

En donde:

V: Volumen del tanque en litros.

P: Número de habitantes (con un valor mínimo de 4 personas)

Cuando los edificios servidos son ocupados durante un tiempo parcial como es el caso de escuelas o lugares de trabajo, el número de habitantes deberá dividirse por dos.

2. Fórmula en función del tiempo de retención:

$$V = Q \times P \times t \quad (B-3)$$

En donde:

V: Volumen del tanque en litros.

P: Número de habitantes servidos.

Q: Caudal de diseño en litros/hab/día

T: tiempo de retención en días.

d. Dimensiones

Las dimensiones del tanque séptico deberán establecerse de acuerdo con la capacidad calculada según lo indicado en el c, guardando aproximadamente las siguientes proporciones relativas:

- Longitud total: L
- Ancho útil: L/3
- Longitud del primer compartimiento de sedimentación: 2L/3
- Longitud del segundo compartimiento: L/3
- Profundidad útil, h: 1.50 m mínimo.

e. Cálculo del Período de Limpieza

El período de remoción de los lodos o limpieza del tanque generalmente se estima entre 2 y 5 años. Para estimar el período de limpieza para un caso en particular podrá utilizarse la siguiente relación:

$$T = V / 3PA \quad (B-4)$$

En donde:

T: Período de limpieza en años.

V: Volumen efectivo del tanque séptico en litros.

P: Número de habitantes servidos.

A: Tasa de acumulación en litros/hab/año.

La tasa de acumulación de lodos, A, deberá establecerse de acuerdo con la experiencia obtenida en instalaciones cercanas, pues la cantidad de sólidos acumulados y su digestión depende de las condiciones locales. A falta de estos datos, puede usarse una cifra promedio de $0.04 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$, como una aproximación razonable para efectos de diseño.

B.2.2 Consideraciones de Construcción

a. Materiales

Los tanques sépticos deben ser construidos con materiales no susceptibles a la corrosión o deterioro, tales como el concreto, o ladrillos recocidos y vitrificados.

b. Accesos

Deben proporcionarse accesos adecuados a cada compartimiento del tanque para propósitos de inspección y limpieza. Dichos accesos podrán ser: una tapa si el tanque es superficial o un pozo de inspección en forma de tronco de cono con una dimensión mínima de 60 cm.

c. Dispositivos de Entrada y Salida de Agua

El dispositivo de entrada estará conformado por un tubo localizado a 7.5 cm mínimo por encima del nivel normal del líquido, así mismo se colocará una pantalla deflectora que penetrará por lo menos 15 cm bajo el nivel normal del líquido. El dispositivo de salida contará con una pantalla deflectora que penetrará bajo la superficie del líquido, una longitud igual al 40% de la profundidad del líquido, y un tubo de salida que corresponde a la descarga del tanque.

B.2.3 Operación y Mantenimiento

Cuando la construcción de la estructura del tanque séptico esté terminada y antes de hacer los rellenos laterales, debe llenarse con agua para verificar su estanqueidad. Si hay fugas estas deben taponarse y volver a probar el tanque hasta que esté en condiciones

adecuadas de trabajo. La operación del tanque será automática ya que los procesos de sedimentación, flotación y digestión se dan en forma espontánea.

Para una adecuada operación del sistema, se recomienda no mezclar las aguas lluvias con las aguas residuales; así mismo, se evitará el uso de químicos para limpieza del tanque séptico y el vertimiento de aceites.

Los tanques sépticos deben ser inspeccionados por lo menos una vez por año, ya que ésta es la única manera de determinar cuándo se requiere una operación de mantenimiento y limpieza. Dicha inspección deberá limitarse a medir la profundidad de los lodos y la nata de la vecindad del deflector de salida. El tanque deberá ser limpiado si el fondo del manto de natas está a menos de 7.5 cm del borde inferior del deflector de salida, o si la profundidad del manto de lodos es del 40 % o más con respecto a la profundidad del líquido en el tanque.

