

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Diagnóstico del estado inicial y desarrollo de la metodología para la puesta en marcha de la planta de tratamiento de aguas residuales en la comunidad de San Pedro, cantón Azogues, Provincia del Cañar”

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

**Master en Ingeniería Civil con mención en Construcciones y
Saneamiento**

Presentado por:

Ing. José David Reyes Novillo

Ing. Luis Andrés Navas Cajamarca

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a Dios, por ser la fuerza que me ha permitido seguir adelante, a mi madre por enseñarme a luchar por mis sueños sin importar las dificultades que encuentre en el camino, a mi padre por ser mi guía y mi mayor inspiración, a mis hermanos por su apoyo constante, por todas sus palabras de aliento y por compartir conmigo este camino lleno de retos y aprendizajes, sin ustedes este logro no habría sido posible.

José David Reyes Novillo

AGRADECIMIENTOS

Mientras redacto estas líneas con las que concluyo este trayecto, no puedo evitar agradecer a todos quienes formaron parte de este camino, en primer lugar, a Dios por darme la fortaleza, la sabiduría y la paciencia para afrontar cada día de este desafío, a mis padres por sus enseñanzas invaluable, a mis hermanos por ser un apoyo incondicional a mis profesores por compartirme sus conocimientos, a mi enamorada, a mis amigos y compañeros quienes contribuyeron no solo en la elaboración de este proyecto de titulación sino que además estuvieron presentes durante todo este programa de postgrado, mil gracias a todos.

José David Reyes Novillo

DEDICATORIA

A Dios, quien ha sido mi fortaleza en los momentos de duda, por darme la sabiduría y la perseverancia necesarias para superar los desafíos y alcanzar esta nueva meta.

A mi familia, el pilar fundamental en mi vida. Por su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante, quienes con su ejemplo me enseñaron el valor del esfuerzo y la dedicación.

A mí mismo, por no rendirme, por luchar contra cada obstáculo y por confiar en que cada esfuerzo valdría la pena.

Luis Andres Navas Cajamarca

AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien ha sido mi luz en este camino académico, donde aprendí a doblegarme, a ser humilde ante el conocimiento y a levantarme con más fuerza tras cada desafío.

A mi familia, por ser un apoyo constante y brindarme aliento en los momentos más difíciles. Por creer en mí, por su paciencia y por ser mi mayor inspiración.

A mis profesores, por compartir su conocimiento y guiarme en este proceso, de aprendizaje e investigación.

A mí y compañero de estudio y de proyecto, por su apoyo en cada jornada de esfuerzo compartido.

Finalmente, me agradezco a mí mismo, por la disciplina, el esfuerzo y la perseverancia para completar este trabajo.

No fue fácil, pero valió la pena. Gracias
Totales

Luis Andres Navas Cajamarca

DECLARACIÓN EXPRESA

Nosotros José David Reyes Novillo y Luis Andrés Navas Cajamarca acordamos y reconocemos que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 12 de marzo del 2025.

Ing. José David Reyes
Novillo

Ing. Luis Andrés Navas
Cajamarca

EVALUADORES

Ing. Fernanda Estefanía

Mejía Peralta

Profesora de Materia

Ing. Cristian Alfonso Salas Vázquez

Tutor de proyecto

RESUMEN

El acceso a un tratamiento eficiente de aguas residuales es fundamental tanto para la salud pública como para el cuidado del medio ambiente, en la comunidad de San Pedro la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) la cual fue construida en 2022, permanece inoperativa lo que genera una descarga directa en el río Dudas afectando la calidad del agua y el ecosistema local. En el presente proyecto se busca evaluar el estado actual de la PTAR e identificar los factores que impiden su funcionamiento proponiendo una metodología adecuada para su puesta en marcha así como un plan para su operación y mantenimiento. Realizar esta evaluación representa un primer paso para orientarse con el objetivo de desarrollo sostenible (ODS) 6 el cual busca garantizar el acceso a agua potable, saneamiento e higiene para todas las personas.

Para desarrollar este estudio se realizó diversas inspecciones en campo, mingas de limpieza con la comunidad, ensayos de laboratorio (granulometrías), ensayos de calidad de agua, levantamientos topográficos entre otras actividades que permitieron conocer el estado actual de esta unidad de tratamiento. Los resultados evidenciaron deficiencias tanto de diseño como constructivas, acumulación de lodos, taponamiento de las unidades, filtraciones y fugas en el filtro ascendente, material filtrante inadecuado y una completa falta de mantenimientos.

Al finalizar este estudio se concluye que la PTAR requiere intervenir para corregir las observaciones encontradas antes de su puesta en marcha, además de la implementación de un plan de operación y mantenimiento que permita garantizar un funcionamiento adecuado sin futuras paralizaciones.

Palabras clave: Tratamiento, inoperativa, calidad, salud

ABSTRACT

Access to efficient wastewater treatment is essential for both public health and environmental protection. In the community of San Pedro, the wastewater treatment plant (WWTP), built in 2022, remains inoperative, leading to the direct discharge of wastewater into the Dudas River, which negatively impacts water quality and the local ecosystem. This project aims to assess the current condition of the WWTP and identify the factors preventing its operation, proposing an appropriate methodology for its commissioning, as well as a plan for its operation and maintenance. Conducting this assessment represents a crucial first step toward aligning with Sustainable Development Goal (SDG) 6, which aims to ensure access to safe drinking water, sanitation, and hygiene for all.

To develop this study, various field inspections were conducted, community clean-up initiatives were organized, and laboratory tests (granulometric analysis), water quality assessments, and topographic surveys were carried out. These activities provided insight into the current state of the treatment unit. The results revealed both design and construction deficiencies, sludge accumulation, unit blockages, leaks and seepage in the upflow filter, inadequate filter material, and a complete lack of maintenance.

Upon conclusion of this study, it was determined that the WWTP requires intervention to address the identified issues before its commissioning, along with the implementation of an operation and maintenance plan to ensure proper functionality and prevent future shutdowns.

Keywords: Treatment, inoperative, quality, health.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE ECUACIONES	IX
1. CAPÍTULO 1	10
1.1 Antecedentes.....	10
1.2 Localización	11
1.3 Estudios previos	12
1.3.1 Composición de la planta de tratamiento de aguas residuales de la comunidad de San Pedro	12
1.4 Definición del problema	14
1.5 Justificación	15
1.6 Objetivos.....	16
1.6.1 Objetivo General	16
1.6.2 Objetivos Específicos	16
2. CAPÍTULO 2	17
2.1 Marco conceptual	17
2.1.1 Aguas residuales.....	17
2.1.2 Caracterización de aguas residuales	17
2.1.3 Clasificación de tratamiento de acuerdo con la disponibilidad de oxígeno	21
2.1.4 Etapas del tratamiento de aguas residuales	22

2.1.5	Tratamiento de lodos residuales	31
2.2	Marco metodológico	37
2.2.1	Trabajo de campo	38
2.2.2	Trabajo de laboratorio o gabinete.....	38
2.2.3	Diseño de unidades faltantes	40
3.	CAPÍTULO 3	41
3.1	Resultados.....	41
3.1.1	Valoración de estado inicial.....	41
3.1.2	Resultados de laboratorio	44
3.1.3	Pruebas de funcionamiento de PTAR	49
3.1.4	Unidades necesarias a implementar	54
3.1.5	Metodología de puesta en marcha, operación y mantenimiento	59
3.2	Discusión de resultados.....	62
4.	CAPÍTULO 4	64
4.1	Conclusiones	64
4.2	Recomendaciones	64
5.	BIBLIOGRAFÍA	66
1.	ANEXO 1.....	3
	Manual de operación y mantenimiento	3

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
OMS	Organización Mundial de la Salud
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
PDOT	Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial
NBI	Necesidades Básicas Insatisfechas
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente
AR	Aguas residuales
PTAR	Panta de tratamiento de aguas residuales
ODS	Objetivo de desarrollo sostenible
HFSSH	Humedales de flujo subsuperficial horizontal
CF	Coliformes fecales

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación PTAR	11
Figura 1.2 Composición de PTAR de San Pedro.....	13
Figura 1.3 Estado inicial PTAR San Pedro	13
Figura 2.1 Esquema de rejilla	23
Figura 2.2 Esquema tradicional de un desarenador	24
Figura 2.3 Esquema fosa séptica.....	26
Figura 2.4 Esquema filtro aerobio de flujo ascendente	28
Figura 2.5 Esquema de HFSSH.....	28
Figura 2.6 Colocación de mamparas en un humedal artificial	30
Figura 2.7 Esquema lecho de secado de lodos	36
Figura 2.8 Muestras de AR	39
Figura 2.9 Muestras de material filtrante.....	39
Figura 2.10 Propuesta de unidades faltantes	40
Figura 3.1 Estado inicial de la PTAR	41
Figura 3.2 Acumulación de sólidos en caja de ingreso	42
Figura 3.3 Fosa séptica sin cota de funcionamiento	43
Figura 3.4 Estado de pozos internos	43
Figura 3.5 Salida de PTAR taponada	44
Figura 3.6 Ingreso a falso fondo	44
Figura 3.7 Pruebas de funcionamiento de la PTAR	49
Figura 3.8 Esquema fosa séptica con pendiente de fondo según	50
Figura 3.9 Esquema fosa séptica con pendiente de fondo según	50
Figura 3.10 Esquema FAFA	52
Figura 3.11 Grietas en el costado de la unidad	53
Figura 3.12 Filtraciones en la tubería de salida	53
Figura 3.13 Fugas en el filtro biológico	53
Figura 3.14 Rejilla de control de sólidos	54
Figura 3.15 Corte A_A rejilla de control de sólidos	55
Figura 3.16 Propuesta lecho de secado de lodos	56
Figura 3.17 Corte de A-A del lecho de secado de lodos.....	56
Figura 3.18 Esquema de humedal horizontal de flujo subsuperficial	58

Figura 3.19 Esquema cabezal de salida	59
Figura 3.20 Corte A_A Cabezal de salida.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Sistemas de saneamiento del cantón Azogues	12
Tabla 1.2 Condiciones teóricas de diseño	14
Tabla 2.1 Composiciones típicas de las aguas residuales domésticas.....	18
Tabla 2.2 Limite de descarga a un cuerpo	19
Tabla 2.3 Parámetros que afectan un tratamiento anaerobio	21
Tabla 2.4 Diferencias principales entre filtros Aerobios y anaerobios.....	27
Tabla 2.5 Composición química de los lodos.....	31
Tabla 2.6 Características y cantidades típicas de lodo	32
Tabla 2.7 Límites máximos permisibles de metales pesados en lodos.....	33
Tabla 2.8 Límites máximos tolerables en el contenido de metales pesados en biosólidos	34
Tabla 2.9 Límites máximos tolerables en el contenido de patógenos y parásitos en biosólidos	35
Tabla 2.10 Estrategias de aprovechamiento de biosólidos	35
Tabla 2.11 Criterios de diseño de un lecho de secado según	36
Tabla 3.1 Resultados de ensayos de caracterización de AR	45
Tabla 3.2 Índice de degradación.....	47
Tabla 3.3 Granulometría capa 1 a 0.50m de profundidad.....	48
Tabla 3.4 Granulometría capa 2 a 1.50m de profundidad.....	48

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1 Catabolismo	22
Ecuación 2.2 Anabolismo	22
Ecuación 2.3 Autólisis.....	22
Ecuación 2.4 Ecuación de Kirshmer	23
Ecuación 2.5 Área superficial para HFSSH	29
Ecuación 2.6 Ecuación cinética de primer orden	30
Ecuación 3.1 Índice de Biodegradabilidad.....	47
Ecuación 3.2 Capacidad de un tanque séptico (1).....	51
Ecuación 3.3 Capacidad de un tanque séptico (2).....	51
Ecuación 3.4 Capacidad de un tanque séptico (3).....	51
Ecuación 3.5 Volumen estimado de lodos	51
Ecuación 3.6 Producción estimada de lodos	55
Ecuación 3.7 Conductividad hidráulica	57
Ecuación 3.8 Ancho estimado de un HFSSH	57
Ecuación 3.9 Remoción de NTK en HFSSH	58

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció el acceso al agua potable y al saneamiento como derechos humanos esenciales para garantizar una vida digna. Este reconocimiento implica que todas las personas deben disponer de instalaciones de saneamiento seguras y accesibles.

En la comunidad de San Pedro, ubicada en la parroquia Pindilig, la inoperatividad de la planta de tratamiento de aguas residuales ha generado un impacto significativo en el ecosistema local. Esta situación ha derivado en problemas de contaminación que afectan directamente al río Dudas, la principal fuente hídrica de la parroquia. Iniciar el funcionamiento de esta unidad de tratamiento permite mitigar los impactos negativos en el río Dudas, para así cumplir con los estándares de saneamiento establecidos en la normativa ambiental y proteger los recursos hídricos de la localidad. En este contexto el presente proyecto busca evaluar el estado actual de la planta de tratamiento y proponer una metodología adecuada para su mantenimiento y puesta en marcha.

El proyecto se organiza en tres etapas fundamentales, primero, se realizará un diagnóstico detallado de las condiciones iniciales de la unidad de tratamiento para evaluar su estado actual; segundo, se identificarán posibles mejoras necesarias para optimizar su funcionamiento; y tercero, se desarrollará un manual con lineamientos claros para la operación y mantenimiento de la unidad. Estas etapas permitirán abordar integralmente la problemática planteada.

1.1 Antecedentes

La zona rural del Ecuador se ha caracterizado por sus condiciones de precariedad tanto en agua potable como alcantarillado, tal es el caso de la parroquia Pindilig, la cual pertenece al cantón Azogues, provincia del Cañar. De acuerdo con los datos del **Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2024 – 2027 del cantón Azogues** (PDOT, 2024) Pindilig posee una extensión de 11 580.13 ha con una población de 1837 personas.

Al igual que en las parroquias de Rivera y Taday, la principal actividad económica de Pindilig es la Ganadería. De acuerdo con el índice de necesidades básicas insatisfechas

(NBI). Pindilig, es la segunda parroquia del cantón con mayor número de personas pobres, con un 65% (PDOT, 2024)

Esta condición es evidente al analizar el caso de la comunidad de San Pedro. En esta localidad para el 2015 se estimó una población de 316 habitantes, sin embargo, hasta el 2021 no se implementó ninguna estrategia de saneamiento, ocupando así métodos deficientes como fosas sépticas sin criterios de diseño, letrinas o deposiciones al aire libre (CELEC, 2019). En 2022 se realizó la construcción de la Planta de tratamiento de aguas residuales de la comunidad de San Pedro (PTAR), sin embargo, de acuerdo con la información proporcionada por el Gad de Pindilig, no se inició su funcionamiento, debido a ello, las aguas recolectadas por el sistema de alcantarillado son vertidas de forma directa en el Río Dudas.

En este contexto, el presente proyecto de titulación busca realizar el diagnóstico del estado actual de la planta de tratamiento, ya que esta ha sufrido deterioro por su falta de operatividad, además se busca proponer una metodología que permita iniciar su funcionamiento con miras a cumplir la normativa ambiental vigente en el País.

1.2 Localización

El proyecto ubica en la comunidad de San Pedro, en la parroquia rural de Pindilig, dentro del cantón Azogues, en la provincia de Cañar, Ecuador. La planta de tratamiento en la que se enfoca el estudio está emplazada en las coordenadas UTM, N: 9709027.47 E: 759066.71 como se aprecia en la Figura 1.1.



Figura 1.1 Ubicación PTAR

1.3 Estudios previos

En el Ecuador en el 2021 se registró un total de 577 plantas de tratamiento de aguas residuales las cuales se encuentran distribuidas en 164 municipios del país lo que corresponde a un 74.2% del total de las municipalidades (INEC, 2021). Sin embargo, es importante considerar que existe una importante brecha respecto a las zonas rurales del país, en las cuales, en una gran cantidad de casos, debido a la escasez de recursos no se cuenta con estrategias de saneamiento adecuadas. En el cantón Azogues se emplean diferentes estrategias de saneamiento ilustradas en la Tabla 1.1

Tabla 1.1 Sistemas de saneamiento del cantón Azogues (PDOT, 2024)

Fuente	Número	Porcentaje
Red Pública de alcantarillado	15.872,00	70,29
Pozo séptico	4.832,00	21,4
Biodigestor	110	0,49
Pozo ciego	165	0,73
Descarga directa al río, lago o quebrada	577	2,56
Letrina	41	0,18
No tiene	985	4,36
Total	22.582,00	100

1.3.1 Composición de la planta de tratamiento de aguas residuales de la comunidad de San Pedro

La PTAR de la comunidad de San Pedro de acuerdo con su diseño se encuentra constituida como se ilustra en la Figura 1.2 cuenta con una caja de ingreso la cual recíbelas AR de la comunidad y las direcciona a una fosa séptica, la cual cuenta con dos compartimientos, una vez atrapados los sólidos, se dirige los lixiviados hasta un filtro aerobio ascendente, el cual funciona como tratamiento secundario, finalmente el agua tratada es dirigida hacia el río Dudas.

Adicionalmente en el interior se cuenta con válvulas que permiten redireccionar el efluente de la fosa séptica, para posteriormente drenar el filtro y realizar ya sea muestreos de lodos o limpieza del filtro.

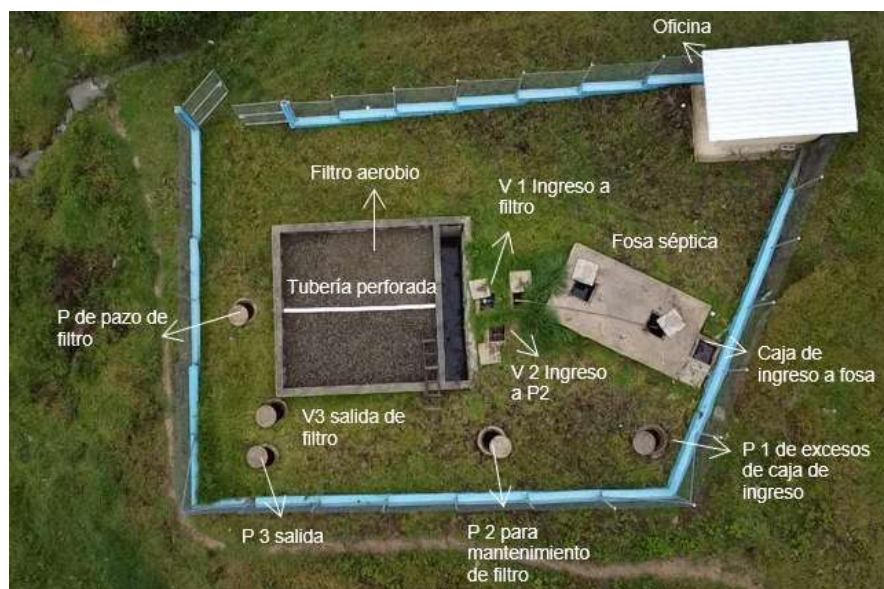


Figura 1.2 Composición de PTAR de San Pedro

Durante una visita técnica realizada en el mes de noviembre de 2024, se evidenció el estado actual de la infraestructura destinada al tratamiento de aguas residuales (AR), como muestra la Figura 1.3. Desde su construcción en 2022, esta PTAR ha permanecido fuera de operación, lo que ha ocasionado un deterioro progresivo de sus componentes. Esta situación resalta la importancia de realizar un diagnóstico técnico detallado y de establecer una metodología apropiada para iniciar su funcionamiento.



Figura 1.3 Estado inicial PTAR San Pedro

La unidad de tratamiento de acuerdo con la consultoría “Alcantarillado en la comunidad de San Pedro de la parroquia Pindilig del cantón Azogues” (CELEC, 2019) se encuentra

emplazada en la ribera del Río Dudas y cuenta con las siguientes unidades: fosa séptica, filtro Anaerobio y lecho de secado de lodos las dimensiones teóricas de las unidades se encuentran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Condiciones teóricas de diseño

Detalle	Valor
Población de diseño	281 habitantes
Nivel de servicio	IIb
Dotación	75 l/hab*día
Caudal de aguas residuales	0.195 l/s
Dimensiones de la fosa séptica	Volumen: 16.90 m ³
	Altura H: 2 m
	Longitud L: 4.20 m
	Ancho A: 2.10 m
Dimensiones del filtro aerobio	Volumen: 44.96 m ³
	Altura H: 2m
	Longitud L: 5m
	Ancho A: 5m

La granulometría del filtro (desde el fondo) está compuesta por:

- 20 cm de canto rodado de 4 pulgadas
- 20 cm de grava de 2 pulgadas
- 1.40m de grava de 1 pulgada

1.4 Definición del problema

Las aguas residuales, son una de las principales causas de contaminación del suelo además de las fuentes hídricas, por ello es fundamental implementar sistemas eficientes de recolección de aguas servidas y posteriormente trasladarlas a una unidad de depuración, previo a la disposición en el cuerpo de agua receptor (CELEC, 2019).

