



**Optimización del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en las oficinas administrativas de la Mina de Carbón a Cielo Abierto Las Palmeras, zona rural del municipio de Puerto Libertador, Córdoba.**

Blanca María Montiel Gómez

Práctica empresarial presentada para optar al título de Ingeniera Sanitaria

Asesor interno

Sebastián Romero Arrieta

Ingeniero Ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Sanitaria

Medellín, Antioquía, Colombia

2024

<b>Cita</b>	(Montiel Gómez, 2024)
<b>Referencia</b>	(Montiel Gómez, B. M. 2024). <i>Optimización del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en las oficinas administrativas de la Mina de Carbón a Cielo Abierto Las Palmeras, zona rural del municipio de Puerto Libertador, Córdoba.</i>
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	[Práctica Empresarial]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Centro de documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi madre y a mi padre que han dado todo para que yo crezca tanto profesionalmente como persona, ser su orgullo es mi mayor satisfacción.

## **Agradecimientos**

Agradezco primeramente a Dios que es la base de mi vida y mis sueños, sin él en mi corazón nada soy; también, agradezco a mis padres que me apoyaron desde siempre para lograr esta meta, agradezco a cada una de las personas que pusieron un grano de arena para que hoy día pueda culminar esta importante etapa de mi vida profesional y por último a la empresa GECELCA S.A E.S.P que me dejó muchas enseñanzas profesionalmente.

## Contenido

Resumen .....	9
Abstract .....	10
1 Introducción .....	11
2 Objetivos .....	14
2.1 Objetivo general .....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3 Marco teórico .....	15
3.1 Conceptos básicos de aguas residuales domésticas.....	15
3.1.1 Trampa de grasas .....	16
3.1.2 Sistema séptico: Tanque séptico - FAFA.....	16
3.2 Principios de funcionamiento de un Tanque séptico.....	17
3.3 Principios de funcionamiento de un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA).....	18
4 Resultados .....	20
4.1 Descripción del sistema actual .....	20
4.2 Análisis demográfico y proyección de población .....	20
4.3 Cálculo de caudales de diseño.....	22
4.3.1 Determinación de caudal faltante a servir.....	24
4.4 Diseño del sistema tratamiento optimizado .....	24
4.4.1 Rediseño del Tanque Séptico.....	24
4.4.2 Rediseño del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) .....	29
4.4.3 Rediseño del Tanque de Contacto para desinfección .....	33
4.4 Evaluación de la reutilización del agua tratada.....	36
4.5 Beneficios de la reutilización del agua tratada.....	36
4.6 Análisis de costos y ahorros asociados .....	37

4.7 Costos de implementación del Sistema Séptico optimizado .....	37
5 Discusión .....	42
5.1 Componentes del sistema implementado: Tanque séptico – FAFA – Tanque de contacto .	42
5.2 Limitaciones y problemas identificados.....	44
5.2.1 Sobredimensionamiento del sistema.....	44
6 Conclusiones .....	46
7 Referencias .....	47

## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> Registros de la población .....	21
<b>Tabla 2</b> Contribución de agua residual por habitante .....	22
<b>Tabla 3</b> Caudal a servir.....	23
<b>Tabla 4</b> Datos iniciales .....	25
<b>Tabla 5</b> Máximos y mínimos de profundidad útil.....	28
<b>Tabla 6</b> Dimensionamiento Pozo Séptico.....	29
<b>Tabla 7</b> Valores típicos de diseño FAFA.....	30
<b>Tabla 8</b> Eficiencia de remoción DBO- Pozo Séptico .....	30
<b>Tabla 9</b> Dimensionamiento del FAFA .....	32
<b>Tabla 10</b> Parámetros de desinfección por cloración .....	34
<b>Tabla 11</b> Dimensionamiento Tanque de contacto .....	35
<b>Tabla 12</b> Costos asociados al diseño del sistema séptico .....	38
<b>Tabla 13</b> Dimensiones del Tanque de Contacto Actual.....	44

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Sistema séptico Mina Las Palmeras.....	12
<b>Figura 2.</b> Succión de equipo Vactor.....	12
<b>Figura 3</b> Componentes más usuales de un sistema séptico .....	16
<b>Figura 4</b> Esquema de un pozo séptico .....	17
<b>Figura 5</b> Esquema de un FAFA.....	19
<b>Figura 6</b> Proyección de población .....	21
<b>Figura 7</b> Vista en planta del tanque séptico.....	42

## Lista de ecuaciones

<i>Ecuación 1. Proyección de población .....</i>	<i>21</i>
<i>Ecuación 2. Cálculo de caudal a servir .....</i>	<i>22</i>
<i>Ecuación 3. Cálculo de caudal faltante .....</i>	<i>24</i>
<i>Ecuación 4. Cálculo de volumen útil .....</i>	<i>25</i>
<i>Ecuación 5. Cálculo de volumen requerido para sedimentación .....</i>	<i>26</i>
<i>Ecuación 6. Cálculo de volumen de lodos .....</i>	<i>26</i>
<i>Ecuación 7. Cálculo de volumen de natas .....</i>	<i>26</i>
<i>Ecuación 8. Cálculo de tiempo de retención .....</i>	<i>27</i>
<i>Ecuación 9. Cálculo de volumen del filtro .....</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 10. Cálculo de volumen total del filtro .....</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 11. Cálculo de carga volumétricas .....</i>	<i>32</i>
<i>Ecuación 12. Cálculo de carga hidráulica .....</i>	<i>32</i>
<i>Ecuación 13. Cálculo de tiempo de retención hidráulica .....</i>	<i>35</i>
<i>Ecuación 14. Cálculo de volumen de tanque de contacto .....</i>	<i>35</i>

### Resumen

El Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (compuesto por un tanque séptico, un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) y un tanque de contacto para desinfección) en las oficinas administrativas de la mina de carbón a cielo abierto Las Palmeras se enfrenta a la problemática de subdimensionamiento debido a un aumento superior al proyectado en la cantidad de personal de trabajo activo (en adelante, referenciado como “población”), lo que limita su eficacia y genera gastos adicionales por la disposición a través de terceros del agua tratada. Este estudio de prefactibilidad busca proyectar la población a 10 años, calcular los caudales de diseño conforme a la población proyectada, diseñar adecuadamente cada componente del sistema (tanque séptico, filtro anaerobio de flujo ascendente, tanque de contacto para desinfección) para el caudal faltante a servir y evaluar los costos asociados. El objetivo principal es ampliar el sistema de tratamiento instalado para garantizar una capacidad adecuada.

*Palabras clave:* Aguas residuales domésticas, Tanque séptico, Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), Desinfección, Actividad minera, Agua tratada, Caudal.

---

**Abstract**

The domestic wastewater treatment system (consisting of a septic tank, an upflow anaerobic filter and a contact tank for disinfection) at the administrative offices of the Las Palmeras open-pit coal mine faces the problem of undersizing due to a higher than projected increase in the number of active workers (hereafter referred to as "population"), which limits its efficiency and generates additional costs for the disposal of treated water through third parties. This pre-feasibility study seeks to project the population to 10 years, calculate the design flow rates according to the projected population, adequately design each component of the system (septic tank, upflow anaerobic filter, contact tank for disinfection) for the missing flow to be served, and evaluate the associated costs. The main objective is to expand the installed treatment system to ensure adequate capacity.

*Keywords:* Domestic wastewater, Septic tank, Upflow anaerobic filter, Disinfection, Mining activity, Treated water, Flow rate.

## 1 Introducción

En la actualidad, se hace necesario que las Aguas Residuales Domésticas sean tratadas antes de disponerse a una fuente hídrica, con el fin de garantizar la salud pública, preservar la vida acuática y la calidad de estas fuentes hídricas. En general, se consideran aguas residuales domésticas (ARD) los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales (Romero Rojas, 1999). Asimismo, las aguas residuales domésticas son las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que correspondan a descargas de los retretes y servicios sanitarios (Resolución 0631, 2015). Durante el diseño de un Sistema de Tratamiento de ARD, la amplia gama de procesos disponibles permite seleccionar soluciones adecuadas en términos técnicos y económicos para cada caso de interés o zona de captación. Para casi todas las combinaciones de requisitos de calidad del efluente, disponibilidad de terreno, costos de construcción y funcionamiento existen uno o más procesos de tratamiento adecuados (Sperling & Chernicharo, 2005)

Teniendo en cuenta lo anterior, los sistemas sépticos son una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, que se usan en gran medida en sectores con poca densidad de población o en lugares donde no se cuenta con sistemas de alcantarillado ni plantas de tratamiento de aguas residuales. Puede tener diferentes componentes, entre los que se encuentran la trampa de grasas, el tanque séptico, filtro anaerobio de flujo ascendente, sus componentes dependen del nivel de tratamiento que se quiera usar o el nivel de materia orgánica que se quiera degradar (Campo Usuga, 2022).

En las oficinas administrativas de la Mina de Carbón a Cielo Abierto "Las Palmeras", el Sistema de Tratamiento de ARD actual, que recibe las aguas negras de la batería sanitaria y las de la cocina (que solo es para uso de lavado de manos del personal), está compuesto por un tanque séptico de dos compartimientos, un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) y un tanque de contacto para desinfección que actualmente no está en operación.