La limpieza se efectúa bombeando el contenido del tanque a un camión cisterna. Los tanques sépticos no deben lavarse ni desinfectarse después del bombeo ya que una cantidad pequeña de lodos debe dejarse para propósitos de inoculación y reactivación del proceso de digestión. Adicionalmente, tanto los métodos como los sitios de disposición final de los lodos deben ser aprobados por la autoridad sanitaria competente en conformidad con la legislación vigente al respecto.

Finalmente, el constructor o diseñador del tanque séptico debe entregar a los usuarios del mismo un plano que muestra la localización del sistema, con las instrucciones para destapar el tanque, hacer la inspección y la forma de hacer el mantenimiento requerido.

C. Pruebas fisicoquímicas involucradas en el proyecto

C.1 Conductividad

La conductividad del agua es una expresión numérica de la habilidad para transportar una corriente eléctrica. La conductividad del agua depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la de determinación. Por tal motivo, cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad, lo que permite obtener un estimado rápido del contenido de sólidos disueltos en el agua. (1)

Para medir la conductividad se utilizan instrumentos comerciales de lectura directa en mS/cm a 25 °C con un error menor del 1%. (1)

El producto del valor de la conductividad en $\mu\text{mho/cm}$ por un factor que oscila entre 0.55 y 0.7 es igual al contenido de sólidos disueltos; dicho factor depende de los iones en solución en el agua y de la temperatura. (1)

C.2 Temperatura

La temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que la del agua de suministro, debido a la incorporación de agua caliente procedente de las casas y los diferentes usos industriales. En función de la situación geográfica, la temperatura media anual del agua residual varía entre 21 y 30 °C. La temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana se sitúa entre los 25-35 °C. Los procesos de digestión aeróbica y de nitrificación se detienen cuando se alcanzan los 50 °C. (1)

El proceso de digestión anaeróbico se desarrolla con temperaturas entre 20-35 °C. Conforme aumenta la temperatura dentro del tanque séptico, el tiempo para la digestión de lodos disminuye. Para mantener la temperatura constante se debe aprovechar el calor de combustión de los gases generados por la digestión. (1)

A temperaturas de alrededor de 15 °C, las bacterias productoras de metano cesan su actividad., por lo que se debe vigilar la temperatura para satisfacer el proceso anaeróbico.(1)

C.3 Sólidos

Incluye toda la materia, excepto el agua contenida en los materiales líquidos. En general las aguas con cantidades de sólidos menores a los 500 mg/l se consideran ideales para el uso doméstico. (1)

Los sólidos en el agua se pueden clasificar según el siguiente esquema:

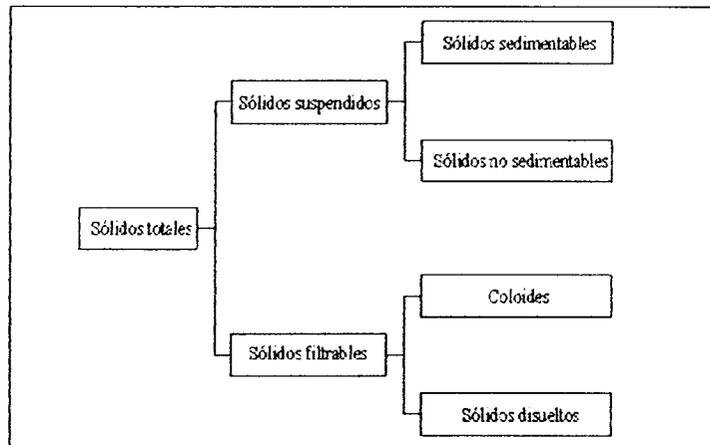


Figura C-1 Clasificación de los sólidos

Fuente: Álvarez, G et al, 2003

- Sólidos totales

Corresponde a la materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a 103 °C. El material de los sólidos totales incluye material disuelto y no disuelto (sólidos suspendidos). (1)

- Sólidos disueltos y no disueltos

La cantidad de sólidos disueltos varía significativamente en las aguas. La prueba de sólidos disueltos debe llevarse a cabo a una temperatura de 180 °C. La razón de la alta temperatura, es la remoción de toda el agua que puede obstaculizar la prueba.