En la comunidad de San Pedro, las aguas residuales son descargadas directamente sobre el Río Dudas, generando afecciones ambientales, contaminación del agua y posibles daños significativos en la salud pública de los habitantes. Esta situación tiene su origen en la falta de operatividad de la planta de tratamiento construida en el sector, la cual, a pesar de haberse finalizado su construcción en 2022, no ha iniciado su

funcionamiento debido a la ausencia de un proceso de puesta en marcha y seguimiento técnico adecuado. El problema aumenta al considerar que esta estructura fue diseñada en el 2013 con un periodo de vida útil de 20 años, es decir a la fecha ha superado el 50% de su vida útil sin cumplir el propósito para el cual fue construida.

El enfoque planteado busca evaluar los factores que impiden el funcionamiento de esta PTAR, recopilándolos en un manual de operación y mantenimiento que impida nuevas paralizaciones para lograr una reducción en los impactos ambientales de la comunidad, así como también sugerir posibles unidades adicionales a implementarse a largo plazo.

1.5 Justificación

El tratamiento de aguas residuales es un factor esencial en la protección de la salud pública y la preservación de los ecosistemas, además del aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos, el objetivo de este proceso es la reducción de la carga contaminante tanto física, química o biológica del agua antes de ser descargada en ríos, lagos u océanos. Los esfuerzos por tratar el agua residual no son nuevos, ya que desde la antigua Roma la humanidad se ha esforzado en buscar un mecanismo eficiente para tratar y limpiar el agua (Gutierrez, 2021).

En Ecuador, el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA, 2015) regula los límites de carga contaminante para la descarga de aguas residuales en cuerpos de agua dulce. Esta norma tiene por objeto proteger los ecosistemas, prevenir la contaminación y garantizar el uso sostenible del agua, exigiendo un tratamiento adecuado de las aguas recolectadas por los alcantarillados (TULSMA, 2015).

Este trabajo busca realizar un diagnóstico del estado actual de las unidades y proponer una metodología para su puesta en marcha. El éxito del proyecto se encuentra alineado con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, el cual busca garantizar el acceso de las personas a un sistema de saneamiento adecuado, equitativo y seguro. Este objetivo no solo promueve el tratamiento y gestión eficiente de las aguas residuales, sino que también contribuye a mejorar la calidad del agua, reducir la contaminación y proteger los ecosistemas acuáticos.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Evaluar el estado actual de la planta de tratamiento de aguas residuales de la comunidad de San Pedro, parroquia Pindilig, cantón Azogues, mediante la revisión de la capacidad hidráulica y de tratamiento de aguas residuales de sus componentes, para el desarrollo de una metodología eficiente que permita su puesta en marcha y garantice su eficiencia operativa.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar un diagnóstico de las condiciones actuales de la planta de tratamiento de la comunidad para la identificación de las deficiencias técnicas existentes y los daños generados durante por su condición inoperatividad.
- Proponer acciones y unidades que debiesen ser consideradas para corregir las deficiencias identificadas durante el diagnóstico de las condiciones actuales de la PTAR.
- Plantear una metodología adecuada para la puesta en marcha de la planta de tratamiento considerando un estado óptimo de funcionamiento de sus componentes.
- Proponer un plan de mantenimiento y operación adecuado de las unidades de la planta de tratamiento de AR, asegurando su correcto funcionamiento, para reducir el riesgo de fallas futuras y evitar la descarga sin tratamiento en el cuerpo de agua receptor.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Aguas residuales

El agua es un recurso esencial para todos los organismos vivos, especialmente para los seres humanos, quienes la emplean además de para su consumo, en otras actividades necesarias en su diario vivir. No obstante, las aguas utilizadas se transforman en desechos los cuales se denominan aguas residuales y pudiendo clasificarse en: domésticas, industriales, agrícolas y pluviales, de acuerdo con su origen (González León et al., 2022).

El “Código de práctica para el diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable, disposición de excretas y residuos líquidos en el área rural” define a los **residuos líquidos domésticos** también conocidos como aguas servidas, como aquellos que resultan de la combinación de aguas que arrastran excretas y aguas desechadas luego de diferentes usos domésticos como las actividades de cocina, lavandería y otros procesos diarios (CPE-INEN, 1997).

Eddy & Metcalf, 2003 clasifican las aguas residuales domésticas de acuerdo con los contaminantes que se encuentran en su composición en Convencionales (Sólidos suspendidos y coloidales, materia orgánica carbonácea, nutrientes y microorganismos patógenos), no convencionales (orgánicos refractarios, orgánicos volátiles, surfactantes, metales, sólidos disueltos) y emergentes (medicinas, detergentes sintéticos, antibióticos veterinarios y humanos, hormonas y esteroides, etc) (Osorio et al., 2021).

2.1.2 Caracterización de aguas residuales

Por la ubicación rural de la zona de estudio, y la ausencia de industrias, el agua residual a tratar será considerada como agua residual doméstica, sin embargo, es de gran importancia la caracterización inicial para conocer los componentes que son descargados en el cuerpo de agua receptor.

El autor (Osorio et al., 2021) menciona la investigación realizada por Cifuentes, (2007) en la cual se demuestra que las personas excretan de 100 a 500 g de heces al día además de 1 a 3 L de orina, aportando con una DBO₅ de 20 a 45 gr por día así mismo. Probabilísticamente se obtiene que las aguas residuales de origen doméstico están

conformadas aproximadamente por un 99.9% de agua mientras que el 0.1% son residuos sólidos orgánicos e inorgánicos.

Según el autor (Arellano, 2009) la composición de las ARD es posible encontrar a las proteínas como el principal componente seguido de carbohidratos y grasas. Adicionalmente se encuentran compuestos surfactantes como fenoles, aceites, pesticidas y otros componentes menos comunes, como metales pesados, compuestos organoclorados, etc (Osorio et al., 2021).

Existen concentraciones típicas de las ARD, obtenidas mediante investigaciones, una de estas se encuentra en la Tabla 2.1 y las clasifica según la concentración de los contaminantes en Media, débil y fuerte.

Tabla 2.1 Composiciones típicas de las aguas residuales domésticas (Metcalf & Eddy, 1995)

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/l	350	720	1200
Disueltos totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
Sólidos en suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
Fijos	mg/l	20	55	75
Volátiles	mg/l	80	165	275
Sólidos sedimentables	ml/l	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno, mg/l 5 días, 20°C (DBO5, 20°C)	mg/l	110	220	400
Carbono orgánico total (COT)	mg/l	80	160	290
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	250	500	1000
Nitrógeno (total en la forma N)	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoniaco libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Fósforo (total en la forma P)	mg/l	4	8	15
Orgánicos	mg/l	1	3	5
Inorgánicos	mg/l	3	5	10
Cloruros*	mg/l	30	50	100
Sulfato*	mg/l	20	30	50
Alcalinidad como (CaCO₃)	mg/l	50	100	200
Grasa	mg/l	50	100	150
Coliformes totales	n°/100ml	10 ⁶ - 10 ⁷	10 ⁷ - 10 ⁸	10 ⁸ - 10 ⁹
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	mg/l	< 100	100 – 400	> 400
* Los valores se deben aumentar en la cantidad en que estos compuestos se hallen presentes en las aguas de suministro				

La caracterización de las aguas residuales es un aspecto clave en la normativa ecuatoriana, permite evaluar la carga contaminante y asegurar que las descargas cumplan con los límites establecidos. En este contexto en el Ecuador, el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) regula los valores permisibles de contaminantes para la descarga en cuerpos de agua dulce.

Toda descarga deberá cumplir con los valores establecidos en la tabla número 9 del TULSMA, titulada como “límites de descarga a un cuerpo de agua dulce” presentada en la Tabla 2.2, su propósito es proteger los ecosistemas hídricos, preservar la salud pública y generar un desarrollo sostenible.

Tabla 2.2 Limite de descarga a un cuerpo (TULSMA)

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y grasas	Sust. Solubles en hexano	mg/l	30
Aluminio	Al	mg/l	5
Arsénico total	As	mg/l	0.1
Bario	Ba	mg/l	2
Boro Total	B	mg/l	2
Cadmio	Cd	mg/l	0.02

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Cianuro total	CN	mg/l	0.1
Cinc	Zn	mg/l	5
Cloro Activo	Cl	mg/l	0.5
Cloroformo	Ext. Carbón cloroformo ECC	mg/l	1
Cloruros	Cl	mg/l	1000
Cobre	Cu	mg/l	1
Cobalto	Co	mg/l	0.5
Coliformes fecales	NMP	NMP/100ml	2000
Color real	Color real	unidad de color	Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0.2
Cromo hexavalente	Cr ⁺	mg/l	0.5
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO ₅	mg/l	100
Demanda química de oxígeno	DQO	mg/l	200
Estaño	Sn	mg/l	5
Fluoruros	F	mg/l	5
Fósforo total	P	mg/l	10
Hierro total	Fe	mg/l	10
Hidrocarburos totales de petróleo	TPH	mg/l	20
Manganeso total	Mn	mg/l	2
Material flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0.005
Níquel	Ni	mg/l	2
Nitrógeno amoniacal	N	mg/l	30
Nitrógeno total Kjeldahl	N	mg/l	50
Compuestos organoclorados	Organoclorados totales	mg/l	0.05
Compuestos organofosforados	Organofosforados totales	mg/l	0.1
Plata	Ag	mg/l	0.1
Plomo	Pb	mg/l	0.2
Potencial hidrógeno	pH		6 a 9

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Selenio	Se	mg/l	0.1
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	130
Sólidos Totales	ST	mg/l	1600
Sulfatos	SO ₄	mg/l	1000
Sulfuros	S ²⁻	mg/l	0.5
Temperatura	°C		Condición natural ± 3
Tensoactivos	Sustancias activadas al azul de metileno	mg/l	0.5
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1
La apreciación del color se estima sobre 10cm de muestra diluida			

2.1.3 Clasificación de tratamiento de acuerdo con la disponibilidad de oxígeno

a) Procesos de tratamiento anaerobio

En el proceso de digestión anaerobia, el tratamiento tiene lugar en un reactor completamente cerrado, por lo que no existe oxígeno en el proceso. Durante el tratamiento la materia orgánica contenida en la mezcla de fangos se transforma biológicamente y bajo condiciones anaerobias en metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) (Metcalf & Eddy, 1995). Los factores que alteran los procesos de tratamiento anaerobio se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Parámetros que afectan un tratamiento anaerobio (CONAGUA, 2015)

Físicos	Temperatura, ph, sólidos totales y volátiles
Químicos	Alcalinidad total, producción de gas, nitrógeno orgánico y total, fosfatos, sulfuros, ácidos grasos volátiles, DBO ₅ , DQO, Ni, Co, Cu, Na, Fe.
Biológicos	Huevos de helminto, coliformes fecales y totales

Adicionalmente (CONAGUA, 2015) menciona además al autor (Bitton, 2005) quien establece una temperatura adecuada de 25 a 40°C, de la misma forma el valor recomendado de Ph, se encuentra entre los rangos 6,6 a 7,6 para los procesos anaerobios. Debido a la escasa producción de lodos en los procesos anaerobios, el

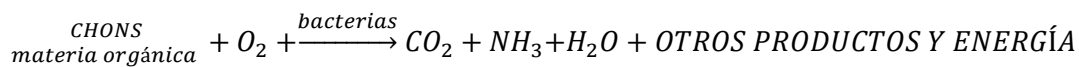
requerimiento de nitrógeno y fósforo es bajo, en caso que el AR no posea Nitrógeno y Fósforo, se podrá adicional en proporciones adecuadas ($DQO/N < 70$ y $DQO/P < 350$). Por otro lado, la alcalinidad recomendada sugiere valores de 2000 a 5000 mg/L de $CaCO_3$, para reducir la producción de acidez en la unidad generado por los ácidos grasos volátiles.

b) Procesos de tratamiento aerobio

Contrario al tratamiento anaerobio descrito anteriormente, los microorganismos que se encuentran en este tipo de tratamiento requieren de ambientes ricos en oxígeno, las unidades de tratamiento aerobio suelen seguir al tratamiento anaeróbico.

Usualmente, las bacterias son consideradas como los organismos más importantes en el tratamiento aerobio de AR gracias a su capacidad para oxidar la materia orgánica y desarrollarse en el medio, entre las comunes se encuentra: Zooglea ramigera, pseudomonas, flavobacterium, alcaligenes. Las tres ecuaciones fundamentales del proceso aerobio según (Romero, 2000) se encuentran detalladas en la Ecuación 2.1, Ecuación 2.2 y Ecuación 2.3.

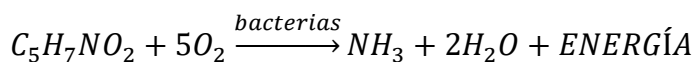
Catabolismo: proceso de oxidación o descomposición **2.1**



Anabolismo: Proceso de síntesis o asimilación **2.2**



Autólisis: Respiración endógena **2.3**



2.1.4 Etapas del tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales comprende varios procedimientos enfocados a la eliminación de los diferentes contaminantes presentes en el agua utilizada. De acuerdo con los componentes que se encuentren en los ensayos de caracterización de aguas los procesos de tratamiento se clasifican en diferentes etapas, cada una enfocada en abordar contaminantes específicos (Peña, 2021).

- **Tratamiento preliminar:** el tratamiento preliminar o pretratamiento es la etapa en la cual se inicia la depuración de AR, en esta se realiza la separación de residuos sólidos de diferentes tamaños mediante el empleo de rejillas y tamices.

a) Rejillas de pretratamiento: Las rejillas como etapa de pretratamiento buscan remover materiales sólidos gruesos presentes en el agua residual, estas estructuras normalmente metálicas como se ilustra en la sirven como filtros que detienen los residuos de gran tamaño en las unidades iniciales del sistema de tratamiento. De acuerdo con (Romero, 2000) el tamaño de las aberturas en las rejillas las permite clasificar como gruesas (aberturas iguales o mayores de 0,64 cm) y finas (aberturas menores a los 0,64 cm). El empleo de rejillas ya sea de limpieza manual o mecánica sirve para proteger bombas, válvulas, tuberías y equipos del taponamiento o interferencia causada por desechos que llegan al alcantarillado. Para dimensionar estas unidades se emplea la Ecuación 2,4 planteada por Kirshmer.

$$H = \beta * \left(\frac{\omega}{b}\right)^{\frac{4}{3}} * hv * \sin(\theta) \quad 2.4$$

Donde:

β : 1,79 para barras circulares

ω : ancho máximo de las barras en dirección al flujo

b: espaciamiento entre barras

hv: carga de velocidad de aproximación

θ : ángulo de la rejilla con la horizontal

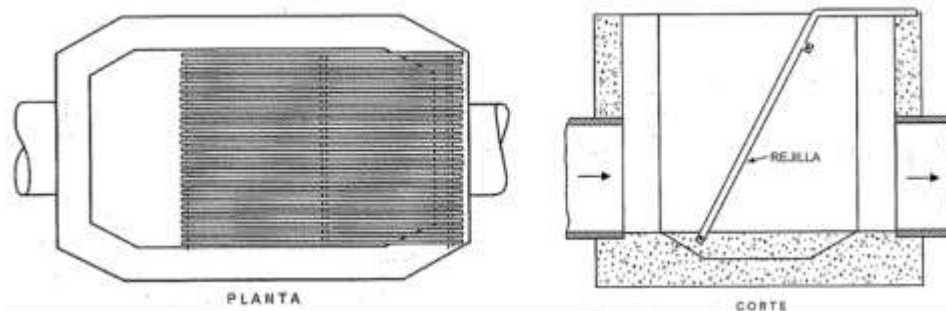


Figura 2.1 Esquema de rejilla (Romero, 2000)

- **Tratamientos primarios:** Permiten remover los contaminantes sedimentarios y sólidos suspendidos y flotantes mediante procesos físicos y en ciertas ocasiones químicos.

Pueden remover desde un 40 a 55% de sólidos en suspensión (SST) y de 25 a 35% de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) (Peña, 2021).

Entre las principales estrategias y unidades empleadas para esta etapa de tratamiento se encuentran:

- a) **Desarenadores:** son estructuras hidráulicas que buscan separar el agua y demás partículas sólidas (como arenas o gravas) para así salvaguardar la integridad de los demás componentes de la PTAR (Salazar & Wilbert, 2023). Los desarenadores más comunes son de flujo horizontal como se aprecia en la Figura 2.2, estas unidades de tratamiento primario son diseñados para retener partículas con diámetros mayores a 0,21 mm, en estos se deberá controlar la velocidad del flujo por medio de las dimensiones de la unidad normalmente con velocidades aproximadas a 30cm/s que han sido comprobadas sus eficiencias en la sedimentación de material pesado inorgánico (Romero, 2000). La sección empleada usualmente en la práctica son desarenadores trapezoidales.

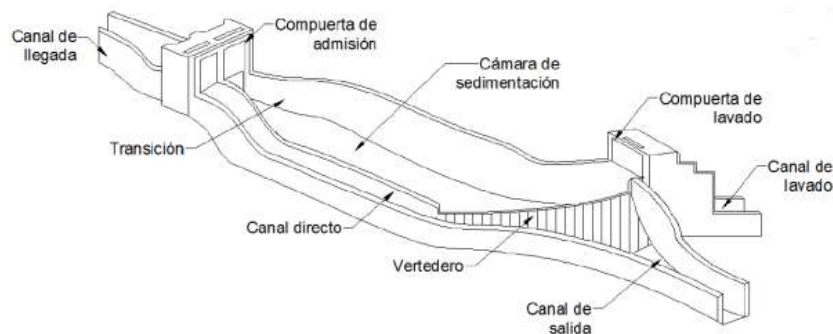


Figura 2.2 Esquema tradicional de un desarenador (Constantino et al., 2015)

- b) **Fosa séptica:** estas unidades ya sean de forma rectangular o cilíndrica, basan su funcionamiento en procesos de fermentación anaerobia y oxidación, constituyen una alternativa viable y de bajo costo para mitigar la contaminación en áreas urbanas y rurales. Su eficiencia depende del tamaño del tanque además de las características propias del efluente a tratar, la fosa séptica presentada en la consultoría del proyecto por (CELEC, 2019) se presenta en la Figura 2.3.

En el interior de la fosa tiene lugar un proceso de sedimentación, la materia orgánica depositada en el fondo de acuerdo con (Constantino et al., 2015) es

sometida a un proceso biológicos generando compuestos como: Metano (CH_4), Dióxido de carbono (CO_2) y Sulfuro de Hidrogeno.

Esta estrategia de saneamiento requiere de una constante limpieza de los lodos sedimentados en su interior, en el trabajo desarrollado por (OPS, 2005), se cita a (Majumber et al., 1960) se menciona que la eliminación de sólidos en suspensión oscila en un rango cercano al 80%. En este mecanismo la temperatura favorece al proceso de digestión con un máximo cerca de los 35°C .

La remoción de DBO en un tanque séptico puede ser del 30 al 50% de grasas y aceites un 70 a 80%, de fósforo un 15%, para aguas residuales domésticas típicas (Constantino et al., 2015), valores semejantes en este tipo de tratamiento son presentados por (Ruiz et al., 2014) quien menciona una eficiencia en temperaturas superiores a los 20°C de 55 a 75% en la eliminación de DQO, 65 a 80% para la eliminación de DBO5 y de un 67 a 81% en la eliminación de SS.

La función principal de estas infraestructuras es almacenar los sólidos y conducir los líquidos a otra unidad de tratamiento (Jiménez, 2008). De acuerdo a la investigación de (González León et al., 2022) las fosas sépticas poseen tres zonas definidas, en cada una de ellas surgen diferentes procesos que aportan al tratamiento de las AR:

- Zona inferior: Lugar en el que se sedimentan los lodos
- Zona central: espacio en el cual se da la separación de las partículas
- Zona superior: donde se acumulan las grasas, aceites entre otros formando una capa de espuma llamada nata.

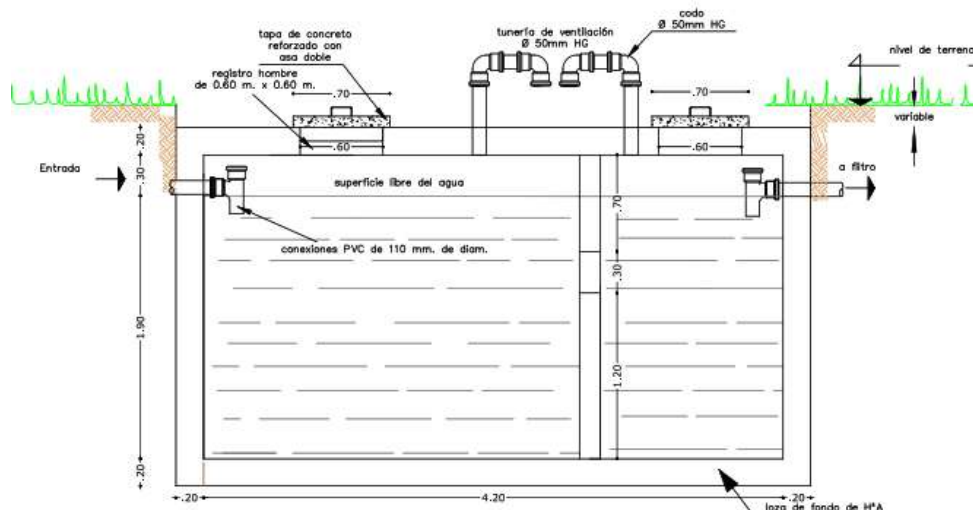


Figura 2.3 Esquema fosa séptica (CELEC, 2019)

- **Tratamiento secundario:** se enfoca en la remoción de materia orgánica soluble y suspendida mediante la acción de microorganismos (procesos biológicos), pueden remover hasta un 85% de la DBO y sólidos suspendidos, además de ciertas cantidades de nitrógeno, fósforo, metales pesados y bacterias patógenas. Entre las principales estrategias y unidades empleadas para esta etapa de tratamiento se encuentran:

a) Filtros biológicos: Un filtro biológico consiste en un lecho formado por materiales extremadamente porosos, en el cual se adhieren microorganismos y a través del cual se filtra el AR, usualmente se emplean piedras para generar este medio filtrante con un diámetro que varía entre los 2.5 a 10cm. Piedras con diámetros pequeños no generan el suficiente volumen de huecos para el crecimiento biológico (Montiel, 2001).