Actualmente, el Sistema Séptico empleado en "Las Palmeras" (**Figura 1**) enfrenta desafíos debido al crecimiento de la población, lo que ha llevado a una capacidad insuficiente y la necesidad de disposición externa del agua tratada mediante un equipo Vactor que realiza la succión (**Figura 2**), manejo y disposición de los residuos líquidos, aumentando los costos de operación de manera significativa. Esta medida ha sido necesaria porque, aunque inicialmente se había contemplado la

## OPTIMIZACIÓN DEL STARD EN MINA DE CARBÓN LAS PALMERAS...

---

disposición de estos efluentes en actividades de riego de jardín, la Resolución 1256 de 2021 prohíbe dicha actividad. Como resultado, ha sido necesario contratar una orden de servicio para la succión, transporte y disposición final de estas aguas. Adicionalmente, el crecimiento poblacional y los volúmenes de agua a disponer están incrementando los costos de operación. Para abordar esta problemática, en este trabajo se realiza un estudio de prefactibilidad que permita optimizar el sistema de tratamiento instalado a una proyección de 10 años (no se considera una proyección mayor debido a que, con el avance de la operación minera, la ubicación del sistema podría cambiar), con el objetivo de garantizar una capacidad adecuada, mejorar su eficiencia y, posteriormente, promover la reutilización del agua tratada en la batería sanitaria.

### **Figura 1.**

*Sistema séptico Mina Las Palmeras*



*Fuente. Fotografía propia*

**Figura 2.**

*Succión de equipo Vector*



*Fuente. Propia*

---

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo general

Realizar un estudio de prefactibilidad para ampliar y optimizar el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en las oficinas administrativas de la Mina de Carbón a Cielo Abierto "Las Palmeras", con el fin de garantizar un tratamiento eficiente y la reutilización del agua tratada en la batería sanitaria de las instalaciones.

### 2.2 Objetivos específicos

1. Proyectar la población a 10 años, considerando avances en la operación minera.
2. Calcular los caudales de aguas residuales generadas por la población proyectada.
3. Diseñar el tanque séptico con capacidad adecuada para la población proyectada.
4. Diseñar el filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) y su lecho filtrante, considerando los caudales y características del agua.
5. Diseñar el tanque de contacto para la desinfección del agua tratada.
6. Evaluar los costos asociados al diseño e implementación del sistema de tratamiento ampliado

### 3 Marco teórico

#### 3.1 Conceptos básicos de aguas residuales domésticas

La generación de aguas residuales es un producto inevitable de la actividad humana. El tratamiento y disposición apropiada de las aguas residuales supone el conocimiento de las características físicas, químicas y biológicas de dichas aguas, además de sus efectos principales sobre la fuente receptora (Romero Rojas, 1999). Para poder reutilizar el agua y mitigar la contaminación de afluentes y ríos, se necesitan tratar las aguas residuales que, por el consumo diario del ser humano, son contaminadas y desechadas con material biológico o desechos sólidos. Esto ha llevado a la sociedad a reaccionar, reduciendo los impactos negativos que generan los vertimientos de aguas contaminadas (Rubiano Diaz & Ortega Patiño, 2022).

La optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales en las oficinas administrativas se realizará conforme a las directrices del Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. Este reglamento establece los criterios y requisitos mínimos para la conceptualización, diseño, construcción, supervisión técnica, puesta en marcha, operación y mantenimiento de dichos sistemas. Sus disposiciones tienen como objetivo garantizar la seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia y sostenibilidad del sistema determinado (MinAmbiente, 2000).

En las zonas rurales la disposición del agua residual se realiza generalmente en sistemas individuales, debido al difícil acceso a otros sistemas centralizados. Los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales requieren una alta inversión, tanto en la instalación como en su posterior operación y mantenimiento, por otra parte, los sistemas para el tratamiento individual de desechos líquidos consisten en varias unidades sencillas o especializadas que, con etapas consecuentes, mejoran la calidad del agua antes de su disposición final.

Entre los sistemas individuales se encuentran las letrinas, la trampa de grasas, los pozos sépticos, los filtros anaerobios ascendentes, los humedales artificiales, reactor anaerobio de flujo ascendente de alta eficiencia, campo de infiltración, el pozo de absorción, y los sistemas Imhoff (Campo Usuga, 2022). Algunos de estos son relevantes para este caso de estudio y se definen de la siguiente manera:

### **3.1.1 Trampa de grasas**

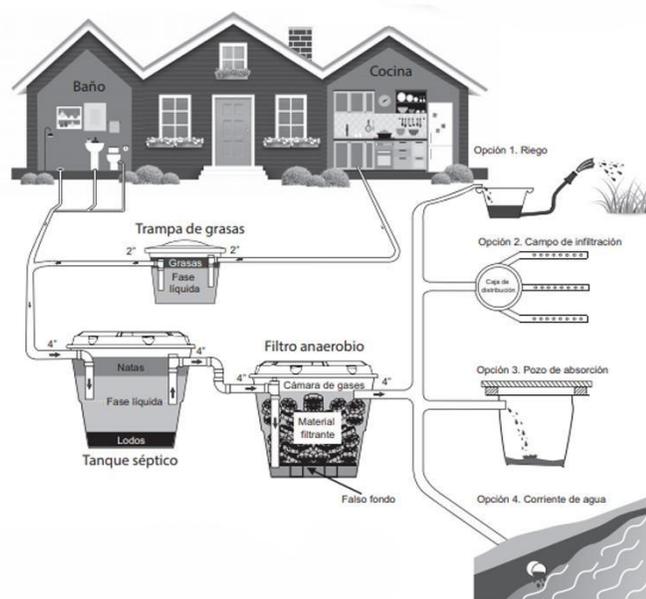
Las trampas de grasa permiten retener por sedimentación los sólidos en suspensión y el material graso. Estas se clasifican en domiciliarias y colectivas. Las domiciliarias, reciben residuos de cocinas y se ubican antes de la descarga del vertimiento a un sistema. Las colectivas tienen una capacidad mayor de volumen y pueden ser suficientes para conjuntos residenciales o industrias (Bustos Cardona & Quevedo Ortega, 2022). Asimismo, las trampas de grasa deben localizarse lo más cerca posible de la fuente de agua residual con grasas (generalmente la cocina), y aguas arriba del tanque séptico o de cualquier otra unidad que requiera este dispositivo, para prevenir problemas de obstrucción, adherencias, acumulaciones en las unidades de tratamiento y malos olores (Minvivienda, 2017).

### **3.1.3 Sistema séptico: Tanque séptico - FAF**

El sistema de fosas sépticas seguidas de filtros anaerobios (**Figura 3**) funciona de la siguiente manera, las fosas sépticas eliminan la mayor parte de los sólidos en suspensión, los sólidos sedimentados pasan a través de una abertura en la parte inferior del compartimento y se dirigen al compartimento inferior (compartimento de digestión). A continuación, los lodos acumulados se someten a una digestión anaerobia. Los gases procedentes de la digestión anaerobia no interfieren en el proceso de sedimentación, ya que no pueden penetrar en el interior de la cámara de sedimentación. El efluente, todavía con una alta concentración de materia orgánica, pasa al filtro anaerobio, donde tiene lugar una mayor eliminación en condiciones anaerobias. El filtro es un reactor de biopelícula: la biomasa crece adherida a un medio de soporte, normalmente grava (Sperling & Chernicharo, 2005)

**Figura 3**

### Componentes más usuales de un sistema séptico



Nota. Fuente (París Constructor, 2022)

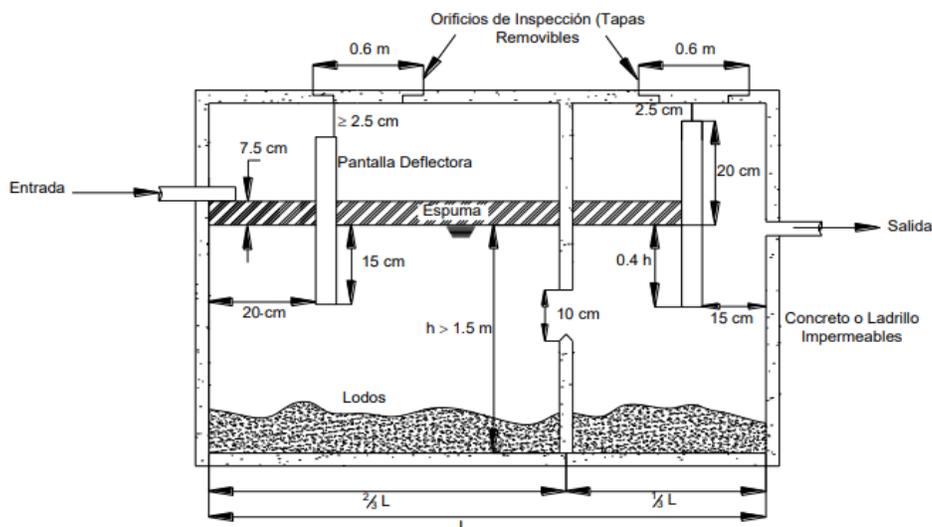
### 3.2 Principios de funcionamiento de un Tanque séptico

Se definen como un sistema individual de disposición de aguas residuales para una vivienda o conjunto de viviendas, el cual combina la sedimentación y la digestión. Los sólidos sedimentados acumulados se remueven periódicamente y se descargan normalmente en una instalación de tratamiento (Minvivienda, 2017). Los pozos sépticos son los sistemas más recomendados para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales, debido a su fácil construcción y su bajo costo de implementación y operación (Naranjo Agudelo, 2019).

Adicionalmente, el RAS señala que son tanques generalmente subterráneos, sellados, diseñados y contruidos para el saneamiento rural, que remueven materia sólida por decantación, al detener agua residual en el tanque. Para que esta separación ocurra, agua residual debe detenerse en el tanque por un mínimo de 24 horas. Hasta el 50% de los sólidos retenidos en el tanque séptico se descomponen. La materia sólida restante se acumula en el tanque. No se necesitan aditivos biológicos ni químicos para acelerar la descomposición (MinAmbiente, 2000). A continuación, se muestra un esquema de un pozo séptico (**Figura 4**).