Los lodos representan un caso extremo en el cual la mayoría de la materia orgánica está en disolución y la fracción disuelta es de menor importancia. La determinación de la cantidad de materia disuelta y sin disolver se alcanza al hacer pruebas en los sólidos filtrables. Los sólidos no disueltos, se conocen como materia en suspensión o sólidos suspendidos.(1)

- Sólidos sedimentables

El término sólidos sedimentables, se aplica a sólidos en suspensión que sedimentarían ante condiciones de calma, debido a la influencia de la gravedad. Solamente el material grueso, con densidad mayor a la del agua va a sedimentar. Determinan la necesidad de unidades de sedimentación y el comportamiento físico de las que ingresan a los cuerpos naturales de agua. La determinación se hace llenando un cono Imhoff de un litro de volumen y registrando el volumen de material sedimentado en el cono al cabo de un periodo de tiempo determinado.(1)

C.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La prueba de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es utilizada en la determinación de la concentración de materia orgánica en las aguas residuales. (1)

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) mide la cantidad de oxígeno que consumen los microorganismos al descomponer la materia orgánica. Normalmente, la prueba se realiza en un periodo de 5 días a 20 °C y se denota como DBO_5^{20} . En aguas residuales domésticas, el valor de DBO a 5 días representa en promedio de 65 a 70% del total de la materia orgánica degradable. (1)

La DBO requiere cuidado especial en su realización. Existen numerosos factores que afectan la prueba de la DBO, entre ellos la relación de la materia orgánica soluble a la materia orgánica suspendida, los sólidos sedimentables, los flotables, la presencia de hierro en su forma oxidada o reducida, la presencia de compuestos azufrados y las aguas no bien mezcladas. No existe una forma de corregir o ajustar los efectos de estos factores. (1)

En los 5 días que dura el ensayo de DBO se llega a oxidar entre el 60-70%, se asumen 20°C como un valor representativo de temperatura que se da en los cursos de agua que circulan a baja velocidad en climas suaves. (1)

La determinación de DBO en laboratorio y la constante de reacción K, se puede llevar a cabo por medio de un equipo electrónico compuesto por controlador y cabezas de medición de DBO (OxiTop OC100). Este equipo consta de recipientes ámbar dentro de los cuales se coloca la muestra y un agitador magnético. En la boca del recipiente se coloca una carista de hule donde se agregan dos pastillas de Hidróxido de Sodio (NaOH). Por

último se coloca la cabeza electrónica, la cual se encarga de realizar las mediciones de manera horaria. Por medio de un controlador electrónico se activan las cabezas eligiendo el rango dentro del cual se espera que se encuentra la DBO a medir. Las botellas así preparadas se colocan sobre una base encargada de efectuar la mezcla por medio de los agitadores magnéticos. Todo esto se introduce en un incubador encargado de mantener una temperatura constante de 20°C. La información se puede extraer de manera gráfica terminado el período de cinco días por medio del controlador electrónico.

C.5 Demanda química de oxígeno (DQO)

La prueba de DQO (Demanda Química de Oxígeno) es utilizada para medir el contenido de materia orgánica en las aguas residuales y los cuerpos de agua naturales. La cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica es medida utilizando un agente químico oxidante fuerte y un medio ácido. El dicromato de potasio ha sido un oxidante excelente en esta prueba. La prueba debe ser llevada a cabo a altas temperaturas. Un compuesto catalítico (sulfato de plata) es requerido como auxiliar en la oxidación de ciertos compuestos orgánicos.