En estas unidades se genera un proceso de biomasa adherida en el cual los microorganismos generan una biopelícula incrustada en un medio fijo, en este caso el material filtrante el cual permanece en el reactor (Limón, 2013). Existe adicionalmente medios filtrantes sintéticos los cuales poseen diferentes ventajas sobre los medios de piedra:

1. Mayor área superficial por unidad de volumen de 2 a 10 veces superior a los medios de piedra para dar lugar a un mejor crecimiento biológico
2. Mayor relación de volumen de huecos lo que favorece a la oxigenación
3. Incrementa el tiempo de retención hidráulico
4. Gracias a que son ligeros se puede incrementar la altura del filtro
5. Mejor resistencia química
6. No requiere estructuras de contención de concreto reforzado

El paso de AR a través de medios porosos tiene sus orígenes en la Estación Experimental Lawrence en Massachusetts, USA, entre 1997 y 1990 (Montiel, 2001). Estas unidades de tratamiento de acuerdo a la disponibilidad de oxígeno en el crecimiento de microorganismos podrán clasificarse en aerobios o anaerobios con diferentes características como se menciona en la Tabla 2.4, en el caso de la PTAR de San Pedro, se lo consideran como mecanismos aerobios ya que los microorganismos que degradan la materia orgánica se encuentran en contacto con el oxígeno como se puede apreciar en la Figura 2.4.

Este es un sistema eficaz en situaciones donde el efluente contiene una elevada carga de materia orgánica biodegradable, medida comúnmente como Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).

La alta concentración de DBO indica una abundancia de compuestos orgánicos que requieren una degradación eficiente, proceso en el cual los filtros aeróbicos son particularmente efectivos (Romero, 2000).

El ph como la temperatura son factores fundamentales, se ha comprobado que la velocidad de reacción de los microorganismos aumenta con la temperatura doblándose por cada 10°C de aumento, de la misma forma el ph óptimo de funcionamiento se encuentra entre los 6.5 y 7.5 (Montiel, 2001).

Tabla 2.4 Diferencias principales entre filtros Aerobios y anaerobios

Características	F. Aerobio	F. Anaerobio
Necesidad de oxígeno	Si	No
Eficiencia en calidad	Alta	Moderada
Costo operativo	Alto	Bajo
Producción de biogás	No	Si
Olores	Bajos	En gran escala
Generación de lodos	Alta	Baja

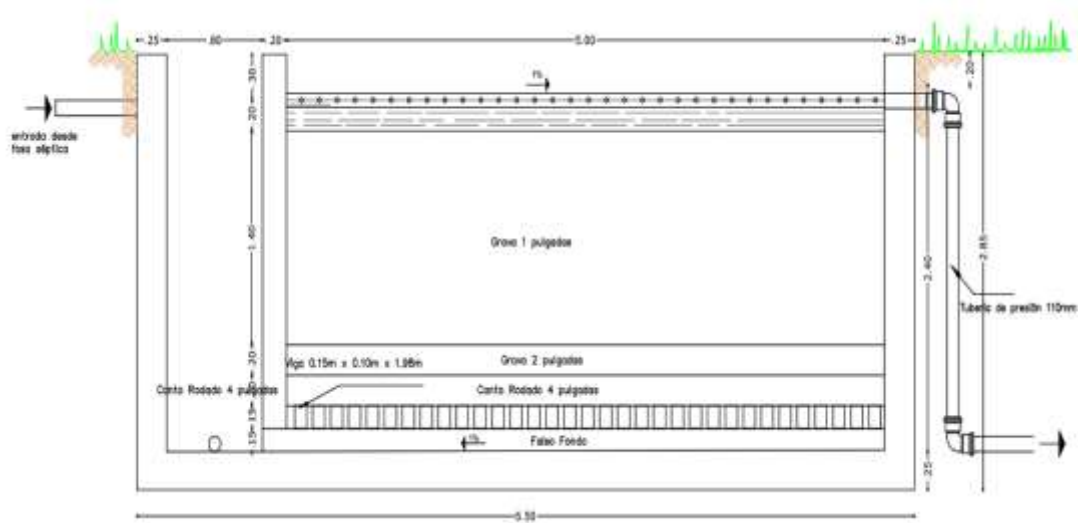


Figura 2.4 Esquema filtro aerobio de flujo ascendente (CELEC, 2019)

- **Tratamiento terciario:** busca eliminar los contenidos remanentes de nutrientes orgánicos e inorgánicos y acondicionar los lodos generados en el tratamiento para su aprovechamiento o disposición final.

Entre las principales estrategias y unidades empleadas para esta etapa de tratamiento se encuentran:

- a) Humedales de flujo subsuperficial horizontal: (HFSSH)** Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento de AR, se encuentran conformados por lechos filtrantes, plantas y microorganismos que favorecen a la eliminación de contaminante. La eliminación de contaminantes está influenciada por diferentes parámetros como la temperatura, ph, oxígeno disuelto, vegetación. Para el diseño de un humedal se considera las recomendaciones presentadas en (CONAGUA, 2019), una representación característica de estas unidades se puede apreciar en la **Figura 2.5**

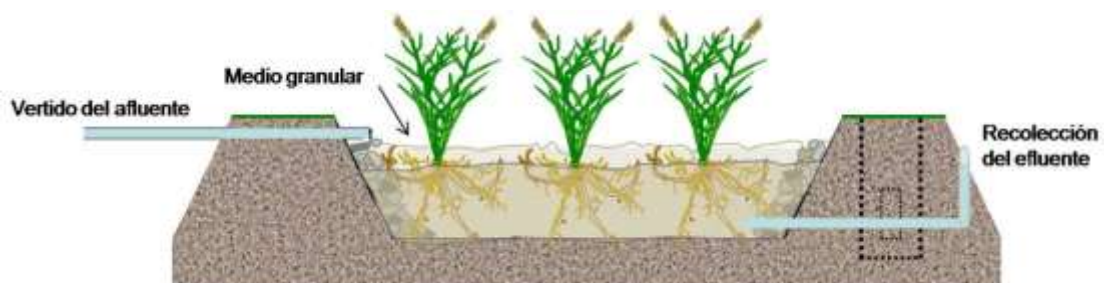


Figura 2.5 Esquema de HFSSH (García Serrano & Corzo Hernández, 2008)

De acuerdo con (García Serrano & Corzo Hernández, 2008) en un humedal de tipo subsuperficial el AR circula de forma subterránea por medio el lecho granular, a su vez mantiene contacto con las raíces y rizomas de las plantas, la profundidad del agua suele ser entre 0,3 y 0,9m, la biopelícula que se desarrolla en contacto con las gravas del lecho filtrante además de las raíces y rizomas tienen un papel fundamental en la descontaminación del AR la cual fluye entre 0,05 y 0,1m por debajo de la superficie.

Estas unidades cuentan con los siguientes elementos: Ingreso del afluente, impermeabilización de laterales y fondo, lecho granular, vegetación, estructura de salida de efluente. En cuanto a su eficiencia es posible esperar una remoción del 10 a 20% de Nitrógeno, 10 a 20% de Fósforo, tanto para DBO₅ y DQO valores que oscilan entre 75 y 95%, la eliminación de patógenos usualmente oscila entre 1 y 2 unidades logarítmicas/ 100ML aproximadamente

Adicionalmente al hablar sobre la eficiencia de remoción de patógenos en (García Serrano & Corzo Hernández, 2008) humedales de tratamiento, menciona que existe bibliografía como la investigación de (Vymazal, 2005) en la cual reportó, que los humedales subsuperficiales de flujo horizontal pueden superar la remoción alcanzada por humedales superficiales logrando tasas de 88.1% para Coliformes totales, 91.6% para coliformes fecales, entre 65.1 a 85.6% para estreptococos fecales. En la normativa mexicana (CONAGUA, 2019) se presenta varios mecanismos para el dimensionamiento de un humedal artificial entre ellos la Ecuación 2.5 utilizada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 1993)

$$As = \frac{Q*(\ln Co - \ln Ce)}{K_{VT} * D_M * n} \quad 2.5$$

Donde:

As: Área superficial del humedal, m²

Q: Caudal del afluente, L/s

K_{VT} : Constante cinética de primer orden, d⁻¹

D_M : Propuesta de profundidad de lecho, m

n: Porosidad, fracción

Adicionalmente se plantea la ecuación cinética de primer orden para corregir la temperatura, ver Ecuación 2.6

$$K_{VT} = K_{V20} * \theta^{T-20}$$

2.6

Donde:

T: Temperatura promedio del agua en °C

θ : Coeficiente de Arrhenius

Para humedales subsuperficiales se deberá emplear un valor de 1.104 d⁻¹ para K_{V20} mientras que el valor del coeficiente de Arrhenius θ será de 1.106. Es importante asegurar una impermeabilización adecuada para evitar la contaminación de agua freática. Para la geometría es recomendable emplear relaciones largo ancho mayores a 2:1 y menores a 4:1, para ello se puede emplear mamparas de poliuretano como se ejemplifica en la Figura 2.6.

En el caso de los humedales subsuperficiales, su profundidad se determina en base a la profundidad que podría alcanzar las raíces de la vegetación, usualmente se utilizan rangos entre 30 a 70cm. Por otro lado, el medio filtrante debe graduarse de grueso a fino a fin de reducir obstrucciones con diámetros de 4-5cm, 2-4cm y 1-2cm. Finalmente, la vegetación seleccionada la norma mexicana sugiere emplear una equidistancia de 1m, sin embargo, brinda la posibilidad de utilizar distancias de entre 50 a 75cm para lograr una mayor densidad de vegetación.

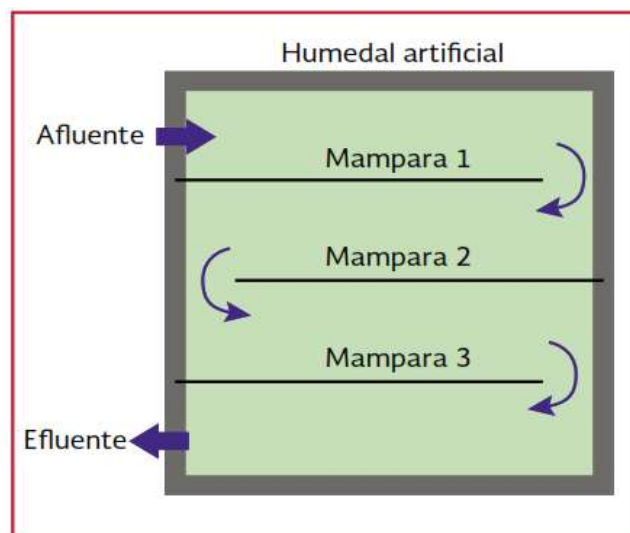


Figura 2.6 Colocación de mamparas en un humedal artificial (CONAGUA, 2019)

2.1.5 Tratamiento de lodos residuales

Los lodos generados de las PTAR, poseen diversas composiciones las cuales dependen del origen de las AR, estos pueden ser producidos en diferentes etapas del tratamiento tanto en AR domésticas o industriales, sus características están vinculadas al procedimiento y unidades de las PTAR (Amador et al., 2015).

De acuerdo con (Metcalf & Eddy, 1995) los lodos residuales se los puede clasificar en:

- Lodos primarios: son generados en la etapa de sedimentación, en ella se remueven sólidos sedimentables ya sea de forma física o química,
- Lodos secundarios: se producen en etapas de tratamiento biológico, en estas se convierten residuos o sustratos solubles en biomasa.
- Lodos digeridos: estos lodos son provenientes de los dos tipos anteriores separados o mezclados

Las características de los lodos dependerán de su origen, tiempo de retención en las distintas etapas de la PTAR, y el tratamiento que ha recibido, en la **Tabla 2.5** se encuentra la diferente composición química típica de los lodos producidos y transportados

Tabla 2.5 Composición química de los lodos (Limón, 2013)

Concepto	Unidades	Lodo primario	Lodo primario digerido	Lodo secundario
Concentración de sólidos	% de ST	5 - 9	2 - 5	0,8 - 1,2
Sólidos volátiles	% de ST	60 - 80	30 - 60	59 - 88
Proteína	% de ST	20 - 30	15 - 20	32 - 41
Nitrógeno (N)	% de ST	1,5 - 4	1,6 - 3	2,4 - 5
Fósforo (P ₂ O ₅)	% de ST	0,8 - 2,8	1,5 - 4	2,8 - 11
Óxido de potasio (K ₂ O)	% de ST	0 - 1	0 - 3	0,5 - 0,7
Celulosa	% de ST	8 - 15	8 - 15	—
Hierro	% de ST	2 - 4	3 - 8	—
Óxido de silicio (SiO ₂)	% de ST	15 - 20	10 - 20	—
pH	u. pH	5 - 8	6,5 - 7,5	6,5 - 8
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /l	500 - 1500	2500 - 3500	580 - 1100
Ácidos orgánicos	mg HAc/l	200 - 2000	100 - 600	1100 - 1700

Concepto	Unidades	Lodo primario	Lodo primario digerido	Lodo secundario
Contenido energético	kJ ST/kg	23000 - 29000	9000 - 14000	19000- 23000

La cantidad de lodo generado, así como sus características dependen del tipo de proceso en el que se ha formado, por ejemplo, al analizar las características de un lodo primario se encontrarán mejores propiedades de sedimentación que en un lodo secundario como se detalla en la Tabla 2.6, en el trabajo de (Limón, 2013) se presenta la tabla, en la cual se detallan las características físicas de los diferentes tipos de lodos además de las cantidades producidas en las diferentes etapas de tratamiento.

Tabla 2.6 Características y cantidades típicas de lodo (Limón, 2013)

Proceso	Gravedad específica sólidos	Gravedad específica lodo	Producción de sólidos secos, kg/ 100m ³
Sedimentación primaria	1.4	1.02	110-170
Lodos activados (purga)	1.25	1.005	70-100
Filtro biológico (purga)	1.45	1.025	60-100
Aireación extendida (purga)	1.30	1.015	80-120
Laguna aireada (purga)	1.30	1.01	80-120
Filtración	1.20	1.005	12-24
Remoción algal	1.20	1.005	12-24
Sedimentación primaria con adición de cal (350-500mg/l)	1.9	1.04	240-400
Sedimentación primaria con adición de cal (800-1,600 mg/l)	2.2	1.05	600-1,300
Desnitrificación con biomasa suspendida	1.20	1.005	12-30
Filtro biológico de desbaste	1.28	1.02	-

2.1.5.1 Estabilización de lodos

El proceso de estabilización de lodos genera diferentes ventajas como reducir la masa, el volumen, facilitar el desaguado y reducir la presencia de organismos patógenos además de olores y atracción de vectores, entre los cuatro métodos más comunes de estabilización se encuentra: Digestión anaerobia, digestión aerobia, composteo y adición de cal (Limón, 2013).

a) Composteo y estabilización alcalina: Debido a la condición económica de la comunidad de San Pedro, la estrategia adecuada para el tratamiento de lodos es el composteo además de la estabilización por medio de adición de cal.

En el composteo se destinará los lodos a mejorar las condiciones de los suelos, esta estrategia requiere únicamente de mano de obra, sin embargo, se debe mencionar que se generarán olores además de transmitir patógenos. Por otro lado, la adición de cal no requiere de inversiones económicas y representa mayor facilidad en su manejo

2.1.5.2 Normativa de cumplimiento para lodos residuales y biosólidos

Regular el correcto manejo de los sólidos es un objetivo de diferentes países a nivel mundial, estas regulaciones dependen de varias consideraciones las cuales varían en función del país en el que se encuentre, en la Tabla 2.7

Se realiza una comparación de los límites máximos permisibles de metales pesados en lodos de acuerdo a diferentes países y distintas normativas.

Tabla 2.7 Límites máximos permisibles de metales pesados en lodos

Metal	Chile ¹		UE ²		U.S.E.P.A ³			Australia 4	
	Suelos aptitud frutal y/o forestal	Suelos degradados	Suelos pH<7	Suelos pH>7	Concentración	Tasa anual	Carga acumulada	Lodo C1	Lodo C2
	Mg kg-1 MS		mg kg-1 MS		mg kg-1 MS	kg ha-1 yr-1	kg ha-1	mg kg-1	
As	20	40	n.n ⁵	n.n	75	2	41	20	60
Cd	8	40	20	40	85	1,9	39	3	20
Cu	1000	1200	100	1750	4300	75	1500	100	2500
Hg	10	20	16	25	840	15	300	1	15
Ni	80	420	300	400	75	0,9	18	60	270

Metal	Chile1		UE2		U.S.E.P.A3			Australia 4	
	Suelos aptitud frutal y/o forestal	Suelos degradados	Suelos pH<7	Suelos pH>7	Concentración	Tasa anual	Carga acumulada	Lodo C1	Lodo C2
	Mg kg-1 MS		mg kg-1 MS		mg kg-1 MS	kg ha-1 yr-1	kg ha-1	mg kg-1	
Pb	300	400	750	1200	420	21	420	150	420
Se	50	100	n.n	n.n	100	5	100	3	50
Zn	2000	2800	2500	4000	7500	140	2800	200	2500
Cr	n.n	n.n	1000	1500	3000	150	3000	100	500
Mo	n.n	n.n	n.n	n.n	57	0,85	17	n.n	n.n

Además, según la norma mexicana (Nom-004-SEMARNAT, 2002) los biosólidos (productos generados luego del tratamiento de lodos) se clasifican en excelente y bueno en función de la concentración de metales pesados Tabla 2.8.

Adicionalmente se encuentra una segunda clasificación en A, B y C de acuerdo a la cantidad de patógenos y parásitos presentes **Tabla 2.9**

Tabla 2.8 Límites máximos tolerables en el contenido de metales pesados en biosólidos (Nom-004-SEMARNAT, 2002)

CONTAMINANTE	EXCELENTES Mg/kg en base seca	BUENOS mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Tabla 2.9 Límites máximos tolerables en el contenido de patógenos y parásitos en biosólidos (Nom-004-SEMARNAT, 2002)

CLASE	INDICADOR BACTERIOLOGICO DE CONTAMINACIÓN	PATOGENOS	PARASITOS
	Coliforme fecales NMP/G en base seca	Salmonella spp NMP/g base seca	Huevos de helmintos/g de en base seca
A	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 1 (a)
B	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2000000	Menor de 300	Menor de 35

Finalmente, estos biosólidos de acuerdo a su clasificación de la Tabla 2.8 y Tabla 2.9 y considerándose un contenido de humedad de hasta el 85% podrán ser aprovechados de diferentes formas de acuerdo a lo indicado en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10 Estrategias de aprovechamiento de biosólidos (Nom-004-SEMARNAT, 2002)

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
EXCELENTE	A	- Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. - Los establecidos para clase A y C
EXCELENTE-BUENO	B	- Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. - Los establecidos para clase C
EXCELENTE BUENO	C	- Usos forestales - Mejoramiento de suelo - Usos agrícolas

2.1.5.3 Lecho de secado de lodos

Los lechos de secado de lodos Figura 2.7 son sistemas pasivos empleados en las PTAR para la deshidratación de lodos estabilizados. Consisten en filtros con profundidades pequeñas, compuestos por capas de arena y grava, con un sistema de drenaje subyacente que permite la evacuación del agua separada del lodo. El proceso de secado se basa en la combinación de drenaje gravitacional y evaporación superficial, facilitando la reducción del contenido de humedad de los lodos reduciendo su volumen hasta un 50% (Cota & Ponce Carlos, 2008). El proceso de secado se basa en 2 principios:

- Percolación del lixiviado a través de los áridos.
- Proceso de la evaporación esto separa la fracción de agua ligada repartidos en un 50% a 80% por drenaje y de 20 a 50% por evaporación.