**Figura 4**

*Esquema de un pozo séptico*



Nota. Fuente (MinAmbiente, 2000)

### 3.3 Principios de funcionamiento de un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)

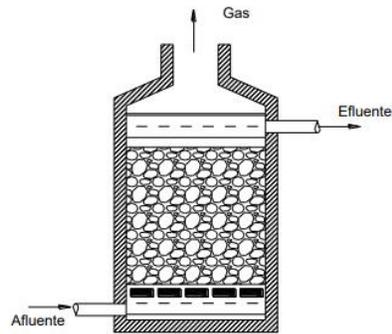
Es aconsejable para aguas residuales con carga orgánica moderada soluble o que se degrade fácilmente en compuestos solubles y, también, para aguas con elevada carga orgánica soluble que pueda ser diluida con recirculación de efluente. Su aplicación en Colombia ha estado orientada al sector rural y a las pequeñas poblaciones en donde se combina con tanques sépticos como tratamiento preliminar, con eficiencias de remoción de orden del 50% para una eficiencia neta del Sistema TS + FAFA entre 70 y 85% (MinAmbiente, 2000).

El filtro anaerobio de flujo ascendente (**Figura 5**) es básicamente una columna o una torre rellena de un material inerte que sirve de medio de adherencia a los microorganismos y en donde se retiene un porcentaje sustancial de la biomasa que está presente en forma de flóculos atrapados en los intersticios del lecho (**Figura 5**). En general, el sistema es operado con flujo vertical ascendente y sin recirculación, lo que produce un régimen hidráulico como el denominado flujo pistón (Sánchez Cadavid, 1997).

Del mismo modo, los filtros anaeróbicos de flujo ascendente (FAFA) se construyen como una cámara anexa al final del pozo séptico o como una cámara independiente. El lecho filtrante podrá estar constituido por un lecho, de grava, con un volumen de 0,02 a 0,04 m por cada 0,1 m/día de aguas residuales que se van a tratar; también será posible emplear material filtrante plástico, utilizando la mitad del volumen anterior (Minvivienda, 2017).

**Figura 5**

*Esquema de un FAFA*



*Nota. Fuente (Sperling & Chernicharo, 2005)*

## 4 Resultados

### 4.1 Descripción del sistema actual

Aunque el caso de estudio se ubica en una Mina de Carbón a Cielo Abierto, las actividades de minería no afectan el área en consideración, dado que el sistema séptico propuesto atiende exclusivamente a las oficinas administrativas. Se reconoce que el sistema actual está subdimensionado debido al aumento en la población y a caudales superiores a los diseñados, lo que justifica la implementación de una nueva unidad en paralelo para optimizar la gestión de los desechos generados en estas áreas. El sistema séptico empleado actualmente funciona con un tren de tratamiento compuesto por un Pozo séptico que es considerado el tratamiento primario de las aguas residuales, seguido de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) con lecho filtrante de grava y finalmente por un Tanque de contacto encargado para desinfección con hipoclorito de calcio.

### 4.2 Análisis demográfico y proyección de población

La proyección de población, un proceso que implica la aplicación de métodos estadísticos y demográficos para estimar de manera precisa la población futura en el área de influencia del proyecto. Esta proyección es esencial para calcular los caudales de aguas residuales que serán generados por dicha población en el futuro cercano, para todos los componentes de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo, se adopta como período de diseño 25 años (Minvivienda, 2017); sin embargo, en este caso, se estima la proyección a 10 años debido a que el plan minero se extiende y con ello la ubicación de las oficinas administrativas cambia.

Casino Gecelca tiene un área aproximada de 2.597 m<sup>2</sup>, los cuales ocupan áreas de oficinas y baños; la primera cuenta con cuatro oficinas, una sala de juntas, una recepción, una sala tipo cafetín o cocina, una zona de labores, un cuarto rack y una oficina tipo LOFT; la segunda área cuenta con dos baños y una bodega, además el número de personal en estas instalaciones con el pasar del tiempo ha ido en aumento, dando esto lugar a que se trabaje con el método aritmético para la proyección de población.

Utilizando el método aritmético y los datos proporcionados por el área de Gestión Humana de GECELCA (**Tabla 1**), se ha realizado una proyección de la población para un período de diseño de 10 años.

**Tabla 1***Registros de la población*

<b>Año del censo</b>	<b>Población</b>
2019	25
2021	30
2024	39

*Fuente. Gestión Humana*

Para el cálculo de la proyección de la población se tiene en cuenta la siguiente fórmula empleada para el método aritmético en el RAS 2017 (**Ecuación 1**).

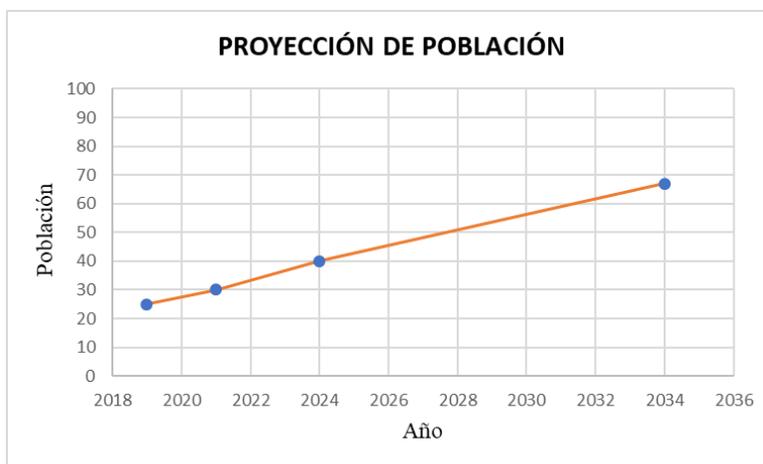
$$\text{Ecuación 1. } Pf = Puc + \frac{Puc - Pci}{Tuc - Tci} * (Tf - Tuc)$$

Donde:

- Población censo inicial (Pci): 25 personas
- Población último censo (Puc): 35 personas
- Año del censo inicial (Tci): 2019
- Año último censo (Tuc): 2024
- Año de proyección (Tf): 2034

Al utilizar la fórmula empleada para el método aritmético con los datos iniciales proporcionados por los diferentes censos realizados en los últimos años, se tiene una población final proyectada de 67 personas (**Figura 6**)

**Figura 6***Proyección de población*



Nota. Fuente Propia

### 4.3 Cálculo de caudales de diseño

Una vez obtenidos los datos de proyección de población, se procede al cálculo de caudales, una etapa en la que se determina la cantidad de agua residual que será generada por la población proyectada (**Ecuación 2**).

$$\text{Ecuación 2. } QD = \frac{CR * P * C}{86400}$$

Donde

- C: Es la contribución de agua residual proyectada por habitante (L/hab.día). Esta se escoge basado en el RAS 2000 teniendo en cuenta la **Tabla 2**.
- P: Es el número de habitantes proyectados al período de diseño.
- El coeficiente de retorno (CR) debe estimarse a partir del análisis de información existente en la localidad y/o de mediciones de campo realizadas por la persona prestadora del servicio. De no contar con datos de campo, se debe tomar un valor de 0,85 (Minvivienda, 2017).

**Tabla 2**

*Contribución de agua residual por habitante*

## OPTIMIZACIÓN DEL STARD EN MINA DE CARBÓN LAS PALMERAS...

Predio	Unidades	Contribución de aguas residuales (C) y lodo fresco $L_f$ (L / día)	
		C	$L_f$
<b>Ocupantes permanentes</b>			
Residencia			
Clase alta	persona	160	1
Clase media	persona	130	1
Clase baja	persona	100	1
Hotel (excepto lavandería y cocina)	persona	100	1
Alojamiento provisional	persona	80	1
<b>Ocupantes temporales</b>			
Fábrica en general	persona	70	0.30
Oficinas temporales	persona	50	0.20
Edificios públicos o comerciales	persona	50	0.20
Escuelas	persona	50	0.20
Bares	persona	6	0.10
Restaurantes	comida	25	0.01
Cines, teatros o locales de corta permanencia	local	2	0.02
Baños públicos	tasa sanitaria	480	4.0

Fuente. (MinAmbiente, 2000)

Los datos para calcular el caudal de diseño son los siguientes:

Inicialmente se tiene un área de 0,2597 hectáreas a una altura sobre el nivel del mar de 70 metros, teniendo en cuenta que la contribución o dotación neta por habitante para oficinas temporales es de 50 L/día y se toma un coeficiente de retorno de 0,80 al aplicar la Ecuación 2 se obtiene un caudal de diseño de 2680 L/día (**Tabla 3**).

**Tabla 3**

*Caudal a servir*

hectáreas (Casino Gecelca)	0,2597
Altura (msnm)	70
Pf	67
Coeficiente de retorno(CR)	0,80
Dotación neta (L/Hab*día)	50
<b>Qdoméstico(L/día)</b>	<b>2680</b>
<b>Qdoméstico(L/s)</b>	<b>0,0310</b>

Fuente. Propia

#### 4.3.1 Determinación de caudal faltante a servir

Para calcular el caudal faltante a servir se utiliza la siguiente formula (**Ecuación 3**).

$$\text{Ecuación 3. } Q_{\text{faltante}} = Q_{\text{proyectado}} - Q_{\text{actual}}$$

Donde:

*Q<sub>faltante</sub>*: Es la diferencia entre el caudal proyectado y el caudal actual.

*Q<sub>proyectado</sub>*: Es el flujo de agua residual que se espera manejar en el futuro, basado en la proyección de la población a 10 años, considerando un aumento en el número de personas y el correspondiente incremento en la generación de aguas residuales.