La prueba de DQO es muy utilizada en aguas residuales procedentes de industrias y municipios que contienen compuestos tóxicos para la vida acuática. El valor de la DQO es, generalmente, mayor que el valor de DBO, debido a que un número mayor de compuestos pueden ser oxidados por medios químicos (este número es mayor que el de compuestos que pueden ser oxidados por medios biológicos). (2)

En esta prueba una porción de 2 ml de la muestra es colocada en un vial para DQO, luego se coloca en el digestor el cual se encargará de mantener el vial a una temperatura de 150°C por espacio de dos horas. Pasado este tiempo, la muestra debe dejarse enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente para luego proceder a medir la DQO mediante un colorímetro.

C.6 Potencial hidrógeno (pH)

El pH es un término utilizado para expresar la condición ácida o básica de una solución. Es una forma de expresar la concentración de iones de hidrógeno. En el área de suministro de aguas se considera de importancia en los procesos de coagulación, desinfección, control de dureza y corrosión. En tratamiento de aguas residuales que

emplean procesos biológicos, el pH debe ser controlado en el rango deseable para el organismo involucrado. (2)

C.7 Nitrógeno

Los elementos del nitrógeno son importantes para el crecimiento de protistas y plantas. Como el nitrógeno es básico para la síntesis de proteínas, es preciso conocer datos sobre la presencia del mismo en el agua y en que cantidades, para valorar la posibilidad de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante procesos biológicos. (1)

El contenido total en nitrógeno está compuesto por nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrato y nitrito. El nitrógeno del nitrito, cuya determinación se realiza colorimétricamente, es relativamente inestable y fácil de oxidar a la forma de nitrato. Es un indicador de la contaminación anterior al proceso de estabilización y raramente excede la cantidad de 1 mg/L en el agua residual. (1)

El nitrógeno del nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno que se puede encontrar en las aguas residuales. La concentración de nitratos en efluentes de aguas residuales puede variar entre 0 y 20 mg/L en forma de nitrógeno (N), con valores típicos entre 15-20 mg/L. (1)

En el agua residual reciente, el nitrógeno se halla primeramente combinado en forma de materia proteínica y urea, aunque su paso a la forma amoniacal se produce enseguida. (1)

C.8 Fósforo

Bajo condiciones normales se encuentra en el agua en pequeñas cantidades; sin embargo, incrementos en el nivel de éste originan efectos no deseados en el agua tales como crecimiento acelerado de plantas, presencia excesiva de algas, bajos niveles de oxígeno disuelto en el agua, y muerte de cierto tipo de peces, invertebrados y otros animales. (1)

- Formas del fósforo.

El fósforo se presenta en la naturaleza en forma de fosfatos (PO_4) orgánicos e inorgánicos, los cuales se pueden encontrar suspendidos o disueltos en el agua. El fósforo cambia de forma cíclicamente (ver fig C-2)

Producto de la excreción o muerte de los animales y plantas el fósforo orgánico, se asienta, las bacterias lo toman y lo convierten nuevamente en fósforo inorgánico, el cual se encuentra disuelto o suspendido en el agua, dando inicio nuevamente al ciclo. Las formas de importancia del fósforo en aguas son: ortofosfatos (fosfatos que presentan un solo ión PO_4), y polifosfatos, (fosfatos que contienen más de un ión grupo fosfatos). (1)

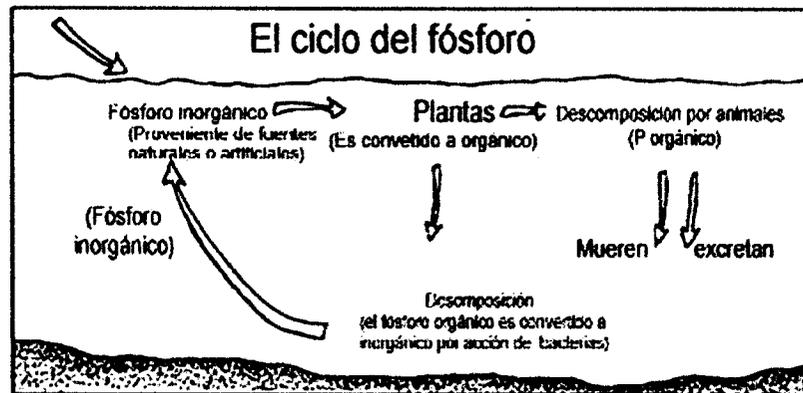


Figura C-2. Ciclo del fósforo.