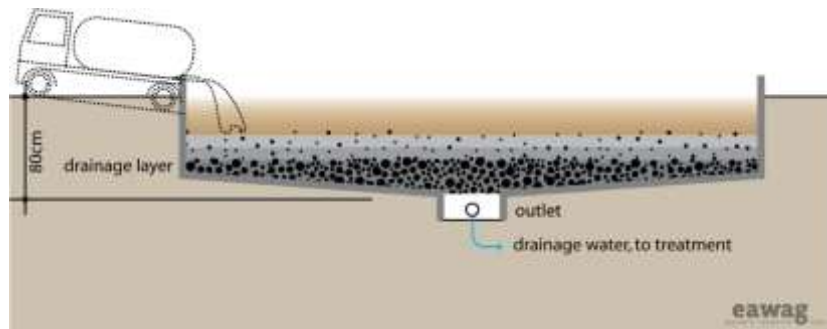


Figura 2.7 Esquema lecho de secado de lodos (Dodane & Ronteltap, 2014)

El dimensionamiento de los lechos de secado de lodos en una PTAR de acuerdo con (Dodane & Ronteltap, 2014) depende de varios factores clave:

- Cantidad de lodos a tratar por unidad de tiempo
- Espesor de las capas de lodo aplicadas
- Tasa de carga permisible

Adicionalmente el autor (Romero, 2000) propone tablas con configuraciones típicas para el dimensionamiento de estas unidades Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Criterios de diseño de un lecho de secado según (Romero, 2000)

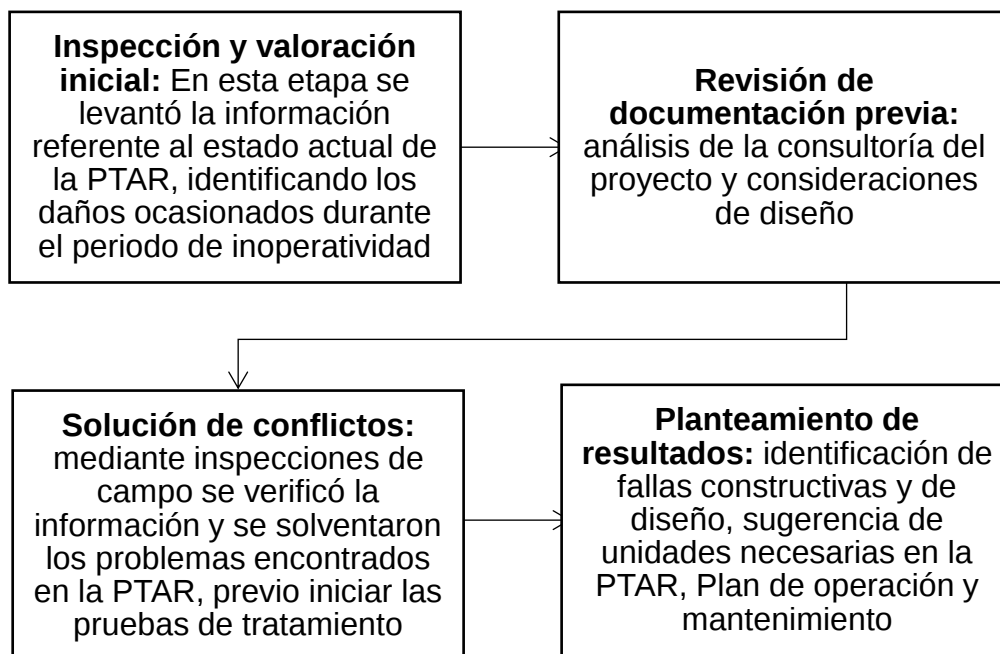
Características	Criterio
Área requerida per cápita	
Lodo primario	0.09 m ² /c
Lodo primario y filtro percolador	0.15 m ² /c
Lodo primario y lodos activados	0,28 m ² /c
Lodo precipitado químicamente	0,18 m ² /c
Otros lodos	0,1-0,25 m ² /c
Carga de sólidos secos	
Lodo primario	134 kg/m ² *año
Lodo primario y filtro percolador	110 kg/m ² *año
Lodo primario y lodos activados	73 kg/m ² *año
Lodo precipitado químicamente	110 kg/m ² *año
Altura sobre la arena	0.5-0.9 m
Diámetro tubería de drenaje principal	>0.1
Pendiente de la tubería de drenaje principal	>1%
Distancia entre drenajes principales	2.5-6m

Características	Criterio
Distancia entre tuberías laterales de drenaje	2.5-3m
Espesor de grava	20-46 cm
Tamaño de grava	3-25mm
Profundidad de arena	20-46cm
Coeficiente de uniformidad de la arena	>4
Tamaño efectivo de la arena	0.3-0.75mm
Ancho del lecho para limpieza manual	7,5m
Longitud del lecho de secado	<60m
Decantadores	Se recomienda sobre el perímetro
Placa de salpicamiento	0.9 x 0.9 x 0,1 para control de erosión
Rampa de acceso en concreto	A lo largo del eje central
Cobertura	En plástico reforzado con fibra de vidrio
Profundidad de aplicación	20-40cm. Generalmente debe producir una carga óptima de 10 a 15 kg/m ²
Operación	Para remoción manual la pasta debe contener un 30 a 40 % de sólidos. Se puede palear con rastrillo tipo pala con varias puntas separadas 2,5 cm entre sí
Control	Para control de moscas se atacan con larvas con bórax y borato de calcio, los cuales no son peligrosos para el hombre ni para animales domésticos, rociando el lodo, especialmente entre las grietas

2.2 Marco metodológico

El presente proyecto de titulación busca atender la necesidad de brindar un procedimiento adecuado para la puesta en marcha de la PTAR de la comunidad de San Pedro de la parroquia Pindilig, mediante un enfoque técnico - operativo en el cual se evaluaron las condiciones actuales / iniciales de la planta y en base a estas se propuso una metodología para iniciar su funcionamiento, además de estrategias de mantenimiento y técnicas de operación adecuadas.

Las actividades desarrolladas para alcanzar con este objetivo englobaron:



2.2.1 Trabajo de campo

Durante el trabajo en campo se realizaron diferentes visitas a la PTAR, trabajando en coordinación con el GAD parroquial rural de Pindilig y la Junta de Agua de la comunidad de San Pedro, durante estas sesiones la comunidad mantuvo gran interés en recuperar esta unidad de tratamiento y lograr un proceso adecuado de depuración de AR que no comprometa el ecosistema ni afecte sus fuentes hídricas.

Con ayuda de la población y mingas de limpieza, se realizaron los trabajos relacionados con el desbroce de la vegetación existente así como también, la limpieza de cajas y pozos taponadas por la falta de mantenimiento de esta unidad de tratamiento.

Mediante los datos obtenidos de la consultoría del proyecto además de un levantamiento topográfico de la PTAR, fue posible evaluar las dimensiones de las unidades previo a realizar una prueba de funcionamiento, por medio de esta prueba se pudo verificar el estado real de las estructuras y que acciones correctivas se deberán tomar previo a una puesta en marcha.

2.2.2 Trabajo de laboratorio o gabinete

Durante el trabajo en campo se identificó la necesidad de desarrollar ensayos de caracterización de las aguas residuales para así conocer la calidad de agua al ingreso de la PTAR y poder definir que unidades se requiere para lograr una remoción adecuada de contaminantes como se aprecia en la Figura 2.8.



Figura 2.8 Muestras de AR

El material filtrante considerado en la consultoría se caracteriza por ser áridos distribuidos en tres diferentes capas, la primera de ellas se encuentra en el fondo de la unidad y se compone de cantos rodados de 4", la segunda capa corresponde a aproximadamente 20cm de gravas de 2" y finalmente la última capa está compuesta por gravas de 1" en un espesor de 1.4m como lo indica la Figura 2.8.

Para verificar el material colocado se extrajo una muestra de cada capa para realizar un ensayo granulométrico la primera muestra se extrajo a una profundidad de -0.50m correspondiente a la capa 3, para la capa 2 se extrajo la muestra a 1.50m, no fue posible extraer muestras de la primera capa ya, esta capa sirve como soporte para evitar que las gravas más pequeñas caigan atreves del falso fondo y genere obstrucciones en las conducciones de drenaje de la PTAR.

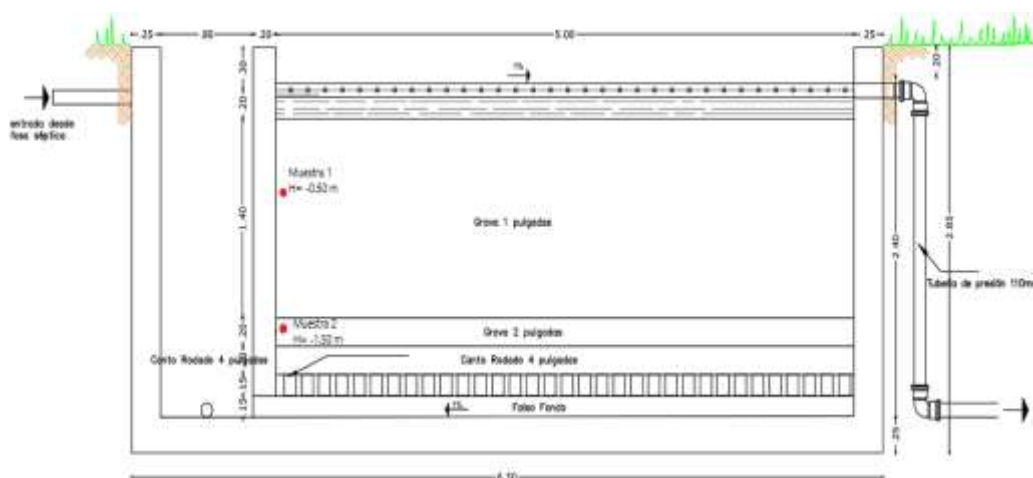


Figura 2.9 Muestras de material filtrante

2.2.3 Diseño de unidades faltantes

Una vez concluida la evaluación y valoración inicial se han identificado diferentes problemáticas en la PTAR, por lo que se realiza las siguientes sugerencias de implementación a futuro las cuales se encuentran esquematizadas en la Figura 2.10

- Implementar una unidad de rejilla y desarenado, (color verde) esta unidad permitirá extraer los lodos y solidos transportados por el alcantarillado, para añadirla se requiere reorientar la conducción a través de la cual ingresa el AR a la planta.

El recorrido actual (línea roja) transporta el AR hasta una caja de ingreso, esta caja no posee las dimensiones adecuadas para permitir el paso normal del agua hacia la fosa séptica, por lo que se requiere una nueva conducción (línea verde) la cual llegue a una unidad de rejilla y desarenador.

- Los lodos procedentes de las diferentes etapas de tratamiento actualmente no cuentan con un lugar para desarrollar su estabilización por ello se requiere de un lecho de secado de lodos (color azul) esta unidad deberá estar conectada a la fosa séptica con una pendiente adecuada para garantizar el desagüe eficiente.
- La constante caída de material vegetal, insectos e incluso animales al falso fondo se puede solventar colocando tapas con sus respectivas perforaciones para garantizar el flujo de aire en su interior.
- El taponamiento de la zona de salida se puede solventar con mantenimientos constantes, sin embargo, también se sugiere la implementación de un cabezal (punto rojo), el cual proteja esta tubería del crecimiento de la vegetación.



Figura 2.10 Propuesta de unidades faltantes

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 Valoración de estado inicial

Durante la segunda semana del mes de noviembre de 2024 se realizó una inspección a las instalaciones de la PTAR, en la cual se constató el estado de las unidades que se presenta en la Figura 3.1, además se mantuvo una reunión con la presidenta del GAD parroquial de Pindilig, en esta reunión se pudo evidenciar el deterioro de la planta debido a su falta de funcionamiento obteniendo los siguientes hallazgos.



Figura 3.1 Estado inicial de la PTAR

- El ingreso a la PTAR se encontraba bloqueado, desde el final de su construcción no se encargó a ninguna persona su mantenimiento.
- La fosa séptica se encontraba cubierta de vegetación, en el caso del filtro si bien en la consultoría se propuso como filtro anaerobio de flujo ascendente, se encontró un filtro aerobio.
- No fue posible localizar el área para secado de lodos mencionada en la consultoría.

- Existe variaciones en la ubicación de los pozos los cuales no fueron inspeccionados debido a que sus tapas se encontraban fuertemente consolidadas.

3.1.1.1 Revisión de documentación previa

Las dimensiones presentadas por el consultor ilustradas en la Tabla 1.2 fueron recalculadas, no existió variación entre estas, por lo que a continuación se constataron los datos de diseño con las características reales de la construcción, en este proceso se incluyó la toma de dimensiones de las unidades (fosa séptica y filtro aerobio) sin encontrar variaciones.

3.1.1.2 Solución de conflictos

En una segunda inspección se verificó las dimensiones del proyecto, además se identificaron las afecciones ocasionadas por la inoperatividad de la PTAR, para este proceso se destaparon con 36 horas de anticipación tanto la fosa séptica, los pozos y la caja de ingreso para garantizar un periodo eficiente de aireación, se encontró los siguientes resultados:

- La caja de registro inicial cuenta con dimensiones 60cm x 60 cm x 70cm, como se aprecia en la Figura 3.2, esta acumulación de sólidos impide el ingreso de las aguas residuales a la fosa séptica por lo que funciona los pozos destinados para excesos conduciendo las aguas residuales de forma directa para el río Dudas.



Figura 3.2 Acumulación de sólidos en caja de ingreso

- La fosa séptica se encuentra con agua acumulada, sin embargo, debido al déficit de aguas residuales (ocasionado por el taponamiento de la caja de ingreso) no se alcanza la cota necesaria para continuar el funcionamiento del sistema, como se puede apreciar en la Figura 3.3.



Figura 3.3 Fosa séptica sin cota de funcionamiento

- En la Figura 3.4 se aprecia los pozos internos de la PTAR, el primero de ellos si mantiene un flujo constante de AR, sin embargo, los siguientes se encuentran parcialmente taponados.



Figura 3.4 Estado de pozos internos

- No se localizó el punto de salida así que se realiza un recorrido por la ribera del río identificando una zona que presenta humedad, además de fuertes olores por lo que se deduce que en ese punto se encuentra la salida de las AR, esta salida se taponó parcialmente por la falta de mantenimientos, entonces el agua se infiltraba en el suelo generando un punto de alta contaminación Figura 3.5. Esta salida fue liberada y el AR acumulada tanto en los pozos como en el ingreso al filtro fue evacuada Figura 3.6.



Figura 3.5 Salida de PTAR taponada

- Una vez completado el drenaje de la planta se observó en la zona de ingreso al falso fondo del filtro la acumulación de vegetación, insectos muertos, arenas, entre otros distintos contaminantes que pudiesen taponar el filtro en caso de retomarse su operación, por ello se planifica una nueva limpieza.



Figura 3.6 Ingreso a falso fondo

3.1.2 Resultados de laboratorio

3.1.2.1 Calidad de agua

El análisis de laboratorio es un factor fundamental para el diseño y optimización de plantas de tratamiento, estas pruebas permiten caracterizar las propiedades fisicoquímicas y biológicas de las AR lo cual es esencial para determinar un sistema de tratamiento eficiente, en la Tabla 3.1, se observan los resultados obtenidos de la caracterización de AR, realizada en el ingreso de la PTAR de la comunidad de San Pedro. Como se mencionó anteriormente un análisis de calidad de agua permite tomar decisiones acertadas de acuerdo con las estructuras que compondrán la PTAR, en este

contexto se puede observar que los valores que sobrepasan la normativa son: Coliformes fecales NMP, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Nitrógeno total Kjeldahl.

Tabla 3.1 Resultados de ensayos de caracterización de AR

AA	PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDADES	RESULTADO	VALORES NORMA	CUMPLIMIENTO	+/- %U**
1	Aceites y Grasas	AAA-PE-A001/ SM 5520C	mg/L	18,5	30	CUMPLE	32,20%
1	Alcalinidad Total	AAA-PE-A040 / SM 2320B	mg/L	386,8			22,10%
1	Coliformes Fecales NMP	AAA-PE-A101 / SM 9323B	NMP/100mL	>2419,6	2000	NO CUMPLE	13,30%
1	Coliformes Totales NMP	AAA-PE-A101 / SM 9323B	NMP/100mL	>2419,6		NO CUMPLE	NA
1	Demanda Bioquímica de Oxígeno 5	AAA-PE-A010 / SM 5210D	mg/L	186	100	NO CUMPLE	23,10%
1	Demanda Química de Oxígeno	AAA-PE-A011 / SM 5220 C y D	mg/L	298	200	NO CUMPLE	8,80%
1	Fósforo Total	AAA-PE-A019 / SM 4500-P C.	mg/L	3,7	10	CUMPLE	13,40%
1	Nitrógeno Amoniacal	AAA-PE-A026 / SM 4500 NH3 F/ HACH 8155	mg/L	0,09	30	CUMPLE	23,80%

AA	PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDADES	RESULTADO	VALORES NORMA	CUMPLIMIENTO	+/- %U**
1	Nitrógeno Total Kjeldahl	AAA-PE-A031 / SM 4500 N org C	mg/L	85	50	NO CUMPLE	13,50%
1	Sólido Totales	AAA-PE-A035 / SM 2540 B	mg/L	844	1600	CUMPLE	3,20%
4	Sólidos Volátiles Totales	SM 2540	mg/L	548			NA

Si bien inicialmente se había concebido la probabilidad de implementar una unidad de desarenado, una vez que se cuenta con los resultados de laboratorio esta estrategia deja de ser adecuada. En este sentido el pre tratamiento que se recomienda es la implementación de una rejilla que permita retener basura y elementos de gran tamaño que puedan generar obstrucciones en las tuberías.

- **Relación entre DQO y DBO₅**

La relación entre la Demanda Química de Oxígeno y la Demanda Bioquímica de Oxígeno, es un indicador crucial para evaluar la composición de la materia orgánica del AR, además de representar un mecanismo para medir la biodegradabilidad.

De acuerdo con (Cisterna, 2018) la DQO, corresponde a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar de forma completa mediante mecanismos químicos los compuestos orgánicos en CO₂ y Agua, por otro lado, la DBO₅ representa la cantidad de oxígeno empleado por los microorganismos para metabolizar los compuestos orgánicos degradables biológicamente a 20°C.

El grado de biodegradación de acuerdo con la relación DQO/DBO₅ se representa en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Índice de degradación (Rodríguez, 2015)

DQO / DBO	Descripción
0 a 2.5	Contaminantes muy biodegradables, típica de AR domésticas
2,5 a 5	Contaminantes degradables
Mayor a 5	Poco degradable

En este contexto de acuerdo a la caracterización de aguas realizada en la PTAR de San Pedro se obtiene el siguiente índice de biodegradabilidad mediante la Ecuación 3.1:

$$IB = \frac{DQO}{DBO_5} \quad 3.1$$

Donde:

$$\frac{DQO}{DBO_5} = \frac{298}{186} = 1.60$$

El tratamiento seleccionado para esta PTAR es un tratamiento biológico ya que sus AR contienen una proporción significativa de materia orgánica biodegradable, por ello se ha seleccionado las estrategias de fosa séptica y un filtro aerobio de flujo ascendente, sin embargo; diferentes autores (González León et al., 2022), (Sanz, 2002), (Romero, 2000) mencionan que estas unidades poseen altas eficiencias para la remoción de DBO₅, DQO y SST, sin embargo no se menciona como estrategias útiles para tratar contaminantes microbiológicos y nutrientes.

Para tratar estos contaminantes (Nava et al., 2023) sugiere emplear Humedales Artificiales de flujo subsuperficial, estas unidades de acuerdo con el autor pueden eliminar una gran cantidad de contaminantes entre los cuales se encuentran nutrientes (nitrógeno y fósforo), orgánicos, sólidos, metales y coliformes. En estas unidades se permite que el AR previamente tratada, fluya por un medio filtrante en el que crece vegetación las cuales participan el proceso de degradación de contaminantes.

3.1.2.2 Ensayos granulométricos

De acuerdo con la recomendación de (Montiel, 2001), el filtro biológico deberá formarse por un medio de alta permeabilidad generalmente de piedras con tamaños que oscilan entre los 2.5 a 10cm (25mm a 100mm), agregados de menor diámetro no proporcionan una porosidad adecuada mientras que partículas de mayor tamaño generan un área superficial insuficiente para el crecimiento biológico.

Durante la evaluación del estado de la PTAR de la comunidad de San Pedro, se extrajo dos muestras del medio filtrante, la primera de ellas a una profundidad de 0,50m, y la segunda a una profundidad de 1.50m. Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 3.3 y Tabla 3.4.