*Q<sub>actual</sub>*: Es el flujo de agua residual que el sistema séptico está manejando actualmente, medido en litros por día (que en este caso es de 1000 L/día).

Dando así un resultado de

$$Q_{\text{faltante}} = 2680 \text{ L/día} - 1000 \text{ L/día} = 1680 \text{ L/día}$$

Es decir, que los diseños de las unidades de tratamiento para la optimización del sistema serán en base al caudal faltante y estas irán en paralelo al sistema séptico actual.

### 4.4 Diseño del sistema tratamiento optimizado

Para el pretratamiento y tratamiento de las aguas residuales domésticas se consideraron sistemas sépticos con tanques sépticos, filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) y Tanque de Contacto para desinfección bajo los parámetros y criterios de diseño estipulados por el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2021) Título J, enfocado en el tratamiento de aguas residuales.

Para definir el sistema séptico integrado requerido para la comunidad servida por el Casino Gecelca en la mina Las Palmeras, se realizó un dimensionamiento de un tanque séptico, un filtro anaerobio de flujo ascendente con su medio filtrante y un tanque de contacto para desinfección, teniendo en cuenta la proyección de habitantes, la contribución diaria de aguas residuales para oficinas temporales, el lodo fresco, el tiempo de retención y el intervalo de limpieza.

#### 4.4.1 Rediseño del Tanque Séptico

El tratamiento que se desarrolla dentro de un tanque séptico es biológico. Allí las aguas residuales son sometidas a descomposición por procesos naturales y microbiológicos en un ambiente ausente de oxígeno, al ser el tanque un recipiente hermético con el fondo, las

paredes y la tapa impermeables. Durante la descomposición se producen lodos que se sedimentan en el fondo del tanque, y gas que ascenderá constantemente en forma de burbujas a la superficie, arrastrando partículas livianas que flotan formando una capa de natas (MVCT, 2021).

#### 4.4.1.1 Criterios de diseño

El diseño hidráulico de este tanque es de forma rectangular, optimizando el área en sentido horizontal. No obstante, también existen tanques con otras formas, como los cilíndricos, que se utilizan para minimizar el área ocupada aumentando la profundidad (MVCT, 2021). Para realizar el diseño del tanque séptico se trabaja en base a ciertos parámetros descritos en la **Tabla 4**.

**Tabla 4**

*Datos iniciales*

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Temperatura	30	C°
Contribución de agua residual por persona	50	L*Hab/día
# Habitantes	67/42	Hab

*Fuente. Propia*

Para determinar el volumen útil del tanque séptico (**Ecuación 4**), se deben considerar varios componentes y factores, que son cruciales para asegurar un tratamiento eficiente de las aguas residuales como el número de habitantes, que si bien la proyección de población dio 67 habitantes ya existe un sistema encargado para suplir la demanda de 25 habitantes por lo tanto este nuevo sistema solo será diseñado para un total de 42 habitantes.

$$\text{Ecuación 4. } V_{\text{útil}} = V_{rs} + V_l + V_n + V_v$$

Obteniendo el siguiente resultado:

$$V_{\text{útil}} = 5,30 \text{ m}^3$$

- **Volumen requerido para la sedimentación (Vrs)**, determinante del rendimiento del proceso de tratamiento, el cual a su vez es función del tiempo de detención hidráulica, se calcula de la siguiente manera (**Ecuación 5**).

$$\text{Ecuación 5. } Vrs = \frac{P*Q*td}{1000}$$

Obteniendo el siguiente resultado:

$$Vrs = 1,68 \text{ m}^3$$

Donde,

- td = Tiempo mínimo de detención hidráulica en días.
- P = Población
- Q = Aporte de aguas residuales en L/Hab\*Día

- **Volumen para el almacenamiento de lodos (VI)**, Espacio dedicado a almacenar los lodos que se acumulan en el fondo del tanque, se calcula de la siguiente manera (**Ecuación 6**).

$$\text{Ecuación 6. } VI = \frac{Tl*P*N}{1000}$$

Obteniendo el siguiente resultado:

$$VI = 2,52 \text{ m}^3$$

Donde,

- VI = Volumen para lodos en m<sup>3</sup>.
- Tl = Tasa de acumulación de lodos en l/hab-año
- P = Población
- N = Número asumido de años entre operaciones de limpieza.

- **Volumen para el almacenamiento de natas y espumas no sumergidas (Vn)**, Área destinada a contener las natas y espumas que flotan en la superficie del líquido, se calcula de la siguiente manera (**Ecuación 7**).

$$\text{Ecuación 7. } Vn = \frac{Tn*P*N}{1000}$$

$$V_n = 0,147 \text{ m}^3$$

Sin embargo, el RAS 2021 establece que, La OPS/CEPIS considera como valor normal un volumen mínimo de 0,7 m<sup>3</sup> así que finalmente, el volumen para natas y espumas tomado es el 0,7 m<sup>3</sup>.

Donde,

- $V_n$  = Volumen de natas en m<sup>3</sup>.
  - $T_n$  = Tasa de acumulación de natas en l/h\*año.
  - $P$  = Población
  - $N$  = No. asumido de años entre operaciones de limpieza.
- **Tiempo de detención hidráulica (td).** El tiempo de detención hidráulica para los tanques sépticos varía no debe ser menor de 8 horas para climas templados y cálidos y de 12 horas para clima frío, de acuerdo con lo establecido en la Resolución 844 de 2018, según las características de las aguas residuales domésticas a tratar, ni mayor de 24 horas, según la Resolución 330 de 2017(MVCT, 2021). Se calcula de la siguiente manera (**Ecuación 8**).

$$\text{Ecuación 8. } td = 1.5 - 0.3 \log(P * Q)$$

$$td = 0,503 \text{ días}$$

Sin embargo, a conveniencia del diseño y del caso de estudio donde se necesita almacenamiento, tomamos un td de 1 día.

Donde,

- $td$  = Tiempo mínimo de detención hidráulica en días.
  - $P$  = Población
  - $Q$  = Aporte de aguas residuales en L/Hab\*Día
- **Volumen para ventilación (Vv).** Es el espacio sobre el nivel de líquido para almacenamiento de espumas y el techo del tanque séptico, o borde libre (MVCT, 2021). En este caso se tomará un volumen de 0,40 m<sup>3</sup>.

#### 4.4.1.2 Dimensionamiento del Tanque Séptico

Para determinar las dimensiones internas de un tanque séptico rectangular se deben emplear los siguientes criterios, de acuerdo con la guía propuesta por el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - Título J Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

- La relación entre el largo y el ancho del tanque séptico será como mínimo de 2 a 1 y como máximo de 5 a 1.
- El ancho del tanque séptico no deberá ser menor a 0,60 m, ya que es el espacio más pequeño en el que puede trabajar una persona durante la construcción o para las operaciones de limpieza.
- La profundidad útil debe estar entre los valores mínimos y máximos dados en la Tabla 25 del artículo 173 de la Resolución 330 de 2017 (**Tabla 5**).

**Tabla 5**

*Máximos y mínimos de profundidad útil*

Volumen Útil (m <sup>3</sup> )	Profundidad útil mínima (m)	Profundidad útil máxima (m)
Hasta 6	1,3	2,2
De 6 a 10	1,5	2,5
Mas de 10	1,8	2,8

*Fuente. RAS 2017*

- Se recomienda que el borde libre (Espacio libre entre la capa superior de la nata o espuma y la parte inferior de la loza de techo del tanque séptico) tenga una altura  $h_v$  entre 0,10 m y 0,15 m de altura.
- El tanque debe constar de mínimo 2 cámaras; el volumen de la primera cámara deberá ser igual a 2/3 del total del volumen
- El fondo de los tanques sépticos deberá tener pendiente de 2% con caída hacia el punto de ingreso de los líquidos.

Teniendo en cuenta todas las recomendaciones de diseño propuestas en el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - Título J Ministerio

de Vivienda, Ciudad y Territorio para el diseño de un pozo séptico, se obtienen como resultados las siguientes dimensiones (**Tabla 6**).

**Tabla 6***Dimensionamiento Pozo Séptico*

Tiempo de retención calculado		
ts=	0,532	días
	12,78	horas
Tiempo de retención adoptado		
ts=	1	día
El tiempo de retención en cualquier clima no debe ser mayor de 24 horas, según la Resolución 0330 de 2017		
Volumen de sedimentación		
Vs=	1,68	m <sup>3</sup>
Volumen de almacenamiento de lodos		
Vd=	2,52	m <sup>3</sup>
Volumen de ventilación		
Vv=	0,40	m <sup>3</sup>
Zona de almacenamiento de espuma		
Ve=	0,70	m <sup>3</sup>
Volumen útil		
Vu=	5,30	m <sup>3</sup>
Dimensiones		
Profundidad útil adoptada	1,8	m
Área del tanque	2,9	m <sup>2</sup>
Relación Largo-Ancho		
Ancho	1,2	m
Largo	2,4	m
Dimensiones de compartimientos		
Long. Primer compartimiento	1,62	m
Long. Segundo compartimiento	0,81	m

*Fuente. Propia*

#### 4.4.2 Rediseño del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)

Los filtros anaeróbicos de flujo ascendente (FAFA) se construyen como una cámara anexa al final del tanque séptico o como una cámara independiente. El proceso, también microbiológico ausente de aire (anaeróbico), consiste en el tránsito del agua por el reactor, la cual es filtrada en un medio de grava (MVCT, 2021).