Fuente: Álvarez, G et al, 2003

C.9 Grasas y Aceites

Las grasas y los aceites corresponden aquellas sustancias poco solubles, que se separan de la porción acuosa y flotan formando natas, películas sobre el agua. Los aceites, las grasas y las ceras son los lípidos más importantes en las aguas residuales. (1)

El parámetro de grasas y aceites incluye los ésteres de ácidos grasos de cadena larga, compuestos con cadenas largas de hidrocarburos (ácido carboxílico), materiales solubles en solventes orgánicos. (1)

Las desventajas que presentan estas sustancias en el tratamiento de aguas residuales son básicamente tres:

1. Difíciles de transportar en las tuberías
2. Reducen la capacidad de flujo de los conductos (drenajes)
3. Difíciles de atacar biológicamente

Por tal motivo, es necesario conocer la concentración de las grasas y aceites en las aguas residuales para determinar el tratamiento previo, la eficiencia de los procesos de remoción y el grado de contaminación.(1)

D. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO UTILIZADO COMO MATERIAL FILTRANTE

Prueba Realizada: Pesos Específicos y Absorción para Agregados Gruesos

Según la norma ASTM C-127

D.1 Equipo Utilizado

- Balanza
- Canasta de alambre
- Recipiente para sumergir la canasta
- Bandejas de metal
- Horno

D. 2 Procedimiento

1. Pesar una muestra mayor que 50 kg (para agregado de aproximadamente 112 mm de tamaño máximo).
2. Se coloca en un recipiente con agua para saturar durante 24 horas.
3. Secar mediante un paño hasta quitar el brillo proporcionado por el agua libre, para llegar al estado saturado superficie seca.
4. Pesar para obtener el peso específico saturado superficie seca.
5. Introducir la muestra en la canasta de alambre, para determinar el peso saturado sumergido en agua.
6. Se coloca el material en bandejas y se introduce al horno a 110° C durante 24 horas, para obtener el peso seco después de enfriarse a temperatura ambiente.

D.3 Descripción del agregado:

Se trata de rocas cuyo tamaño máximo es de aproximadamente 10 cm, de forma muy angular, color gris predominantemente aunque con algunas coloraciones amarillas y blancas.

D.4 Datos Experimentales

Tabla D-1. Datos Experimentales

Fecha	19 –20 de octubre del 2004
Peso saturado superficie seca	50138.8 g
Peso sumergido de la muestra	30502.4 g
Peso seco	49123.9 g
Volumen total (recipiente)	0.0469 m ³

Tabla D-2. Resultados Experimentales

PARÁMETRO	FÓRMULA	VALOR
Peso específico aparente	$G_s = \frac{P_s}{V_s \sigma_w} = \frac{P_s}{P_s - P_{sumerg}}$	2.64
Peso específico saturado superficie seca	$G_{Bss} = \frac{P_{ss}}{V_B \sigma_w} = \frac{P_{sss}}{P_{sss} - P_{sumerg}}$	2.55
Peso específico bruto seco	$G_{bs} = \frac{P_s}{V_b \sigma_w} = \frac{P_s}{P_{sss} - P_{sumerg}}$	2.50
Absorción	$\%D = \frac{P_{wd}}{P_s} \cdot 100 = \frac{P_{sss} - P_s}{P_s} \cdot 100$	2.10%
Volumen sólido	$V_s = \frac{P_s - P_{sumerg.}}{\sigma_w}$	0.0186 m ³
Volumen de Vacíos	$V_v = V_T - V_s$	0.0283
Porosidad	$p = \frac{V_v}{V_T}$	58%