Tabla 3.3 Granulometría capa 1 a 0.50m de profundidad

TAMIZ N°	ABERTURA	PESO RET.	RET. ACUM.	%	%	% ESPECIFICACIONES	
	mm	gramos	gramos	RETENIDO	PASA	SUPERIOR	INFERIOR
3"	76,2	0	0	0	100		
2 1/2"	63,5	0	0	0	100		
2"	50,8	0	0	0	100		
1 1/2"	38,1	0	0	0	100	100	100
1"	25,4	0	0	0	100	100	95
3/4"	19,1	1688	1688	27	73		
1/2"	12,7	2455	4143	67	33	60	25
3/8"	9,52	806,5	4949,5	81	19		
N°4	4,76	946	5895,5	96	4	10	0
FONDO	-----	247	6142,5	100	0		

Tabla 3.4 Granulometría capa 2 a 1.50m de profundidad

TAMIZ N°	ABERTURA	PESO RET.	RET. ACUM.	%	%	% ESPECIFICACIONES	
	mm	gramos	gramos	RETENIDO	PASA	SUPERIOR	INFERIOR
3"	76,2	0	0	0	100		
2 1/2"	63,5	0	0	0	100	100	100
2"	50,8	0	0	0	100	100	95
1 1/2"	38,1	104	104	1,77	98		
1"	25,4	1091,5	1195,5	20,38	80	70	35
3/4"	19,1	260,5	1456	25	75		
1/2"	12,7	2219	3675	63	37	30	10
3/8"	9,52	731,5	4406,5	75	25		
N°4	4,76	1050	5456,5	93	7	5	0
FONDO	-----	409	5866,5	100	0		

De acuerdo con la granulometría presentada en la Tabla 3.3 el medio filtrante encontrado en la PTAR, no corresponde con el diseño presentado por el consultor ya que no tiene gravas de 1" y apenas un 27% del material es retenido por el tamiz de 3/4".

De la misma forma la Tabla 3.4 muestra la granulometría de la segunda capa del filtro, en ella se puede apreciar que no existe agregados de 2" y únicamente un porcentaje cercano al 2 % es retenido por el tamiz de 1 ½".

3.1.3 Pruebas de funcionamiento de PTAR

En coordinación con la comunidad fue posible realizar las actividades necesarias para corregir la situación de abandono de esta unidad de depuración, para ello luego de la limpieza de las unidades colmatadas se permitió el ingreso de las aguas residuales en la línea de tratamiento como se aprecia en la Figura 3.7.



Figura 3.7 Pruebas de funcionamiento de la PTAR

- **Fosa séptica**

El funcionamiento de la fosa séptica no registró detalles constructivos a nivel superficial al momento de iniciar sus pruebas de funcionamiento, sin embargo, es importante destacar que esta unidad de acuerdo con los planos presentados por la consultoría del proyecto carece de una estrategia adecuada para su limpieza, no cuenta con una pendiente que facilite el arrastre de los sólidos como lo detallan diferentes autores (Romero, 2000) ilustrada en la Figura 3.8 y (OPS, 2005) representada en la Figura 3.9.

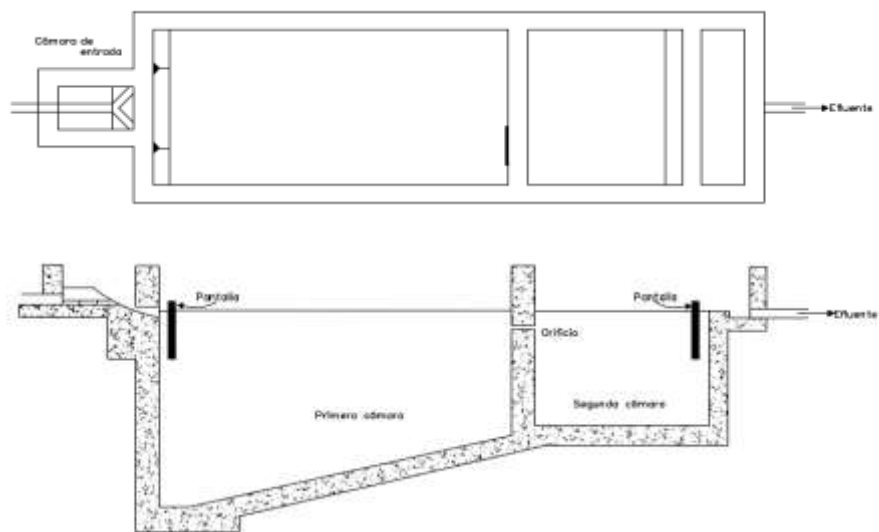


Figura 3.8 Esquema fosa séptica con pendiente de fondo según (Romero, 2000)

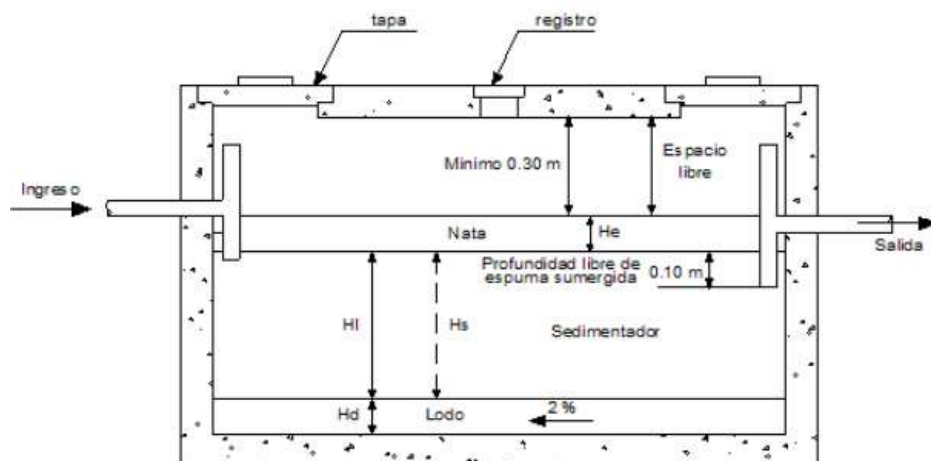


Figura 3.9 Esquema fosa séptica con pendiente de fondo según (OPS, 2005)

A continuación, se presenta una metodología para evaluar el volumen de la unidad sugerido por (Romero, 2000) en función del volumen de acumulación de lodos y el periodo de limpieza.

Para determinar el intervalo de limpieza de los lodos, además de recomendarse un tiempo de retención de entre uno y tres días, se puede establecer la frecuencia de retiro de lodos considerando una capacidad para lodos equivalente a un tercio de la capacidad total del tanque y una tasa de acumulación de $0,04 \text{ m}^3$ por persona servida al año. Las ecuaciones propuestas por son las siguientes:

$$C = 0.18 * P + 2 \quad 3.2$$

$$C = 1.5 * Q \quad 3.3$$

$$C = 4.26 + 0.75 * Q1 \quad 3.4$$

Donde:

C: Capacidad del tanque en m³

P: Población servida

Q: caudal de AR menores a 5,7 m³/día

Q1: caudal de AR entre 5,7 a 380 m³/día

De acuerdo con el caudal reportado en estudios previos se evalúa la capacidad del tanque con la Ecuación 3.4:

$$Q = 0.195 \text{ l/s} = 16.85 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$C = 4.26 + 0.75 * (16.85) = 16.90 \text{ m}^3$$

El tanque construido es de 17.64 m³ por lo que cumple con la metodología planteada por (Romero, 2000).

Volumen estimado de lodos:

$$P = \frac{Vt}{3 * Pf * 0.04 \text{ m}^3/\text{año}} \quad 3.5$$

Donde:

P: Periodo de limpieza en años

Vt: Volumen del tanque

Pf: Población servida

De la Ecuación 3.5 se obtiene que el periodo de desenlode es de: 0.52 años es decir se requiere una limpieza del tanque de por lo menos dos veces al año para evitar una acumulación excesiva de lodos.

De igual manera la limpieza de natas debe hacerse cuando la capa se extienda a menos de 7.5 cm desde el borde interior de la pantalla o unidad de salida, o cuando el manto de lodos posea un espesor mayor al 40% de la profundidad del líquido en el tanque (Romero, 2000). Para realizar una limpieza se debe considerar un largo periodo de ventilación ya que los gases son altamente tóxicos, se recomienda el uso de equipos de bombeo o camiones de limpieza.

- **Filtro aerobio**

Durante el desarrollo del presente proyecto se ha mencionado a esta unidad como un **“Filtro aerobio”** ya que no se ha impedido su contacto con el oxígeno, sin embargo, durante la revisión bibliográfica, y de la consultoría del proyecto es posible suponer que existió un error de parte del equipo consultor.

En la pag 32 del documento (CELEC, 2019) luego de realizar una evaluación de tres posibles opciones de tratamiento a implementarse se concluye como opción más viable: *“Fosa séptica – Filtro anaerobio – lecho de secado de lodos”*. Posteriormente en la pag 35 se encuentra el subcapítulo *“7.6.2 Filtro Anaerobio de flujo ascendente”* sin embargo, para la pag 36 del documento se cambia su concepción y se diseña como un filtro aerobio.

En la Figura 3.10 se encuentra un esquema de Filtro Anaerobio de flujo ascendente (FAFA) el cual presenta una distribución y composición similar a la que se encuentra en campo por lo que se deduce que fue la unidad que se presumía colocar en la PTAR, sin embargo, no se construyó una tapa para generar el proceso anaerobio

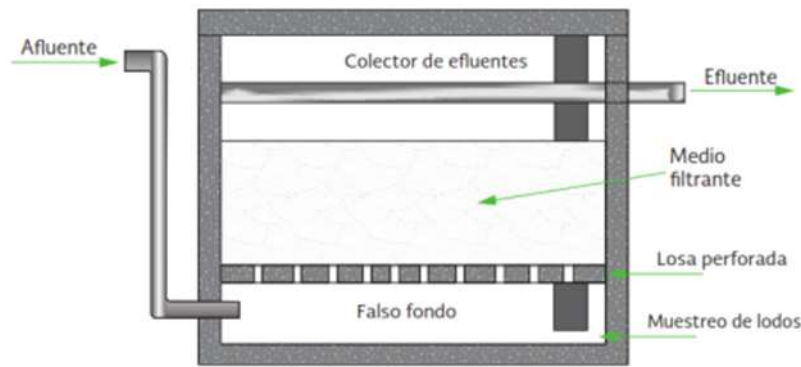


Figura 3.10 Esquema FAFA (CONAGUA, 2015)

Durante la inspección del filtro de la planta de tratamiento, se identificaron grietas, filtraciones y perforaciones en su estructura, atribuibles a deficiencias en su construcción las cuales se presentan a continuación:

- Grietas en las paredes como se aprecia en la
- Mala conexión con la tubería perforada de salida lo que genera una constante salida de las AR hacia el terreno de la PTAR
- Fugas en las caras laterales del filtro ascendente



Figura 3.11 Grietas en el costado de la unidad



Figura 3.12 Filtraciones en la tubería de salida



Figura 3.13 Fugas en el filtro biológico

Las irregularidades encontradas ocasionaron la filtración de AR hacia el terreno circundante, esta situación obligó a suspender las pruebas de funcionamiento para evitar daños mayores. De haberse permitido la operación del filtro en estas condiciones, se habría generado un foco de infección, representando un riesgo significativo para la salud pública y el medio ambiente.

Por la situación descrita anteriormente también fue imposible tomar muestras del efluente y lograr evaluar la eficiencia de las unidades, adicionalmente se recomienda colocar una tapa en esta unidad para lograr un proceso de tratamiento en condiciones anaerobias.

3.1.4 Unidades necesarias a implementar

La PTAR requiere de la implementación de mejoras para prevenir futuras paralizaciones, las unidades que se han identificado como posibles mejoras en la unidad de tratamiento son:

- **Implantación de una rejilla**

Como se ha mencionado con anterioridad, gracias a los resultados de laboratorio se ha determinado que no es necesario la implementación de una unidad de desarenado ya que el contenido de sólidos de las AR cumple con la normativa necesaria para la descarga en cuerpos de agua dulce, sin embargo, si se requiere una rejilla que retenga los sólidos de gran tamaño que pudiesen taponar las unidades o conexiones entre ellas para la cual se emplea la ecuación de Kirshmer Ecuación 2.4.

Se emplearán barras circulares de 1cm de diámetro con inclinación de 45° y un espaciamiento de 2cm, debido a la posible variación del caudal a mediar que se conecten un mayor número de beneficiarios se tomará como velocidad de aproximación 0.6 m/s recomendada para alcantarillados.

$$h_v = \frac{V^2}{2 * g} = \frac{0.6^2}{2 * (9,81)} = 0.018 \text{ m}$$

$$H = 1.79 * \left(\frac{0.01}{0.02} \right)^{\frac{4}{3}} * 0.018 * \sin(45) = 0.9 \text{ cm}$$

Debido a la topografía se requiere ampliar la caja de ingreso a fin de ubicar esta rejilla en la misma caja y no requerir de la construcción de un canal de aproximación

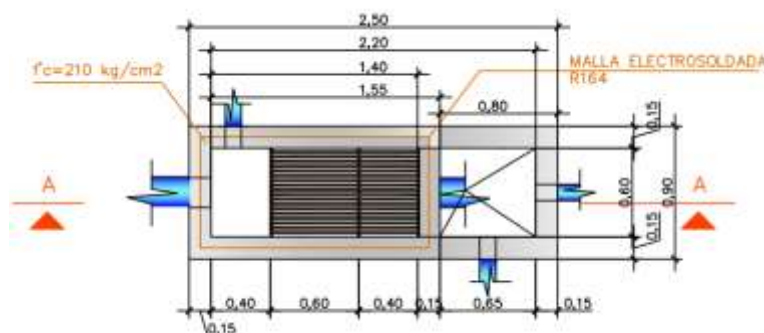


Figura 3.14 Rejilla de control de sólidos

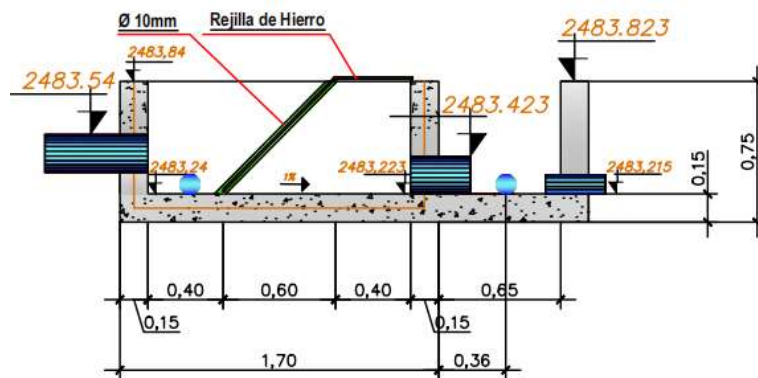


Figura 3.15 Corte A_A rejilla de control de sólidos

- **Lecho de secado de lodo**

Durante las diferentes etapas del tratamiento se generan lodos los cuales cada cierto tiempo deben ser extraídos de las diferentes unidades de tratamiento, como se detalló en secciones previas, estos lodos requieren pasar por un proceso de desaguado además de una estabilización previo a su disposición final,

En este contexto se requiere una unidad de secado de lodos la cual deberá contar con la pendiente adecuada para dirigir los lixiviados al interior de la fosa séptica mientras que los lodos puedan ser tratados para emplearlos ya sea como abono para mejorar los terrenos o para enviarlo a zonas de relleno sanitario.

Como se mencionó anteriormente es posible estimar el volumen de lodos considerando una generación de 0.04 m³ de lodo por persona al año, entonces si se emplea una población final de 281 personas y un tiempo de desenlode de 6 meses, mediante la

$$VL = \frac{Pf \cdot 0.04}{2} \quad 3.6$$

$$VL = \frac{281 \cdot 0.04}{2} = 5.62 \text{ m}^3$$

De acuerdo con las consideraciones de la Tabla 2.11 se colocará una altura de lodos sobre la arena de 0.50m, además se empleará 0.30m de grava y 0.20m de arena, teniendo un lecho de secado de las siguientes condiciones:

$$Alecho = \frac{5.62}{0.50} = 11.24 \text{ m}^2$$

Con dimensiones de 3.25m de largo por 3.50m de ancho se tendría:

$$AF = 3.25\text{m} \cdot 3.50\text{m} = 11.38\text{m}^2 > 11.24 \text{ m}^2$$

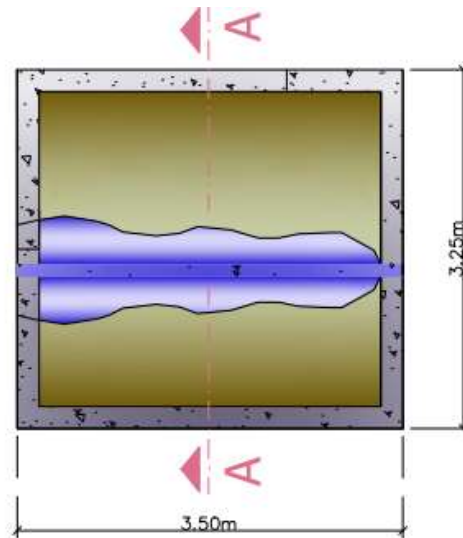


Figura 3.16 Propuesta lecho de secado de lodos

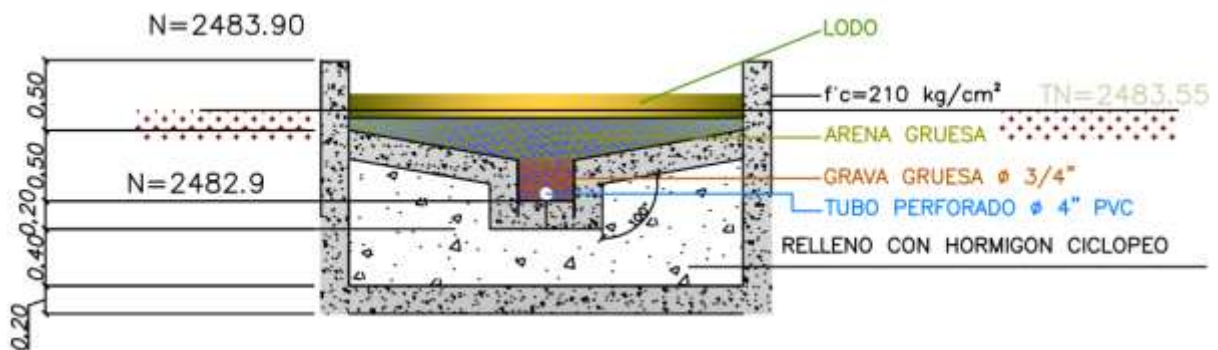


Figura 3.17 Corte de A-A del lecho de secado de lodos

- **Humedad artificial de flujo subsuperficial**

Los humedales presentan cualidades y funciones que benefician al ecosistema, se diseñan especialmente para tratar AR mediante procesos físicos, químicos y biológicos, en estos procesos se realiza la degradación de materia orgánica. Entre las ventajas adicionales se destaca sus reducidos costos de operación, estrategias de operación y mantenimientos de baja dificultad (Rivera, 2015)

Datos iniciales:

Las variables climáticas se tomaron del estudio realizado por (CELEC, 2019):

Temperatura media del mes más caluroso= 31.5 °C

Temperatura media del mes más frío= 6 °C

Constante cinética= $K_{V20} = 1.104 d^{-1}$

Planta seleccionada= Carrizo

Profundidad de la raíz= $y_r=0.6m$

Separación entre planta= $d=1m$

Propuesta de profundidad en zona inicial= $d_o=0.6m$

Propuesta de profundidad en zona de final de tratamiento= $d_f=0.6m$

Profundidad del lecho= $d_{wf}=0.6m$

Pérdida de carga máxima en zona inicial= $d_h=0.06m$

Pendiente del fondo del humedal= $S=0.005$

Diámetro de grava= $D_g=25mm$

Porosidad= $n=43$

Caudal: $Q=0.195 \text{ l/s} = 16.848 \text{ m}^3/\text{día}$

- Cálculo de conductividad hidráulica:

$$K_s = 12600 * D_g^{1.9} \quad 3.7$$

De aplicar la Ecuación 3.7 se obtiene

$$K_s = 71854.929 \frac{m^3}{m^2 * dia}$$

Parámetros del afluente:

$DBO_5=186 \text{ mg/l}$ - $NTK= 85\text{mg/l}$

- Parámetros esperados del efluente:

$DBO_5=30 \text{ mg/l}$ - $NTK= 50\text{mg/l}$

Se requiere evaluar el efecto de la temperatura mediante la Ecuación 2.6, empleando tanto la temperatura más calurosa y como la más fría, con estos resultados se obtendrá el área superficial (A_s) mediante la Ecuación 2.5.

$$K_{VT} = 1.04 * 1.06^{6-20} = 0.43 \text{ d}^{-1}$$
$$A_s = \frac{16.848 * (\ln(186) - \ln(30))}{0.46 * 0.6 * 0.43} = 259.015 \text{ m}^2$$

- La zona inicial de tratamiento corresponde al 30% del área mientras que la zona final representa el 70% restante teniendo como resultado:

$$A_1 = 0.30 * A_s = 77.70 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0.70 * A_s = 181.31 \text{ m}^2$$

- Para determinar el ancho W , se emplea la Ecuación 3.8 de acuerdo con la metodología de diseño sugerida por

$$W = \left(\frac{Q * A_1}{\frac{K_s}{100} * d_{wf} * d_h} \right)^{0.5} = 7.114 \text{ m} \quad 3.8$$

Con este ancho, se encuentra una pérdida de carga de $0.06m$, sin embargo, es posible utilizar uno mayor para garantizar que la perdida sea igual o menor a la sugerida.