#### 4.4.2.1 Criterios de diseño

El reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000 propone los siguientes criterios de diseño:

**Filtro de grava:** Se recomienda para el dimensionamiento utilizar la siguiente metodología:

- Los principales parámetros de diseño son el tiempo de detención -  $t_d$  (V/Q, h), la carga volumétrica -  $L_v$  (S0/ $t_d$ , kgDQO/m<sup>3</sup>.d) y la carga hidráulica -  $q_a$  (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d).
- El filtro de flujo ascendente debe tener una altura entre 1,2 y 3,0 m, y el medio filtrante puede ser roca o un medio plástico con un área neta,  $a$ , mayor de 100 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> de material filtrante.
- Los valores típicos de diseño para zonas cálidas o templadas se encuentran en la **Tabla 7**, cabe anotar que la carga volumétrica también se tiene en unidades de Kg DBO/m<sup>3</sup>\*día donde los valores recomendados están entre 0,15- 0,50 Kg DBO/m<sup>3</sup>\*día.

**Tabla 7**

*Valores típicos de diseño FAFA*

	Tiempo de detención, $t_d$	Carga volumétrica, $L_v$	Carga hidráulica, $q_a$	Altura, h
Unidades	horas	kgDQO/m <sup>3</sup> .d	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d	m
Rango	4-12	10-16	6-15	1,2-3,0
Valor típico	6	12	10	2,5

*Fuente. MinAmbiente, 2000*

Para proceder con el cálculo de los valores típicos de diseño para zonas cálidas, según la **Tabla 8**, se asume que el agua ingresante al tanque séptico tiene una DBO de 250 mg/L. Con una eficiencia de remoción del 40%, el agua efluente del tanque séptico tiene una DBO de 150 mg/L. Esta concentración de DBO es la que ingresará al filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA).

Con base en esta información, se calculará la carga volumétrica. Además, utilizando datos de caudal y área, se determinarán los valores adicionales necesarios para el diseño.

**Tabla 8**

*Eficiencia de remoción DBO- Pozo Séptico*

DBO afluente	kg/l	0,25
Eficiencia de remoción	%	0,4
DBO efluente	kg/l	0,15

*Fuente. Propia*

**Tiempo de detención:** El tiempo de detención hidráulica es el período durante el cual el agua residual permanece en el filtro anaerobio. En climas cálidos, según el RAS 2000, el tiempo de detención está entre 4 a 12 horas. Para el diseño se escogerá un tiempo de detención de 12 horas.

**Volumen del filtro:** Teniendo en cuenta la **Ecuación 9**, se halla el volumen del filtro con datos de caudal y tiempo de detención.

$$\text{Ecuación 9. } V_f = T_d * Q$$

Dando como resultado un volumen efectivo del filtro de:

$$V_f = 1,34 \text{ m}^3$$

**Porosidad del medio:** La porosidad del medio se refiere al porcentaje del volumen de un medio filtrante, que en este caso es la grava, ocupado por poros o espacios vacíos. El RAS 2000 recomienda que los valores de porosidad del medio estén entre 0,95 a 0,99 por lo que se adopta un valor de 0,98.

**Volumen del tanque que contiene el filtro:** Para calcular el volumen del tanque que contiene el filtro se sigue la **Ecuación 10**.

$$\text{Ecuación 10. } V_t = \frac{V_f}{\text{Porosidad}} = 1,37 \text{ m}^3$$

**Carga volumétrica:** La carga volumétrica se refiere a la cantidad de materia orgánica, expresada generalmente en kilogramos de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) por metro cúbico de volumen del reactor por día (kg DBO/m<sup>3</sup>·día). En climas cálidos, según el RAS 2000, este parámetro está entre 0,15 a 0,50 kg DBO/m<sup>3</sup>\*día. En la **Ecuación 11** se muestra como se calcula este valor.

$$\text{Ecuación 11. } Lv = \frac{Q \cdot So}{V}$$

Donde:

- Q= Caudal entrante
- So= Concentración de materia orgánica entrante
- V= Volumen del tanque que contiene el filtro

Finalmente, el resultado de la carga volumétrica es de 0, 29 Kg DBO/ m<sup>3</sup>\*día dando este un resultado dentro del rango establecido por el RAS 2000.

**Carga hidráulica:** La carga hidráulica es la cantidad de agua que fluye a través de un sistema de tratamiento por unidad de área por día, generalmente expresada en metros cúbicos por metro cuadrado por día (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día). En la **Ecuación 12** se muestra como calcular el valor.

$$\text{Ecuación 12. } qa = \frac{Q}{As}$$

Donde:

- Q= Caudal entrante
- As= área superficial del tanque que contiene el filtro

Esto nos da como resultado una carga hidráulica de 2,94 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día, pero como el resultado no está dentro de los rangos establecidos por el RAS 2000 se adopta un valor para la carga hidráulica de 6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día.

#### 4.4.2.2 Dimensionamiento del FAFA

Teniendo en cuenta todas las recomendaciones de diseño propuestas en el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - Título E Ministerio de Desarrollo económico 2000 para el diseño de un filtro anaerobio de flujo ascendente, se obtienen como resultados las siguientes dimensiones (**Tabla 9**).

**Tabla 9**

*Dimensionamiento del FAFA*

FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE			
Tiempo de retención hidráulico	días	0,5	Asumido
Volumen efectivo del filtro anaerobio	m <sup>3</sup>	1,34	
Porosidad del medio		0,98	Asumido
Volumen del tanque que contiene el filtro	m <sup>3</sup>	1,37	
Carga orgánica volumétrica	KgDBO/m <sup>3</sup> *día	0,29	
Carga hidráulica calculada	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *día	2,94	
Carga hidráulica adoptada	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *día	6	
Altura total del filtro	m	1,8	Asumido
Altura del fango fondo	m	0,15	Asumido
Altura de la pérdida de carga y el nivel de agua	m	0,15	Asumido
Altura efectiva del filtro	m	1,5	
Área requerida del filtro	m <sup>2</sup>	0,91	
Ancho del filtro	m <sup>2</sup>	1,5	
Longitud del filtro	m <sup>2</sup>	0,608	
Velocidad=Q/A	m/hora	0,12	
Eficiencia	%	75	
DBO efluente	mg/L	37,67	

*Fuente. Propia*

#### 4.4.3 Rediseño del Tanque de Contacto para desinfección

El tanque de contacto para desinfección es una estructura diseñada para asegurar que el agua tratada tenga un tiempo suficiente de contacto con el agente desinfectante (como el hipoclorito de calcio) para lograr la destrucción de bacterias y virus de origen fecal en las aguas residuales, mediante un agente desinfectante y hacer una desinfección efectiva antes de su vertido o reutilización. El diseño de este tanque debe cumplir con ciertos criterios técnicos y normativos del RAS 2000 para asegurar su eficiencia y adecuado manejo.

##### 4.4.3.1 Criterios de diseño

El tanque de contacto de cloro debe ser construido de manera que reduzca al mínimo los cortocircuitos. Deben proveerse tabiques de direccionamiento de flujo con este fin. El desagüe debe estar provisto de válvula. El punto de descarga debe asegurar tratamiento adecuado al agua de desagüe, lo cual puede requerir bombeo. Deben proveerse unidades duales para el contacto de cloro. Se instalarán instalaciones de lavado para estas cámaras.

La cámara de contacto se divide en dos secciones con el propósito de no suspender la operación mientras se limpie una de ellas (MinAmbiente, 2000).

Para la desinfección por cloración debe emplearse tanque de contacto, previo al almacenamiento, con el fin de proporcionar un tiempo de contacto mínimo de 20 minutos, que garantice la desinfección del agua. Para la determinación de la dosis óptima de residual de desinfectante debe emplearse el valor Ct-Concentración aplicada por tiempo de detención igual a K de acuerdo con las siguientes indicaciones (MVCT, 2021). En la **Tabla 10**.

**Tabla 10**

*Parámetros de desinfección por cloración*

Dosis de Cloro Aplicada mg/l	10 °C				15 °C				20 °C				25 °C			
	pH				pH				pH				pH			
	6,0	6,5	7,0	7,5	6,0	6,5	7,0	7,5	6,0	6,5	7,0	7,5	6,0	6,5	7,0	7,5
<=0,40	37	44	52	63	25	30	35	42	18	22	26	31	12	15	18	21
0,6	38	45	54	64	25	30	36	43	19	23	27	32	13	15	18	22
0,8	39	46	55	66	26	31	37	44	20	23	28	33	13	16	19	22
1,0	40	47	56	67	27	32	38	45	20	24	28	34	13	16	19	23
1,2	40	48	57	69	27	32	38	46	20	24	29	35	14	16	19	23
1,4	41	49	58	70	28	33	39	47	21	25	29	35	14	17	20	24
1,6	42	50	60	72	28	33	40	48	21	25	30	36	14	17	20	24
1,8	43	51	61	74	29	34	41	49	22	26	31	37	15	17	21	25
2,0	44	52	62	75	29	35	42	50	22	26	31	38	15	18	21	25

Valores de  $C_t = K$  (mg-min/l) para inactivación de Coliformes totales por Cloro libre para log 3  
Donde C hace referencia al residual de desinfectante y no a la dosis aplicada

Dosis de Cloro Aplicada mg/l	10 °C				15 °C				20 °C				25 °C			
	pH				pH				pH				pH			
	6,0	6,5	7,0	7,5	6,0	6,5	7,0	7,5	6,0	6,5	7,0	7,5	6,0	6,5	7,0	7,5
2,2	45	53	64	77	30	35	43	51	22	27	32	39	15	18	21	26
2,4	45	54	65	79	30	36	43	53	23	27	33	39	15	18	22	26
2,6	46	55	66	80	31	37	44	54	23	28	33	40	16	19	22	27
2,8	47	56	67	82	31	37	45	55	24	28	34	41	16	19	23	27
3,0	48	57	69	83	32	38	46	56	24	29	34	42	16	19	23	28

Fuente. (MVCT, 2021).