Tabla D-3. Selección de la masa de la muestra

Tamaño máximo nominal mm (in)	Peso mínimo de la muestra kg (lb)
12.5 (1/2) o menos	2 (4.4)
19.0 (3/4)	3 (6.6)
25.0 (1)	4 (8.8)
37.5 (1 1/2)	5 (11.1)
50 (2)	8 (18)
63 (2 1/2)	12 (26)
75 (3)	18 (40)
90 (3 1/2)	25 (55)
100 (4)	40 (88)
112 (4 1/2)	50 (110)
125 (5)	75 (165)
150 (6)	125 (276)

E. Análisis Estadístico

Como se puede ver en la página siguiente, se ha tomado como ejemplo el parámetro DQO de la muestra de aguas crudas en el sistema tanque – FAFA – drenaje para ilustrar el análisis estadístico realizado a los datos para determinar cuales de ellos pueden ser eliminados después de demostrarse que son datos sesgados.

La metodología seguida fue la aplicación de la prueba de bondad de ajuste, χ^2 para determinar si la muestra se ajusta a la distribución normal.

Para esto, se clasifican los datos dentro de una serie de clases, con lo que se obtiene la frecuencia observada en cada una de las clases. Seguidamente se normalizan estas clases de manera que se pueda calcular la probabilidad (distribución normal) de que un dato esté dentro de ese rango, dadas las características de la muestra. Esta probabilidad multiplicada por el tamaño de la muestra, da como resultado la frecuencia esperada. Por último se aplica la prueba de bondad de ajuste.

Una vez demostrada la normalidad de la muestra, se precede a fijar un rango de confianza, dentro del cual se toman los valores como confiables, y aquellos datos que estén fuera de este rango son desechados. Este rango es de 1,5 desviaciones estándar por encima y por debajo del promedio.

De acuerdo con las características de la distribución normal, en este rango se encuentra aproximadamente un 80% de los datos de la muestra.

Como puede verse en el ejemplo, se conservan los datos que estén entre 95 y 1862 mg/l, los datos que se encuentran fuera de este rango se consideran sesgados y son desechados. En este caso se eliminan tres datos.

F. REDISEÑO DEL FILTRO ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE IMPLEMENTANDO RECOMENDACIONES PROPUESTAS

Como se ha mencionado anteriormente, el Ing. Elías Rosales en su documento "Tanques Sépticos" establece que un tiempo de retención hidráulica entre 6 y 12 horas para asegurar la capacidad sanitaria del filtro. Con base en esto se realiza un diseño del filtro para lograr una unidad de tratamiento que provea un tiempo de retención hidráulica dentro de este rango, y cuyas dimensiones sean iguales o menores que las que tiene el filtro construido, para esto se toman en cuenta las modificaciones propuestas en la sección 8.2.2, a saber:

- Cambio del fondo falso por una rejilla resistente a la corrosión y al peso del medio filtrante con un espesor de 5 cm.
- Cambio del medio filtrante por dos capas de piedra cuarta y cuartilla con una porosidad de 45 y 43% y un peso volumétrico de 1461 kg/m³ y 1446 respectivamente.
- Disminución en las dimensiones para ahorrar espacio, dado que actualmente está sobredimensionado.

Para realizar el diseño se sigue las metodologías desarrolladas en las secciones 4.4.1 y 4.4.2 y se supone una ocupación de 4 habitantes en la vivienda. Los resultados son los siguientes:

Tabla F-1. Revisión sanitaria e hidráulica para diferentes dimensiones de FAFA.

Diámetro (m)	Altura (m)	P. Cuarta P. Cuartilla		V _{efectivo} (m ³)	TRH(hrs)	Resist al flujo(m)
		c ₁ (m)	c ₂ (m)			
1,2	2,00	0,80	0,45	0,87	20	0,32
1,2	1,65	0,60	0,30	0,70	16	0,23
1,2	1,30	0,35	0,20	0,52	12	0,14
1,0	1,75	0,60	0,40	0,52	12	0,25
1,0	1,55	0,50	0,30	0,45	10	0,20
1,0	1,45	0,40	0,30	0,42	9	0,18
0,8	1,75	0,60	0,40	0,33	8	0,25
0,8	1,6	0,50	0,35	0,30	7	0,22
0,8	1,40	0,40	0,25	0,26	6	0,16

Como se puede ver en esta tabla si se mantiene el diámetro actual puede disminuirse la profundidad del filtro de 1.90 m a 1.30 con una capa de piedra cuarta de 35 cm y una capa de piedra cuartilla de 20 cm, obteniéndose un tiempo de retención hidráulica de 12 horas, el cual está dentro del rango recomendado y una resistencia al flujo de 14 cm, la cual es menor que los 50 cm de carga hidráulica disponible.