- La Longitud inicial y final del tratamiento:

$$Li = \frac{A1}{W} = 10.92m$$

$$Lf = \frac{A2}{W} = 25.48m$$

- Longitud total del humedal:

$$Lt = Li + Lf = 36.409 m$$

Al menos, se recomiendan dos celdas de tratamiento para facilitar las actividades de operación y mantenimiento. Ahora bien, para cumplir con las recomendaciones de la relación largo-ancho (2:1 a 4:1), se propone un número de celdas (N), estas celdas pudieran estar separadas, por ejemplo, por una geomembrana.

$$N = 2$$

$$L_{celda} = \frac{Lt}{2} = 18.205 m$$

- Tiempo de retención hidráulico:

$$TRH = \frac{n * dwf}{\frac{Q}{As}} = 3.9 \text{ días} = 95.20 \text{ horas}$$

- Concentración de nitrógeno total, de acuerdo con (CONAGUA, 2019) para evaluar la concentración del efluente de un humedal subsuperficial se aplica la Ecuación:

$$NTKe = 0.52NTKa + 3.1$$

3.9

$$NTKe = 0.52(85) + 3.1 = 47.3 \text{ mg/l}$$

La concentración de NTK del efluente cumple con lo solicitado en la normativa

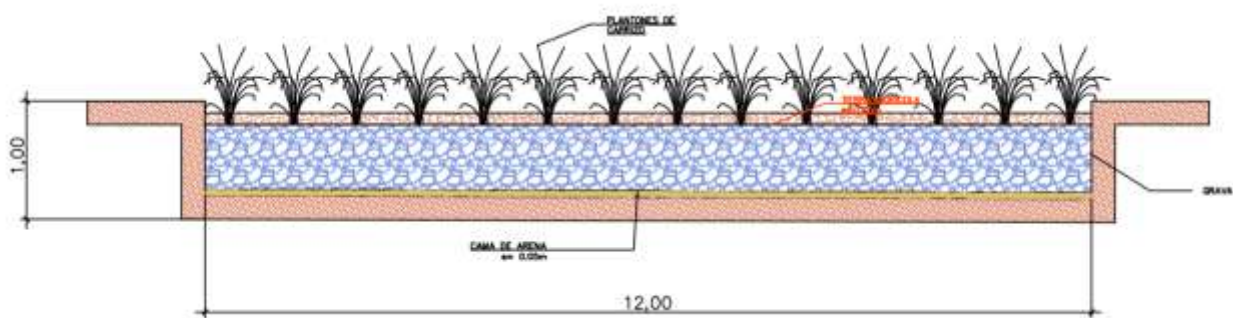


Figura 3.18 Esquema de humedal horizontal de flujo subsuperficial

- **Cabezal de salida**

Entre los principales problemas que ocasionó el taponamiento de los diferentes pozos fue la colmatación de la tubería de salida de la planta, por ello implementar un cabezal permitirá evitar que esta situación se repita. Para determinar el punto de salida de la

planta se evalúa el punto de máxima crecida que ha tenido el río Dudas (cuerpo de agua receptor).

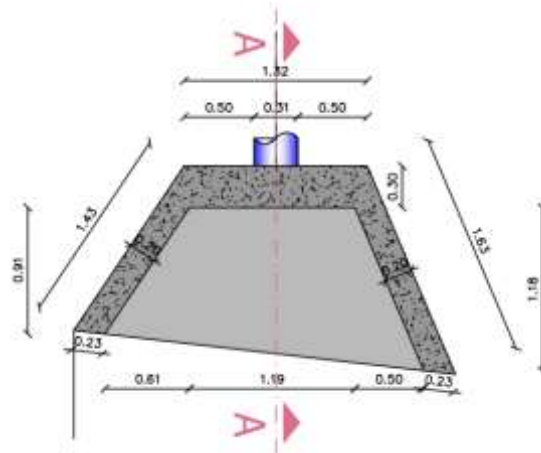


Figura 3.19 Esquema cabzal de salida

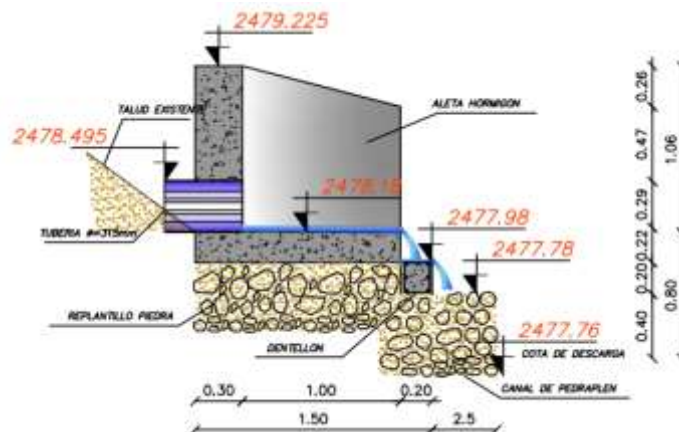


Figura 3.20 Corte A_A Cabezal de salida

Con la implementación de las unidades mencionadas anteriormente y la corrección de los errores encontrados se podrá lograr una depuración total de las AR de la comunidad de San Pedro, sin embargo, conocedores de la necesidad de la población de utilizar esta obra, se anexa al presente proyecto un manual de operación y mantenimiento tanto de las unidades existentes como de las sugeridas.

3.1.5 Metodología de puesta en marcha, operación y mantenimiento

Durante las diferentes etapas del proyecto se ha analizado cada unidad que compone esta PTAR identificando problema tanto constructivos como de diseño, los inconvenientes encontrados asociados a falta de mantenimiento del sistema como:

acumulación de maleza, taponamiento de unidades y mala configuración de válvulas han sido solucionados como requisitos para iniciar las pruebas de funcionamiento.

Los errores de diseño (falta de rejillas en la caja de ingreso, inexistencia de un lecho de secados de lodos, necesidad de tratamientos terciarios, ausencia de proceso anaerobio en el filtro, falta de zona de acumulación de lodos en la fosa séptica, no concepción de metodología de drenado de fosa, falta de cabezal para salida) requieren de una mayor inversión económica por lo que únicamente se presenta un diseño preliminar con su posible costo.

La metodología que se sugiere seguir para iniciar el funcionamiento de las unidades existentes en la PTAR considerando su situación actual es:

1. **Correcciones fundamentales:** no es posible permitir el ingreso del AR a la planta de tratamiento sin realizar los correctivos necesarios los cuales se detallan a continuación y pretenden evitar mayores perjuicios tanto ambientales como económicos.
 - a) **Impermeabilización de filtro:** las fugas identificadas y presentadas con anterioridad son un indicativo de los deficientes procesos constructivos empleados, deberán ser selladas con productos impermeabilizantes y ensayadas previo a continuar con el procedimiento de puesta en marcha.
 - b) **Reemplazo del material filtrante:** Como se pudo apreciar en los ensayos granulométricos el material colocado no cumple con las recomendaciones del consultor por lo que debe ser reemplazado por un material clasificado y colocado de acuerdo a las especificaciones detalladas con anterioridad.
 - c) **Limpieza de pozos y salida de PTAR:** Si bien para realizar las pruebas de funcionamiento ya se realizó un mantenimiento de la PTAR, es posible que nuevamente sea abandonada por lo que se sugiere realizar una nueva limpieza sobre todo de la salida de la PTAR, la cual se encontró cubierta de maleza y tierra debido a su ubicación en la orilla del río Dudas.
 - d) **Drenaje y limpieza de fosa séptica:** la fosa séptica debido a la falta de un mecanismo de drenaje actualmente tiene AR y lodos acumulados en su interior, por lo que se sugiere emplear una bomba de drenado para extraer el contenido de la fosa antes de iniciar nuevamente su funcionamiento, para la limpieza de esta unidad como se menciona en el manual de operación y mantenimiento anexo al proyecto no se debe emplear productos químicos como detergentes o jabón.

- e) **Inoculación:** En este proceso se busca introducir microorganismos activos para acelerar la descomposición de la materia orgánica y estabilizar su funcionamiento, para ello se llenará parcialmente la fosa séptica con agua proveniente del cuerpo receptor, posteriormente se agregará lodos activados recolectados de otra unidad de tratamiento la cual posee una gran cantidad de microorganismos que favorecen a la depuración, finalmente se permite el ingreso de las AR.
- f) **Manipulación de válvulas:** para esta etapa del proceso es importante basarse en el manual de operación anexo al proyecto ya que se debe mantener cerrada la válvula que drena al filtro, además se abrirá la llave que controla el efluente de la fosa séptica y se cerrará la llave que redirige este efluente a fin de lograr un paso adecuado de las AR a través de estas unidades.
- g) **Inspecciones iniciales:** Durante las primeras horas de funcionamiento se recomienda inspeccionar todas las unidades a fin de buscar nuevas fugas que ocasionen daños al suelo y medio ambiente cercano.
- h) **Inspecciones rutinarias:** Es importante inspeccionar la PTAR durante los primeros días de funcionamiento para corroborar que el proceso de tratamiento se desarrolla de forma adecuada y no se registra inconvenientes.

De acuerdo con (Romero, 2000) el periodo de puesta en marcha de un sistema de tratamiento con procesos anaerobios puede tardar de 4 a 6 meses por lo que transcurrido este tiempo es recomendable realizar nuevamente ensayos de calidad de agua en el efluente de la PTAR a fin de observar la eficiencia de las unidades. En caso de no lograrse cumplir los límites establecidos por la normativa para descarga en cuerpos de agua dulce se deberá buscar nuevas estrategias para mejorar la eficiencia o a su vez considerar el tratamiento terciario sugerido en el presente proyecto.

Entre las unidades faltantes se mencionó además una rejilla de ingreso y un lecho de secado de lodos, gestionar la incorporación de estos elementos permitirán un manejo eficiente de la PTAR ya que se limitará el ingreso a la fosa séptica de sólidos de gran tamaño con lo que se evitan posibles obstrucciones mientras que el lecho de secado es fundamental para tareas de limpieza de la PTAR.

La operación y mantenimiento del sistema se encuentra detallado en el manual anexo a la presente tesis, el cual se entregará al GAD de Pindilig una vez finalizado el proyecto.

3.2 Discusión de resultados

Todo proyecto debe orientarse a mejorar la calidad de vida de las personas de la localidad en la que será implantado, sin embargo, en el caso de la Planta de Tratamiento y Aguas residuales implantada en la comunidad de San Pedro de Pindilig esta meta no fue alcanzada.

Los resultados obtenidos en la evaluación de esta PTAR evidencian diversas deficiencias tanto en procesos constructivos como en concepciones de diseño, estos errores sumados a una nula capacitación referente a operación y mantenimiento lograron impedir el funcionamiento de esta obra generando una contaminación constante en el Río Dudas, en el cual se descargan estas AR sin ningún tipo de tratamiento.

La primera estructura de esta unidad de tratamiento es una caja de ingreso, esta caja como se apreció en la sección de evaluación inicial se encontró completamente colapsada por sólidos, no existe una rejilla que detenga materiales de gran tamaño, esta unidad de acuerdo con el autor (Talero, 2023) funciona como filtro inicial de pretratamiento para retirar materiales de grandes dimensiones que pudiesen acompañar al agua.

Posteriormente se encontró la fosa séptica, si bien a nivel superficial no se encontraron deficiencias constructivas de acuerdo con (OPS, 2005; Romero, 2000) es importante considerar una zona de acumulación de lodos o una pendiente adecuada que facilite las estrategias de mantenimiento, en el caso de los planos presentado por (CELEC, 2019) no existe esta pendiente, además no se ha considerado una estrategia para drenar la unidad por lo que se deberá emplear bombas de succión en caso de requerirse.

A continuación, se identificó un filtro aerobio; sin embargo, como se mencionó previamente es posible que haya un error de parte de la consultoría del proyecto, las condiciones observadas y la configuración de la unidad corresponden a un filtro anaerobio de flujo ascendente FAFA, según lo establecido por (CONAGUA, 2015), actualmente la unidad construida no posee una tapa lo podría afectar el funcionamiento eficiente en condiciones concebido en condiciones anaerobias.

El material filtrante colocado en el FAFA, no corresponde con el sugerido por la consultoría autores como (Mejia, 2024), (CONAGUA, 2015), (Carrilo et al., 2022), entre otros, sugieren emplear materiales para el lecho filtrante mayores a 2.5cm con el objetivo de aumentar la cantidad de poros y favorecer a la filtración de las AR, como se pudo apreciar, en los resultados granulométricos se obtiene en la capa superficial que el 100%

del material es menor a una pulgada, sugerida por el consultor, mientras que para la segunda capa, el material en su 100% es menor a las dos pulgadas sugeridas por el consultor.

La salida de la PTAR, fue encontrada completamente colapsada, esta tubería se encuentra colocada en la orilla del río Dudas sin embargo carece de todo tipo de obras de protección por lo que se taponan con facilidad sobre todo cuando el río aumenta su caudal, por ello es importante emplear constantemente estrategias de mantenimiento hasta colocar un cabezal que permita proteger esta salida de las crecientes, crecimiento de vegetación, entre otros.

Al evaluar la calidad de agua del afluente de acuerdo con la (TULSMA, 2015), se ha determinado que no es apta para descargar de forma directa a un cuerpo de agua superficial, de acuerdo con los ensayos los parámetros de DBO5, DQO, Coliformes fecales (CE) y Nitrógeno total Kjeldahl (NTK) se encuentran fuera del rango permitido por la normatividad. Por la bibliografía citada durante la sección de resultados se estima que los valores de DBO5 y DQO pueden ser removidos por las unidades que ya se encuentran implantadas en el terreno sin embargo para valores de CE y NTK, se ha diseñado un humedal de flujo subsuperficial como unidad de tratamiento terciario.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El tratamiento de aguas residuales es fundamental tanto para la conservación del medio ambiente como para la protección de la salud pública, en la evaluación realizada a la PTAR de la comunidad de San Pedro se identificaron errores constructivos y de diseño que han afectado su operatividad hasta llegar a la paralización total del funcionamiento.
- Las unidades construidas poseen deficiencias, en la fosa séptica no se consideró una estrategia adecuada para recoger los lodos, en el filtro biológico se ha empleado materiales granulares que no solo difieren con lo especificado por la consultoría, sino que además contradice las recomendaciones de varios autores por su granulometría, adicionalmente se encontraron filtraciones y fugas de gran tamaño que impiden iniciar el funcionamiento de esta PTAR.
- Al finalizar esta tesis es posible concluir que la PTAR de la comunidad de San Pedro, requiere correcciones en sus unidades antes de su puesta en marcha para lograr un funcionamiento adecuado, además, la implantación de mejoras en el diseño, acompañadas de un mantenimiento adecuado y una correcta capacitación lograrán un funcionamiento eficiente y constante. Como parte de este estudio se ha desarrollado un Plan de operación y mantenimiento el cual será anexado a la presente tesis y entregado al GAD de Pindilig para una vez culminadas las reparaciones necesarias sea implementado.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda considerar la implementación de nuevas unidades como una rejilla en el ingreso, un lecho de secado de lodos para la estabilización de los mismos, un cabezal en la salida de la planta que la proteja de taponamientos y debido a los contaminantes encontrados en el análisis de calidad se requiere un humedal de flujo subsuperficial.
- Una vez iniciado el funcionamiento de la PTAR se recomienda establecer un plan de monitoreo y mantenimiento con limpiezas periódicas e inspecciones, de la misma forma ensayar el efluente luego de un periodo de 4 a 6 meses de la puesta

en marcha permitirá conocer cómo se están adaptando los microorganismos y la eficiencia de las unidades existentes.

- La metodología de puesta en marcha sugerida así como el plan de operación y mantenimiento se basa en las unidades existentes en la PTAR así como el estado en el que se encuentran, por lo que iniciar sus reparaciones y capacitar adecuadamente al personal son factores clave para iniciar el tratamiento de las aguas residuales de la comunidad de San Pedro.

BIBLIOGRAFÍA

- Amador, A., Veliz, E., & Bataller, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 46.
- Carrilo, B., Vera, J., & Loor, J. (2022). Diseño de un filtro anaerobio de flujo ascendente para el tratamiento de aguas residuales. *Journal Ineniar*, 5(10). <https://doi.org/10.46296/ig.v5i10edespnov.0075>
- CELEC. (2019). *Alcantarillado en la comunidad de San Pedro de la parroquia Pindilig del Cantón Azogues*.
- CONAGUA. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Filtros anaerobios de flujo ascendente*. www.conagua.gob.mx
- CONAGUA. (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales: Vol. Libro 30*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. www.conagua.gob.mx
- Constantino, L., Medina, M., Beltrán, H., Cruz, J., Vázquez Rodríguez, & Mendiola, L. (2015). Diseño de fosas sépticas rectangulares mediante el uso de la herramienta FOSEP. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14, 757–765.
- Cota, A., & Ponce Carlos. (2008). Eliminación de bacterias patógenas en lodos residuales durante el secado solar. *Revsta Interancional de Contaminación Ambiental*, 24, 161–170.
- CPE-INEN. (1997). *CÓDIGO DE PRACTICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE, DISPOSICIÓN DE EXCRETAS Y RESIDUOS LÍQUIDOS EN EL ÁREA RURAL*. <https://doi.org/10.07-610>
- Dodane, P.-H., & Ronteltap, M. (2014). *Manejo de secado de lodos un enfoque sistemático para su implementación y operación* (Primera edición). IWA Publishing.
- García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos Guía Práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*.
- González León, M. V., Coronel Sacoto, D., & Matovelle Bustos, C. (2022). Determinación de la eficiencia en el uso de fosas sépticas y filtros anaerobios (Biodigestor) para el

- tratamiento de aguas residuales domésticas. *AlfaPublicaciones*, 4(2.1), 6–24. <https://doi.org/10.33262/ap.v4i2.1.191>
- Gutierrez, J. J. (2021). *Costos de inversión y beneficios del tratamiento de aguas residuales domésticas en el Municipio de Zipaquirá*. Universidad Militar Nueva Granada.
- INEC. (2021). *Estadísticas de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales*.
- Jiménez, M. A. (2008). *Propuesta de un sistema de conversión de fosas sépticas a biodigestores y evaluación termoeconómica de una planta de cogeneración que utilice biogas como combustible principal*.
- Limón, J. G. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o recurso? *Ingeniería Química*.
- Mejia, T. (2024). *Aplicación de filtros anaerobios de flujo ascendente en la tratabilidad de aguas residuales domésticas generadas en Puerto Ayora isla Santa Cruz Provincia de Galapagos*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales* (McGraw-Hill, Ed.; tercera edición).
- Montiel, J. M. (2001). *Los filtros biológicos aerobios como una alternativa para aumentar la eficiencia de las lagunas de oxidación*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Nava, J., Lango, F., Castañeda, M. del R., & Reyes, C. (2023). Remoción de contaminantes en los humedales artificiales de flujo subsuperficial: Una Revisión. *Terra Latinoamericana*, 41, 1–12. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1715>
- Nom-004-SEMARNAT. (2002). *Norma oficial mexicana protección ambiental.- lodos y biosólidos.- especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*.
- OPS. (2005). *Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización*.
- Osorio, M., Carrillo, W., Loo, X., Negrete, J., & Riera, E. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas The quality of domestic waste water A qualidade das águas residuais domésticas. *Polo Del Conocimiento*, 6, 228–245. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2360>
- PDOT. (2024). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial Azogues*.

- Peña, Y. (2021). *Análisis del funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas PTARD ubicadas en los 42 municipios del departamento del Cauca*.
- Rivera, D. A. (2015). Vista de Humedales de flujo subsuperficial como filtros de aguas residuales en Colombia. *Instituto Tecnológico de Antioquia*, 7, 99–107.
- Rodriguez, R. (2015). *Analisis de calidad del agua en el sector urbano del Malecón de Manta Provincia de Manabi*. Universidad de especialidades Espiritu Santo.
- Romero, J. A. (2000). *Tratamiento de aguas residuales teorías y principios de diseño*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ruiz, I., Antonio Álvarez, J., & Soto, M. (2014). El potencial de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales urbanas y efluentes de baja carga orgánica. *Researchgate*.
- Salazar, D., & Wilbert, A. (2023). *Evaluación del funcionamiento hidráulico de un desarenador en escala reducida para concentraciones altas, caso: La Víbora - Chinecas - Perú*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Sanz, T. M. (2002). *Sistema de fosa séptica mejorada para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Universidad de Nariño.
- Talero, F. (2023). *Diseño técnico de una planta de tratamiento de aguas residuales PTAR procedentes de un centro de eventos ubicado a las afueras de Bogotá D.C*. Fundación Universidad de Américas.
- TULSMA. (2015). *Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*.

REJILLA PARA PRETRATAMIENTO DE TANQUES SÉPTICOS



ESC: 1:75



ESC: 1:50

ESTRUCTURA DE DESCARGA 1

ESC. 1:50



70

ESC: 1:50

CONTIENE:

LECHO DE SECADO DE LODOS

ESTRUCTURA DE DESCARGA PLANTA Y ELEVACIÓN

espol

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA
DEL LITORAL

PROYECTO: UNIDADES COMPLEMENTARIAS PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LA COMUNIDAD DE SAN PEDRO DE LA PARROQUIA DE FINDILIG.