Asimismo, López Cualla (2002) precisa que, las dosis de cloro que se emplean normalmente son de 1 mg/L a 2 mg/L; se obtienen residuales de cloro del orden de 0.5 mg/L para prevenir contaminación posterior en la red de distribución. Para que el cloro actúe efectivamente, se debe dejar un tiempo de contacto del cloro con el agua, de 15 a 20 minuto.

#### 4.4.3.2 Dimensionamiento del Tanque de Contacto

**Dosis de cloro:** Teniendo en cuenta, que la temperatura del sitio es cálida y el ph del agua que ingresa al tanque de contacto es de 7,5 unidades de ph y tomando una dosis de cloro de 2 mg/L se obtiene de la **Tabla 11** un K de 25 mg\*min/l.

**TRH:** El tiempo de contacto del cloro con el agua se halla mediante la **Ecuación 13**.

$$\text{Ecuación 13. } TRH = \frac{K}{\text{DosisCloro}} = 12,5 \text{ minutos}$$

El resultado hallado es de 12,5 minutos, pero como la normativa ambiental recomienda que este tiempo sea de 20 minutos, adoptaremos un TRH de 20 minutos.

**Volumen TDC:** El volumen del tanque de contacto empleado, se determina mediante la **Ecuación 14.**

$$\text{Ecuación 14. } V_{tdc} = Q * TRH = 37,22 L$$

Teniendo en cuenta todas las recomendaciones de diseño propuestas en el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - Título E Ministerio de Desarrollo económico 2000 para el diseño de un tanque de contacto, se obtienen como resultados las siguientes dimensiones (Tabla 11).

**Tabla 11**

*Dimensionamiento Tanque de contacto*

Tanque de Contacto		
Hipoclorito de Calcio (Ca(ClO)2)		
Qdiseño=	2,68 m <sup>3</sup> /día	
	0,0310 L/s	
Dosis cloro=	2 g/m <sup>3</sup>	
	2 mg/L	
Cantidad=	5,36 g/día	
	0,00536 kg/día	
Temperatura=	26	
pH=	7,5	
Dosis cloro=	2 mg/L	
k=	25 mg*min/L	
TRH=	12,5 min	
	20 min	RAS señala que mínimo 20 minutos
	1200 s	
Volumen TDC=	37,22 L	
	0,0372 m <sup>3</sup>	
Volumen TDC=	L*B*H	
Volumen TDC=	2B*B*H	
H=	0,1 m	Asignado
B=	0,4 m	
L=	0,9 m	
Profundidad con borde libre	0,125 m	
espaciamiento entre barras	0,05 m	
ancho del tabique	0,425 m	
ancho de giro	0,075 m	
# tabiques	19 m	
# canales	20 m	

*Fuente. Propia*

#### 4.4 Evaluación de la reutilización del agua tratada

En el caso específico del Casino Gecelca en la mina Las Palmeras, a continuación, se realiza un análisis detallado de los costos y ahorros asociados a la reutilización del agua tratada, considerando la inviabilidad de la modificación de las estructuras existentes.

#### 4.5 Beneficios de la reutilización del agua tratada

Aunque en este caso específico la reutilización no es viable, es importante destacar los beneficios potenciales de la reutilización del agua tratada en la batería sanitaria en situaciones donde sea factible:

- **Ahorro de Agua Potable:** Reducción significativa del consumo de agua potable al reutilizar el agua tratada para sanitarios y otros usos no potables.

- **Reducción de efluentes:** Disminución del volumen de aguas residuales vertidas al medio ambiente, lo que puede reducir la carga sobre los sistemas de tratamiento y cuerpos receptores.

#### **4.6 Análisis de costos y ahorros asociados**

Se realiza un análisis detallado de los costos y ahorros asociados a la reutilización del agua tratada, considerando la inviabilidad de la modificación de las estructuras existentes.

Costos de Demolición y Construcción: Los costos asociados con la demolición de estructuras existentes y la construcción de nuevas instalaciones para permitir la reutilización del agua tratada en la batería sanitaria son prohibitivos. Adicionalmente, los costos para reforzar las estructuras debilitadas por las modificaciones necesarias aumentarían significativamente el presupuesto del proyecto.

Dado que la reutilización del agua tratada en la batería sanitaria puede ofrecer beneficios significativos en términos de sostenibilidad y ahorro de agua potable, la necesidad de romper y modificar estructuras existentes en el Casino Gecelca incrementa los costos y debilita la estructura, haciendo esta opción inviable en este caso particular

#### **4.7 Costos de implementación del Sistema Séptico optimizado**

El proceso de estudio de prefactibilidad para la instalación de un sistema séptico de tratamiento de aguas residuales en las oficinas administrativas de la Mina de Carbón a Cielo Abierto "Las Palmeras" se desarrolla en varias etapas, cada una de ellas crucial para garantizar la efectividad y viabilidad del proyecto. Para la elección de dicho sistema, se tienen en cuenta gran variedad de ventajas que este posee, ya que este es apropiado para comunidades rurales, su limpieza no es frecuente, tiene bajo costo de construcción y operación, y no se requiere de una mano de obra especializada para su operación (Isaza Santos et al., 2021).

Los costos del sistema séptico, incluyendo la cámara de contacto para desinfección, se determinaron utilizando como referencia el trabajo de grado de especialización titulado "Tipificación y Análisis de Precios Unitarios para la Construcción de Pozos Sépticos en Viviendas de Suelo Rural". Este estudio proporcionó una base detallada de datos sobre los materiales necesarios y sus costos en el año 2019. Para ajustar estos valores al presente, se aplicó el Índice de

Precios al Consumidor (IPC), lo que permitió actualizar los costos a las condiciones económicas actuales.

Además de la actualización de precios, se revisaron y ajustaron las unidades y volúmenes en metros cúbicos, asegurando que las dimensiones del diseño propuesto se adecuaran a los requerimientos específicos del proyecto en la mina Las Palmeras. Este proceso incluyó:

**1. Revisión de Materiales y Cantidades:**

- Identificación de todos los materiales necesarios para la construcción del sistema séptico y la cámara de contacto.
- Ajuste de las cantidades de materiales según las dimensiones del tanque séptico, filtro anaerobio de flujo ascendente y la cámara de contacto especificadas en el diseño.

**2. Ajuste de Costos:**

- Aplicación del IPC para actualizar los costos de los materiales desde 2019 hasta el año actual.

Como resultado de este análisis, se obtuvieron costos detallados y actualizados para la construcción de un sistema séptico rectangular de concreto, que incluye una cámara de contacto para desinfección. En la **Tabla 12** se evidencian todos los detalles dando así un costo total de la construcción del sistema séptico de \$ 8.402.420,82

**Tabla 12**

*Costos asociados al diseño del sistema séptico*

## OPTIMIZACIÓN DEL STARD EN MINA DE CARBÓN LAS PALMERAS...

Diseño Sistema Séptico					
Materiales	Unidad	Cantidad	Valor unitario (2019)	Valor unitario (2024)	Valor total
Diseño de la estructura	Un	3	\$ 120.000,00	\$ 168.000,00	\$ 504.000,00
Construcción caja de distribución 0,6x0,6x0,55 m					
Materiales	Unidad	Cantidad	Valor unitario (2019)		Valor total
marco en ang. 1 1/2"x1x1/4" y refuerzo para tapa en platina 3x3/16" con parrilla en varilla 3/8 cada 10 cm para Caja distribución de 0,65x0,65m	un	1	\$ 120.000,00	\$ 168.000,00	\$ 168.000,00
Concreto de limpieza e= 0,05 cm de 2000 psi	m3	0,06	\$ 354.446,06	\$ 496.224,48	\$ 29.773,47
Concreto de 3000 psi en placa de fondo	m3	0,16	\$ 443.057,58	\$ 620.280,61	\$ 99.244,90
Concreto de 3000 psi en muros	m3	0,31	\$ 443.057,58	\$ 620.280,61	\$ 192.286,99
Concreto de 3000 psi en tapas	m3	0,06	\$ 443.057,58	\$ 620.280,61	\$ 37.216,84
Mortero 1:4	m3	0,05	\$ 411.580,37	\$ 576.212,52	\$ 28.810,63
Malla electrosoldada m-335	kg	18	\$ 3.083,47	\$ 4.316,86	\$ 77.703,44
Excavación a mano en terreno común	m3	0,11	\$ 35.000,00	\$ 49.000,00	\$ 5.390,00
Alambre negro #18	kg	0,024	\$ 3.800,00	\$ 5.320,00	\$ 127,68
Recebo común	m3	0,11	\$ 55.000,00	\$ 77.000,00	\$ 8.470,00
Sika 101 mortero	kg	5,65	\$ 11.050,00	\$ 15.470,00	\$ 87.405,50
Equipos y herramientas	Unidad	Rendimiento	Valor unitario (2019)	Valor unitario (2024)	Valor total
Herramienta menor	glb	0,5	\$ 2.200,00	\$ 3.080,00	\$ 1.540,00
Formaleta	día	3	\$ 11.000,00	\$ 15.400,00	\$ 46.200,00
Mano de obra	Unidad	Rendimiento	Valor unitario (2019)	Valor unitario (2024)	Valor total
Cuadrilla BB (instalaciones)	h	3	\$ 20.000,00	\$ 28.000,00	\$ 84.000,00
Costo Total Caja de Distribución					\$ 866.169,44