Si se disminuye el diámetro del filtro a 1 m se observa que se puede tener profundidades entre 1.75 m y 1.45 m con tiempos de retención hidráulica entre 12 y 9 horas respectivamente, los cuales están dentro del rango recomendado. Además se mantiene la resistencia al flujo por debajo de la carga hidráulica disponible.

Puede disminuirse el diámetro aun más a 80 cm obteniéndose profundidades entre 1.75 y 1.40 m con tiempos de retención hidráulica entre 8 y 6 horas respectivamente y cumpliendo con la carga hidráulica disponible.

Entre estos diseños se propone un filtro de 1.75 m de profundidad con una capa de piedra cuarta de 60 cm, una capa de piedra cuartilla de 40 cm y un tiempo de retención hidráulica de 12 horas.

Como es sabido, no hay una metodología exacta para determinar la eficiencia que puede esperarse para un filtro de este tipo con determinadas características.

Sin embargo, para el presente estudio se cuenta con el artículo "Factores que afectan el Diseño y Desempeño de Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente" (Factors Affecting the Design and Performance of Upflow Anaerobic Filters). En este artículo el autor, mediante un análisis estadístico (correlación multivariable) de datos provenientes del seguimiento de filtros a gran escala operando bajo diferentes condiciones, realiza una selección y ordenamiento de los parámetros que influyen en el rendimiento de los FAFA's.

De acuerdo con este estudio, y como ya se ha mencionado, el tiempo de retención hidráulica (TRH) es el parámetro más importante tanto para filtros con medio modular como con filtros de relleno libre.

Con base en este estudio se establecen una serie de ecuaciones empíricas para predecir la eficiencia del filtro. Entre estas se encuentra la que se utilizará a continuación para predecir la eficiencia del filtro con las dimensiones y características antes establecidas.

Esta fórmula incluye la carga orgánica y la concentración del influente. Por otro lado para el cálculo de la carga orgánica toma en cuenta el Tiempo de Retención Hidráulica, de

manera que es una fórmula que incluye tres parámetros de importancia en el diseño de este tipo de filtros.

Como se puede ver a continuación, la correlación entre estos parámetros es de 0.73, la cual es aceptable.

$$E = k' \cdot (L_a)^{a'} \cdot (S_0)^{b'} \Rightarrow R^2 = 0.7333 \quad (F-1)$$

Donde S_0 es la concentración del influente, k' , a' y b' son coeficientes tabulados en el texto y L_a es la carga orgánica aplicada, en $\text{kgDQO}/\text{m}^3\text{día}$ y calculada como sigue:

$$L = \frac{S_0(\text{kgDQO} / \text{m}^3)}{\text{TRH}(\text{días})} \quad (F-2)$$

Para medio de roca, según el artículo:

$$a' = -0.165$$

$$k' = 28.51$$

$$b' = -0.157$$

Con una concentración del influente de $222 \text{ mgDQO}/\text{l}$, y las características del sistema se obtiene una eficiencia en remoción de DQO de 76%

Es importante aclarar que las ecuaciones propuestas por Young están desarrolladas para filtros a gran escala con volúmenes del orden de los miles de metros cúbicos. Por otro lado no hay una concordancia entre el material filtrante utilizado por estos filtros y el que se estudia en este proyecto. Sin embargo, esta eficiencia estimada se encuentra dentro del rango esperado para este tipo de filtros, de 70 a 80%. (6)