UBICACION GEOGRAFICA

CANTON:	PARROQUIA:	SECTOR:
AZOGUES	PINDILIG	SAN PEDRO
ESCALA:	ALTITUD:	FECHA:
LAS INDICADAS	2480 m. s. n. m.	08/MARZO/2023

CONTIENE : LO INDICADO	A4	Hoja 
------------------------	----	--

REALIZADO POR:

REALIZADO POR:

ING. LUIS ANDRÉS NAVAS CAJAMARCA

ING. JOSE DAVID REYES NOVILLO

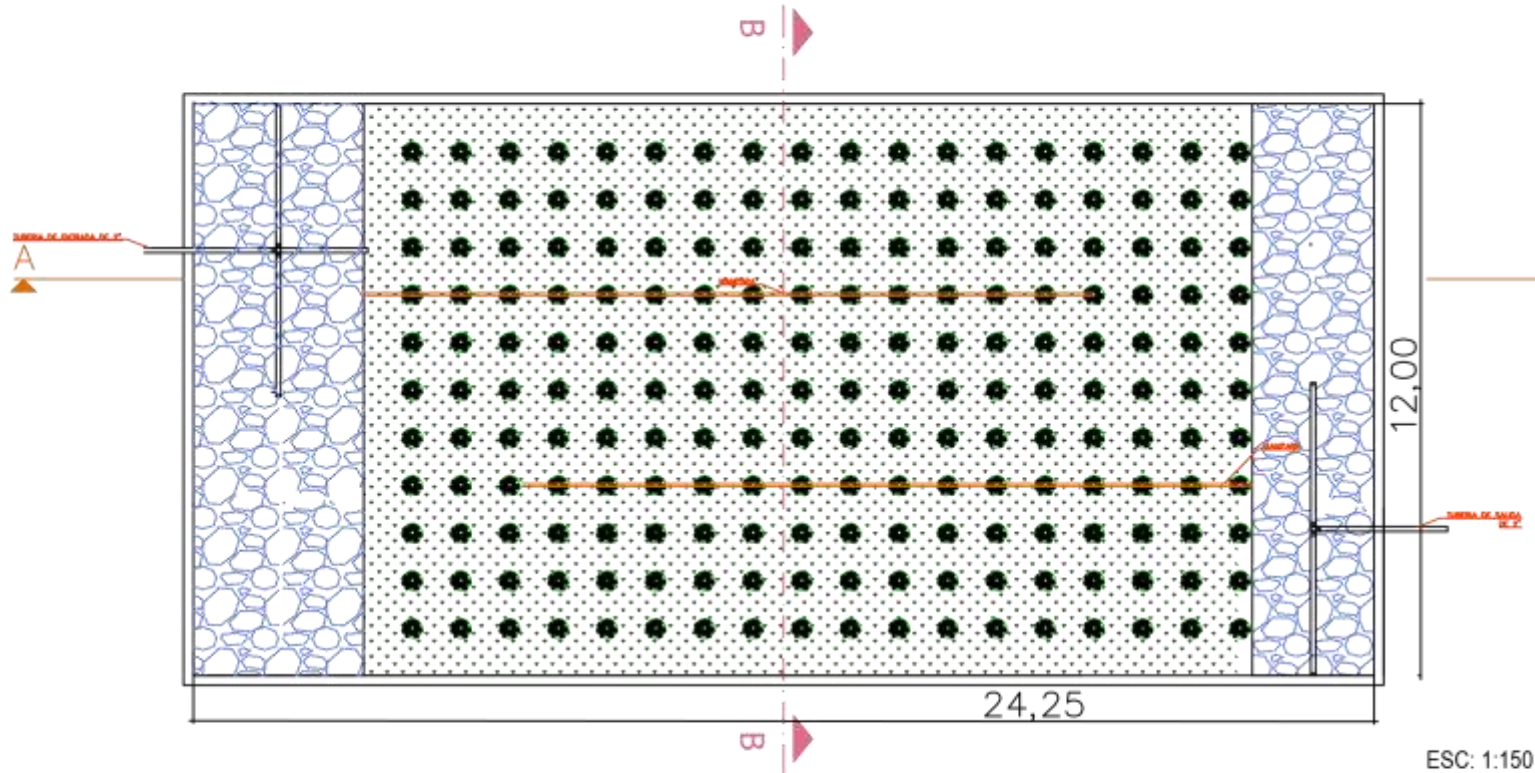
TAPA ESTRUCTURAL PROPUESTA
FILTRO AEROBIO
ESC 1:75

ESC: 1:50

**ESTRUCTURAS DE DESCARGA
CORTE A-A
DISEÑO ESTRUCTURAL**

ING. JOSE DAVID REYES NOVILLO

HUMEDAL ARTIFICIAL

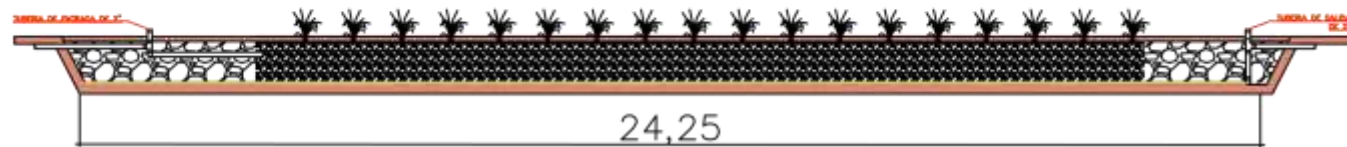


CONTIENE:

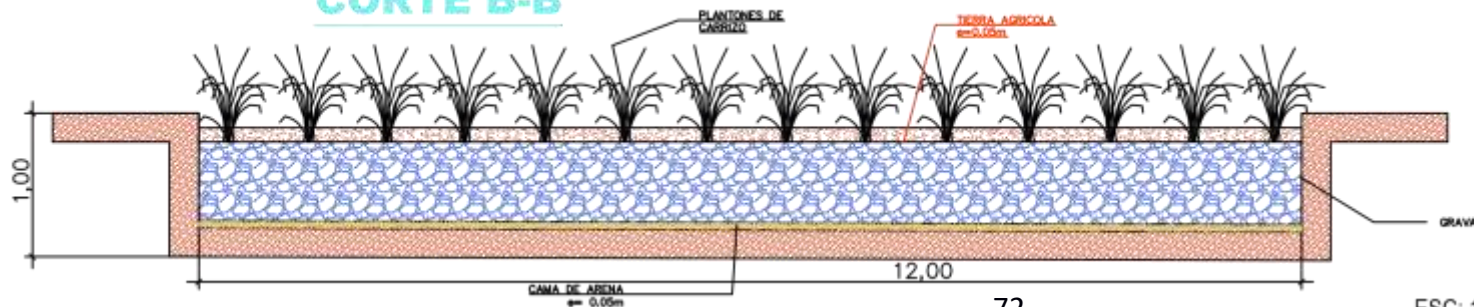
HUMEDAL ARTIFICIAL

- PLANTA
- CORTE A-A
- CORTE B-B

CORTE A-A



CORTE B-B



ESC: 1:150

ESC: 1:50

espol

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA
DEL LITORAL

PROYECTO: UNIDADES COMPLEMENTARIAS PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTO
DE LA COMUNIDAD DE SAN PEDRO DE LA PARROQUIA DE PINDILIG.

UBICACION GEOGRAFICA

CANTON: AZOGUES PARROQUIA: PINDILIG SECTOR: SAN PEDRO
ESCALA: LAS INDICADAS ALTITUD: 2480 m. s. n. m. FECHA: 08/MARZO/2023

CONTIENE: LO INDICADO

A4

Hoja 8

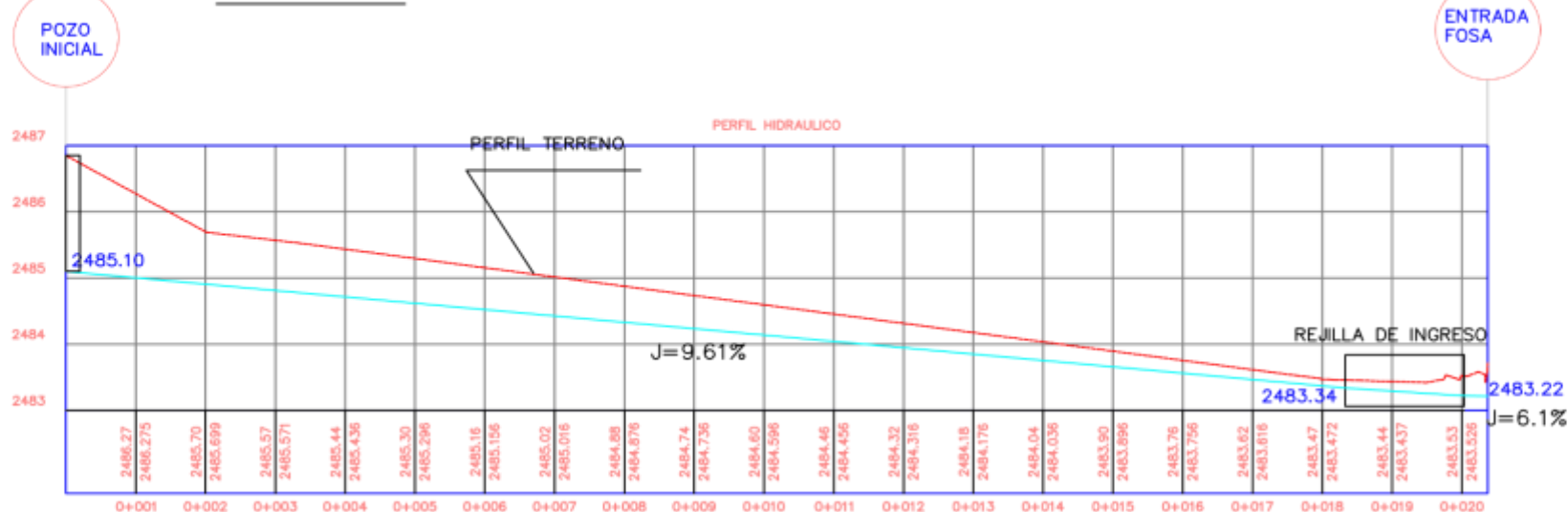
REALIZADO POR:

REALIZADO POR:

ING. LUIS ANDRES NAVAS CAJAMARCA

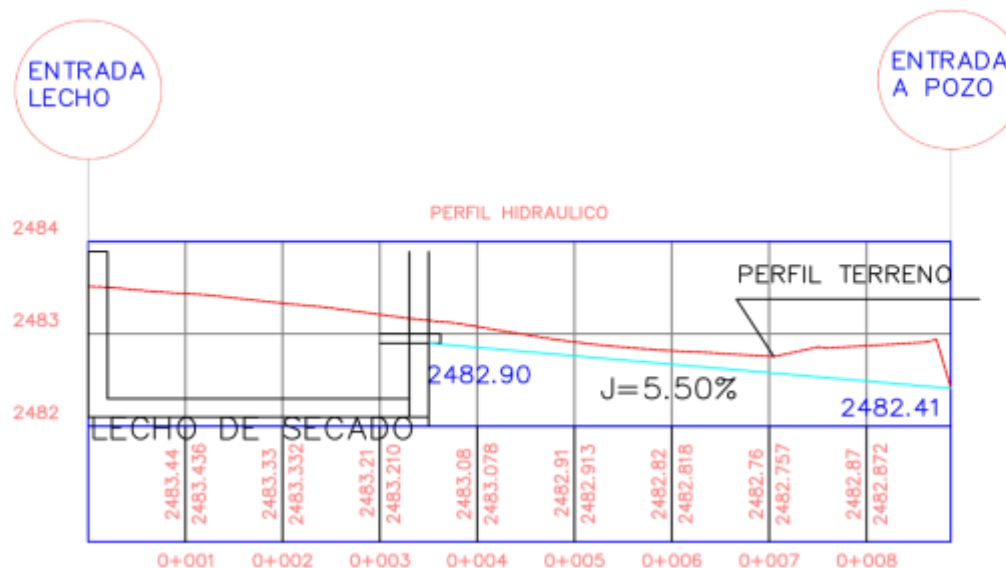
ING. JOSE DAVID REYES NOVILLO

PERFIL HIRAUICO POZO INICIAL ENTRADA A LA FOSA SEPTICA
ESC 1:100



ESC: 1:100

PERFIL HIRAUICO LECHO DE SECADO DE LODOS CAJON DE ENTRADA AL FILTRO ASCENDENTE
ESC 1:75



ESC: 1:75

CONTIENE:

PERFILES HIDRAULICOS DE:

- REJILLA
- POZO INICIAL
- ENTRADA A LA FOSA
- LECHO DE SECADO DE LODOS
- POZO INGRESO AL FILTRO

espol

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA
DEL LITORAL

PROYECTO: UNIDADES COMPLEMENTARIAS PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTO
DE LA COMUNIDAD DE SAN PEDRO DE LA PARROQUIA DE PINDILIG.

UBICACION GEOGRAFICA

CANTON: AZOGUES PARROQUIA: PINDILIG SECTOR: SAN PEDRO
ESCALA: LAS INDICADAS ALTITUD: 2480 m. s. n. m. FECHA: 08/MARZO/2023

CONTIENE: LO INDICADO

A4

Hoja 12

REALIZADO POR:

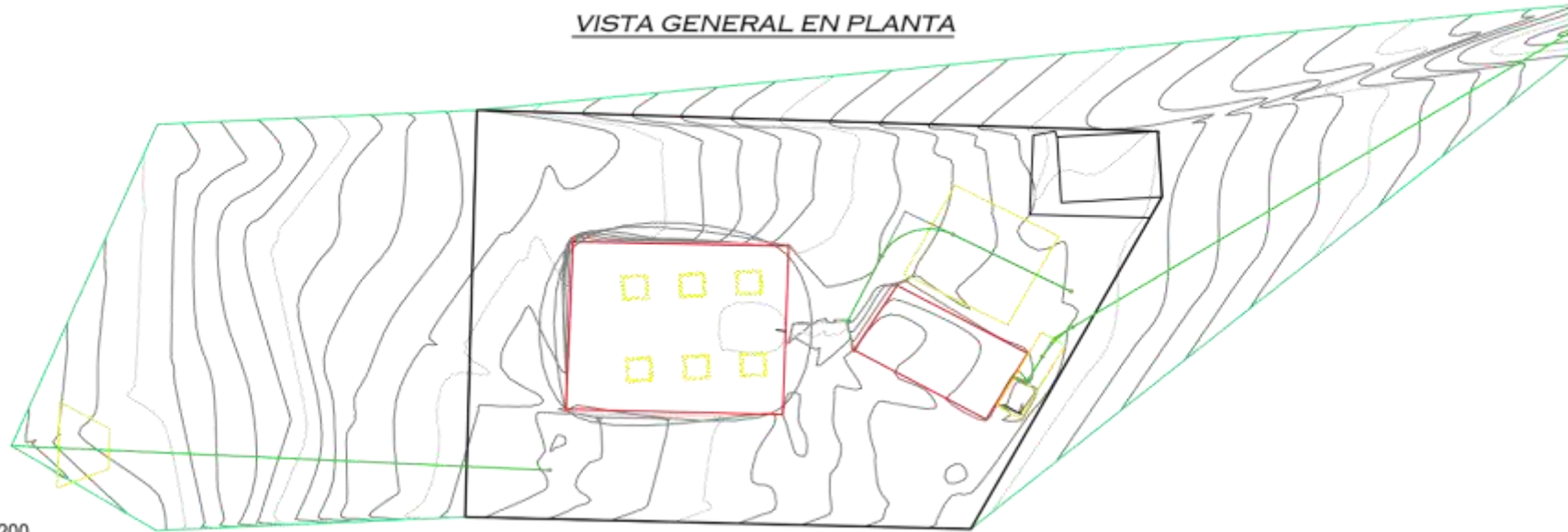
REALIZADO POR:

ING. LUIS ANDRES NAVAS CAJAMARCA

ING. JOSE DAVID REYES NOVILLO

PLANTA DE TRATAMIENTO

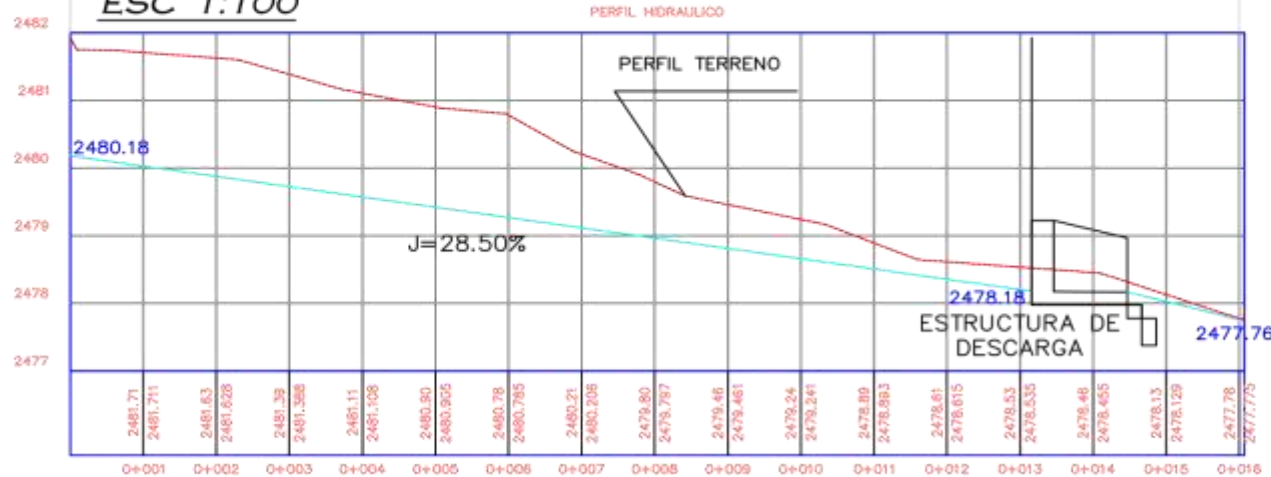
VISTA GENERAL EN PLANTA



ESC: 1:200

POZO
FINAL

PERFIL HIRAUICO POZO FINAL ESTRUCTURA DE DESCARGA ESC 1:100



ESC: 1:100

CONTIENE:

**PLANTA GENERAL DE LA PLANTA
DE TRATAMIENTO.**

**AMARILLO LO DISEÑADO
ROJO LO CONSTRUIDO**

**PERFIL HIDRAULICO POZO FINAL A
DESCARGA DISEÑADA**

espol ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL	
PROYECTO: UNIDADES COMPLEMENTARIAS PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LA COMUNIDAD DE SAN PEDRO DE LA PARROQUIA DE PINDILIG.	
UBICACION GEOGRAFICA	
CANTON: AZOGUES	PARROQUIA: PINDILIG
SECTOR: SAN PEDRO	FECHA: 08/MARZO/2023
ESCALA: LAS INDICADAS	ALTITUD: 2480 m. s. n. m.
CONTIENE: LO INDICADO	Hoja 1/1
REALIZADO POR:	REALIZADO POR:
ING. LUIS ANDRES NAVAS CAJAMARCA	ING. JOSE DAVID REYES NOVILLO

Anexo 1

**Manual de Operación y
Mantenimiento de la
planta de tratamiento de
la comunidad de San
Pedro de la Parroquia
Pindilig**

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Diagnóstico del estado inicial y desarrollo de la metodología para la puesta en marcha de la planta de tratamiento de aguas residuales en la comunidad de San Pedro, cantón Azogues, Provincia del Cañar”

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

**Máster en Ingeniería Civil con mención en Construcciones
y Saneamiento**

Presentado por:

Ing. José David Reyes Novillo

Ing. Luis Andrés Navas Cajamarca

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

1. ANEXO 1

Manual de operación y mantenimiento

1. Introducción

El establecimiento de un programa técnico y permanente de operación y mantenimiento (O y M), es imprescindible para conseguir los servicios esperados de una obra de infraestructura, así como su buena conservación física durante el tiempo para el cual está diseñada, es decir, para asegurar la sustentabilidad de los proyectos. Se considera oportuno presentar algunas recomendaciones básicas para este efecto.

Un manual de operaciones es un documento que nos da indicaciones de lo que debemos hacer y cómo debemos hacerlo. La gestión operativa y el mantenimiento de una planta de tratamiento son factores esenciales para garantizar su funcionamiento eficiente y sostenible. Por ello, resulta fundamental que estas actividades se desarrollen de manera organizada, sistemática y con un enfoque técnico riguroso. En este contexto, el presente manual establece de forma clara y precisa las acciones fundamentales que deben implementar los responsables de la operación y el mantenimiento de la planta, asegurando su óptimo desempeño, continuidad operativa y cumplimiento de normativas internacionales.

2. Definiciones.

2.1. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) tiene como propósito principal prevenir la contaminación del cuerpo de agua receptor. Su función es disminuir la carga de materia orgánica y la presencia de patógenos antes de que el efluente sea vertido, mitigando los posibles impactos negativos en el ecosistema y en las comunidades cercanas.

2.2. Operación de sistema

Las actividades de operación son aquellas que se llevan a cabo de manera regular con el objetivo de asegurar el óptimo desempeño de cada componente del sistema. El tratamiento de aguas residuales puede implementarse mediante técnicas físicas, químicas, bioquímicas o una integración de estas.

2.3. Mantenimiento

Las actividades de mantenimiento engloban las intervenciones necesarias para asegurar el correcto funcionamiento y la integridad física de las obras civiles, equipos y accesorios del sistema. No se puede establecer una frecuencia fija para dichas tareas; en el caso de las infraestructuras, se deben ejecutar al primer indicio de deterioro físico, mientras que para los equipos y accesorios se seguirán las recomendaciones de periodicidad indicadas por sus fabricantes.

2.4. Desarrollo de actividades.

Para llevar a cabo estas actividades, se considera imprescindible que la administración del sistema contrate personal local, preferiblemente residentes en las proximidades de las instalaciones que serán operadas y mantenidas, y que reciban capacitación específica para realizar las labores asignadas. En los contratos laborales se debe estipular que los propios operadores sean responsables de suministrar su transporte, vestimenta y equipo de protección personal (como botas, casco, guantes, mascarillas, entre otros), así como las herramientas menores necesarias para ejecutar sus funciones, a fin de evitar la dispersión de responsabilidades.

El personal recomendado para contratación y sus respectivas funciones son:

- Un operador encargado del sistema de alcantarillado y del tratamiento de aguas servidas.

Recursos necesarios:

- Operador y personal de apoyo
- Tanquero o vehículo hidro succionador (contratado o facilitado por la Municipalidad) de ser necesario.
- Herramientas menores

3. Descripción de funcionalidad de la PTAR.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales ubicada en San Pedro cuenta con las siguientes operaciones unitarias: fosa séptica, filtro aerobio de flujo ascendente, caja de entrada y lecho de secado de lodos como unidades complementarias. Sin embargo, el análisis técnico realizado a la planta determinó que el filtro existente no cumple actualmente con las características de un FAFA. Por ello, se propone su adecuación mediante el sellado correspondiente, permitiendo su funcionamiento conforme a los principios de un FAFA y estableciendo un plan de mantenimiento acorde a esta configuración.

El ingreso del agua residual se lo realiza a través del sistema de alcantarillado con una tubería de PVC de 110 mm de diámetro del último pozo de revisión hacia el pozo de entrada de la planta.

El agua residual debe atravesar una rejilla y fluye hacia la fosa séptica, donde tenemos el tratamiento para la remoción de sólidos suspendidos, grasas y aceites así; como el almacenamiento y la formación de lodos.

De la fosa séptica, ingresa el agua residual mediante tubería de 4 plg de diámetro al filtro aerobio, para la terminar con este tratamiento y empezar a realizar el mantenimiento se propone anteriormente un lecho de secado de lodos.

4. Unidades que conforman la PTAR.

- 4.1. Rejilla:** Las rejillas pueden ser utilizadas para reemplazar al tratamiento primario en pequeñas plantas de aguas residuales; pero su funcionamiento de igual manera al ser utilizada en plantas de mayor gasto ha funcionado de manera correcta.

La rejilla evita el ingreso de materiales gruesos y reduce el riesgo de taponamiento de tuberías y estructuras, evitando la reducción de la efectividad de los procesos de tratamiento posteriores. Su limpieza es de modo manual.

El espaciamiento entre ejes de las barras es de 20 mm, y el diámetro de cada barra es de 10 mm, siendo esta una rejilla estática, esta será colocada entre el canal de entrada (nuevo a construir) y el pozo de entrada, (ya implantado al ingreso de la fosa séptica). Las rejillas pueden utilizarse para sustituir a los sedimentadores primarios, de acuerdo con la abertura de paso a través de ellas.



Figura 1. Limpieza de rejillas

Mantenimiento y Operación

Equipo de protección mínimo:

- Casco de protección
- Lentes protectores
- Overol de trabajo
- Guantes de hule de carnaza
- Botas de hule y de labor

Equipos y herramientas:

- Pala recta
- Carretilla
- Cuchara de albañil
- Rastrillo

El objetivo del mantenimiento es para, evitar desbordes del agua residuales en el canal de ingreso, por obstrucciones en la rejilla y se debe procurar que el flujo sea normal hacia las unidades de depuración.

Para cumplir las actividades de mantenimiento se debe realizar el rastrillado de la rejilla que ayuda con la remoción del material solido retenido, ese material debe ser colocado en una carretilla y finalmente realizar la

disposición en el lecho de secado de lodos. El tiempo estimado de limpieza es de 30 minutos y con una frecuencia aproximada semanal.

4.2.Fosa séptica: En el tratamiento de aguas residuales domésticas, los procesos anaerobios más comúnmente empleados incluyen fosas sépticas, tanques Imhoff, lagunas anaerobias, reactores anaerobios de flujo ascendente y filtros anaerobios.

El tanque séptico funciona como tanque combinado de sedimentación y desnatación, como digestor anaeróbico sin calentamiento y como tanque de almacenamiento de lodos.

El mantenimiento adecuado del tanque séptico es primordial para su buen funcionamiento y sobre todo para no ocasionar problemas en su operación, por ello es necesario llevar un control adecuado de las tareas de limpieza e inspección rutinaria.

Se debe asegurar su normal funcionamiento, evitando la acumulación de en exceso de lodos y natas sobrenadantes, deben enfocarse en:

- Revisión de la impermeabilidad del tanque
- Revisión del ingreso de aguas extrañas al tanque
- Revisión de empaques en las conducciones que lo conectan con las siguientes unidades
- Revisión de la acumulación de lodo y espuma

El tanque séptico debe someterse a un proceso de limpieza cuando la capa de natas se encuentre a menos de 7,5 cm del borde inferior de la pantalla o unidad de salida, o cuando el manto de lodos alcance un espesor superior a la profundidad del líquido en el tanque. Esta medida es fundamental para garantizar el adecuado funcionamiento del sistema, prevenir obstrucciones y asegurar el cumplimiento de estándares técnicos y ambientales establecidos a nivel internacional.



Figura 2. Extracción de lodos

Mantenimiento y Operación

Personal mínimo Equipo y herramientas:

- Camión Hidro succionador o Bomba de succión de 4".
- Escalera
- Lampones
- Recipientes
- Botas de caucho
- Mascarilla
- Traje impermeable
- Arnés para las personas que ingresen
- Operador y personal de apoyo.

Para garantizar un mantenimiento óptimo, se debe escobillar la superficie del líquido con el fin de romper y rehidratar las natas flotantes, promoviendo así su sedimentación. Este proceso facilita la liberación de gases generados por la estabilización anaerobia de los sólidos depositados, lo que ayuda a prevenir la acidificación del agua y sus efectos adversos sobre la actividad metanogénica.

Esta tarea se puede realizar utilizando un rastrillo, un chorro de agua a presión mediante manguera o mediante una pequeña motobomba que extraiga el agua de la misma fosa séptica.

Posteriormente, se debe extraer el lodo parcialmente estabilizado acumulado en el fondo de la unidad. Para llevar a cabo esta acción, se requiere el apoyo de un camión hidrosuccionador proporcionado por la empresa prestadora del servicio o, se puede bombear el lodo dependiendo del tiempo en que se realice el mantenimiento y sabiendo que la bomba es lo suficientemente potente para llegar al hacia el lecho de secado de lodos disponible en la planta de tratamiento.

En términos generales, la remoción del lodo se debe realizar cuando su acumulación alcanza aproximadamente entre el 25% y el 30% de la altura del agua en la fosa, lo cual se mide con una varilla cubierta de tela en la que se indica claramente el nivel del lodo. Es fundamental no extraerlo en su totalidad, sino dejar una capa residual de entre 10 y 15 cm que funcione como inóculo para mantener el proceso de digestión anaerobia de los sólidos sedimentados.

El tiempo de limpieza de natas debe ser por lo mínimo 1 hora y la extracción de los lodos digeridos 4 horas. La frecuencia para realizar el mantenimiento corresponde de la siguiente manera: para el escobillado de natas superficiales, debe ser mínimo 15 días máximo un mes y la frecuencia de extracción de lodos debe realizarse cada 6 meses, pero se debe ir verificando que el nivel de lodos se encuentre entre los 50 y 60 cm.

Durante la limpieza del tanque se debe tener mucho cuidado con los gases tóxicos que salen del lodo, ninguna persona debe ingresar al tanque, a menos

que su ingreso sea debidamente forzoso, el tanque debe ser previamente ventilado por un tiempo considerable, para ingresar al operador se le debe dotar del equipo de arnés necesario para este trabajo. Nunca usar fósforos o antorchas al ingresar al tanque. Importante es saber que a los tanques sépticos no debe lavarse ni colocar ningún tipo de desinfectante de uso de limpieza.

4.2. Filtro aerobio o anaerobio. - La eliminación de contaminantes presentes en las aguas residuales se logra mediante la aplicación de procesos físicos, químicos y bioquímicos. En el caso de los procesos bioquímicos, estos pueden desarrollarse con o sin aporte de aire, dependiendo del sistema utilizado. Según las condiciones en las que se lleven a cabo, pueden clasificarse en aeróbicos, anóxicos o anaeróbicos, siendo estos últimos aquellos que operan en total ausencia de oxígeno.

Entre las propiedades clave del medio filtrante se encuentran la superficie específica y la porosidad. La superficie específica determina la cantidad de carga orgánica que el filtro puede soportar: a mayor valor, mayor será su capacidad para retener materia orgánica. Por su parte, una elevada porosidad contribuye a minimizar los problemas de obstrucción en el sistema.

Con el transcurso de varios meses de operación se produce la acumulación de sólidos biológicos, concentrándose principalmente en la zona inferior del filtro anaerobio. La magnitud de esta acumulación varía en función del tipo de residuo procesado, ya que las aguas residuales pueden presentar un elevado contenido de sólidos en suspensión, en su mayoría no biodegradables. En caso de obstrucciones frecuentes, puede ser necesario realizar un retro lavado, especialmente cuando se utiliza piedra como material de soporte. Sin embargo, disponer de los medios adecuados para efectuarlo resulta complejo si no se han incorporado desde la etapa de diseño.

Mantenimiento y operación

Personal mínimo, Equipos y herramientas:

- Bomba de agua 4".
- Operador y personal de apoyo.

Se pretende asegurar las condiciones apropiadas de operación para conseguir las eficiencias esperadas, también evitar la colmatación del lecho filtrante.

El lavado del material filtrante (grava) debe realizarse cuando se observe que la superficie del agua alcanza el nivel del lecho filtrante o cuando el nivel del agua en la fosa séptica supere el nivel de operación inicial. Esta condición indica la colmatación del filtro debido a la acumulación de material sólido retenido en el lecho filtrante, lo que puede comprometer la

eficiencia del sistema. Por ello, es fundamental implementar un mantenimiento periódico para garantizar el óptimo desempeño hidráulico y la funcionalidad del tratamiento.

En condiciones de funcionamiento normal (con el filtro limpio), la superficie del nivel del agua estará siempre sobre la superficie del lecho filtrante o el nivel de agua en la fosa se mantiene constante.

El procedimiento de lavado se realiza de la siguiente forma:

1. Drenar el filtro, para ello se deberá abrir la válvula de salida de filtro ver figura 5.
2. Una vez se ha extraído el agua del filtro mediante una bomba de 4" se procede a verter agua desde la parte superior del filtro, para remover los contaminantes atrapados entre el material filtrante
3. Verifique que todos los accesorios de la planta estén dispuestos para el lavado del filtro anaerobio.
4. Repita este procedimiento varias veces para lograr remover los contaminantes que han obstruido el filtro. Cuando este procedimiento ya no sea eficiente para la limpieza del material filtrante se deberá retirarlo y lavarlo en el exterior del filtro, posterior a ello se lo reubicará cuidando en lo posible las capas iniciales.
5. Una vez terminado el procedimiento se cierra la válvula de salida del filtro para reestablecer el funcionamiento de la PTAR.

4.3. Lecho de secado de lodos. – El lecho de secado es una estructura rectangular con base de ladrillo, sobre la que se coloca una capa de arena y piedra que actúa filtrando el líquido residual de los lodos. Debajo de estos materiales se instala un sistema de drenaje encargado de recolectar y canalizar el líquido hacia un punto de descarga o infiltración. A partir de la acción combinada de la radiación solar y la evaporación superficial, los lodos se deshidratan hasta adquirir una consistencia sólida. El tiempo requerido para el secado varía entre 3 y 6 meses, dependiendo de condiciones climáticas como la intensidad de la radiación solar, las precipitaciones y la humedad del suelo.

Se utilizan para dar un secado natural o deshidratación del contenido de humedad de los lodos producidos en la PTAR. Tienen el objetivo de reducir el contenido de agua de los lodos a menos del 85%. Una vez que el lodo se ha secado, se retira y se utiliza como acondicionador de suelos. La PTAR de San Pedro no posee un lecho de secado, pero es una de las unidades recomendadas faltantes en la PTAR, se considera un módulo rectangular, construido de hormigón armado, sobre una capa de arena con un espesor de 20 cm y debajo de esta una capa de grava graduada con un espesor de 30 cm, estas capas conforman el lecho como fondo poroso.

La arena utilizada presenta diámetros que oscilan entre 0.3 y 1.2 mm y cuenta con un coeficiente de uniformidad inferior a 5.0. En cuanto a la grava, se clasifica comúnmente con diámetros efectivos que varían de 0.3

a 2.5 cm. Anteriormente, el drenaje inferior se realizaba utilizando tubería de arcilla vitrificada; sin embargo, en la actualidad se prefiere el uso de tubería de plástico. Estas tuberías, que tienen un diámetro superior a 10 cm, se disponen a una separación de 2.4 a 6 m y se instalan con una pendiente mínima del 1 por ciento.

En caso de que las infiltraciones pongan en peligro el agua subterránea, se sella el piso con una membrana impermeable. El área alrededor del sistema del bajo dren se rellena con grava gruesa

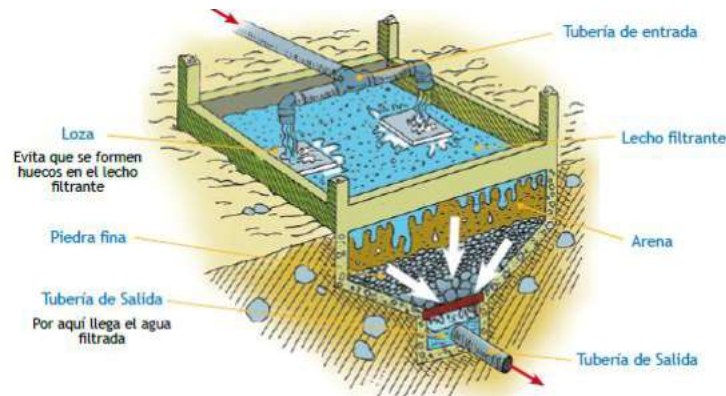


FIGURA3 ESQUEMA DE LECHO DE SECADO DE LODOS

Mantenimiento y operación.

El agua del lodo se filtra en el fondo poroso, por evaporación de la superficie mediante acción del sol y del viento para finalmente ser recolectada por una tubería de PVC perforada de 110 mm de diámetro, que llevará el contenido líquido de los lodos hacia la fosa séptica.

El lodo generado de las diferentes unidades operativas que llegan hacia el lecho de secado por medio de carretillas, baldes y la bomba de succión (extracción de lodos de la fosa séptica), su disposición es netamente manual

4.4. Humedales. - Estos pueden ser de naturales o artificiales, son de 2 tipos:

- Superficies de agua libre, es decir con espejo de agua
- Flujo subsuperficial sin espejo de agua

Los humedales con espejo de agua es un pantano en donde la vegetación esta a una profundidad de 10 a 45 cm, estas pueden ser juncos cañas, espadaña entre otros.

Esta vegetación sirve como soporte de crecimiento bacterial y reduce el crecimiento potencial de las algas de la misma manera que oxigena. Se recomienda cargas de DBO máximas de 112 kg/DBOha.d, la remoción en DBO puede ser del 60 al 80 por ciento y del SST 50 al 90%.

Los humedales de flujo superficial el agua fluye por debajo de la superficie de un medio poroso sembrado de plantas. En este caso es el utilizado y diseñado por esta tesis, ya que estos utilizan menos área para su implantación y otra característica es que no presentan olores y por ende de mosquitos, las desventajas de este tipo de humedal es que se encarece por los áridos que deben ser colocados y por el riesgo a ser taponados por los áridos utilizados como filtros.

Mantenimiento y operación.

El mantenimiento tiene como finalidad conservar las instalaciones en condiciones óptimas de forma permanente, a través de la reparación o el reemplazo de componentes o equipos que se hayan deteriorado por su uso.

Las actividades para el mantenimiento son las siguientes:

- Regulación de los niveles de agua dentro del humedal, manteniéndolos aproximadamente diez centímetros por debajo de la superficie en los humedales de flujo subsuperficial.
- Remoción de maleza y material vegetal seco dentro del lecho del humedal.
- Corte o eliminación de la vegetación en los bordes perimetrales del humedal.
- Poda de la vegetación presente en el humedal con una periodicidad de dos a tres veces al año, eliminando principalmente las plantas envejecidas o de tonalidad amarillenta, procurando retirar entre el 10 % y 15 % del total en cada poda.
- Replantación de especies vegetales para garantizar una alta densidad y evitar la aparición de zonas sin cobertura vegetal.
- Poda de árboles en los alrededores del humedal para minimizar la acumulación de hojarasca y optimizar la exposición solar sobre las plantas del lecho
- Se debe evitar la proliferación de mosquitos en el área.

La recolección y retiro de las especies vegetales podadas fuera del humedal evita que las hojas en descomposición liberen nuevamente los nutrientes en el estanque.

Realizar una poda periódica, entre una y dos veces al año, lo que favorece una mayor eficiencia en la eliminación de nutrientes

Las tareas rutinarias necesarias para conservar los humedales en buen estado y asegurar su adecuado funcionamiento no demandan un alto nivel de capacitación, lo que permite que estos sistemas sean operados de manera sencilla.



Figura 4 Mantenimientos de humedales.

Otras labores que se llevan a cabo con menor regularidad incluyen el mantenimiento del cuarto del operador, las mallas de protección y los caminos de acceso al sistema de tratamiento.

Es fundamental que los operadores dispongan de equipo de seguridad e higiene para su protección, como guantes, overoles, botas, gorras, mascarillas, gafas de seguridad, jabón y un botiquín de primeros auxilios.

5. Operación de la planta de San Pedro de la Parroquia Pindilig



Figura 5 Vista en planta general de la PTAR

Para operar la PTAR de San Pedro se debe tener en cuenta las siguientes actividades para la operación y mantenimiento.

Se debe mantener la caja de ingreso a la fosa en óptimas condiciones de limpieza, ya que la acumulación de lodos puede obstruir el flujo y provocar el colapso del sistema de ingreso a la fosa séptica. En caso de que esto ocurra, el exceso de fluido se desvía a través de un vertedero de emergencia, dirigiendo el

flujo sin tratar directamente al pozo de excedentes 1 y este a su vez se dirige al pozo de salida.

Para llevar a cabo el mantenimiento de la fosa séptica, es necesario cerrar la válvula 1, identificada en la Figura 5 con color amarillo. Esto evita que los lodos y residuos retirados durante la limpieza sobresaturen el filtro. Simultáneamente, se debe abrir la válvula 2, permitiendo que el exceso de agua se dirija directamente al pozo 2, garantizando así un proceso de mantenimiento eficiente y sin afectar el sistema de filtración.

Para realizar la limpieza del filtro aerobio, es fundamental cerrar las válvulas que regulan el flujo desde la fosa séptica, específicamente la válvula 1, y abrir la válvula 2 para garantizar la continuidad del flujo de agua sin interrupciones. Antes de iniciar el mantenimiento, y conforme a lo señalado en capítulos anteriores, se debe abrir la válvula 3 para vaciar el filtro. Esto facilita la ejecución de todas las actividades de mantenimiento de manera eficiente y segura.

6. Recomendaciones

Es fundamental mantener limpios todos los pozos, verificando periódicamente que no presenten acumulación excesiva de lodos que pueda obstruir el flujo. Para garantizar un funcionamiento óptimo, se recomienda realizar su limpieza cada tres meses.

Asimismo, se debe prestar especial atención a la descarga de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), ya que su colapso podría generar una sobresaturación en los pozos. Para mitigar este riesgo, se considera la implementación de una unidad de descarga diseñada en este caso un cabezal para evitar su obstrucción.

Es esencial llevar a cabo la operación periódica de las válvulas para prevenir su adherencia u obstrucción, asegurando así un funcionamiento eficiente del sistema.

En el diseño de nuevas unidades, se debe considerar no solo su implementación, sino también el mantenimiento requerido para su óptimo desempeño.

Las actividades de mantenimiento incluyen:

- Eliminación de arenas y residuos acumulados en el desarenador.
- Limpieza de desechos en las estructuras de entrada y distribución del caudal, tales como cajas de registro, tuberías y vertedores.
- Mantenimiento y reparación de infraestructuras clave, incluyendo bordes, cercas, puertas, engrase de dispositivos mecánicos, pintura, geomembranas, banquetas y estructuras de protección hidráulica, como cunetas y bordos.