## OPTIMIZACIÓN DEL STARD EN MINA DE CARBÓN LAS PALMERAS...

Construcción pozo séptico 2.4x1.2x1.8m					
Materiales	Unidad	Cantidad	Valor unitario (2019)	Valor unitario (2024)	Valor total
Excavación a mano en terreno común	m3	6,51	\$ 35.000,00	\$ 49.000,00	\$ 318.990,00
Recebo común	m3	0,5	\$ 55.000,00	\$ 77.000,00	\$ 38.500,00
Concreto de limpieza e= 0,05 cm de 2000 psi	m3	0,2	\$ 354.446,06	\$ 496.224,48	\$ 99.244,90
	m3	0,51	\$ 491.629,64	\$ 688.281,50	\$ 351.023,56
Concreto de 4000 psi en muros	m3	1,9	\$ 491.629,64	\$ 688.281,50	\$ 1.307.734,84
Concreto de 3000 psi en tapas	m3	0,11	\$ 443.057,58	\$ 620.280,61	\$ 68.230,87
Mortero 1:4	m3	0,07	\$ 411.580,37	\$ 576.212,52	\$ 40.334,88
Malla electrosoldada m-335	kg	54	\$ 3.083,47	\$ 4.316,86	\$ 233.110,33
Alambre negro #18	kg	0,03	\$ 3.800,00	\$ 5.320,00	\$ 159,60
marco en ang. 1 1/2"x1x1/4" y refuerzo para tapa en platina 3x3/16" con parrilla en varilla 3/8 cada 10 cm para Caja distribución de 2.4x1.2m	un	2,5	\$ 150.000,00	\$ 210.000,00	\$ 525.000,00
Impermeabilizante en polvo con base cementosa	kg	19,48	\$ 11.050,00	\$ 15.470,00	\$ 301.355,60
Equipos y herramientas	Unidad	Rendimiento	Valor unitario (2019)	Valor unitario (2024)	Valor total
Herramienta menor	glb	0,3	\$ 2.200,00	\$ 3.080,00	\$ 924,00
Formaleta	día	15	\$ 11.000,00	\$ 15.400,00	\$ 231.000,00
Mano de obra	Unidad	Rendimiento	Valor unitario (2019)	Valor unitario (2024)	Valor total
Cuadrilla BB (instalaciones)	h	8	\$ 20.000,00	\$ 28.000,00	\$ 224.000,00
Costo Total Pozo Séptico					\$ 3.739.608,58
Construcción filtro anaerobio 1.5x0.6x1.8m					
Materiales	Unidad	Cantidad	Valor unitario (2019)	Valor unitario (2024)	Valor total
Excavación a mano en terreno común	m3	4,18	\$ 55.000,00	\$ 77.000,00	\$ 321.860,00
Recebo común	m3	0,64	\$ 31.000,00	\$ 43.400,00	\$ 27.776,00
Concreto de limpieza e= 0,05 cm de 2000 psi	m3	0,1	\$ 354.446,06	\$ 496.224,48	\$ 49.622,45
Concreto de 4000 psi en placa de fondo	m3	0,2	\$ 491.629,64	\$ 688.281,50	\$ 137.656,30
Concreto de 4000 psi en muros	m3	0,92	\$ 491.629,64	\$ 688.281,50	\$ 633.218,98
Concreto de 3000 psi en tapas	m3	0,09	\$ 443.057,58	\$ 620.280,61	\$ 55.825,26
Mortero 1:4	m3	0,015	\$ 411.580,37	\$ 576.212,52	\$ 8.643,19
Malla electrosoldada m-335	kg	37,2	\$ 3.083,47	\$ 4.316,86	\$ 160.587,12
Alambre negro #18	kg	0,029	\$ 3.800,00	\$ 5.320,00	\$ 154,28
marco en ang. 1 1/2"x1x1/4" y refuerzo para tapa en platina 3x3/16" con parrilla en varilla 3/8 cada 10 cm para Caja distribución de 1.5x0.6m	un	1	\$ 150.000,00	\$ 210.000,00	\$ 210.000,00
Falso fondo de 0.15x0.8x0.8m en malla electrosoldada en acero inoxidable de perforaciones inferior a 1/2". Incluye estructura de soporte en acero	un	1	\$ 100.000,00	\$ 140.000,00	\$ 140.000,00
Impermeabilizante en polvo con base cementosa	kg	11	\$ 11.050,00	\$ 15.470,00	\$ 170.170,00
Equipos y herramientas	Unidad	Cantidad	Valor unitario (2019)	Valor unitario (2024)	Valor total
Herramienta menor	glb	0,2	\$ 2.200,00	\$ 3.080,00	\$ 616,00
Formaleta	día	15	\$ 11.000,00	\$ 15.400,00	\$ 231.000,00
Mano de obra	Unidad	Rendimiento	Valor unitario (2019)	Valor unitario (2024)	Valor total
Cuadrilla BB (instalaciones)	h	5	\$ 20.000,00	\$ 28.000,00	\$ 140.000,00

## OPTIMIZACIÓN DEL STARD EN MINA DE CARBÓN LAS PALMERAS...

Lecho filtrante de grava triturada de 3/4" para FAFA					
Materiales	Unidad	Cantidad	Valor unitario (2019)	Valor unitario (2024)	Valor total
Grava triturada de 3/4"	m3	1	\$ 108.000,00	\$ 151.200,00	\$ 151.200,00
Equipos y herramientas	Unidad	Rendimiento	Valor unitario (2019)	Valor unitario (2024)	Valor total
Herramienta menor	h	0,01	\$ 2.200,00	\$ 3.080,00	\$ 30,80
Mano de obra	Unidad	Rendimiento	Valor unitario (2019)	Valor unitario (2024)	Valor total
Cuadrilla AA (albañilería) 1Of y 1Ay	h	0,02	\$ 20.000,00	\$ 28.000,00	\$ 560,00
Costo Total FAFA					\$ 2.438.920,36
Construcción tanque de contacto 0,9x0,4x0,1 m					
Materiales	Unidad	Cantidad	Valor unitario (2019)		Valor total
marco en ang. 1 1/2"x1x1/4" y refuerzo para tapa en platina 3x3/16" con parrilla en varilla 3/8 cada 10 cm para Caja distribución de 0,9x0,4m	un	1	\$ 120.000,00	\$ 168.000,00	\$ 168.000,00
Concreto de limpieza e= 0,05 cm de 2000 psi	m3	0,04	\$ 354.446,06	\$ 496.224,48	\$ 19.848,98
Concreto de 3000 psi en placa de fondo	m3	0,12	\$ 443.057,58	\$ 620.280,61	\$ 74.433,67
Concreto de 3000 psi en muros	m3	0,27	\$ 443.057,58	\$ 620.280,61	\$ 167.475,77
Concreto de 3000 psi en tapas	m3	0,045	\$ 443.057,58	\$ 620.280,61	\$ 27.912,63
Mortero 1:4	m3	0,032	\$ 411.580,37	\$ 576.212,52	\$ 18.438,80
Malla electrosoldada m-335	kg	14	\$ 3.083,47	\$ 4.316,86	\$ 60.436,01
Excavación a mano en terreno común	m3	0,9	\$ 35.000,00	\$ 49.000,00	\$ 44.100,00
Alambre negro #18	kg	0,019	\$ 3.800,00	\$ 5.320,00	\$ 101,08
Recebo común	m3	0,9	\$ 55.000,00	\$ 77.000,00	\$ 69.300,00
Sika 101 mortero	kg	4,65	\$ 11.050,00	\$ 15.470,00	\$ 71.935,50
Equipos y herramientas	Unidad	Rendimiento	Valor unitario (2019)	Valor unitario (2024)	Valor total
Herramienta menor	glb	0,5	\$ 2.200,00	\$ 3.080,00	\$ 1.540,00
Formaleta	día	3	\$ 11.000,00	\$ 15.400,00	\$ 46.200,00
Mano de obra	Unidad	Rendimiento	Valor unitario (2019)	Valor unitario (2024)	Valor total
Cuadrilla BB (instalaciones)	h	3	\$ 20.000,00	\$ 28.000,00	\$ 84.000,00
Costo Total Tanque de Contacto					\$ 853.722,44
Costo toda la estructura					\$ 8.402.420,82

Fuente. Propia

## 5 Discusión

### 5.1 Componentes del sistema implementado: Tanque séptico – FAFA – Tanque de contacto

**Tanque séptico:** Uno de los principales objetivos del diseño del tanque séptico es crear dentro de este una situación de estabilidad hidráulica, que permita la sedimentación por gravedad de las partículas pesadas. El material sedimentado forma en la parte inferior del tanque séptico una capa de lodo, que debe extraerse periódicamente. Para determinar las dimensiones se siguen los lineamientos establecidos en el Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Básico RAS – 2000.

Volumen requerido para sedimentación (m <sup>3</sup> )	25.00
Volumen de almacenamiento de los lodos (m <sup>3</sup> )	1
Volumen de almacenamiento de las natas y espumas no digeridas (m <sup>3</sup> )	0.09

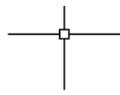
Dando así, un volumen útil para el tanque séptico de 26.09 m<sup>3</sup> que trata un caudal de 1000 L/día con una población de 25 habitantes.

Finalmente, se optó por un tanque rectangular; a partir del volumen útil, se asume una profundidad útil de 1.80 m y un borde libre de 0.30 m., asumiendo una relación largo/ancho de 2:1, el ancho neto del tanque es igual a 2.70 m y el largo de 5.40 m; el volumen teórico del tanque es igual 26.24 m<sup>3</sup>, siendo este mayor al volumen útil.

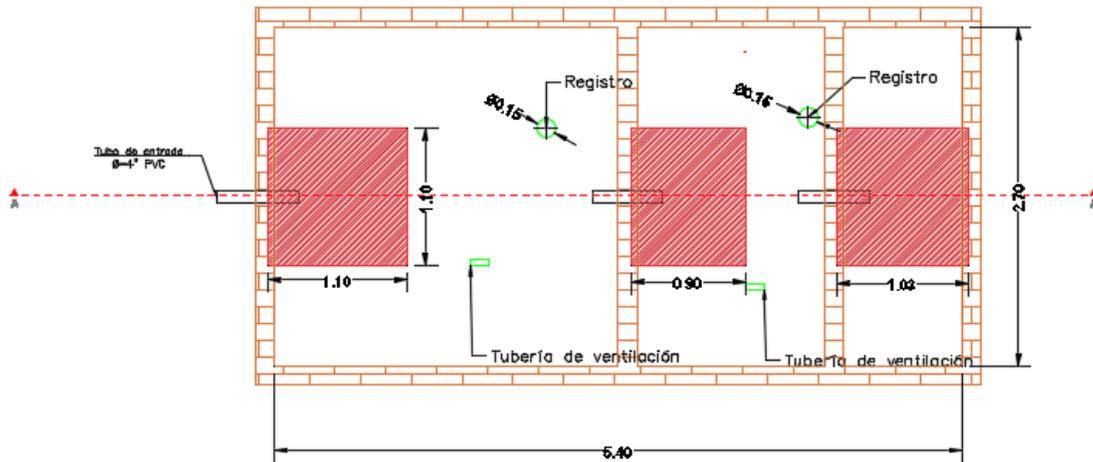
Es de suma importancia anotar, que al momento de la constructora realizar el diseño actual no diferenciaron entre una unidad de tratamiento y otra, pues para su llamado tanque séptico realizaron 3 compartimientos donde hay dos pertenecientes al tanque séptico y el sobrante es el FAFA que mide 1,03 de ancho, valor que ya está incluido dentro del ancho del tanque anteriormente dicho y asimismo, del volumen útil, presentado a continuación de la siguiente manera (**Figura 7**).

**Figura 7**

*Vista en planta del tanque séptico*



## TANQUE SEPTICO PLANTA



Fuente. Consultorías Geotecnia y Ambiente.

Esta falta de diferenciación es un problema crítico porque los criterios de diseño para el pozo séptico y el FAFA son distintos. Cada unidad de tratamiento tiene especificaciones técnicas y operativas particulares que deben ser consideradas para asegurar su correcta funcionalidad y eficiencia en el tratamiento de aguas residuales. El tanque séptico se diseña principalmente para la sedimentación y digestión anaerobia de los sólidos presentes en el agua residual, mientras que el FAFA se enfoca en la depuración biológica del efluente mediante un proceso de filtración y degradación anaerobia.

Por lo tanto, es fundamental en el rediseño del sistema diferenciar claramente entre el tanque séptico y el FAFA, cada uno con sus respectivos compartimientos y criterios de diseño, para garantizar que cada unidad cumpla su función específica y se logre un tratamiento óptimo del agua residual.

**FAFA:** En el diseño actual no se tiene información precisa sobre esta más que las dimensiones vistas en la imagen anterior (**Figura 8**) que son las siguientes: 1,03 m de longitud y 2,70 m de ancho.

**Tanque de contacto:** el agua residual proveniente del FAFA llega a un tanque de contacto semejante a un floculador hidráulico, el cual, tiene como finalidad desinfectar por medio de un agente (hipoclorito de calcio) cualquier patógeno presente en las aguas tratadas antes de devolverlas al medio. El tanque de contacto es similar a un floculador hidráulico, las dimensiones propuestas por la consultoría son las siguientes (**Tabla 13**):

**Tabla 13**

*Dimensiones del Tanque de Contacto Actual*

Ancho (m)	0.5
Longitud útil (m)	1.19
Profundidad útil (m)	0.1
Profundidad con borde libre (m)	0.125
Profundidad total (m)	0.225
Espaciamiento entre placas (m)	0.05
Ancho de tabiques (m)	0.425
Ancho de giro (m)	0.075
Número de tabiques	19
Número de canales	20

*Fuente: Consultoría Geotecnia y Ambiente.*

## 5.2 Limitaciones y problemas identificados

El sistema séptico actual en la mina Las Palmeras, diseñado originalmente para tratar las aguas residuales de 25 personas, enfrenta inconvenientes debido al diseño no adecuado de las unidades de tratamiento. A continuación, se detalla el problema más relevante:

### 5.2.1 Sobredimensionamiento del sistema

Los resultados del diseño indican que el volumen útil del tanque séptico es de 5,30 m<sup>3</sup>. comparando este con el diseño actual en la mina Las Palmeras, elaborado por la Consultoría Geotecnia y Ambiente, se observa que el volumen del tanque séptico existente es de 26.09 m<sup>3</sup> incluyendo el filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), que en el actual no se incluye ya que su diseño es diferente al del pozo séptico. Esto revela una discrepancia significativa, ya que el tanque actual, diseñado para un menor número de habitantes, tiene un volumen mucho mayor al calculado en el nuevo diseño.

Esta diferencia sugiere que el problema no radica en un subdimensionamiento del sistema como inicialmente se sugería, sino en un sobredimensionamiento. En lugar de necesitar una ampliación para optimizar el sistema, el análisis de los cálculos realizados para el diseño actual muestra un error en la fase de dimensionamiento realizada por la Consultoría Geotecnia y Ambiente. Específicamente, se identificó que el volumen requerido para sedimentación se calculó incorrectamente al multiplicar el número de habitantes dos veces, lo cual infló el volumen del tanque séptico más allá de lo necesario. Sin embargo, este error de cálculo no incurre en un problema operativo del sistema ya que más que un pro

## 6 Conclusiones

El diseño de una potencial ampliación del sistema de tratamiento de aguas residuales para la mina Las Palmeras de GECELCA ha sido una tarea integral que aborda las necesidades actuales y futuras de la operación minera. La proyección demográfica y el análisis de caudales permitieron dimensionar adecuadamente los componentes del sistema, garantizando su eficiencia y sostenibilidad a largo plazo.

El análisis demostró que el volumen útil del tanque séptico actual es significativamente mayor que el necesario, indicando un sobredimensionamiento. Este hallazgo sugiere que el sistema existente puede manejar un mayor número de usuarios sin necesidad de costear ampliaciones, aunque se requiere una revisión y ajuste en la operación para optimizar su rendimiento.

El diseño del filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) y el tanque de contacto para desinfección sigue las directrices establecidas por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento, asegurando que el efluente tratado cumpla con las normativas ambientales y sanitarias. La elección de hipoclorito de calcio para la desinfección, junto con la planificación de mantenimiento anual utilizando un vehículo vector, proporciona un enfoque robusto para la gestión operativa del sistema.

A pesar de los beneficios potenciales de reutilizar el agua tratada en la batería sanitaria, esta opción no se consideró viable debido a los costos adicionales y riesgos estructurales asociados. Sin embargo, la reutilización del agua tratada en otras aplicaciones no críticas sigue siendo una opción valiosa para mejorar la eficiencia hídrica de la operación.

## 7 Referencias

- Bustos Cardona, S. Á., & Quevedo Ortega, V. (2022). *FORMULACIÓN DE UNA PROPUESTA PARA EL MANEJO DE AGUAS RESIDUALES EN UNA COMUNIDAD RURAL DEL MUNICIPIO DE SAN ANTONIO DEL TEQUENDAMA EN EL MARCO DEL PLAN DE SEGURIDAD DEL SANEAMIENTO*.
- Campo Usuga, J. F. (2022). *Estado del arte de los sistemas sépticos para el tratamiento del agua residual en zonas rurales*. [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)
- Isaza Santos, I. I., González, F., & Gómez, Y. (2021). *Comparación de dos sistemas de tratamiento anaeróbicos de aguas residuales de características homogéneas para escuelas sin sistema de tratamiento*.  
<https://revistas.up.ac.pa/index.php/centros/issue/view/297>
- MinAmbiente. (2000). *Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento Básico "RAS - 2000"*. Título E. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/12736>
- Minvivienda. (2017). *RAS 2017*. <https://www.minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0330-2017-0>
- Naranjo Agudelo, D. C. (2019). *Pozos sépticos en el departamento del Quindío y solución alternativa con humedales subsuperficiales*. Universidad de los Andes.  
<http://hdl.handle.net/1992/44484>
- París Constructor. (2022). *Así funcionan los sistemas de los tanques sépticos*.  
<https://parisconstructor.com/asi-funcionan-los-sistemas-de-los-tanques-septicos/>
- Romero Rojas, J. A. (1999). *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño*.  
[https://tuxdoc.com/download/tratamiento-de-aguas-residuales-teoria-y-principios-de-diseo-jairo-alberto-romer-10\\_pdf](https://tuxdoc.com/download/tratamiento-de-aguas-residuales-teoria-y-principios-de-diseo-jairo-alberto-romer-10_pdf)
- Rubiano Diaz, G. A., & Ortega Patiño, B. (2022). *Análisis de los lineamientos y parámetros para el diseño de un prototipo de un tanque séptico con faja para el tratamiento de aguas residuales en la escuela ubicada en la vereda Manuel sur – Ricaurte Cundinamarca*.  
<http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/11982>
- Sánchez Cadavid, J. A. (1997). *Evaluación de un sistema de tratamiento tipo tanque séptico-filtro anaerobio de flujo ascendente para las aguas residuales del "Beneficio Ecológico" del café*. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/5946>

Sperling, M. von., & Chernicharo, C. A. de Lemos. (2005). *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. IWA.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). *Título J. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. Obtenido de Alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural:*

[https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulo\\_j\\_vf.pdf](https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulo_j_vf.pdf)

López Cualla, R. (2003). *Elementos De Diseño Para Acueductos Y Alcantarillados*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito