

**DIAGNÓSTICO DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL MUNICIPIO DE LA DORADA  
(PUTUMAYO)**

LAURA DANIELA SANTACRUZ VALENCIA  
YENNY MARISOL ORDOÑEZ DÍAZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE  
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL  
SANTIAGO DE CALI  
2023

**DIAGNÓSTICO DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL MUNICIPIO DE LA DORADA  
(PUTUMAYO)**

**YENNY MARISOL ORDOÑEZ DÍAZ  
LAURA DANIELA SANTACRUZ VALENCIA**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA  
SANITARIA Y AMBIENTAL**

**DIRECTORA:  
PhD. JENNY ALEXANDRA RODRÍGUEZ VICTORIA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE  
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL  
SANTIAGO DE CALI  
2023**

## **DEDICATORIA**

A Dios, por darme la oportunidad de estudiar y aprender. También, por darme la fuerza y la sabiduría para culminar esta maravillosa etapa de mucho aprendizaje.

A Mamá y Papá por enseñarme a ser fuerte, independiente y por fomentar en mí, el deseo de superación y triunfo en la vida. Gracias por el constante aliento, motivación y apoyo incondicional.

A mis hermanos, Jairo, Carlos y Paul por el apoyo y sus palabras de aliento. Gracias por estar siempre ahí para mí.

***Yenny Marisol Ordoñez Díaz***

A mi madre Dora, por su amor infinito, por creer en mí, por ser mi más grande apoyo y por motivarme en cada momento difícil, todo esto ha sido posible gracias a ti.

A mi padre Edgar (q.e.p.d), que lloró de alegría junto a mí cuando fui admitida en la universidad, gracias por cuidarme y ser mi guía desde el cielo. Este logro es para ti, papá.

A mi hermano Christian, por su apoyo y toda la paciencia que me tuvo durante el desarrollo de este trabajo.

A mis mascotas y compañeras de vida, Cookie y Chanel, por acompañarme en cada traspaso, por ayudarme a encontrar momentos de tranquilidad y llenarme de mucho amor.

***Laura Daniela Santacruz Valencia***

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestra directora Jenny Rodríguez, gracias por la disposición y guía en el desarrollo de este proyecto de grado. También le agradecemos por la paciencia y enseñanza. Nos sentimos muy afortunadas de haber tenido la oportunidad de conocerla y aprender de ella.

Agradecemos a la Universidad del Valle por abrirnos las puertas al conocimiento y habernos formado como ingenieras.

A los profesores y profesoras del programa académico de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, por compartirnos sus conocimientos.

Agradecemos a la Empresa de Servicios Públicos de La Dorada, Putumayo por habernos permitido llevar a cabo del estudio de investigación.

Al ingeniero Brayan Navia, por su disposición y colaboración con los permisos necesarios para la recolección de datos durante nuestras visitas a la PTAR.

A Pablo, Paul, Carlos y Jairo por el acompañamiento y apoyo en el levantamiento de mediciones de las unidades de tratamiento de la PTAR.

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| RESUMEN .....                                                                                                                   | 12 |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                                                              | 13 |
| 1. OBJETIVOS .....                                                                                                              | 15 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL .....                                                                                                      | 15 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                                                                 | 15 |
| 2. MARCO REFERENCIAL .....                                                                                                      | 16 |
| 2.1 AGUA RESIDUAL .....                                                                                                         | 16 |
| 2.2 COMPOSICIÓN TÍPICA DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA .....                                                                        | 16 |
| 2.3 TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL .....                                                                                         | 20 |
| 2.3.1. Objetivos del tratamiento de agua residual .....                                                                         | 20 |
| 2.3.2 Niveles de tratamiento de tratamiento .....                                                                               | 21 |
| 2.4 SISTEMAS DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO DEL AGUA RESIDUAL .....                                                                   | 22 |
| 2.4.1 Tratamiento aerobio .....                                                                                                 | 24 |
| 2.4.2 Tratamiento anaerobio .....                                                                                               | 25 |
| 2.4.3 Combinación de procesos biológicos: digestión anaerobia - proceso aerobio .....                                           | 26 |
| 2.5 TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA .....                                                                 | 28 |
| 2.5.1 Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) .....                                                                        | 28 |
| 2.5.2 Filtros percoladores .....                                                                                                | 30 |
| 2.6 EXPERIENCIAS DEL SISTEMA COMBINADO REACTOR UASB – FILTRO<br>PERCOLADOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA ..... | 32 |
| 3. METODOLOGÍA .....                                                                                                            | 35 |
| 3.1 ÁREA DE ESTUDIO .....                                                                                                       | 35 |
| 3.2 CONTRASTACIÓN DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PTAR .....                                                                    | 36 |
| 3.2.1 Visitas de reconocimiento .....                                                                                           | 38 |
| 3.2.2 Contrastación de la información .....                                                                                     | 38 |
| 3.3 DEFINICIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN .....                                                               | 38 |
| 3.3.1 Visitas y contrastación .....                                                                                             | 39 |
| 3.4 PROPUESTA DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN .....                                                                              | 39 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                                                                                 | 40 |
| 4.1 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA .....                                                                                               | 40 |
| 4.2 CONTRASTACIÓN DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS UNIDADES DE<br>TRATAMIENTO DE LA PTAR LA DORADA .....                        | 42 |
| 4.2.1 Estructura de entrada (By-pass) .....                                                                                     | 44 |
| 4.2.2 Cribado .....                                                                                                             | 47 |
| 4.2.3 Desarenador de flujo horizontal .....                                                                                     | 49 |
| 4.2.4 Trampa de grasas .....                                                                                                    | 52 |

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.5 Tanque homogeneizador .....                                        | 54  |
| 4.2.6 Reactor UASB .....                                                 | 56  |
| 4.2.7 Filtros percoladores .....                                         | 58  |
| 4.2.8 Sedimentador final y cloración.....                                | 62  |
| 4.2.9 Lecho de secado .....                                              | 66  |
| 4.3 IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS Y PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN ..... | 69  |
| 4.3.1 Caudales de diseño .....                                           | 69  |
| 4.3.2 Estructura de separación de caudales .....                         | 72  |
| 4.3.3 Estructura de entrada (Canal de entrada + By-pass).....            | 73  |
| 4.3.4 Cribado .....                                                      | 78  |
| 4.3.5 Desarenador .....                                                  | 88  |
| 4.3.6 Trampa de grasas .....                                             | 95  |
| 4.3.7 Tanque homogeneizador .....                                        | 98  |
| 4.3.8 Reactor UASB .....                                                 | 103 |
| 4.3.9 Filtro percolador.....                                             | 116 |
| 4.3.10 Sedimentador final y cloración.....                               | 125 |
| 4.3.11 Lecho de secado .....                                             | 132 |
| 4.3.12 Laboratorio de medición y control de parámetros .....             | 136 |
| 5. CONCLUSIONES .....                                                    | 138 |
| 6. REFERENCIAS .....                                                     | 140 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Características del agua residual .....                                                                                  | 17 |
| <b>Tabla 2.</b> Composición típica del agua residual doméstica .....                                                                     | 19 |
| <b>Tabla 3.</b> Objetivos del tratamiento de agua residual.....                                                                          | 21 |
| <b>Tabla 4.</b> Etapas del tratamiento del agua residual .....                                                                           | 21 |
| <b>Tabla 5.</b> Descripción de los procesos biológicos.....                                                                              | 22 |
| <b>Tabla 6.</b> Principales procesos de tratamiento según proceso biológico y tipo de crecimiento .....                                  | 23 |
| <b>Tabla 7.</b> Ventajas y limitaciones del tratamiento aerobio.....                                                                     | 24 |
| <b>Tabla 8.</b> Eficiencias de remoción obtenidas en los sistemas combinados anaerobio-aerobio según el tipo de crecimiento aerobio..... | 27 |
| <b>Tabla 9.</b> Principales ventajas y limitaciones del reactor UASB .....                                                               | 29 |
| <b>Tabla 10.</b> Ventajas y limitaciones de los filtros percoladores.....                                                                | 32 |
| <b>Tabla 11.</b> Información recopilada a partir de los documentos suministrados por las entidades públicas .....                        | 37 |
| <b>Tabla 12.</b> Variables del diseño de las unidades de tratamiento de la PTAR la Dorada.....                                           | 39 |
| <b>Tabla 13.</b> Proyecto de la construcción de la PTAR .....                                                                            | 40 |
| <b>Tabla 14.</b> Información general del diseño de la PTAR La Dorada .....                                                               | 41 |

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 15.</b> Parámetros iniciales para el diseño.....                                          | 42  |
| <b>Tabla 16.</b> Asignación del nivel de complejidad .....                                         | 43  |
| <b>Tabla 17.</b> Parámetros de diseño de la estructura de entrada .....                            | 44  |
| <b>Tabla 18.</b> Contrastación del diseño y construcción de la estructura de entrada .....         | 47  |
| <b>Tabla 19.</b> Parámetros de diseño del cribado .....                                            | 47  |
| <b>Tabla 20.</b> Contrastación del diseño y construcción del cribado.....                          | 49  |
| <b>Tabla 21.</b> Parámetros de diseño del desarenador horizontal .....                             | 49  |
| <b>Tabla 22.</b> Contrastación del diseño y construcción del desarenador de flujo horizontal.....  | 50  |
| <b>Tabla 23.</b> Parámetros de diseño de la trampa de grasas.....                                  | 52  |
| <b>Tabla 24.</b> Contrastación del diseño y construcción de la trampa de grasas .....              | 53  |
| <b>Tabla 25.</b> Parámetros de diseño del tanque homogeneizador .....                              | 54  |
| <b>Tabla 26.</b> Parámetros de diseño del reactor UASB .....                                       | 56  |
| <b>Tabla 27.</b> Contrastación del diseño del reactor UASB .....                                   | 58  |
| <b>Tabla 28.</b> Parámetros de diseño del Filtro Percolador .....                                  | 58  |
| <b>Tabla 29.</b> Contrastación del filtro percolador.....                                          | 61  |
| <b>Tabla 30.</b> Parámetros de diseño del sedimentador secundario.....                             | 63  |
| <b>Tabla 31.</b> Contrastación del diseño y construcción del sedimentador secundario .....         | 64  |
| <b>Tabla 32.</b> Parámetros de diseño de cloración .....                                           | 65  |
| <b>Tabla 33.</b> Contrastación del diseño y construcción del tanque de cloración.....              | 66  |
| <b>Tabla 34.</b> Parámetros de diseño del lecho de secado .....                                    | 66  |
| <b>Tabla 35.</b> Contrastación diseño/construcción del lecho de secado .....                       | 67  |
| <b>Tabla 36.</b> Información de la población considerada en el cálculo de caudales de diseño ..... | 69  |
| <b>Tabla 37.</b> Comparación de los caudales de diseño .....                                       | 71  |
| <b>Tabla 38.</b> Propuestas de optimización de la estructura de entrada (By-pass) .....            | 76  |
| <b>Tabla 39.</b> Criterios de diseño de rejillas según su clasificación.....                       | 78  |
| <b>Tabla 40.</b> Recomendaciones para huella y contrahuella para escaleras .....                   | 83  |
| <b>Tabla 41.</b> Comparación entre el cribado construido y el reajustado .....                     | 85  |
| <b>Tabla 42.</b> Propuestas de optimización para el cribado.....                                   | 86  |
| <b>Tabla 43.</b> Parámetros de diseño del desarenador.....                                         | 88  |
| <b>Tabla 44.</b> Comparación entre el desarenador construido y el reajustado .....                 | 92  |
| <b>Tabla 45.</b> Propuestas de optimización para el desarenador de flujo horizontal .....          | 93  |
| <b>Tabla 46.</b> Parámetros de diseño de la trampa de grasas.....                                  | 95  |
| <b>Tabla 47.</b> Dimensiones de la trampa de grasas recalculada .....                              | 100 |
| <b>Tabla 48.</b> Propuestas de optimización de la trampa de grasas .....                           | 101 |
| <b>Tabla 49.</b> Parámetros de diseño del reactor UASB .....                                       | 103 |
| <b>Tabla 50.</b> Comparación entre reactor UASB construido y el propuesto con optimizaciones.....  | 111 |
| <b>Tabla 51.</b> Propuestas de optimización del reactor UASB.....                                  | 113 |

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 52.</b> Parámetros de diseño del filtro percolador .....                                     | 116 |
| <b>Tabla 53.</b> Comparación del filtro percolador construido y el propuesto con optimizaciones ..... | 121 |
| <b>Tabla 54.</b> Propuestas de optimización del filtro percolador.....                                | 122 |
| <b>Tabla 55.</b> Parámetros de diseño del sedimentador final .....                                    | 125 |
| <b>Tabla 56.</b> Comparación del sedimentador final construido y el propuesto con optimizaciones..... | 131 |
| <b>Tabla 57.</b> Propuesta de optimización del sedimentador final .....                               | 131 |
| <b>Tabla 58.</b> Parámetros de diseño del lecho de secado .....                                       | 132 |
| <b>Tabla 59.</b> Propuestas de optimización del lecho de secado .....                                 | 135 |
| <b>Tabla 60.</b> Propuestas de optimización para el laboratorio de la PTAR.....                       | 137 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Tipos de agua residual .....                                                             | 16 |
| <b>Figura 2.</b> Porcentaje en promedio de agua residual producida según las actividades del hogar .....  | 17 |
| <b>Figura 3.</b> Transformación de la materia orgánica en procesos aerobios .....                         | 24 |
| <b>Figura 4.</b> Transformación de la materia orgánica en la digestión anaerobia.....                     | 25 |
| <b>Figura 5.</b> Dibujo esquemático de un reactor anaerobio de flujo ascendente .....                     | 28 |
| <b>Figura 6.</b> Esquema de filtro percolador .....                                                       | 31 |
| <b>Figura 7.</b> Localización de la zona de estudio .....                                                 | 35 |
| <b>Figura 8.</b> Ubicación de la PTAR.....                                                                | 35 |
| <b>Figura 9.</b> Diagrama metodológico de la investigación .....                                          | 36 |
| <b>Figura 10.</b> Diagrama de flujo de la PTAR La Dorada.....                                             | 42 |
| <b>Figura 11.</b> Vista en planta de la estructura de entrada y cribado .....                             | 45 |
| <b>Figura 12.</b> Vista en corte de la estructura de entrada y cribado .....                              | 45 |
| <b>Figura 13.</b> Válvulas de la estructura de entrada .....                                              | 46 |
| <b>Figura 14.</b> Tuberías de entrada y salida de la estructura.....                                      | 46 |
| <b>Figura 15.</b> Cribado grueso y fino .....                                                             | 48 |
| <b>Figura 16.</b> Cribado.....                                                                            | 48 |
| <b>Figura 17.</b> Diseño en planta desarenador horizontal y canaleta Parshall .....                       | 50 |
| <b>Figura 18.</b> Diseño en corte del desarenador horizontal y canaleta Parshall .....                    | 50 |
| <b>Figura 19.</b> Líneas de cribado y desarenador.....                                                    | 51 |
| <b>Figura 20.</b> Transición hacia Canaleta Parshall y compartimiento integración del agua residual ..... | 51 |
| <b>Figura 21.</b> Diseño en planta trampa de grasas.....                                                  | 52 |
| <b>Figura 22.</b> Estructura de la trampa de grasas.....                                                  | 53 |
| <b>Figura 23.</b> Diseño en planta del tanque homogeneizador .....                                        | 54 |
| <b>Figura 24.</b> Diseño en corte del tanque homogeneizador.....                                          | 54 |
| <b>Figura 25.</b> Interior del tanque homogeneizador .....                                                | 55 |
| <b>Figura 26.</b> Tanque homogeneizador.....                                                              | 55 |

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 27.</b> Diseño en corte del Reactor UASB .....                                                                                                       | 56 |
| <b>Figura 28.</b> Diseño en planta del Reactor UASB.....                                                                                                       | 57 |
| <b>Figura 29.</b> Parte superior del reactor UASB.....                                                                                                         | 57 |
| <b>Figura 30.</b> Diseño en planta filtro percolador.....                                                                                                      | 59 |
| <b>Figura 31.</b> Diseño en corte del filtro percolador.....                                                                                                   | 59 |
| <b>Figura 32.</b> Filtro percolador .....                                                                                                                      | 60 |
| <b>Figura 33.</b> Medio filtrante del filtro percolador.....                                                                                                   | 60 |
| <b>Figura 34.</b> Soporte del relleno del filtro percolador .....                                                                                              | 61 |
| <b>Figura 35.</b> Sistema de ventilación .....                                                                                                                 | 62 |
| <b>Figura 36.</b> Drenaje del filtro percolador.....                                                                                                           | 62 |
| <b>Figura 37.</b> Diseño en planta del sedimentador secundario .....                                                                                           | 63 |
| <b>Figura 38.</b> Diseño en corte del sedimentador .....                                                                                                       | 64 |
| <b>Figura 39.</b> Sedimentador final.....                                                                                                                      | 65 |
| <b>Figura 40.</b> Tubería de distribución de la purga de lodos .....                                                                                           | 67 |
| <b>Figura 41.</b> Lecho de secado .....                                                                                                                        | 68 |
| <b>Figura 42.</b> Estructura de separación de caudales del alcantarillado combinado .....                                                                      | 72 |
| <b>Figura 43.</b> Representación gráfica de la estructura de entrada .....                                                                                     | 73 |
| <b>Figura 44.</b> Estructura de entrada a la PTAR.....                                                                                                         | 74 |
| <b>Figura 45.</b> Válvulas estructura de entrada .....                                                                                                         | 75 |
| <b>Figura 46.</b> Situación de la PTAR en temporada invernal <b>(a)</b> en comparación con la temporada de verano <b>(b)</b> .....                             | 75 |
| <b>Figura 47.</b> Punto de descarga de agua residual de exceso a la fuente hídrica receptora .....                                                             | 76 |
| <b>Figura 48.</b> Propuestas de optimización para la estructura de entrada a la PTAR.....                                                                      | 78 |
| <b>Figura 49.</b> Representación gráfica del cribado y desarenador actual .....                                                                                | 79 |
| <b>Figura 50.</b> Inclinação de la rejilla .....                                                                                                               | 80 |
| <b>Figura 51.</b> Herramienta empleada para el retiro de residuos sólidos .....                                                                                | 81 |
| <b>Figura 52.</b> Agujero para el depósito de residuos sólidos.....                                                                                            | 81 |
| <b>Figura 53.</b> Agujero con cubierta vegetal .....                                                                                                           | 82 |
| <b>Figura 54.</b> Estado actual de las escaleras de acceso al sistema preliminar .....                                                                         | 82 |
| <b>Figura 55.</b> Lámina levantada.....                                                                                                                        | 83 |
| <b>Figura 56.</b> Distribución ineficiente del caudal en las líneas de tratamiento.....                                                                        | 84 |
| <b>Figura 57.</b> Propuestas de optimización del canal de entrada y cribado considerando el caudal recalculado ( $Q_{dm\acute{a}x} = 47,53 \text{ L/s}$ )..... | 87 |
| <b>Figura 58.</b> Representación gráfica desarenador.....                                                                                                      | 89 |
| <b>Figura 59.</b> Línea de cribado y desarenador .....                                                                                                         | 90 |
| <b>Figura 60.</b> Cámara del desarenador.....                                                                                                                  | 91 |
| <b>Figura 61.</b> Canaleta Parshall .....                                                                                                                      | 92 |
| <b>Figura 62.</b> Estructura del desarenador considerando caudal de $47,53 \text{ L/s}$ .....                                                                  | 94 |

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 63.</b> CADICA rectangular de dos salidas .....                                                | 95  |
| <b>Figura 64.</b> Esquema isométrico de la trampa de grasas .....                                        | 96  |
| <b>Figura 65.</b> Vista en planta de la trampa de grasas .....                                           | 96  |
| <b>Figura 66.</b> Estructura de la trampa de grasas.....                                                 | 97  |
| <b>Figura 67.</b> Representación gráfica del tanque homogeneizador .....                                 | 98  |
| <b>Figura 68.</b> Interior del tanque homogeneizador .....                                               | 99  |
| <b>Figura 69.</b> Rebosamiento del tanque homogeneizador.....                                            | 99  |
| <b>Figura 70.</b> Vista corte: Propuesta de optimización de la trampa de grasas .....                    | 102 |
| <b>Figura 71.</b> Vista en planta: Propuesta de optimización del interior de la trampa de grasas .....   | 102 |
| <b>Figura 72.</b> Vista en planta: Propuesta de optimización de la cubierta de la trampa de grasas ..... | 103 |
| <b>Figura 73.</b> Representación gráfica reactor UASB .....                                              | 104 |
| <b>Figura 74.</b> Representación gráfica del interior del reactor UASB según memoria de cálculo .....    | 105 |
| <b>Figura 75.</b> Tuberías principales de alimentación a los reactores UASB.....                         | 107 |
| <b>Figura 76.</b> Plano tuberías de distribución internos de los reactores UASB .....                    | 107 |
| <b>Figura 77.</b> Liberación de burbujas de biogás por la zona de recolección del efluente .....         | 108 |
| <b>Figura 78.</b> Tea de quemado sin funcionamiento .....                                                | 109 |
| <b>Figura 79.</b> Corrosión generada por los gases del Reactor UASB.....                                 | 109 |
| <b>Figura 80.</b> Parte superior de los reactores UASB.....                                              | 110 |
| <b>Figura 81.</b> Tuberías de purga de lodos .....                                                       | 111 |
| <b>Figura 82.</b> Representación gráfica CADICA de ocho salidas .....                                    | 114 |
| <b>Figura 83.</b> CADICAS para alimentación interna a los reactores UASB.....                            | 115 |
| <b>Figura 84.</b> Recolección del efluente por medio de tees sumergidas .....                            | 115 |
| <b>Figura 85.</b> Reactor UASB con propuestas de optimización .....                                      | 116 |
| <b>Figura 86.</b> Representación gráfica del filtro percolador exterior .....                            | 117 |
| <b>Figura 87.</b> Sistema de distribución ineficiente del filtro percolador.....                         | 118 |
| <b>Figura 88.</b> Ventilación natural del filtro percolador .....                                        | 119 |
| <b>Figura 89.</b> Placas del filtro percolador .....                                                     | 120 |
| <b>Figura 90.</b> Corte interior del filtro percolador .....                                             | 120 |
| <b>Figura 91.</b> Acumulación de agua sin drenar en el piso del filtro percolador .....                  | 121 |
| <b>Figura 92.</b> Estructura de caja de integración de caudales .....                                    | 123 |
| <b>Figura 93.</b> Representación gráfica CADICA de tres salidas .....                                    | 124 |
| <b>Figura 94.</b> Propuesta de optimización del filtro percolador.....                                   | 124 |
| <b>Figura 95.</b> Esquema en corte de las propuestas de optimización del filtro percolador .....         | 125 |
| <b>Figura 96.</b> Representación gráfica sedimentador final y cloración.....                             | 126 |
| <b>Figura 97.</b> Interior del sedimentador final.....                                                   | 126 |
| <b>Figura 98.</b> Entrada al sedimentador final .....                                                    | 127 |
| <b>Figura 99.</b> Falencias encontradas sedimentador final.....                                          | 128 |

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 100.</b> Recolección ineficiente del efluente del sedimentador final .....          | 129 |
| <b>Figura 101.</b> Recolección del efluente del sedimentador final.....                       | 129 |
| <b>Figura 102.</b> Presencia de lodos en el sistema de cloración .....                        | 130 |
| <b>Figura 103.</b> Diseño del sedimentador secundario con las propuestas de optimización..... | 132 |
| <b>Figura 104.</b> Lecho de secado de la PTAR.....                                            | 133 |
| <b>Figura 105.</b> Compartimientos del lecho de secado para reactor UASB 1.....               | 134 |
| <b>Figura 106.</b> Vista corte: Lecho de secado con optimizaciones.....                       | 136 |
| <b>Figura 107.</b> Vista en planta: Lecho de secado con optimizaciones .....                  | 136 |

## RESUMEN

Las plantas de tratamiento de aguas residuales son importantes porque ayudan a proteger el medio ambiente y la salud humana. Eliminan los contaminantes del agua residual, como: sólidos, grasas, patógenos, bacterias, virus, entre otras. Sin embargo, en Colombia muchas de las PTAR se encuentran en estado de abandono. Esto se debe a una serie de factores, como: la falta de fondos, mantenimiento y conciencia pública. Especialmente en las zonas rurales del país, como es el caso PTAR La Dorada, ubicada en el municipio San Miguel, Putumayo, donde se realizó el diagnóstico del diseño de las tecnologías existentes, y operación; mediante la recopilación de información y revisión de los planos técnicos, memoria de diseño e informes de las visitas técnicas de seguimiento y monitoreo a la PTAR.

A partir de la información recopilada, se realizó la contrastación del diseño y construcción, posteriormente se realizó una comparación entre los parámetros construidos con los recomendados por la literatura, para identificar las unidades que presentan falencias en el diseño y operación. De las falencias encontradas se plantearon propuestas de optimización para cada unidad de tratamiento.

Del análisis se identificó que, el diseño de la PTAR no se tuvo en cuenta los criterios recomendados por la literatura. Además, algunas unidades de tratamiento fueron sobredimensionados principalmente, el tratamiento preliminar, mientras que, los filtros percoladores fueron subdimensionados. También se evidenció que PTAR está en estado de abandono, con alta contaminación y cubierta vegetal.

**Palabras clave:** Agua residual, Tratamiento de agua residual, PTAR, Reactor UASB, Filtro percolador.

## INTRODUCCIÓN

El vertimiento de agua residual sin ningún tipo de tratamiento a los cuerpos de agua superficial y al suelo, genera un impacto negativo en el ambiente y en la salud humana.

Según el Banco Mundial (2020), el 80% del agua residual producida en el mundo se vierte al ambiente sin haber recibido un tratamiento adecuado, lo que trae como consecuencia que cada año sean más las personas que mueren por enfermedades relacionadas con el agua contaminada. La Organización Mundial de la Salud (2019) estima que al menos el 10% de la población mundial consume alimentos regados con fuentes de agua contaminada, aumentando el riesgo a enfermar por cólera, disentería, fiebre tifoidea, poliomielitis y diarrea.

La contaminación del agua es más crítica en países de bajos ingresos, dado que el tratamiento del agua residual es tan solo del 8%, un porcentaje muy bajo si se compara con el 70% de los países de altos ingresos (UNESCO, 2017). Estas cifras indican la carencia de infraestructura en materia de saneamiento en los países en vía de desarrollo. Por lo tanto, es urgente la necesidad de asegurar una buena gestión de recursos para el desarrollo de proyectos que contribuyan a mejorar la calidad del agua residual de la manera más sostenible y eficiente posible (Banco Mundial, 2020).

De acuerdo con la información reportada por el Departamento Nacional de Planeación (2020) en el CONPES 4004, países latinoamericanos como Chile y Brasil, han alcanzado una depuración del agua residual del 99% y 57% respectivamente, mientras que en Colombia el porcentaje de aguas tratadas es 48.56% (Superintendencia De Servicios Públicos Domiciliarios, 2019). Esta cifra representa una baja cobertura de saneamiento en comparación con aquellos países que han alcanzado valores cercanos al 100%.

Dentro de las tecnologías de tratamiento de agua residual más utilizadas en países de América Latina como Brasil, Chile, Guatemala, México, República Dominicana, se encuentran el sistema de lodos activados, las lagunas de estabilización, el tratamiento primario avanzado (con adición de químicos) y el reactor UASB, que representan el 58%, 15%, 9% y 7% respectivamente. (Noyola et al., 2013).

En Colombia, Según los reportes del SUI comprendidos entre los años 2009 y 2020, las tecnologías de tratamiento más utilizadas son las lagunas de estabilización, sistema de lodos activados, reactor UASB y filtros percoladores con 182, 46, 32 y 24 reportadas respectivamente en 184 municipios. Además, el último informe de Superintendencia De Servicios Públicos Domiciliarios (2019), reporta que existen 712 plantas de tratamiento de agua residual; sin embargo, no todas las plantas operan adecuadamente, puesto que, de las PTAR construidas y distribuidas en 31 departamentos, sólo se reporta información de 273. Las restantes probablemente estén mal diseñadas, construidas o no cuentan con un plan de mantenimiento y operación adecuado para dar cumplimiento a la normativa colombiana de vertimientos puntuales.

Aunque en Colombia se reporte una cobertura de saneamiento cercana al 50%, gran parte de los proyectos se encuentran en los centros urbanos del país, dejando de lado las áreas rurales donde gran parte del agua residual es descargada a los cauces naturales sin ningún tipo de tratamiento, alterando las propiedades químicas del agua y provocando un deterioro progresivo de los ecosistemas que dependen de ellos. La poca inversión en infraestructura de saneamiento da origen a problemas de sanidad y contaminación (Torres, 2018), sobre todo en la zona rural, lo que genera la necesidad de cerrar la brecha que existe con la zona urbana, implementando sistemas de saneamiento sostenibles y eficientes mediante una adecuada selección de tecnología y operación del sistema.

No tratar el agua residual en zonas urbanas y rurales genera problemas de carácter político, ambiental, social y económico (Mosquera y Gómez, 2018), debido a que el bajo presupuesto para la gestión de proyectos de PTAR, generan un sinnúmero de falencias que están inmersas en una mala selección de tecnologías, operación y diseño.

Ahora bien, el crecimiento de la población trae como consecuencia el aumento en las cargas contaminantes de las aguas residuales municipales (CONAGUA, 2007) y un incremento en las concentraciones de compuestos potencialmente dañinos para los cuerpos receptores, ecosistemas, fauna y en la salud humana aumentando el riesgo de padecer enfermedades diarreicas que son la quinta causa de defunción en los países de bajos ingresos (Organización Mundial de la Salud, 2020). Por lo tanto, se tiene la necesidad de evaluar las plantas existentes para optimizar y corregir los problemas de las unidades de tratamiento teniendo en cuenta experiencias internacionales y los criterios de diseño recomendados por la literatura con la finalidad de garantizar el vertimiento de aguas puntuales de acuerdo con la normativa colombiana.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el diseño y construcción con fines de optimización de la planta de tratamiento de agua residual del municipio de La Dorada, Putumayo.

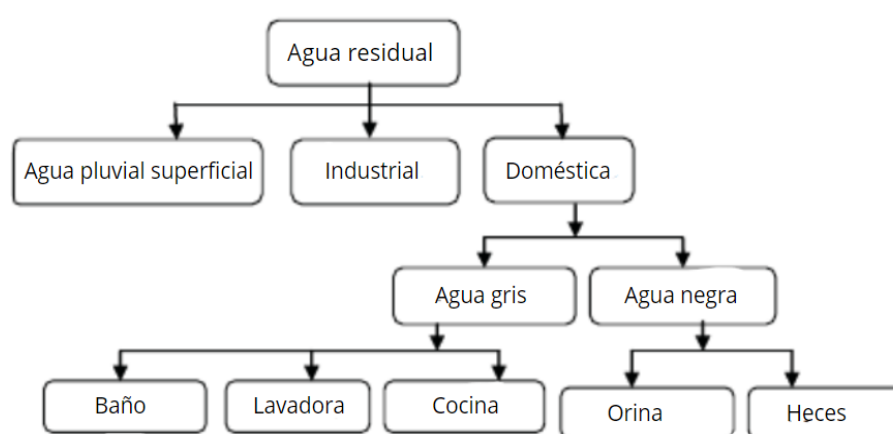
### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Contrastar el diseño y construcción de los componentes de la PTAR
- Definir los puntos críticos que afectan el diseño y la construcción de la PTAR
- Proponer estrategias de optimización de las unidades de tratamiento asociados a la infraestructura de la PTAR

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1 AGUA RESIDUAL

El agua residual es el producto final líquido o subproducto de las diferentes actividades humanas y su composición química refleja naturalmente el origen del que proviene (Ellis, 2004). Corresponde a cualquier tipo de agua cuya calidad física, química y microbiológica haya sido influenciada y modificada por el uso humano, por lo tanto, existen diversos tipos de agua residual (**figura 1**) resultantes de las actividades en zonas residenciales, comerciales, industriales, agrícolas, así como también aquellas provenientes de la escorrentía superficial o pluviales (Fahad et al. 2019).

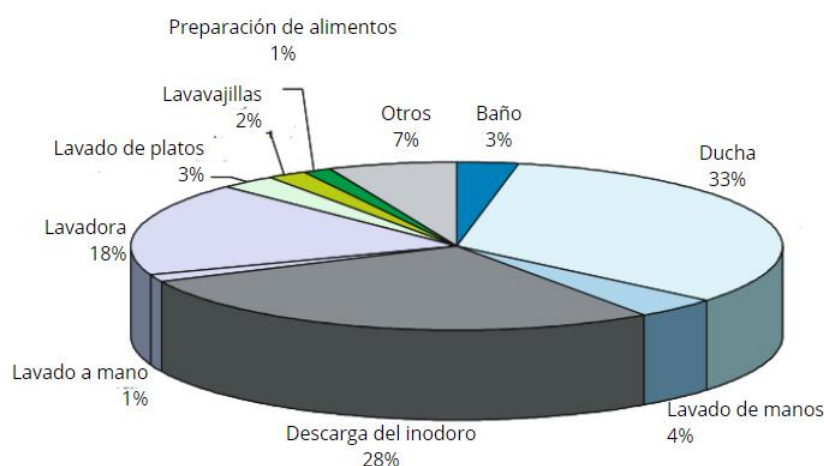


**Figura 1.** Tipos de agua residual

**Fuente:** Amoatey y Bani (2011)

### 2.2 COMPOSICIÓN TÍPICA DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

Se estima que el agua residual doméstica está constituida aproximadamente un 99,9% de agua y el 0,1% de sólidos suspendidos, coloidales y disueltos, siendo esta pequeña fracción de sólidos la que presenta los mayores problemas en su tratamiento y su disposición (Díaz et al., 2012). Entre algunas de las sustancias presentes en el agua residual doméstica se encuentran: residuos de comida, detergentes provenientes del lavado de ropa, desechos provenientes de la utilización de duchas e inodoros, lavado de vehículos, productos químicos de limpieza y entre otras sustancias (Amoatey y Bani, 2011), donde el agua obtiene sólidos, materia orgánica, tensoactivos, grasas y aceites. En la **figura 2** se presenta el porcentaje de agua residual en promedio que representa cada una de las actividades realizadas en el hogar.



**Figura 2.** Porcentaje en promedio de agua residual producida según las actividades del hogar  
**Fuente:** Kujawa y Zeeman (2006)

Según Kujawa y Zeeman (2006), el agua residual doméstica está constituida por diferentes tipos de acuerdo con su punto de generación: agua negra es una mezcla de heces, orina y agua de descarga, compuesta por nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, además de contener patógenos, residuos farmacéuticos y hormonas. Esta concentración de agua negra se ve influenciada por la elección del inodoro, ya que depende de la cantidad de agua que descargue el aparato sanitario; mientras que el agua gris está caracterizada por tener concentraciones más bajas e incluso ausencia de algunos componentes en comparación con el agua negra. El caudal producido por las duchas y el lavado de ropa está ligeramente contaminado, mientras que el agua residual producida en la cocina tiene una carga de contaminación significativa.

El agua residual doméstica tiene características físicas, químicas y microbiológicas que debido a los efectos negativos que produce en el ambiente es necesario su reducción o eliminación, mediante la implementación de plantas de tratamiento de agua residual o sistemas de saneamiento básico. Las principales características del agua residual y sus efectos se presentan en la **tabla 1**.

**Tabla 1.** Características del agua residual

| Características | Componente  | Efecto                                                                                                                          |
|-----------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Físicas         | Color       | <b>Agua residual fresca:</b> café-grisácea<br><b>Agua residual séptica:</b> gris-negro                                          |
|                 | Olor        | <b>Agua residual fresca:</b> Ligeramente desagradable<br><b>Agua residual séptica:</b> Desagradable, debido a la descomposición |
|                 | Temperatura | Afecta la viscosidad, la temperatura del agua residual es mayor a la del agua potable                                           |

**Tabla 1.** Características del agua residual

| Características        | Componente        | Efecto                                                                                                                                                                              |
|------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Químicas</b>        | Materia orgánica  | Compuesta por proteínas, carbohidratos, grasas y aceites. Su presencia disminuye el oxígeno disuelto en el cuerpo de agua. Se mide mediante los parámetros DQO y DBO <sub>5</sub> . |
|                        | pH                | Mayor concentración de iones [H <sup>+</sup> ] dificulta el tratamiento biológico. Generalmente se encuentra entre 6 - 9 unidades.                                                  |
|                        | Alcalinidad       | Normalmente es alcalina, ayuda a resistir los cambios de pH.                                                                                                                        |
|                        | Nutrientes (N, P) | Esenciales para el crecimiento de microorganismos, sin embargo, en grandes concentraciones pueden generar eutrofización de los cuerpos hídricos.                                    |
|                        | Metales           | En concentraciones altas, pueden producir efectos tóxicos, cancerígenos perjudiciales en la salud.                                                                                  |
| <b>Microbiológicas</b> | Bacterias         | Enfermedades intestinales, diarrea, fiebre tifoidea, cólera, gastroenteritis.                                                                                                       |
|                        | Virus             | Causan gastroenteritis, hepatitis infecciosa, meningitis, enfermedades respiratorias.                                                                                               |
|                        | Protozoos         | Mantienen el equilibrio entre los microorganismos dado que consumen bacterias, algas, entre otros. En los humanos causan diarrea severa, náuseas e indigestión.                     |
|                        | Helmintos         | Los huevos de helmintos son responsables de causar ascariasis.                                                                                                                      |

**Fuente:** Metcalf y Eddy (2003)

Su composición física, química y biológica puede variar por factores como el clima, la temperatura, cultura y condiciones socioeconómicas (Metcalf y Eddy, 2003). El caudal y la calidad del agua residual doméstica puede diferir del tipo y modo de uso de los múltiples aparatos empleados en los hogares, además, difiere de un usuario a otro; es decir que la cultura es un papel importante dentro de la composición del agua residual (Larsen et al., 2013). En la **tabla 2** se presenta la composición típica del agua residual doméstica.

**Tabla 2.** Composición típica del agua residual doméstica

| Contaminantes                                           | Unidad  | 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                                   | mg/L    | 5                                | 10                               | 20                               |
| Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> , 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                               |
| Amoníaco libre                                          | mg/L    | 12                               | 25                               | 50                               |
| Nitritos                                                | mg/L    | 0                                | 0                                | 0                                |
| Nitratos                                                | mg/L    | 0                                | 0                                | 0                                |
| Fósforo (total en la forma P)                           | mg/L    | 4                                | 8                                | 15                               |
| Orgánico                                                | mg/L    | 1                                | 3                                | 5                                |
| Inorgánico                                              | mg/L    | 3                                | 5                                | 10                               |
| Cloruros                                                | mg/L    | 30                               | 50                               | 100                              |
| Sulfato                                                 | mg/L    | 20                               | 30                               | 50                               |
| Alcalinidad (como CaCO <sub>3</sub> )                   | mg/L    | 50                               | 100                              | 200                              |
| Grasa                                                   | mg/L    | 50                               | 100                              | 150                              |
| Coliformes totales                                      | n/100mL | 10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup> | 10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup> | 10 <sup>8</sup> -10 <sup>9</sup> |
| Compuestos orgánicos volátiles (COVs)                   | μ/L     | <100                             | 100-400                          | >400                             |

**Fuente:** Metcalf y Eddy (2003)

La composición del agua residual doméstica puede variar considerablemente por los contaminantes liberados de las fuentes domésticas, industriales, comerciales e institucionales (UNESCO, 2017). Según Falconer (2006), el agua residual doméstica (ARD) no contiene sustancias peligrosas, sin embargo, en ocasiones se presentan alteraciones a causa de las malas prácticas en los hogares al arrojar por el inodoro, medicamentos que están parcialmente consumidos, vencidos y deteriorados, estas sustancias modifican la composición típica del agua residual doméstica, aumentando la complejidad del tratamiento.

Cardona (2020) asegura que los antibióticos son moléculas muy complejas de tratar y más aún, cuando las plantas de tratamiento convencionales no son diseñadas para remover moléculas de complejidad química. Es por ello que, a lo largo de los años, se han desarrollado proyectos para el tratamiento del agua residual donde se prioriza conocer su composición fisicoquímica y biológica, para poder establecer estrategias de control de la contaminación y alcanzar las normas de calidad establecidas en las legislaciones vigentes (Torres, 1994).

## **2.3 TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL**

### **2.3.1. Objetivos del tratamiento de agua residual**

El siglo XX fue testigo de la revolución en la gestión del agua residual, las ciencias ambientales y las opiniones sociales sobre la contaminación. Los descubrimientos científicos de la época, los debates sobre las prioridades sociales y el interés del gobierno evolucionaron a lo largo del siglo (Shifrin, 2005), donde también se destaca el octavo informe del año 1912 de la Comisión Real de Disposición de Agua Residual, que introdujo por primera vez el concepto de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) donde se establecieron estándares y pruebas aplicadas al agua residual, que se extendieron por todo el mundo (Lofrano, 2010).

En 1950, los debates sobre contaminación se centraron en los estándares de calidad del agua y la clasificación del uso de las corrientes, precedentes necesarios para el desarrollo de una política de gestión de residuos (Shifrin, 2005). Un nuevo avance en la comprensión de la contaminación ambiental se produjo con la cromatografía de gases y la espectrofotometría de absorción atómica, comercialmente disponibles a finales de 1970 (Lofrano, 2010).

En la **tabla 1** se abordaron múltiples efectos de los principales componentes del agua residual, de ahí radica la importancia y el objetivo de tratar el agua residual, que busca la reducción de estos efectos para mitigar los impactos sobre los cuerpos hídricos receptores de las descargas de agua residual que afectan el entorno ecológico impactando flora, fauna y las comunidades que se benefician de los servicios ecosistémicos que éstos ofrecen. En la **tabla 3** se aborda de manera más concreta algunos objetivos del tratamiento del agua residual y el motivo de importancia de su realización.

**Tabla 3.** Objetivos del tratamiento de agua residual

| Objetivo                                             | Motivo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Reducción de las sustancias orgánicas biodegradables | Las sustancias orgánicas como el carbono, nitrógeno, fósforo y azufre deben descomponerse por medio de oxidación.                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Reducción de la concentración de los nutrientes      | Los nutrientes como el nitrógeno y fósforo enriquecen los cuerpos de agua o los vuelven eutróficos, lo que conlleva al crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas que agotan el oxígeno presente en el agua, afectando la vida acuática.                                                                                                                          |
| Eliminación de patógenos                             | Los patógenos presentes en el agua son mayormente provenientes de las excretas de animales y humanos. Estos organismos como bacterias, virus, hongos, protozoarios, helmintos, entre otros, causan diversas enfermedades.                                                                                                                                                |
| Reciclaje y reutilización del agua                   | El agua es un recurso finito cuyo consumo se ha visto incrementado desde el último siglo debido al crecimiento poblacional. Además, la distribución temporal y espacial del agua ha representado un desafío con los recursos de agua subterránea sobreexplotados, por lo que el reciclaje y reutilización del agua se ha vuelto un punto crucial para la sostenibilidad. |

**Fuente:** Amoatey y Bani (2011)

### 2.3.2 Niveles de tratamiento de tratamiento

El tratamiento del agua residual consiste en la aplicación de procesos físicos, químicos y/o biológicos, los cuales buscan remover los contaminantes presentes en el agua, de tal forma que su vertimiento no afecte la calidad del cuerpo receptor y la salud pública. Este tratamiento se realiza en las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), y está compuesto de diferentes etapas clasificadas de acuerdo con su grado de remoción: tratamiento preliminar, primario, secundario y terciario. En la **Tabla 4** se presentan las características generales de cada etapa de tratamiento.

**Tabla 4.** Etapas del tratamiento del agua residual

| Etapas     | Característica                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Preliminar | En esta etapa se separa el material grueso del agua mediante el uso de rejillas o criba. Se emplea principalmente para proteger los accesorios como bombas, válvulas, tuberías, etc., del taponamiento o interferencia causado por objetos de mayor tamaño como trapos, tarros, entre otros (Romero, 2004). |

**Tabla 4.** Etapas del tratamiento del agua residual

| <b>Etapas</b>        | <b>Característica</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Primaria             | Se refiere a la remoción parcial de sólidos suspendidos relacionados con los sólidos sedimentables, los cuales lo conforman materia orgánica e inorgánica. De esta forma, se mejora la eficiencia de las etapas posteriores. Esta etapa ayuda a amortiguar las variaciones de caudal, así como puede ser usada para un control adecuado de pH para minimizar los requerimientos posteriores en procesos de neutralización (Romero, 2004).                                                                                                                         |
| Secundaria           | En esta etapa se transforma la materia orgánica biodegradable principalmente mediante procesos de tratamiento biológico debido a su bajo costo, facilidad de operación y altas eficiencias de remoción. En el caso del agua residual doméstica o municipal, el objetivo principal es reducir el contenido orgánico y, en ciertos casos, los nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo (Noyola et al, 2013).                                                                                                                                                 |
| Terciaria o avanzada | También conocido como tratamiento avanzado. Es aplicado para eliminar los contaminantes que tienen importantes efectos sobre los ecosistemas y la salud pública, tales como: Turbiedad, patógenos, calcio, potasio, el nitrato y el fosfato. Además, reduce sólidos suspendidos, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, metales pesados y DQO soluble (Hernández, 1998). Los procesos disponibles para el tratamiento terciario son: Filtración, adsorción con carbono, eliminación de fósforo, control de nitrógeno, arrastre de amoníaco (Davis y Masten, 2005). |

## 2.4 SISTEMAS DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO DEL AGUA RESIDUAL

El objetivo del tratamiento biológico es eliminar los contaminantes del agua mediante el uso de microorganismos. En la mayoría de los casos, la materia orgánica biodegradable soluble e insoluble, así como el nitrógeno, son eliminados eficientemente por la acción biológica (Méndez et al, 2018) a través de su metabolismo. Los procesos biológicos se clasifican según las rutas metabólicas primarias presentes en los diferentes microorganismos dominantes activos en el sistema de tratamiento. Estas rutas metabólicas a su vez dependen de la disponibilidad y utilización de oxígeno, por lo tanto, los procesos biológicos se clasifican en aerobios, anóxicos y anaerobios (Ziauddin et al., 2013), en la **tabla 5** se describe brevemente cada uno de ellos.

**Tabla 5.** Descripción de los procesos biológicos

| <b>Proceso</b> | <b>Descripción</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aerobio        | Los procesos de tratamiento que ocurren en presencia de oxígeno molecular (O <sub>2</sub> ) y utilizan la respiración aerobia para generar energía celular, se denominan procesos aerobios. Son procesos metabólicamente más activos, pero también generan mayor cantidad de sólidos como masa celular. |

**Tabla 5.** Descripción de los procesos biológicos

| Proceso   | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Anóxico   | Son procesos que ocurren en ausencia de oxígeno molecular libre ( $O_2$ ) y generan energía a través de la respiración anaerobia. Los microorganismos usan oxígeno combinado de material inorgánico en los desechos como su aceptor final de electrones. Los procesos anóxicos son sistemas biológicos comunes de eliminación de nitrógeno a través de la desnitrificación. |
| Anaerobio | Estos son los procesos que ocurren en ausencia de oxígeno libre o combinado y dan como resultado la reducción de sulfato y la metanogénesis. Por lo general, producen biogás como un subproducto útil y tienden a generar cantidades más bajas de lodos.                                                                                                                    |

**Fuente:** Ziauddin et al. (2013)

Estos principales procesos biológicos se pueden dividir en dos categorías dependiendo del tipo de crecimiento de la biomasa, que puede ser suspendida o adherida a un medio de soporte. Los principales tipos de crecimiento y procesos de tratamiento se presentan en la **tabla 6**.

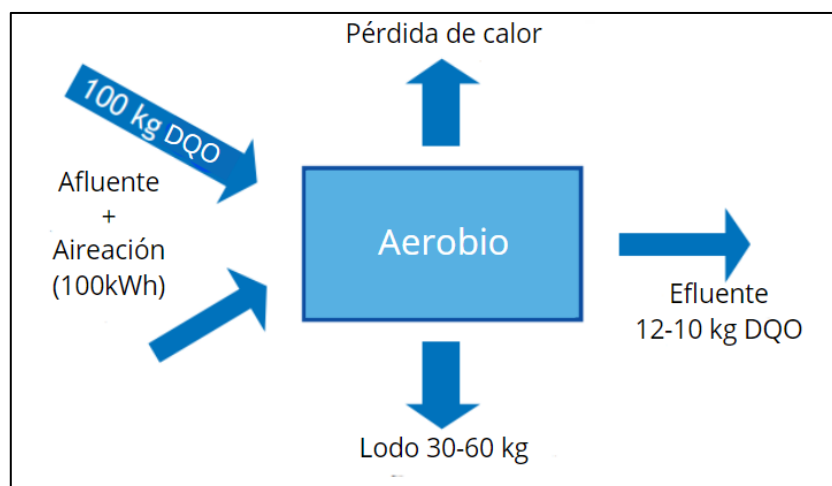
**Tabla 6.** Principales procesos de tratamiento según proceso biológico y tipo de crecimiento

| Proceso biológico | Tipo de crecimiento | Proceso de tratamiento                                                                                                                  |
|-------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aerobio           | Suspendido          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceso de lodos activados</li> <li>• Lagunas aireadas</li> <li>• Digestión aerobia</li> </ul> |
|                   | Adherido            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtro percolador</li> <li>• Reactor de medio empacado</li> <li>• Biodiscos</li> </ul>         |
|                   | Híbrido             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtro percolador / Lodos activados</li> </ul>                                                 |
| Anóxico           | Suspendido          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desnitrificación de crecimiento suspendido</li> </ul>                                          |
|                   | Adherido            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desnitrificación de crecimiento adherido</li> </ul>                                            |
| Anaerobio         | Suspendido          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Digestor anaerobio</li> <li>• Reactor anaerobio de contacto</li> </ul>                         |
|                   | Adherido            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reactor de lecho empacado y fluidizado</li> </ul>                                              |
|                   | Manto de lodos      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reactor anaerobio de flujo ascendente</li> </ul>                                               |
|                   | Híbrido             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reactor anaerobio de flujo ascendente / crecimiento adherido</li> </ul>                        |

**Fuente:** Metcalf y Eddy (2003)

### 2.4.1 Tratamiento aerobio

El tratamiento aerobio consiste en la descomposición biológica de la materia orgánica en presencia de oxígeno. Las bacterias son los organismos más importantes en el tratamiento aerobio del agua residual porque son excelentes oxidando la materia orgánica y se desarrollan bien en ese medio, siendo capaces de formar una capa floculenta gelatinosa de muy buenas características para la remoción de la materia orgánica (Romero, 2004). La **figura 3** muestra el proceso de transformación de la materia orgánica en un sistema aerobio suponiendo que 1 kg DQO requiera 1 kWh de aireación.



**Figura 3.** Transformación de la materia orgánica en procesos aerobios

**Fuente:** van Lier et al. (2008)

El tratamiento aerobio se caracteriza por obtener efluentes de mejor calidad, en comparación con otros procesos biológicos, sin embargo, se debe reconocer los altos costos operativos debido a la energía requerida para la aireación y su alta producción de lodos (van Lier et al., 2008). El tratamiento aerobio presenta las ventajas y limitaciones presentadas en la **tabla 7**.

**Tabla 7.** Ventajas y limitaciones del tratamiento aerobio

| Ventajas                                                                                                                                       | Limitaciones                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| El sistema aerobio produce efluentes bien floculados y de alta calidad debido a la mayor capacidad de eliminación de materia orgánica soluble. | La presencia de oxígeno ha incrementado la tendencia a la formación de hidrocarburos a partir de compuestos orgánicos biodegradables.                                         |
| No requiere un tratamiento posterior de agua residual, ya que proporciona una mejor eliminación de nutrientes                                  | La baja carga y el crecimiento descontrolado de la biopelícula pueden provocar obstrucciones y bloqueo de la circulación de aire. La biopelícula puede comenzar a degradarse. |
| Puesta en marcha relativamente rápida, entre 2 - 4 semanas.                                                                                    | Altos requerimientos energéticos para suministrar aireación                                                                                                                   |

**Tabla 7.** Ventajas y limitaciones del tratamiento aerobio

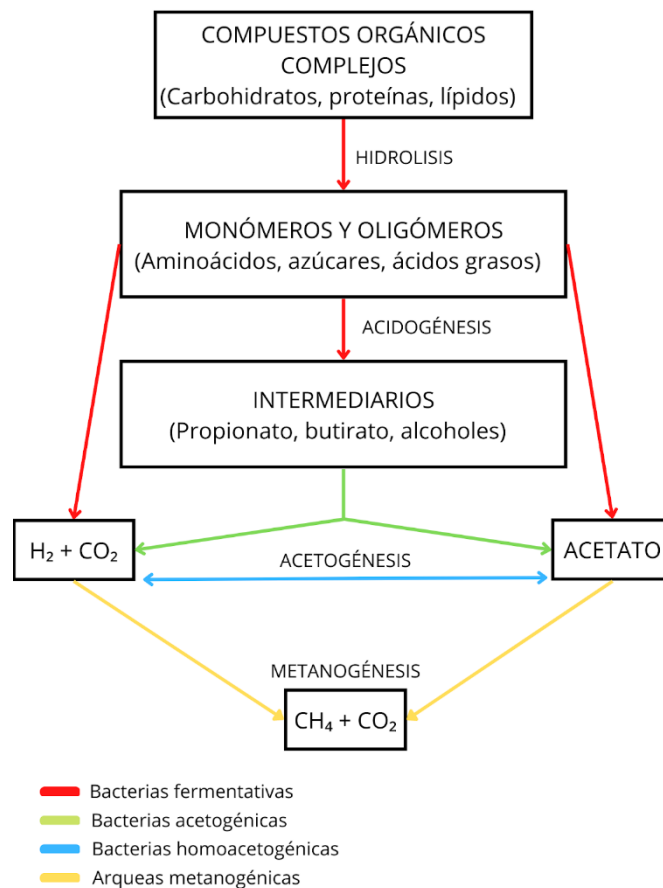
| Ventajas                                | Limitaciones               |
|-----------------------------------------|----------------------------|
| No presenta problemas de olor           | Alta producción de lodo    |
| Tolerancia a los cambios de temperatura | Alta demanda de nutrientes |

**Fuente:** Anijiofor et al. (2017) y Goli et al. (2019)

#### 2.4.2 Tratamiento anaerobio

El tratamiento biológico anaerobio o digestión anaerobia permite la degradación de la materia orgánica por medio de una fermentación llevada a cabo por microorganismos en un recinto cerrado y en ausencia de oxígeno. Como cualquier proceso biológico, este requiere ciertas condiciones de temperatura, pH, y un tiempo de duración específico, con el fin de que los microorganismos proliferen y puedan metabolizar la materia orgánica correctamente (Belzona, 2010).

En la digestión anaerobia se degrada la materia orgánica por medio de cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (**figura 4**), donde se produce el biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono.



**Figura 4.** Transformación de la materia orgánica en la digestión anaerobia

**Fuente:** Dávila y Razo (2007)

La digestión anaerobia se puede realizar en sistemas simples y es aplicable a cualquier escala y en cualquier lugar. La cantidad de lodo que se produce es baja y se trata de un lodo estabilizado, llegando incluso a tener un valor de mercado cuando en el biorreactor se producen lodos granulares. Además, se produce energía útil en forma de biogás en lugar de consumir altos grados de energía (Akhtar, 2017).

Según van Lier et al. (2008), la digestión anaerobia tiene algunas ventajas sobre el tratamiento convencional aerobio, estas son:

- Reducción en el exceso de producción de lodo hasta en un 90%.
- Reducción de hasta 90% del espacio requerido cuando se usan sistemas de lecho de lodo expandido.
- Requiere menor volumen de reactor para soportar altas tasas de carga de DQO, alcanzando hasta los 20-35 kg de DQO por m<sup>3</sup> de reactor por día.
- Producción aproximada de 13,4 MJ CH<sub>4</sub> (energía) por 1 kgDQO eliminado, dando 1,5kWh de electricidad.
- Nulo o muy poco uso de químicos.
- Tecnologías sencillas con altas eficiencias de tratamiento.
- El exceso de lodo tiene un valor de mercado.

Mientras que Anijiofor et al. (2017) y Ziauddin (2013), mencionan las siguientes limitaciones de la digestión anaerobia:

- El efluente generado es de menor calidad en comparación al obtenido con el tratamiento aerobio debido a la baja tasa de crecimiento de los microorganismos, baja tasa de sedimentación y las inestabilidades que conducen a obtener efluentes tóxicos compuestos por iones de amonio y sulfuro de hidrógeno.
- Cuando el agua residual a tratar contiene sulfitos, se generan malos olores debido a la producción de biogás que contiene sulfuro de hidrógeno.
- Largos periodos de arranque debido a la baja tasa de crecimiento de los organismos metanogénicos.

#### **2.4.3 Combinación de procesos biológicos: digestión anaerobia - proceso aerobio**

Debido a que no se degrada completamente la materia orgánica en los reactores anaerobios, siempre habrá una fracción de DQO remanente presente en el efluente, junto con nutrientes (Kujawa y Zeeman, 2006) haciendo necesario un tratamiento posterior, que puede ser llevado a cabo a través de procesos aerobios. El tratamiento de agua residual doméstica en procesos anaerobios-aerobios combinados aprovecha las ventajas de los dos procesos. En comparación con las tecnologías aerobias convencionales, el sistema combinado anaerobio-aerobio consume claramente menos energía, produce menos lodo en exceso y su funcionamiento es menos complejo (von Sperling y Chernicharo, 2005).

Algunas de las ventajas de los procesos biológicos combinados anaerobio-aerobio según Anijiofor (2017) son:

- Un gran potencial para la recuperación de energía, ya que el tratamiento de agua residual mediante la digestión anaerobia es capaz de eliminar los contaminantes orgánicos convirtiéndolos en biogás.
- Al estar en combinación con el proceso aerobio se potencian los resultados de eliminación y se obtienen efluentes de mejor calidad.
- Menor volumen de producción y tratamiento de lodos debido a que el exceso de lodos aerobios es disminuido porque menor cantidad de materia orgánica va a ser tratada en el sistema aerobio. Además, es posible tratar el lodo aerobio en el reactor anaerobio.
- Bajo consumo de energía, ya que el tratamiento anaerobio reduce la demanda de oxígeno en el sistema aerobio, lo que ayuda a reducir el requerimiento de aireación.

Kassab et al., (2010), realizaron una revisión documental de los sistemas combinados anaerobios-aerobios con énfasis en los sistemas de alta tasa. Estos sistemas se clasificaron según el tipo de crecimiento en el reactor aerobio, es decir de crecimiento suspendido o adherido. La **tabla 8** presenta un resumen de los sistemas combinados y sus eficiencias alcanzadas en el tratamiento de agua residual doméstica.

**Tabla 8.** Eficiencias de remoción obtenidas en los sistemas combinados anaerobio-aerobio según el tipo de crecimiento aerobio

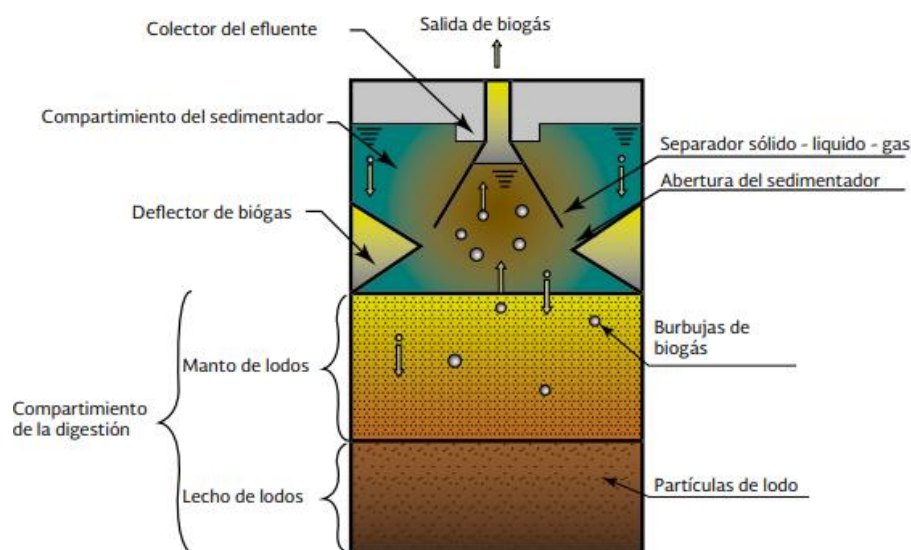
| Tipo de crecimiento                                                      | Sistema anaerobio-aerobio                                                     | Eficiencia de remoción (%) |       |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|
|                                                                          |                                                                               | DQO total                  | SST   |
| Sistemas combinados anaerobio-aerobio con crecimiento aerobio suspendido | UASB - Lodos activados                                                        | 85-93                      | 85-95 |
|                                                                          | UASB - Reactor biológico secuencial aerobio                                   | 91                         | 84    |
|                                                                          | UASB - Jet Loop Reactor                                                       | 87-95                      | -     |
|                                                                          | Reactor biológico secuencial anaerobio - Reactor biológico secuencial aerobio | 94                         | -     |
| Sistemas combinados anaerobio-aerobio con crecimiento aerobio adherido   | UASB - Filtro percolador                                                      | 80-88                      | 80-89 |
|                                                                          | UASB - Biodiscos                                                              | 95                         | -     |
|                                                                          | UASB - Reactor DHS (Downflow Hanging Sponge)                                  | 91                         | 93    |
|                                                                          | UASB - Filtro aireado sumergido                                               | 88                         | 76    |

**Fuente:** Kassab et al. (2010)

## 2.5 TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

### 2.5.1 Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)

El reactor UASB se desarrolló en los Países Bajos a principios de los años 70 (Lettinga et al., 1991) y son ampliamente utilizados alrededor del mundo, dada su capacidad de tratar diferentes tipos de agua residual a altas tasas de carga (Ferrera et al., 2022). Esta tecnología no requiere de un medio empacado o de soporte y logra una alta eficiencia de eliminación de sólidos suspendidos y DQO, por medio de un manto de lodo floculento o granular activo (Nnaji, 2013). El afluente fluye en sentido ascendente a través del manto de lodos (conformado por microorganismos anaerobios), donde la materia orgánica biodegradable se transforma en biogás, el cual está compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono (CONAGUA, sf). El biogás producido genera una circulación interior o mezcla. El biogás, el lodo y el agua ascienden a la parte superior del reactor, en donde entran en contacto con deflectores que permiten la separación del biogás y de las partículas sólidas, logrando que el agua sea recolectada por la parte superior, los sólidos sedimenten y retornen al manto de lodos y el biogás sea captado (Rosales, 2019) en una campana de recolección que se encuentra en la parte superior del reactor. La **Figura 5** presenta un dibujo esquemático del reactor UASB.



**Figura 5.** Dibujo esquemático de un reactor anaerobio de flujo ascendente

**Fuente:** Chernicharo (2007)

Las principales ventajas y limitaciones del reactor UASB se presentan en la **tabla 9**. La característica principal de un reactor UASB, que lo convierte en una tecnología conocida en todo el mundo como un digestor anaerobio de alta tasa es la disponibilidad de lodo granular o floculento, que le permite lograr eficiencias de eliminación de DQO sin necesidad de un medio de soporte, además, la turbulencia natural generada por las burbujas de gas liberadas en el proceso de digestión anaerobia, proporcionan un contacto eficiente entre el agua residual y la biomasa, por lo tanto, al no requerirse mezcla mecánica se reduce significativamente la demanda y el costo energético (Chong et al., 2012).

**Tabla 9.** Principales ventajas y limitaciones del reactor UASB

| <b>Ventajas</b>                                                                                                                                                                                           | <b>Desafíos / Limitaciones</b>                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Maneja altas velocidades de flujo de agua residual con un tiempo de retención muy inferior en comparación con otros tipos de reactores.                                                                   | El exceso de ácidos grasos volátiles en el afluente disminuye la alcalinidad bicarbonática, por lo tanto, conducen a la acidificación del reactor provocando fallas en el mismo.  |
| Cuenta con el separador gas-líquido-sólido (GLS) que mejora el contacto entre los microorganismos y el agua residual.                                                                                     | Se requiere mejorar la zona de sedimentación para evitar la salida de sólidos en el efluente.                                                                                     |
| Los tiempos de retención de sólidos e hidráulicos se pueden manipular de manera independiente y efectiva. Cuando se obtiene granulación, los tiempos de tratamiento se pueden reducir significativamente. | Se pueden producir retrasos en la puesta en marcha y la formación de gránulos, el arranque del reactor define la eficacia y estabilidad del reactor.                              |
| No requiere control de la temperatura debido a la liberación de calor que se produce durante la metanogénesis. Así se mantienen las condiciones mesófilas dentro del reactor.                             | El reactor no puede funcionar a la tasa de carga orgánica de diseño antes del periodo de aclimatación / adaptación del inóculo implementado.                                      |
| Se producen cantidades de lodo muy pequeñas, que se retiran en periodos más largos.                                                                                                                       | El reactor no puede eliminar los agentes patógenos y colorantes del agua residual por sí solo, por lo tanto, requiere de tratamientos posteriores para una mejor calidad de agua. |

**Fuente:** Bobade (2015)

La eficiencia de un reactor UASB depende en gran medida de la actividad microbiana en el reactor. La estabilización de la materia orgánica en un reactor UASB, es un proceso que involucra bacterias hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y arqueas metanogénicas (Kobayashi et al., 2009).

Un reactor UASB bien diseñado suele obtener un efluente con un orden del 65% de eliminación de DQO y un 70% de remoción de DBO. Generalmente, en el caso de agua residual doméstica típica, se obtiene un efluente con concentración máxima 120 mg/L de DBO y se puede obtener un valor inferior a 80 mg/L de SST (Jordão y Pessôa, 2011). Esta eficiencia se ve afectada por la temperatura, la composición del agua residual, el diseño del reactor, pH, toxicidad, velocidad de flujo ascendente, tamaño y composición del manto de lodo, la actividad microbiana y el tipo de mezcla (Nnaji, 2013). Singh et al. (2006) observaron que el régimen de mezcla de los reactores UASB que tratan agua residual municipal se ve afectado por la temperatura, dado que para temperaturas entre 20 y 30°C se evidenció comportamiento de reactor completamente mezclado con una mezcla lenta adicional, mientras que aquellos que operan a temperatura menores a 20°C tienden a comportarse como reactores de flujo pistón.

La experiencia de países latinoamericanos como Colombia, México y Brasil es destacada, ya que fueron los países pioneros en la definición del potencial de los reactores UASB para el tratamiento de ARD en condiciones de clima tropical. La primera planta piloto de 64 m<sup>3</sup> fue construida en Cali, Colombia en el año 1982 para tratar ARD, a una temperatura de 25 °C obteniendo resultados satisfactorios, con eficiencias de reducción de DQO y DBO mayores 75 % (Schellinkhout et al., 1985). Además, la ventaja de los reactores UASB es que los costos de operación y mantenimiento son relativamente bajos (Castro et al, 2019). Los tipos de agua residual industrial mayormente utilizadas para tratamiento en el reactor UASB son las provenientes del sector alimenticio, papeler, farmacéutico, cervecero, azucarero y sus derivados (Ruiz et al, 2000).

La exitosa experiencia en estos países es una fuerte indicación del potencial de este reactor para el tratamiento de agua residual doméstica. La digestión anaerobia a través de reactores UASB presenta varias ventajas cuando son comparados con los procesos aerobios convencionales, especialmente cuando se aplica en regiones con climas cálidos, como el que se presenta en la mayoría de los países en vía de desarrollo (von Sperling y Chernicharo, 2005).

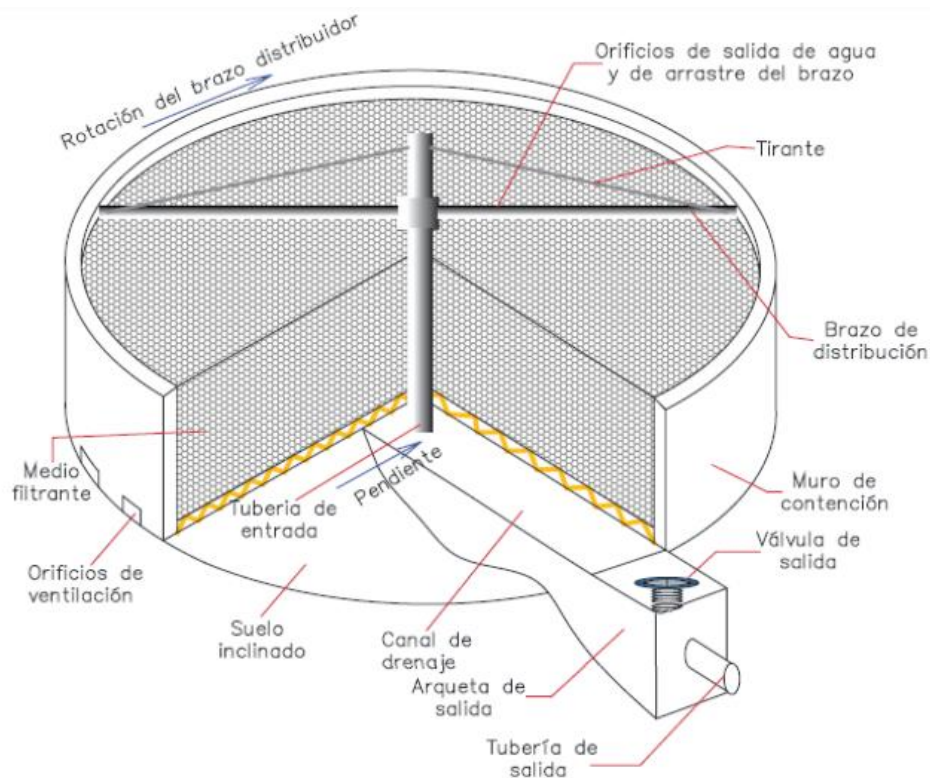
El interés en investigar los reactores UASB está creciendo principalmente en cuatro tópicos: Producción de energía, combinaciones con otros sistemas de tratamiento, procesos de remoción de contaminantes específicos, caracterización de la comunidad microbiana y composición del lodo granular (Collivignarelli et.al., 2021).

### **2.5.2 Filtros percoladores**

Un filtro percolador o lecho bacteriano es una unidad de tratamiento biológico y consiste en un tanque, cilíndrico o rectangular (Gutiérrez et al, 2005) que tiene como objetivo reducir la carga orgánica presente en el agua residual (Duque y Castillo, 2010). La forma de un filtro está relacionada con el tipo de distribución (CONAGUA, Sf). Sin embargo, los filtros circulares generalmente son los de mayor construcción, porque se logra una mejor distribución del agua residual en la sección transversal del filtro (Reyes y Mazzoco, 2009).

Los filtros percoladores pueden alcanzar diámetros hasta 60 m y profundidades de 1,5 a 12 m (RAS, 2000). La profundidad del filtro percolador puede variar dependiendo del tipo de agua a tratar, entre más profundo es el medio, más carga hidráulica u orgánica puede tratar por día (Lesikar y Enciso, 2001). Los filtros pueden ser de carga orgánica aplicada baja, intermedia, alta, y muy alta, o pueden ser de desbaste, o de doble etapa.

Los factores de mayor importancia en un filtro percolador son: medio filtrante o de soporte, carga orgánica o hidráulica, sistemas de ventilación, sistema de drenaje y sistema distribución (CONAGUA, sf). En la **figura 6** se presenta la configuración de un filtro percolador con sus componentes.



**Figura 6.** Esquema de filtro percolador

**Fuente:** Carvajal (2020)

El agua residual se distribuye por medio de brazos fijos o móviles y cae por gravedad, a una biopelícula adherida al medio filtrante, la cual oxida la materia orgánica por acción de los microorganismos (Rincón et al., 2009). Según Ríos y Rafael (1980) el sistema de distribución pueden ser brazos giratorios y tuberías fijas. Los brazos giratorios son los más utilizados y consta de dos o más tuberías horizontales que giran por medio de un motor y se mantienen a poca altura del medio filtrante. El sistema de distribución de tuberías fijas es menos utilizado que el tipo giratorio, por la baja uniformidad del agua residual sobre el medio filtrante. En la **tabla 10**, se presentan algunas ventajas y limitaciones de los filtros percoladores.

Existen varios tipos de medio filtrante tales como: grava, piedra quebrada, piedra de campo, boleos, tabiques, carbón, remanente, conchas de mariscos, latas de estaño, tiras de madera, tiras de polietileno y material sintético (CONAGUA, Sf). Este último es el más recomendado para tratar agua residual principalmente, con alta carga orgánica e hidráulica, puesto que la estructura del material sintético brinda una mayor área/volumen, es decir que permite mayor carga hidráulica u orgánica gracias al alto porcentaje de espacio vacíos, también brinda mayor adherencia de microorganismo por unidad de volumen y, por último, permite una mayor aireación (CONAGUA, Sf).

**Tabla 10.** Ventajas y limitaciones de los filtros percoladores

| <b>Ventajas</b>                                                                                                                                                                                                                    | <b>Limitaciones</b>                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bajo requerimiento energético, los filtros percoladores generalmente no requieren equipo adicional que consuma energía.                                                                                                            | La carga orgánica excesiva o una ventilación inadecuada puede provocar problemas de olores debido a que se presentará descomposición anaerobia.                                                             |
| Bajos requerimientos de mantenimiento debido a la baja cantidad de piezas móviles.                                                                                                                                                 | Aparición de moscas e insectos alrededor de los filtros si no hay una correcta limpieza y la humedad del medio filtrante es inadecuada.                                                                     |
| Los lodos del filtro percolador se componen principalmente de la capa biológica que se desprende. Este tipo de lodo tiende a asentarse e hidratarse más fácilmente que los residuos de lodos activados de las PTAR convencionales. | El desprendimiento de la biopelícula puede provocar taponamientos del medio filtrante que resulta en una remoción ineficiente de los contaminantes y por lo tanto una reducción en la calidad del efluente. |
| Resistencia alta a toxinas o las variaciones de carga, tienen la capacidad de recuperarse de las variaciones dado que no es un sistema de mezcla completa.                                                                         | Los filtros percoladores no tienen características que les permitan ajustarse rápidamente en un aumento de la carga, no se pueden ajustar para lograr un alto nivel de tratamiento.                         |
| Los filtros percoladores son fáciles de operar y no requieren de una operación sofisticada para obtener un buen efluente.                                                                                                          | Puede ser necesario bombeo para llevar el agua residual a una posición más alta que permita que el flujo pueda salir a través de los brazos de distribución.                                                |

**Fuente:** Departamento de Protección Ambiental (2016)

## **2.6 EXPERIENCIAS DEL SISTEMA COMBINADO REACTOR UASB – FILTRO PERCOLADOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA**

Pontes y Chernicharo (2003), evaluaron la influencia del exceso de lodo producido en un filtro percolador sobre el desempeño de un reactor UASB usado para el tratamiento combinado de agua residual doméstica. Durante la fase 1 de la investigación, el sistema fue alimentado con agua residual doméstica bombeada directamente desde el colector de alcantarillado del arroyo Arrudas, en Belo Horizonte – Brasil. Durante la fase 2, además de alimentar el reactor UASB con el agua residual doméstica, también se alimentó con los lodos del filtro percolador. Observaron que no se presentó ningún efecto adverso sobre el rendimiento del reactor UASB que recibía la recirculación de los lodos del filtro percolador; por el contrario, los resultados de DQO indicaron un mayor porcentaje de cumplimiento de los estándares de descarga establecidos por la entidad de regulación ambiental. El filtro percolador incrementó la estabilidad operacional del sistema de tratamiento y se obtuvo una mejor calidad del efluente

final. Con respecto a la DBO, las concentraciones finales en el filtro percolador se mantuvieron siempre por debajo de 60 mg/L.

Conil (2004), realizó una revisión de los reactores UASB construidos en América Latina empleados para el tratamiento de agua residual doméstica. En su investigación se abordan experiencias con la implementación de esta tecnología que han resultado exitosas. En Colombia se construyó la primera planta UASB del mundo a escala real para tratamiento directo de agua residual doméstica del barrio Vipasa de la ciudad de Cali. Esta planta inició su arranque en 1988 y fue diseñada para tratar un caudal de 45 L/s. Sin embargo, debido a que la planta no contaba con la captación y combustión del biogás, su puesta en marcha no pudo ser exitosa debido a los fuertes olores en la zona residencial aledaña. En 1993 se presentaron los arreglos correspondientes y la planta pudo operar sin inconvenientes. La Planta de Río Frío ubicada en Bucaramanga tiene una capacidad de 540 L/s y se trata de una de las plantas de tratamiento de agua residual doméstica con reactores UASB más grandes del mundo. Sin embargo, el diseño de esta planta se considera de primera generación, por lo tanto, se presenta arrastre de sólidos suspendidos al post-tratamiento y, a pesar de tener una buena recolección y combustión del biogás se presentan olores desagradables para la zona residencial. Dentro de las conclusiones de las PTAR se consideró el filtro percolador como el postratamiento del efluente del reactor UASB como uno de los más prácticos y económicos, donde se pudo evidenciar que los costos de inversión se encuentran entre los 40 USD\$/hab y los costos de operación y mantenimiento entre 1,1 a 2,7 USD\$/hab, haciendo que esta combinación resulte ser una de la más favorables en comparación con otras tecnologías como los lodos activados, posibilitando el acceso al tratamiento de agua residual en países o municipios con escasos o limitados recursos.

Nada et al. (2011), han investigado la construcción de un reactor UASB seguido de un filtro percolador como tratamiento posterior. El desempeño del reactor UASB fue monitoreado por un período de 20 meses mediante la implementación de un programa intensivo de monitoreo. Después de alcanzar el estado estacionario de 20 semanas, los valores promedio de remoción en términos porcentuales fueron  $70,05\% \pm 11,22$  para DQO total,  $70,35 \pm 12,97$  para  $\text{DBO}_5$  total y  $85,56\% \pm 7,26$  para SST. La eficiencia general de la planta de tratamiento fue satisfactoria. Se logró una eliminación promedio total de  $\text{DBO}_5$  de hasta un 90,26 % y para DQO total y SST fueron 83,14 % y 87,36 %, respectivamente. Los costos de operación y mantenimiento de la planta UASB se compararon con otras plantas de tratamiento de agua residual que utilizan diferentes tecnologías. Los resultados indicaron que los costos de operación y mantenimiento son entre un 30 % y un 60 % más bajos que los de otros sistemas, principalmente debido a los bajos requisitos de energía.

La investigación realizada por Almeida et al. (2011), se evaluaron los filtros percoladores seguido de reactores UASB en términos de la eliminación de DQO,  $\text{DBO}_5$  y SST. El procedimiento experimental constaba de un reactor UASB que un filtro percolador con cuatro compartimentos de reacción independientes rellenos con diferentes materiales de soporte (anillos plásticos, espumas de poliuretano, escoria de alto horno y tubo flexible corrugado PVC de diámetro 1"). El reactor UASB operó en régimen permanente y se tuvieron tres condiciones de operación en función de la variación de caudal y, en consecuencia, de las tasas de aplicación

superficial y cargas orgánicas en cada fase del experimento. Se pudo comprobar que los sistemas UASB/Filtro Percolador cumplieron con los estándares requeridos por la normativa en la descarga y adicionalmente observaron que el medio de soporte a base de espumas de poliuretano proporcionó mejoras significativas en la calidad final del efluente, además una menor producción de lodos en este sistema, esto lo hace una alternativa llamativa para los casos en los que se desee operar sin sedimentador secundario. Además, la investigación resalta la importancia de la etapa anaerobia dado que representó alrededor del 70% al 90% de la remoción de DQO y DBO.

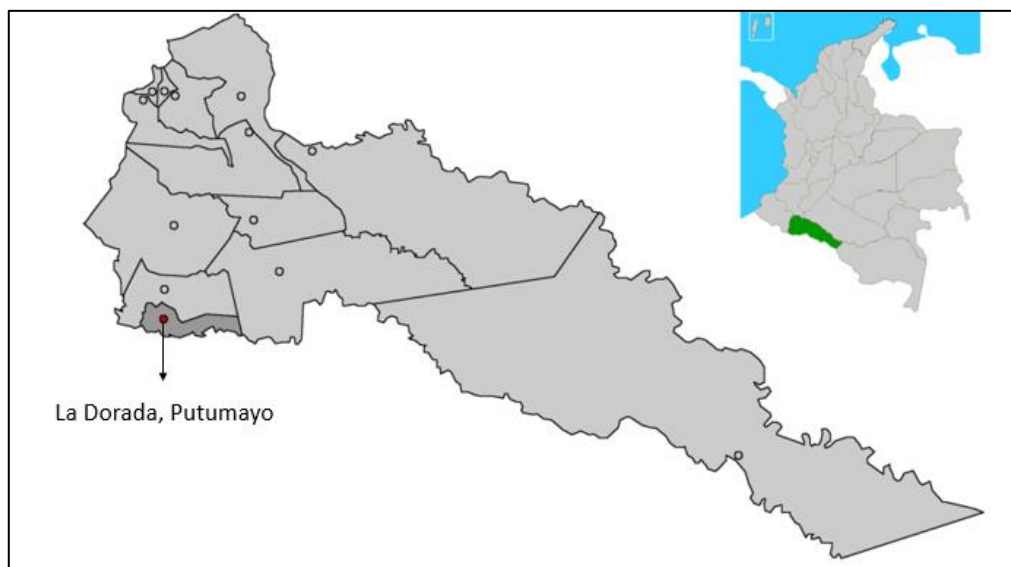
Torres et al. (2016) evaluaron la configuración reactor UASB seguida de Filtro Percolador en el Valle del Cauca, Colombia, donde existen 19 PTAR con esta configuración. Dentro de los análisis y resultados encontraron que las PTAR muestran debilidades en la selección inadecuada de los criterios de diseño y deficiencias en la operación y mantenimiento. A pesar de los puntos críticos identificados la configuración UASB/Filtro Percolador logró eficiencias de eliminación de DQO, DBO<sub>5</sub> y SST superiores al 80%. Estos resultados demostraron la eficiencia de la tecnología y el gran potencial que se alcanzaría al tener en cuenta las recomendaciones de diseño dadas por la literatura y la experiencia práctica asociada a esta configuración.

En el estudio realizado por Philomina et al. (2022) se evaluó el rendimiento de una planta de tratamiento de agua residual municipal a gran escala en la ciudad de Accra, capital de Ghana, país ubicado al oeste de África. La PTAR combina reactores UASB con filtros percoladores y sedimentadores finales. Los autores concluyeron que los reactores UASB funcionaban a temperatura mesófila bajo condiciones operativas de TRH entre  $46 \pm 25$  h, velocidad ascendente de  $1,0 \pm 0,2$  m/h, y una tasa de carga orgánica entre  $1,3 \pm 0,8$  kgDQO/m<sup>3</sup>/d. La planta obtuvo altas eficiencias de eliminación de DQO (93%), DBO (98%), TSS (93%) y cargas microbianas (94-95%). Los sedimentadores finales mejoraron la eliminación de sólidos, materia orgánica y cargas microbianas, asegurando los cumplimientos de calidad reglamentarios en Ghana; sin embargo, la PTAR no logró una remoción adecuada de nutrientes (N y P), ya que el efluente contenía concentraciones de 84 mg/L de N y 29 mg/L de P, superando los límites máximos permisibles por la entidad regulatoria de las descargas de agua residual. Este mal rendimiento de eliminación de nutrientes se atribuye a la ausencia de la recirculación en los filtros percoladores que mejoraría el proceso de nitrificación, también se le atribuye al insuficiente carbono orgánico residual en el efluente de los reactores UASB que permitiría facilitar el proceso de desnitrificación en el filtro percolador y, por último, se le atribuye al desequilibrio general de nutrientes C:N:P en el agua residual entrante.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDIO

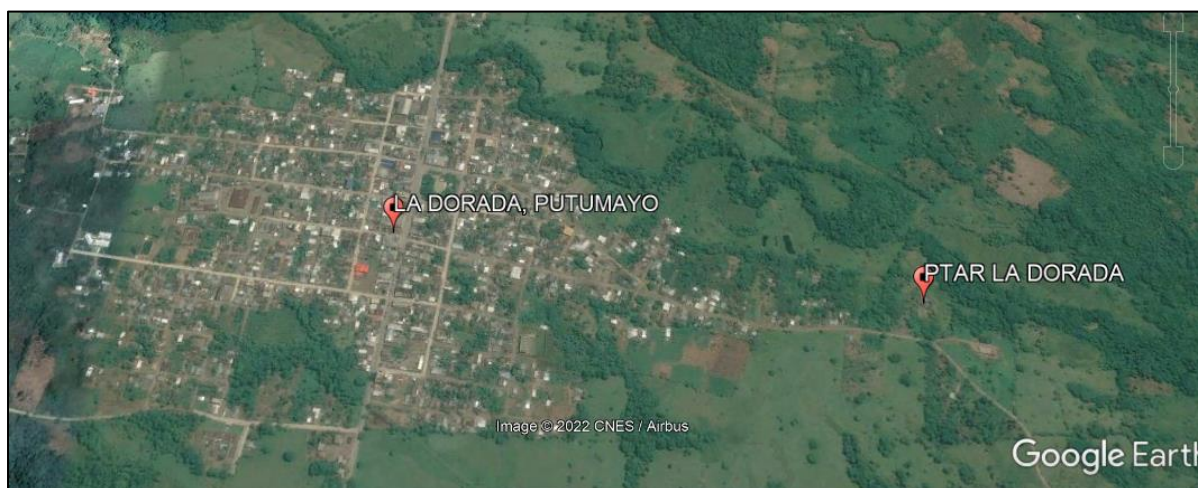
La investigación del trabajo de grado se desarrolló en la planta de tratamiento de agua residual (PTAR) La Dorada, en el departamento del Putumayo, ubicado en el extremo suroccidental de Colombia, tal como se muestra en la **figura 7**.



**Figura 7.** Localización de la zona de estudio

**Fuente:** <https://commons.wikimedia.org/>

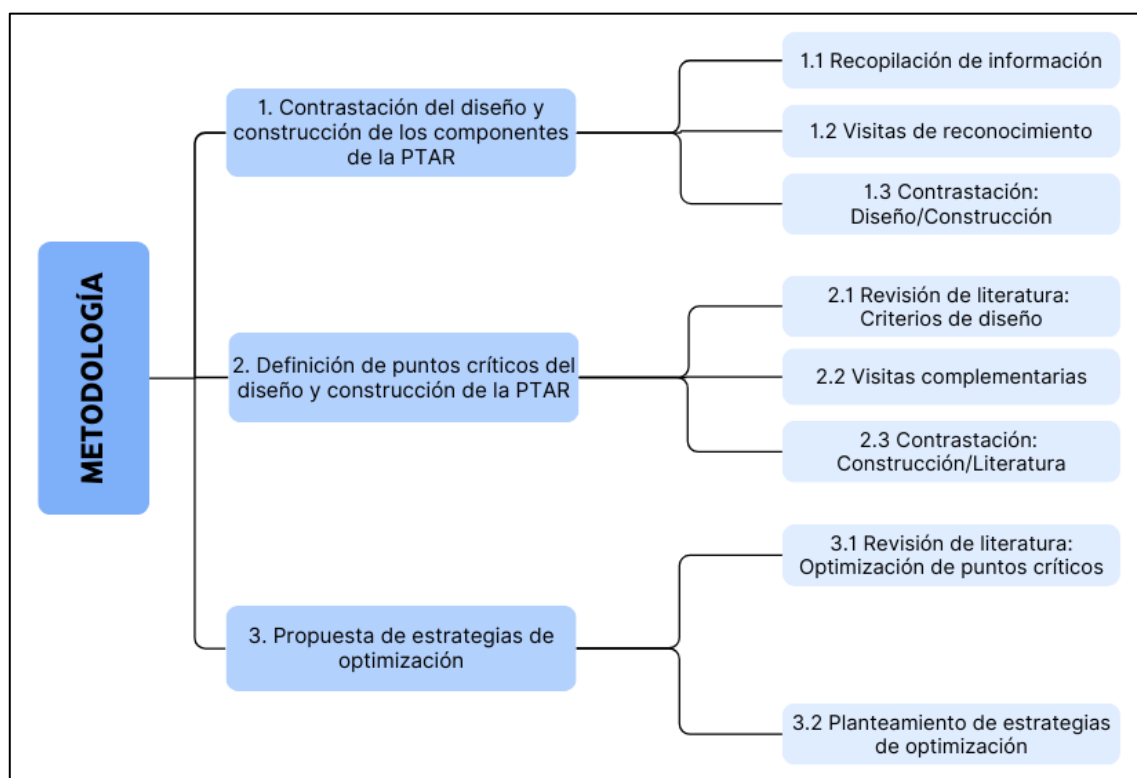
El casco urbano La Dorada, cabecera municipal de San Miguel, se encuentra a una distancia de 146 km de Mocoa, desde donde se llega por vía terrestre en un trayecto de aproximadamente cuatro horas (Alcaldía de San Miguel, 2016). La **figura 8** presenta la ubicación exacta de la PTAR La Dorada, ubicada en la vereda Nueva Risaralda a 800 metros del casco urbano.



**Figura 8.** Ubicación de la PTAR

**Fuente:** Google Earth

En la **figura 9**, se presenta el diagrama metodológico de la investigación.



**Figura 9.** Diagrama metodológico de la investigación

### 3.2 CONTRASTACIÓN DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PTAR

El proceso de contrastación inicia por medio de la recopilación de información de la PTAR La Dorada, mediante solicitudes de información realizadas a Corpoamazonia, a la Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios (ESP) del municipio de San Miguel y la alcaldía municipal.

Por parte de Corpoamazonia se obtuvo el plan de manejo ambiental (PMA), que contempla el proyecto de la construcción del alcantarillado y la PTAR, como también los informes de las visitas técnicas de seguimiento y monitoreo que se realizaron a la PTAR desde el año 2008 hasta el año 2022. La empresa de servicios públicos domiciliarios del municipio de San Miguel suministró los planos en AutoCAD del diseño de las unidades de la PTAR, la memoria de diseño y también las caracterizaciones del agua residual del afluente y efluente. La alcaldía municipal de San Miguel suministró el plan de desarrollo del municipio y el manual de operación y mantenimiento de la PTAR La Dorada. En la **tabla 11** se presenta la información recopilada de los documentos suministrados por cada entidad.

**Tabla 11.** Información recopilada a partir de los documentos suministrados por las entidades públicas

| Entidad                                                   | Documentos suministrados                                   | Información recopilada                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Corpoamazonia                                             | Plan de manejo ambiental                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proyecto inicial de alcantarillado y PTAR</li> <li>• Tipo de alcantarillado</li> <li>• Longitud total del alcantarillado, diámetro de tuberías, tipo y número de cámaras.</li> <li>• Población beneficiada del proyecto</li> <li>• Costos del proyecto</li> <li>• Información hidrológica sobre la fuente receptora</li> <li>• Características fisicoquímicas y bacteriológicas de la fuente</li> <li>• Permiso de vertimientos</li> </ul> |
|                                                           | Visitas técnicas de seguimiento y monitoreo (2008-2022)    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Situación encontrada en cada visita de monitoreo con registros fotográficos.</li> <li>• Estado de cumplimiento de las obligaciones de la PTAR según la resolución DTP No. 0332</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios de San Miguel | Caracterizaciones del agua residual                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Parámetros fisicoquímicos en el afluente y efluente</li> <li>• Parámetros microbiológicos en el afluente y efluente</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                                           | Memoria de cálculo y diseño                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Periodo de diseño</li> <li>• Nivel de complejidad</li> <li>• Caudal de diseño</li> <li>• Cálculos de diseño de las unidades de tratamiento</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios de San Miguel | Planos técnicos del diseño                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño del perfil hidráulico de la PTAR en planta y corte</li> <li>• Plano localización general PTAR</li> <li>• Plano topografía PTAR</li> <li>• Plano técnico de cada unidad de tratamiento</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                    |
| Alcaldía municipal de La Dorada                           | Manual de operación y mantenimiento de la PTAR             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Componentes del sistema de tratamiento con fotografías</li> <li>• Descripción del funcionamiento de cada unidad</li> <li>• Labores de operación y mantenimiento</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|                                                           | Plan de desarrollo del municipio de San Miguel (2020-2023) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Información sociocultural de la comunidad</li> <li>• Situación actual en sector de agua potable y saneamiento</li> <li>• Plan estratégico de saneamiento y agua potable</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                         |

A partir de los documentos obtenidos se realizó una descripción de la información recopilada, con el fin de tener un panorama más amplio de la situación de la PTAR.

### **3.2.1 Visitas de reconocimiento**

Las visitas de reconocimiento se realizaron inicialmente para conocer los componentes del sistema de tratamiento, entender su funcionamiento y corroborar si lo que se encuentra plasmado en las memorias de cálculo, diseño y planos técnicos, coincide con lo construido. Adicionalmente, la visita en campo permitió conocer las labores de operación y mantenimiento, verificar si el operario conoce el manual de operación y cuenta con el conocimiento necesario para operar y mantener adecuadamente la tecnología presente en la PTAR, también se corroboró si hay algún procedimiento que se realice en la planta durante alguna eventualidad, que pueda afectar el funcionamiento de las unidades de tratamiento y, si se cuenta con laboratorio y equipo necesario para realizar mediciones de parámetros fisicoquímicos, que permitan vigilar y controlar el funcionamiento de las unidades de tratamiento.

### **3.2.2 Contrastación de la información**

La contrastación de la información se realizó por medio de comparaciones entre lo diseñado (memoria de cálculo y planos técnicos) y lo construido, esto último se evidenció en las visitas de reconocimiento. La contrastación entre lo diseñado con lo construido permite dar un indicio de las posibles falencias que puede estar presentando la PTAR, dado que, se tiene la posibilidad de presentar: un buen diseño con mala planificación en la fase constructiva, obteniendo resultados no favorables que afecten el buen funcionamiento de la PTAR y la eficiencia de remoción, un mal diseño con modificaciones constructivas que permitan mejorar el funcionamiento de las unidades de tratamiento, obteniendo buenos resultados y en general, lograr un adecuado sistema de tratamiento; así como también una mala ejecución desde el diseño, que se refleja en la construcción sin presentar modificaciones que permitan mejorar su funcionamiento.

## **3.3 DEFINICIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN**

Los puntos críticos del diseño y construcción son aquellos aspectos que influyen negativamente en el sistema de tratamiento, afectando la hidráulica de los procesos y la eficiencia de remoción de contaminantes. Para definir los puntos críticos se realizó una revisión de literatura especializada en criterios de diseño y construcción, en donde se pudo identificar las variables de diseño más relevantes para cada unidad de tratamiento que conforma la PTAR, las cuales se presentan en la **tabla 12**. También, se tuvieron en cuenta las recomendaciones de diseño y construcción recomendados por el RAS y la literatura con la finalidad de realizar comparaciones con lo plasmado en la memoria de cálculo y diseño de La PTAR La Dorada, de este modo, identificar las fortalezas, falencias y limitaciones del sistema de tratamiento.

**Tabla 12.** Variables del diseño de las unidades de tratamiento de la PTAR La Dorada

| <b>Estructura</b>        | <b>Criterios de diseño</b>                                                 |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Rejillas gruesas y finas | Forma, espaciamiento y ángulo de inclinación                               |
| Desarenador              | Velocidad horizontal, controlador de velocidad                             |
| Trampa de grasas         | Relación Largo/Ancho, TRH                                                  |
| Tanque homogeneizador    | Relación Largo/Ancho                                                       |
| Reactor UASB             | TRH, altura, ancho, largo, forma de alimentación y velocidad ascendente    |
| Filtro percolador        | Alimentación, distribución, medio de soporte, ancho, largo y ventilación   |
| Sedimentador secundario  | Relación Largo/ancho, profundidad, alimentación y recolección del efluente |
| Sistema de cloración     | TRH, Relación Largo/Ancho y baffles                                        |
| Lechos de secado         | Pendiente, granulometría y espesor de la grava y arena, tiempo de secado   |

### 3.3.1 Visitas y contrastación

Las visitas complementarias se realizaron con la finalidad de identificar con mayor claridad todas las variables de diseño y construcción de los puntos críticos identificados en la PTAR, estas visitas fueron realizadas con un punto de vista más crítico y analítico sobre el diseño y construcción de la PTAR, principalmente con el objetivo de poner en evidencia mediante registros fotográficos aquellos aspectos por mejorar en el funcionamiento de la planta, así como también poder identificar las principales falencias en el diseño hidráulico y de construcción.

### 3.4 PROPUESTA DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN

Se revisaron múltiples experiencias de tratamiento con la misma tecnología implementada y bajo las mismas condiciones climáticas similares a las de la zona, con buenas eficiencias y desempeño, con la finalidad de plantear estrategias de optimización para cada unidad que compone el sistema de tratamiento, considerando la posibilidad real de ser implementadas y que a su vez permitiera mejorar la calidad de agua en términos de reducción de las variables DQO, DBO y SST. También, se tuvieron en cuenta múltiples estrategias de optimización considerando la operación y mantenimiento, priorizando que la labor del operario sea segura y no se encuentre expuesto a riesgos de accidentes laborales. Las estrategias planteadas consideraron a su vez, las condiciones socioculturales, nivel educativo de los operarios y condiciones económicas del municipio para facilitar su implementación y asegurar la sostenibilidad de las estrategias planteadas.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA

Hasta los años 90, la cabecera municipal no contaba con una red de alcantarillado ni con planta de tratamiento de agua residual. La población de San Miguel utilizaba pozos de absorción para infiltrar el agua residual doméstica, estos eran construidos en cada vivienda a una distancia de 5 a 10 metros de los aljibes artesanales que hasta la actualidad son la fuente de abastecimiento de agua para consumo humano. Debido a infiltraciones y contaminación de los aljibes, la alcaldía municipal de San Miguel presentó a Corpoamazonia el 26 de enero del año 2002 la solicitud del trámite de licencia ambiental para la ejecución del proyecto para la construcción del alcantarillado y la construcción de la PTAR para la cabecera municipal y, en abril del mismo año, se adoptó y aprobó el plan de manejo ambiental.

El plan de manejo ambiental aprobado por Corpoamazonia contemplaba la construcción de un alcantarillado combinado con un sistema de tratamiento de lagunas de oxidación con una cobertura del 100%. Sin embargo, el proyecto contemplado no se llevó a cabo tal como se presentó y se aprobó por Corpoamazonia. Se desconoce el motivo del cambio de tecnología seleccionada para la construcción de la PTAR. El nuevo diseño fue elaborado en el año 2004. En la **tabla 13** se presenta un resumen de los cambios realizados en el proyecto de la construcción de la PTAR.

**Tabla 13.** Proyecto de la construcción de la PTAR

|                                      | <b>Aprobado por<br/>Corpoamazonia</b> | <b>Proyecto ejecutado</b>                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tipo de<br/>alcantarillado</b>    | Alcantarillado combinado              | Alcantarillado combinado                                                                                                                                                             |
| <b>Tecnología de<br/>tratamiento</b> | Lagunas de estabilización             | Tratamiento preliminar (Cribado, desarenador, canaleta Parshall y trampa de grasas), tanque homogeneizador, Reactor UASB, filtros percoladores, sedimentador secundario y cloración. |
| <b>Cobertura</b>                     | 100%                                  | 95%, según el informe de la visita técnica de Corpoamazonia (2015)                                                                                                                   |

De la memoria de cálculo y diseño se tuvo en cuenta la información básica necesaria para la selección de tecnología. En este caso es importante conocer el tamaño de la población a servir, capacidad económica del municipio y factores ambientales para verificar la viabilidad de la combinación Reactor UASB - Filtro Percolador. En la **Tabla 14**, se presentan las consideraciones generales para la selección de tecnología.

**Tabla 14.** Información general del diseño de la PTAR La Dorada

| Variable                    | Valor | Unidad |
|-----------------------------|-------|--------|
| Población Inicial (2004)    | 4.612 | Hab    |
| Población proyectada (2024) | 6.853 | Hab    |
| Temperatura promedio        | 28    | (°C)   |
| Altitud                     | 380   | msnm   |
| DBO                         | 250   | mg/L   |
| DQO                         | 450   | mg/L   |
| Sólidos suspendidos (SS)    | 300   | mg/L   |
| Sólidos totales (ST)        | 800   | mg/L   |

Fuente: Ospina (2004)

Según Torres (2012), en Colombia las tecnologías más implementadas para el tratamiento de agua residual doméstica son las lagunas de estabilización y los sistemas anaerobios, debido a la predominancia de las condiciones climáticas tropicales con temperaturas superiores a los 20°C. El municipio de La Dorada se encuentra dentro de estas condiciones ambientales, donde la temperatura en promedio se encuentra en los 28°C, por lo tanto, se puede asegurar que la aplicación de estas tecnologías resulta favorable para su implementación dado que se asegurará el desarrollo normal del proceso biológico, favoreciendo el crecimiento y la actividad de los microorganismos participantes en la degradación de la materia orgánica (Rodríguez, 2006).

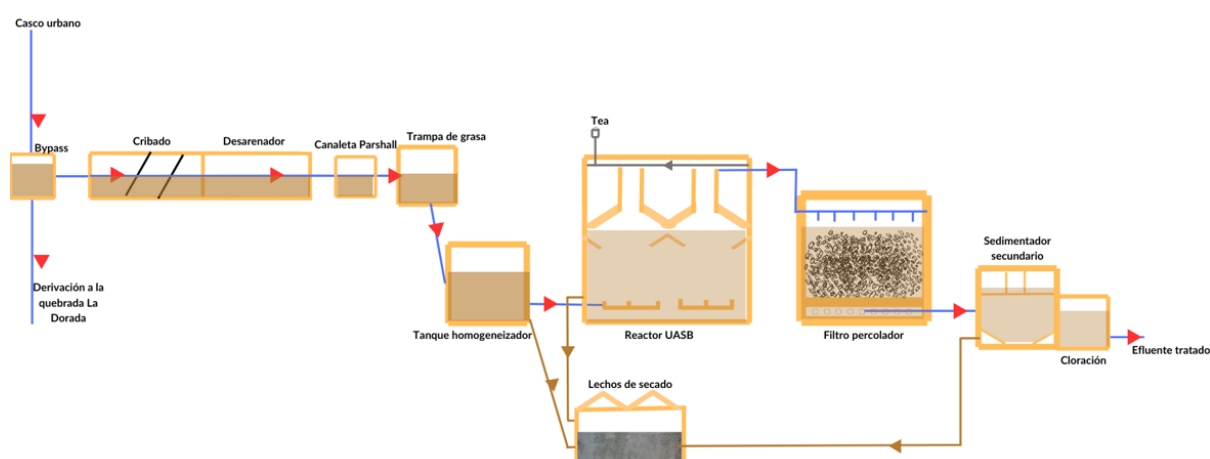
Considerando que inicialmente se había seleccionado la implementación de lagunas de estabilización, es necesario establecer si este cambio en la selección de tecnología fue adecuado para el municipio. En el análisis de los costos de inversión en plantas de tratamiento de agua residual municipal en Cundinamarca realizado por Rodríguez et al. (2015), se determinó que un proyecto de lagunas de estabilización en términos de costos de inversión per cápita para Colombia puede encontrarse entre el rango de USD\$44/hab a USD\$132/hab, lo que muestra un rango de dispersión muy alto, que puede ser principalmente por los costos para la adquisición de terrenos amplios para su implementación, el costo de excavación, revestimiento de la laguna y la estructura de entrada y salida (Mburu et al. 2013). Para las tecnologías anaerobias se identificó que la inversión per cápita se encuentra en el rango de USD\$20/hab a USD\$40/hab. En general, los costos de inversión varían mucho y dependen de una buena planificación y ejecución de los planes de acción y actividades del proyecto.

El servicio de energía eléctrica en La Dorada no es estable, por lo que claramente establecer un sistema que requiera de equipos eléctricos no es una opción. Considerando el valor comercial que tienen los subproductos generados por el sistema anaerobio, representa una oportunidad para generar ingresos con la operación de la PTAR. Según Conil (2004), el biogás

producido por el sistema anaerobio se valoriza para la producción de electricidad con plantas eléctricas a gas o dual-fuel; y el lodo producido por el sistema anaerobio es estabilizado y de fácil deshidratación, logrando ser una fuente nueva de abono orgánico que puede ser empleado en el municipio favoreciendo el desarrollo de la agricultura local.

Considerando los aspectos mencionados, se puede establecer que la selección de tecnología para La Dorada fue correcta, ya que las condiciones ambientales y la altitud favorecen el desarrollo normal del sistema anaerobio, el cual tiene un costo de inversión relativamente bajo, además de ser una tecnología de fácil operación y mantenimiento.

La planta de tratamiento de agua residual de La Dorada cuenta con tratamiento preliminar, tratamiento biológico (anaerobio - aerobio), sedimentador secundario, cloración y lechos de secado. En la **figura 10** se presenta el diagrama de flujo general que muestra el proceso de tratamiento en la PTAR La Dorada.



**Figura 10.** Diagrama de flujo de la PTAR La Dorada

## 4.2 CONTRASTACIÓN DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS UNIDADES DE TRATAMIENTO DE LA PTAR LA DORADA

Para iniciar con el proceso de contrastación se tuvieron en cuenta las variables iniciales del diseño de la PTAR La Dorada, estas se presentan en la **Tabla 15**. Esta información representa una relevancia considerable, dado que es necesaria para analizar y evaluar aspectos importantes como proveniencia del agua residual, nivel de complejidad y el periodo de diseño.

**Tabla 15.** Parámetros iniciales para el diseño

| Variable                    | Valor | Unidad |
|-----------------------------|-------|--------|
| Población Inicial (2004)    | 4.612 | Hab    |
| Población proyectada (2024) | 6.853 | Hab    |
| Periodo de diseño           | 20    | Años   |

**Tabla 15.** Parámetros iniciales para el diseño

| Variable                   | Valor     | Unidad |
|----------------------------|-----------|--------|
| Caudal medio agua residual | 13,75     | L/s    |
| Caudal diseño máximo       | 18,00     | L/s    |
| Caudal de diseño medio     | 12,50     | L/s    |
| Tipo de alcantarillado     | Combinado |        |

Fuente: Ospina (2004)

Es importante destacar que el alcantarillado del municipio es combinado, es decir que, el colector final transporta agua sanitaria y agua pluvial. Esta característica puede variar la composición típica del agua residual doméstica durante la temporada de lluvias, dado que el agua residual tendrá una mayor cantidad de sólidos, esto implica una mayor exigencia en el pretratamiento para no afectar el tratamiento biológico.

El periodo de diseño fue seleccionado de acuerdo con las especificaciones de [RAS \(2000\)](#), en donde se debe tener en cuenta el nivel de complejidad según la proyección de crecimiento poblacional de la cabecera municipal (**ver tabla 16**). La población proyectada fue de 6.853 habitantes, es decir que se encuentra en un nivel de complejidad medio, por lo tanto, el periodo de diseño seleccionado para la construcción de la planta de tratamiento fue 20 años, debido a la estratificación social y capacidad económica de la población.

**Tabla 16.** Asignación del nivel de complejidad

| Nivel de complejidad | Población en la zona urbana | Capacidad económica de los usuarios |
|----------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Bajo                 | <2500                       | Baja                                |
| Medio                | 2501 a 12500                | Baja                                |
| Medio alto           | 12501 a 60000               | Media                               |
| Alto                 | >60000                      | Alta                                |

Fuente: RAS (2000)

La PTAR La Dorada inició su construcción en el año 2006, es decir, 2 años después de presentar el diseño. El proceso constructivo terminó en el año 2009, esto significa una duración de 3 años, lo que representa un tiempo total transcurrido desde el diseño hasta el inicio de operación de la planta de aproximadamente 5 años. Esto implica una pérdida en los años de vida útil del sistema de tratamiento. Además, según los informes de seguimiento y monitoreo realizados durante los años 2010 a 2015 se reporta que la planta no se encontraba en funcionamiento y el vertimiento del agua residual se realizaba directamente a la quebrada La

Dorada. En los informes no se especifica el motivo de la interrupción al funcionamiento de la PTAR. Esto indica que estuvo sin operación por un periodo de más de 6 años, donde claramente también se generó una pérdida en la vida útil de la PTAR, además de generarse deficiencias en las unidades de tratamiento a causa del estado de abandono. Hasta la actualidad, la planta no ha recibido ningún tipo de mantenimiento, por lo que en todos los informes de monitoreo se han reportado sedimentos, colmataciones y estancamientos.

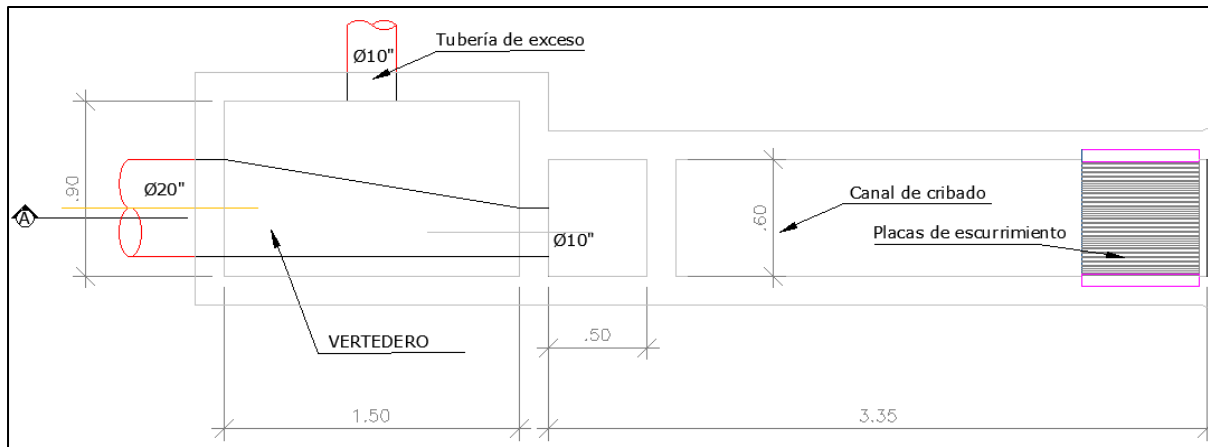
En la actualidad, el sistema de tratamiento está a punto de culminar su periodo de diseño (2024), lo cual es un factor relevante para corregir fallas en el diseño, construcción y operación. Según el DANE (2018), en el Censo Nacional de Población y Vivienda determinó que la población proyectada para la cabecera municipal del municipio de San Miguel para el año 2024 es de 5.785 habitantes, comparando con la población proyectada en la memoria de diseño, se observó que la población proyectada por el DANE es inferior a la proyectada en la memoria de diseño, que presenta un valor superior por 1.068 habitantes.

#### 4.2.1 Estructura de entrada (By-pass)

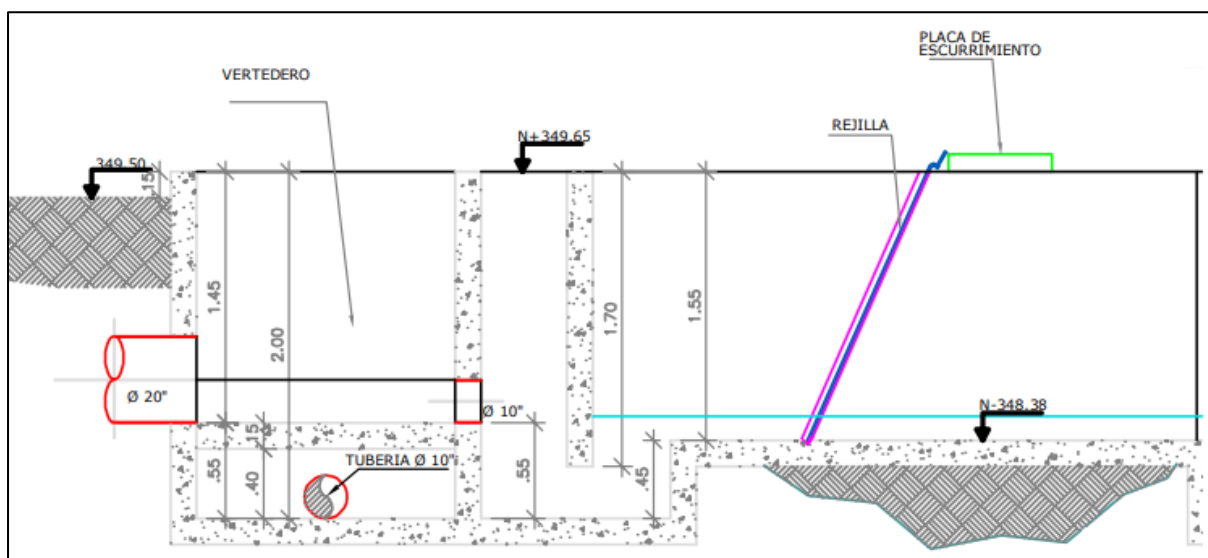
En el diseño, la estructura de entrada está ubicada al costado del canal de cribado, separadas por un único muro donde por medio de una tubería de 10 pulgadas conduce el agua residual hacia el canal de cribado, mientras que otra tubería de igual diámetro derivaría el caudal de hacia la fuente receptora. En la **tabla 17** se presentan los parámetros del diseño del By-pass y en la **figura 11 y 12** se presentan los planos técnicos de la unidad.

**Tabla 17.** Parámetros de diseño de la estructura de entrada

| Parámetro                                 | Valor | Unidad |
|-------------------------------------------|-------|--------|
| Altura                                    | 2,00  | m      |
| Ancho                                     | 0,90  | m      |
| Largo                                     | 1,50  | m      |
| Diámetro tubería alcantarillado combinado | 20    | pulg   |
| Diámetro tubería de entrada a la PTAR     | 10    | pulg   |
| Diámetro tubería de exceso                | 10    | pulg   |



**Figura 11.** Vista en planta de la estructura de entrada y cribado  
Fuente: Ospina (2004)



**Figura 12.** Vista en corte de la estructura de entrada y cribado  
Fuente: Ospina (2004)

La construcción del By-pass se realizó en hormigón con una geometría cuadrada. Las dimensiones se presentan en la **tabla 18**. Es importante mencionar que la construcción no corresponde al diseño. En principio, porque se identificó que la estructura de entrada está construida por fuera de la valla que limita el área de la PTAR, encontrándose a una distancia de unos metros de la carretera que conecta el municipio de La Dorada y la vereda de San Carlos, San Marcelino y La Bocana, es decir que fue construida aproximadamente a 5 metros del tratamiento preliminar y no al costado del canal de cribado como se presenta en el diseño. Además, esta estructura cuenta con dos compuertas que permiten controlar el caudal de entrada de agua residual hacia la PTAR y la otra válvula permite derivar el caudal hacia la quebrada La Dorada (**figura 13**).



**Figura 13.** Válvulas de la estructura de entrada

Por otra parte, en el interior de la estructura se encontró que el caudal del alcantarillado combinado ingresa por medio de una tubería instalada en la sección lateral del muro y frente a esta, se encuentran dos tuberías; una que transporta el caudal hacia las instalaciones de la PTAR y la otra transporta el caudal hacia la fuente receptora, tal como se presenta en la **figura 14**. Además, se pudo evidenciar que no existe un vertedero como se presentó en los planos del diseño.



**Figura 14.** Tuberías de entrada y salida de la estructura

**Tabla 18.** Contrastación del diseño y construcción de la estructura de entrada

| Parámetro                                 | Diseño  | Construcción |
|-------------------------------------------|---------|--------------|
| Profundidad                               | 2,0 m   | 3,0 m        |
| Ancho                                     | 0,90 m  | 1,70 m       |
| Largo                                     | 1,50 m  | 1,70 m       |
| Diámetro tubería alcantarillado combinado | 20 pulg | ---          |
| Diámetro tubería de entrada a la PTAR     | 10 pulg | ---          |
| Diámetro tubería de exceso                | 10 pulg | ---          |

#### 4.2.2 Cribado

El cribado fue diseñado con un bafle para regular la velocidad de entrada del agua residual a la zona de rejillas. En los planos técnicos se presenta un único canal que cuenta con una única rejilla y placa de escurrimiento para los residuos sólidos (**Figura 11 y 12**). Los parámetros de diseño del cribado se presentan en la **tabla 19**.

**Tabla 19.** Parámetros de diseño del cribado

| Parámetro             | Valor   | Unidad     |
|-----------------------|---------|------------|
| Ancho de la barra     | 0,0127  | m          |
| Forma de la barra     | Redonda | -          |
| Espaciamiento         | 0,02    | m          |
| Inclinación           | 45      | Grados (°) |
| Ancho del canal       | 0,60    | m          |
| Profundidad del canal | 1,55    | m          |

En la visita en campo se observó, que lo construido no coincide con lo diseñado, dado que se construyeron dos canales de cribado, que no cuentan con barras redondas de ½” sino con dos láminas perforadas por cada canal, cada una con diferente diámetro de orificio correspondientes a 0,02m para la primera placa y 0.01m para la segunda. Las placas perforadas se presentan en la **figura 15**. En la **tabla 20** se presenta la contrastación del diseño y construcción, donde se evidenciaron cambios no sólo en la forma del cribado, sino también en la inclinación de las láminas, ancho del canal y profundidad. Además, se destaca la ausencia del bafle en la entrada

al cribado y las placas de escurrimiento, las cuales fueron reemplazadas con placas de concreto. En la **figura 16** se presenta la estructura construida en la PTAR.



**Figura 15.** Cribado grueso y fino



**Figura 16.** Cribado

**Tabla 20.** Contrastación del diseño y construcción del cribado

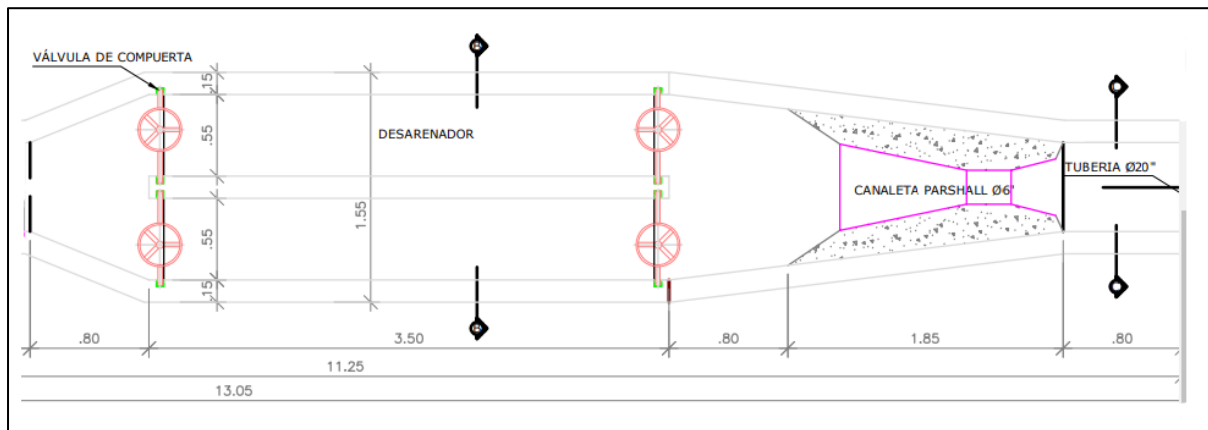
| Parámetro                    | Diseño  |          | Construcción                                 |         |
|------------------------------|---------|----------|----------------------------------------------|---------|
| Forma de la barra            | Redonda | 0,0127 m | Lamina perforada con orificio grueso         | 0,02 m  |
|                              |         |          | Lamina perforada con orificio fino           | 0,01 m  |
| Espaciamiento                | 0,02 m  |          | Espaciamiento entre orificios eje horizontal | 0,025 m |
|                              |         |          | Espaciamiento entre orificios eje vertical   | 0,040 m |
| Profundidad lamina perforada | —       |          | 0,55m                                        |         |
| Inclinación rejilla          | 45°     |          | 79°                                          |         |
| Ancho canal                  | 0,60 m  |          | Ancho canal izquierdo                        | 0,55 m  |
|                              |         |          | Ancho canal derecho                          | 0,57 m  |
| Profundidad                  | 1,55 m  |          | 1,60 m                                       |         |

#### 4.2.3 Desarenador de flujo horizontal

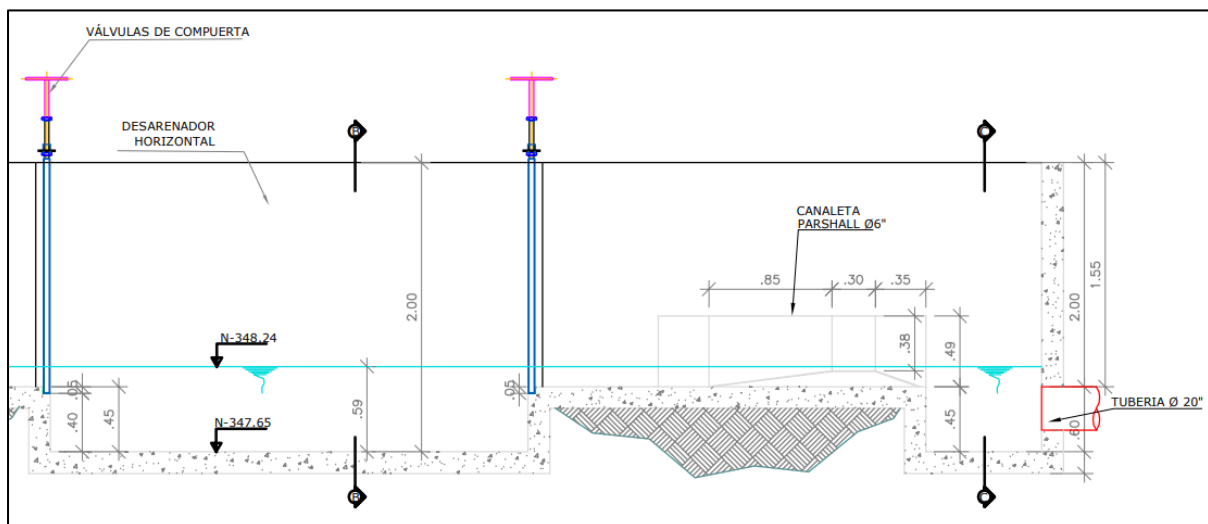
En el diseño se contemplaron dos líneas de desarenación de flujo horizontal trabajando de forma simultánea en paralelo, conectadas con el canal de cribado por medio de una transición. Cada línea cuenta con dos válvulas tipo compuerta a la entrada y salida del canal, finalizando, se conectan ambas líneas de desarenación por medio de una transición hacia una Canaleta Parshall que actúa como estructura de medición de caudal, como se observa en la **figura 17 y 18**. En la **tabla 21** se presentan los parámetros de diseño de la estructura.

**Tabla 21.** Parámetros de diseño del desarenador horizontal

| Parámetro                        | Valor | Unidad |
|----------------------------------|-------|--------|
| Velocidad de transición          | 0,30  | m/s    |
| Longitud                         | 3,50  | m      |
| Ancho de cada canal              | 0,55  | m      |
| Profundidad del desarenador      | 2,0   | m      |
| Longitud de la Canaleta Parshall | 1,85  | m      |



**Figura 17.** Diseño en planta desarenador horizontal y canaleta Parshall  
Fuente: Ospina (2004)



**Figura 18.** Diseño en corte del desarenador horizontal y canaleta Parshall  
Fuente: Ospina (2004)

En la visita en campo se evidenció que lo construido no corresponde al diseño, dado que se encontró la ausencia del canal de transición y diferencias dimensionales en la profundidad, ancho y largo. En la **tabla 22** se presenta un resumen de las diferencias entre el diseño y construcción.

**Tabla 22.** Contrastación del diseño y construcción del desarenador de flujo horizontal

| Parámetro                   | Diseño | Construcción |
|-----------------------------|--------|--------------|
| Ancho de cada línea         | 0,55 m | 0,55 m       |
|                             |        | 0,57 m       |
| Longitud                    | 3,5 m  | 3,4 m        |
| Profundidad del desarenador | 2,0 m  | 2,10 m       |

En la **figura 19** se puede observar que, el desarenador está construido después del cribado y no cuenta con el canal de transición, como se indica en el diseño. Con respecto a las válvulas tipo compuerta se comprobó que éstas sí fueron construidas a la entrada y salida de las líneas de desarenación, tal como se presentó en el diseño. En la **figura 20**, se presenta la transición construida hacia la canaleta Parshall y se encontró una diferencia constructiva a la salida de la canaleta, puesto que el agua residual es conducida hacia un compartimiento rectangular cuyo objetivo parece ser una cámara de integración.



**Figura 19.** Líneas de cribado y desarenador



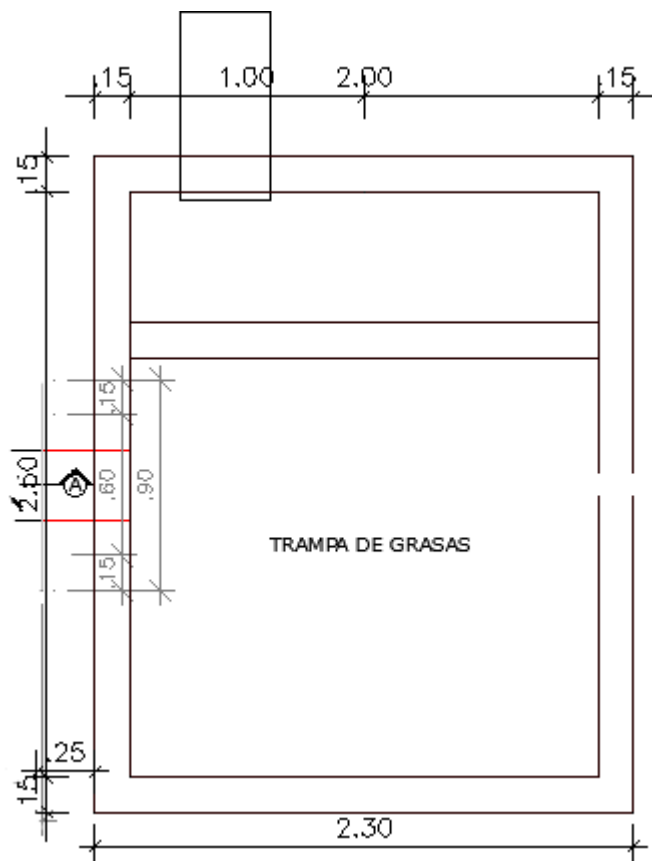
**Figura 20.** Transición hacia Canaleta Parshall y compartimiento integración del agua residual

#### 4.2.4 Trampa de grasas

La trampa de grasas fue diseñada bajo tierra y en concreto, con una geometría rectangular. Esta estructura contaría con una pantalla para lograr una sedimentación de los sólidos. En la **tabla 23** se presentan los parámetros de diseño. Cabe mencionar que, en la memoria de cálculo y diseño no está especificado el dimensionamiento de esta estructura, los parámetros del diseño se tomaron con base en los planos, donde se encontró únicamente el plano en planta de esta estructura (**figura 21**).

**Tabla 23.** Parámetros de diseño de la trampa de grasas

| Parámetro          | Valor | Unidad |
|--------------------|-------|--------|
| Tubería de entrada | 20    | pul    |
| Ancho              | 2,0   | m      |
| Longitud           | 2,5   | m      |
| Profundidad        | 2,0   | m      |



**Figura 21.** Diseño en planta trampa de grasas  
Fuente: Ospina (2004)

En la visita se observó que la trampa de grasas difiere con lo diseñado. Se pudo evidenciar la construcción de una pantalla adicional, que generó una zona muerta. Dada la necesidad de resolver este inconveniente, el operario menciona que decidieron taparla con una placa de concreto, como se indica en la **figura 22**.



**Figura 22.** Estructura de la trampa de grasas

En la **figura 22**, se puede observar que la entrada y salida del agua residual es por el fondo. También se evidenció que el flujo del agua residual pasa por encima y por debajo del bafle central para llegar a la tubería de salida. La contrastación del diseño y construcción se presenta en la **Tabla 24**.

**Tabla 24.** Contrastación del diseño y construcción de la trampa de grasas

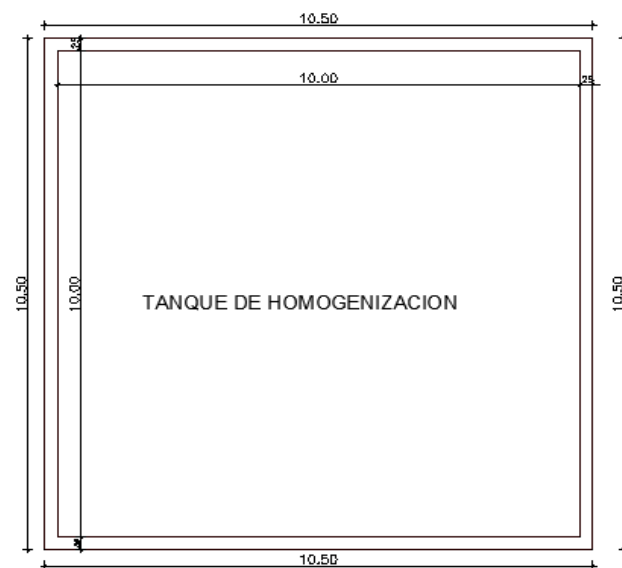
| Parámetro          | Diseño | Construcción | Unidad |
|--------------------|--------|--------------|--------|
| Tubería de entrada | 20     | 12           | pul    |
| Tubería de salida  | ---    | 16           | pul    |
| Ancho              | 2,00   | 2,10         | m      |
| Largo              | 2,50   | 3,80         | m      |
| Profundidad        | 2,00   | 2,80         | m      |

#### 4.2.5 Tanque homogeneizador

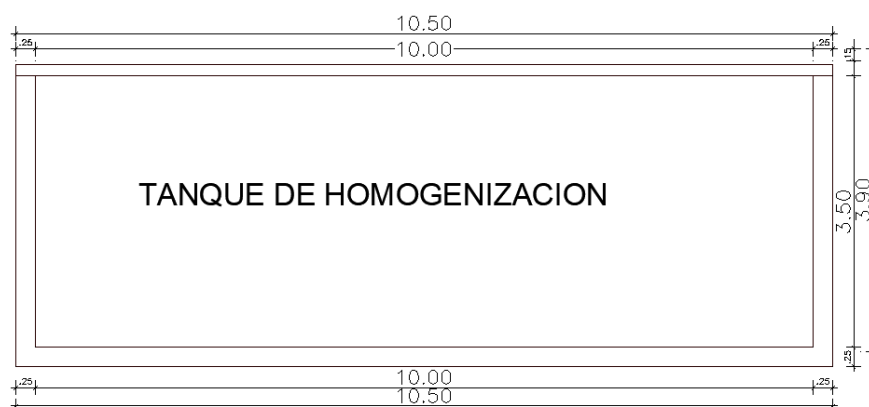
En el diseño se presenta el tanque de homogeneización con una geometría cuadrada, sin especificar la ubicación de las tuberías de entrada y salida. En la **tabla 25** se presentan los parámetros de diseño. En la **figura 23 y 24** se presenta el plano técnico del diseño del tanque homogeneizador.

**Tabla 25.** Parámetros de diseño del tanque homogeneizador

| Parámetro        | Diseño | Construcción | Unidad |
|------------------|--------|--------------|--------|
| Ancho            | 10,5   | 10,3         | m      |
| Longitud         | 10,5   | 10,3         | m      |
| Profundidad útil | 3,5    | 3,5          | m      |



**Figura 23.** Diseño en planta del tanque homogeneizador  
Fuente: Ospina (2004)



**Figura 24.** Diseño en corte del tanque homogeneizador  
Fuente: Ospina (2004)

El dimensionamiento del ancho y largo del tanque homogeneizador no corresponde a lo diseñado, la construcción presenta una diferencia de 0,20m menos con lo planteado en el diseño. La ubicación de la entrada y salida del agua residual no fue posible observarlas, dado que el tanque presenta colmatación (**figura 25**). Esta unidad presenta rebosamiento y es producto de la colmatación, situación que se presenta principalmente en época de invierno, donde la planta recibe mayor volumen de agua residual proveniente del alcantarillado sanitario y pluvial.

En la **figura 26** se puede observar que el tanque homogeneizador cuenta con cuatro tuberías de ventilación. Además, una tubería de purga para evacuar los lodos al lecho de secado y dos ventanas de acceso, que se utilizan para ingresar a realizar labores de mantenimiento.



**Figura 25.** Interior del tanque homogeneizador



**Figura 26.** Tanque homogeneizador

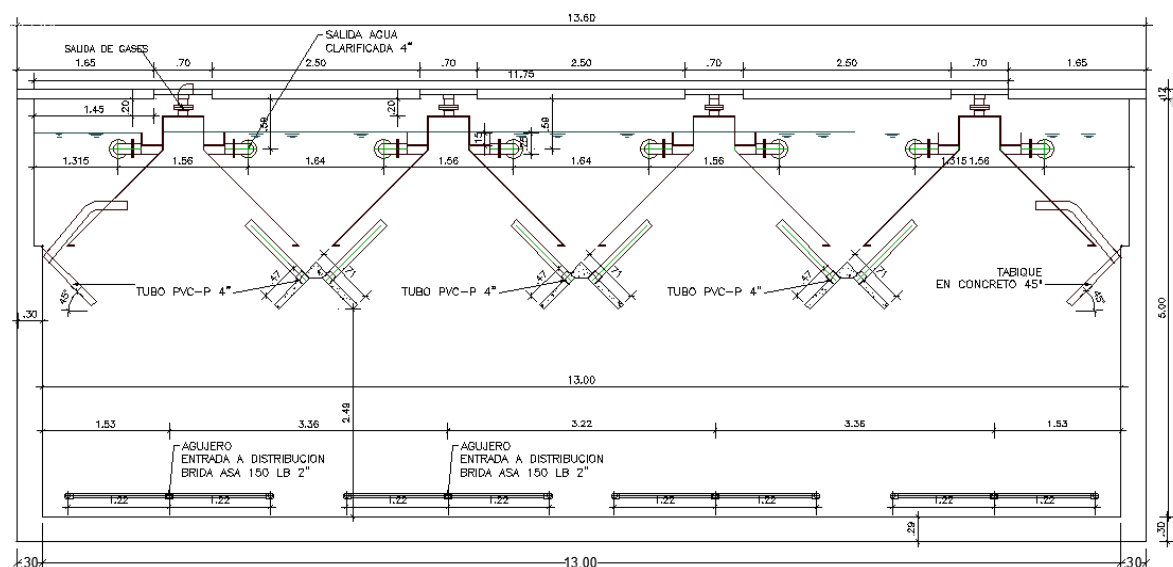
#### 4.2.6 Reactor UASB

La PTAR fue diseñada con dos reactores UASB que reciben el agua residual proveniente del tanque homogeneizador. El reactor UASB, en sus paredes externas de la zona alta, media y baja, cuenta con válvulas para evacuación de lodos, que posteriormente llegan al lecho de secado. También cuenta con válvulas para realizar lavado y vaciado general del reactor. En la **tabla 26** se presentan los parámetros de diseño.

**Tabla 26.** Parámetros de diseño del reactor UASB

| Parámetro                            | Valor | Unidad         |
|--------------------------------------|-------|----------------|
| Número de Reactores                  | 2     | Und            |
| Tiempo de retención hidráulico (TRH) | 12    | h              |
| Altura efectiva del reactor          | 4     | m              |
| Ancho cada reactor                   | 5     | m              |
| Longitud                             | 13    | m              |
| Volumen de cada reactor              | 540   | m <sup>3</sup> |
| Área del reactor                     | 135   | m <sup>2</sup> |
| Área unitaria                        | 67,5  | m <sup>2</sup> |
| Velocidad ascendente                 | 0,33  | m/h            |

En la **figura 27 y 28** se presenta el diseño del reactor UASB



**Figura 27.** Diseño en corte del Reactor UASB

Fuente: Ospina (2004)



**Tabla 27.** Contrastación del diseño del reactor UASB

| Parámetro                         | Diseño                | Construcción         |
|-----------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Reactores                         | 2 Und                 | 2 Und                |
| Altura total del reactor          | 5,42 m                | 5,20 m               |
| Altura efectiva de cada reactor   | 4,00 m                | 4,60m                |
| Ancho total estructura            | 10,90 m               | 9,80 m               |
| Ancho efectivo de cada reactor    | 5,00 m                | 4,00 m               |
| Longitud total estructura         | 13,60 m               | 14,20 m              |
| Longitud efectiva de cada reactor | 13,00 m               | 12,40 m              |
| Espesor pared                     | 0,30 m                | 0,30 m               |
| Ancho pasarela                    | 0,30 m                | 0,90 m               |
| Volumen efectivo de cada reactor  | 260,00 m <sup>3</sup> | 228,16m <sup>3</sup> |
| TRH                               | 12 h                  | 10,14 h              |

#### 4.2.7 Filtros percoladores

Fueron diseñados dos filtros percoladores, los cuales contarían con una alimentación fija a través de 8 tuberías perforadas. No se especifica el tipo de medio filtrante en el diseño. El efluente del filtro se recolecta mediante una canaleta cuya pendiente permite su drenaje y es transportado hacia el sedimentador final. En la **tabla 28** se presentan los parámetros de diseño

**Tabla 28.** Parámetros de diseño del Filtro Percolador

| Parámetro                         | Valor | Unidad |
|-----------------------------------|-------|--------|
| Tubería fija principal            | 10    | pulg   |
| Diámetro efectivo                 | 5,0   | m      |
| Profundidad                       | 4,0   | m      |
| Altura medio de soporte y drenaje | 0,35  | m      |

En la **figura 30 y 31** se presenta el diseño del filtro percolador.



El filtro percolador fue puesto en operación por medio de dos tuberías principales que conducen el efluente de cada reactor UASB a dos filtros percoladores (**figura 32**), sobre los cuales descende el agua residual a través de un medio filtrante compuesto por rosetones plásticos (**figura 33**). La contrastación del dimensionamiento planteado en el diseño y lo evidenciado en la construcción se presenta en la **Tabla 29**.



**Figura 32.** Filtro percolador



**Figura 33.** Medio filtrante del filtro percolador

**Tabla 29.** Contrastación del filtro percolador

| Parámetro               | Diseño  | Construcción |
|-------------------------|---------|--------------|
| Tubería principal       | 10 pulg | 6 pulg       |
| Tuberías secundarias    | -       | 2 pulg       |
| Diámetro efectivo       | 5,0 m   | 5,0 m        |
| Profundidad             | 4,0 m   | 4,0 m        |
| Altura medio de soporte | 0,35 m  | 1,0 m        |

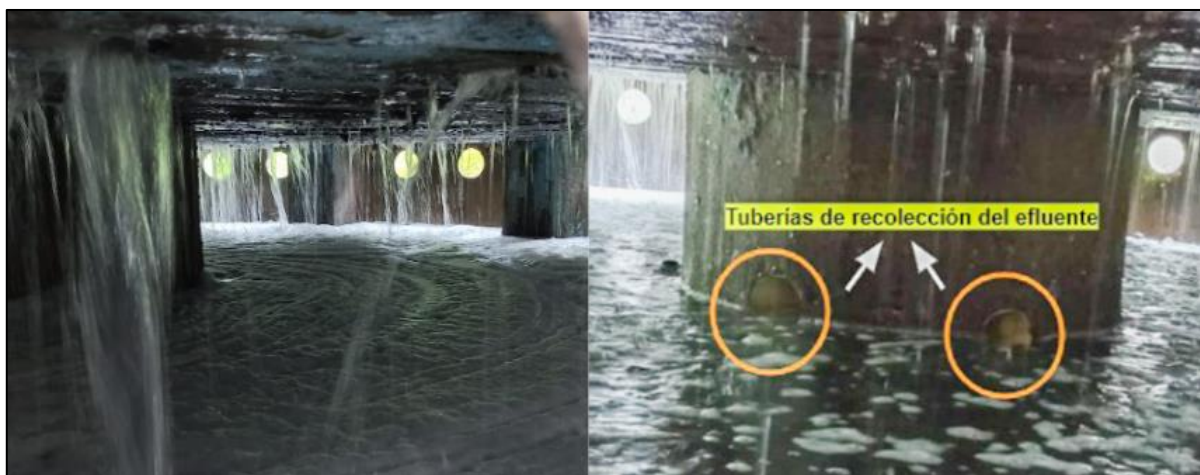
El filtro percolador fue construido con un material de fibra de vidrio reforzado en poliéster. Se pudo evidenciar que la distribución de agua al filtro percolador que se presenta en el diseño difiere a lo construido, dado que en el diseño se presenta que el agua del reactor UASB llegaría por medio de una tubería al centro del filtro percolador donde cae a una cámara que distribuiría el flujo hacia los tubos de distribución. En la visita se encontró que el filtro cuenta con una única tubería principal que proviene del reactor UASB y de la cual se derivan tuberías fijas de menor diámetro con perforaciones que distribuyen el agua al interior del filtro. La zona que soporta el relleno del filtro percolador contiene placas perforadas que están apoyadas en 9 columnas de hormigón (**figura 34**). En la zona del drenaje, se encuentran distribuidas perimetralmente ventanas de ventilación con diámetro de 0,14 m separadas cada 0,20 m (**figura 35**). Según el plano en corte del diseño (**figura 31**) el fondo del filtro percolador contaría con una pendiente para conducir el efluente hacia la tubería de recolección de 12", sin embargo, en la visita en campo se evidencio que el efluente se recoge por medio de tuberías que se encuentran en la parte inferior de la columna central de hormigón (**figura 36**). Cabe destacar que, en los planos y la memoria de diseño no presenta el valor adoptado de la pendiente, sin embargo, se logra evidenciar que existe una pequeña pendiente en el fondo del filtro, ya que conduce el efluente hacia las tuberías de la columna central.



**Figura 34.** Soporte del relleno del filtro percolador



**Figura 35.** Sistema de ventilación



**Figura 36.** Drenaje del filtro percolador

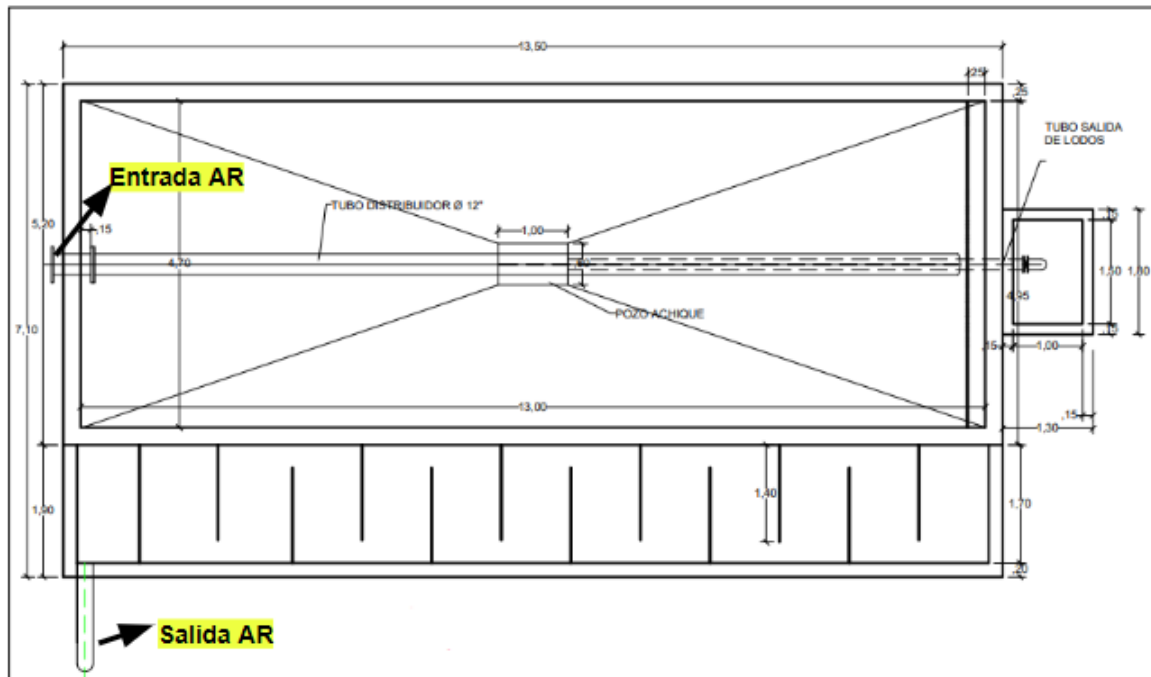
#### 4.2.8 Sedimentador final y cloración

El efluente del filtro percolador es conducido hacia el sedimentador final. El sedimentador fue diseñado de forma rectangular y de alta tasa con módulos lamelares. El agua clarificada es recolectada por medio de una canaleta central. En la **tabla 30** se presentan los parámetros de diseño.

**Tabla 30.** Parámetros de diseño del sedimentador secundario

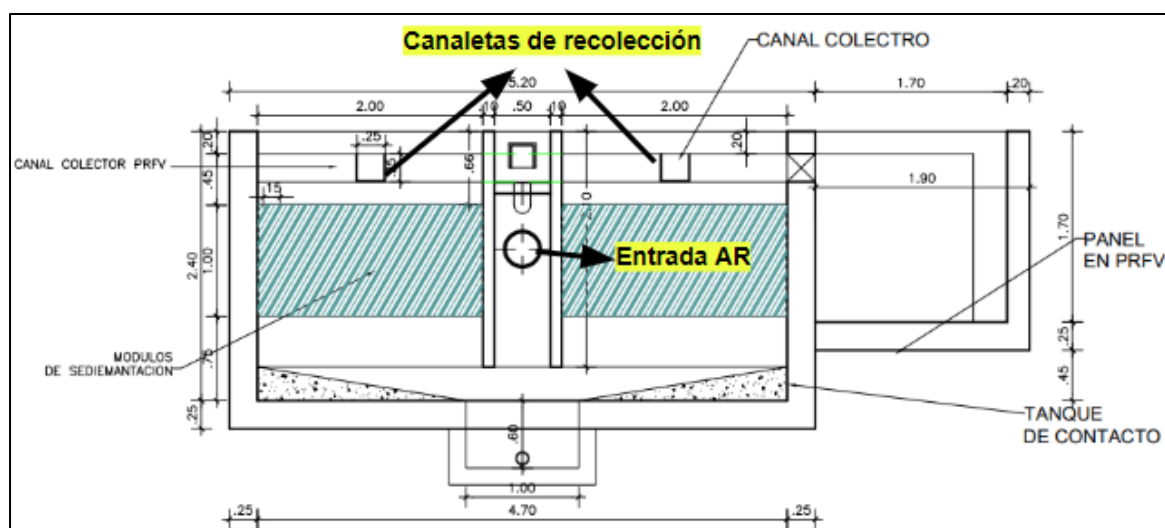
| Parámetro                      | Valor | Unidad                            |
|--------------------------------|-------|-----------------------------------|
| Profundidad                    | 2,40  | m                                 |
| Ancho                          | 4,70  | m                                 |
| Longitud                       | 13,00 | m                                 |
| Tubería principal              | 12    | pul                               |
| Área superficial               | 61,10 | m <sup>2</sup>                    |
| Tasa de aplicación superficial | 60    | m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d |

En la **figura 37 y 38** se presenta el diseño del sedimentador secundario



**Figura 37.** Diseño en planta del sedimentador secundario

Fuente: Ospina (2004)



**Figura 38.** Diseño en corte del sedimentador

Fuente: Ospina (2004)

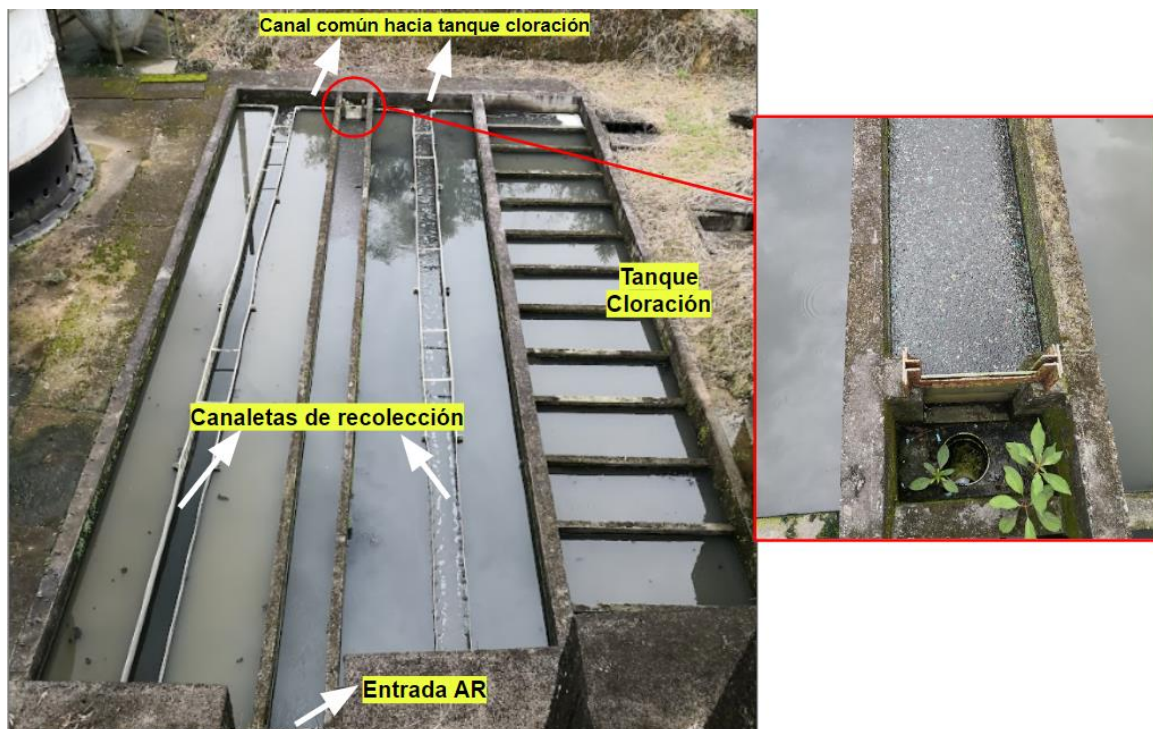
Según el diseño, el afluente ingresa por medio de una tubería que cubre toda la longitud del canal central, sin embargo, en la visita en campo se observó que la distribución de caudal no realiza por medio de esta tubería sino por medio de un canal cuyas paredes tienen una apertura en la parte inferior que permite la distribución del caudal por el fondo, hacia los dos módulos del sedimentador. Además, se evidenció que al final del canal central se encuentra una compuerta que conduce hacia una pequeña cámara (**figura 39**). El diseño y funcionamiento no es claro, tampoco se evidencia hacia dónde conduce el flujo de la presente tubería. El sedimentador final cuenta con módulos lamelares inclinados y de forma hexagonal tipo “colmena”, en la **Tabla 31** se pueden observar las diferencias del dimensionamiento entre lo diseñado y construido.

**Tabla 31.** Contrastación del diseño y construcción del sedimentador secundario

| Parámetro                      | Diseño                                  | Construcción                            |
|--------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Ancho                          | 4,70 m                                  | 4,00 m                                  |
| Longitud                       | 13,0 m                                  | 13,0 m                                  |
| Profundidad                    | 2,40 m                                  | 1,70 m                                  |
| Tubería principal              | 12 pul                                  | ---                                     |
| Área superficial               | 61,10 m <sup>2</sup>                    | 52,00 m <sup>2</sup>                    |
| Tasa de aplicación superficial | 60,00 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d | 20,76 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d |

En el diseño en planta (**figura 39**) indica que los lodos del sedimentador se extraen mediante una pendiente que permite direccionarlos hacia un pozo de achique que se encuentra ubicado en la zona central del sedimentador y, mediante una tubería conducir los lodos hacia una cámara de salida, sin embargo, en la visita no se observó dicha cámara y tubería.

Por otra parte, la recolección del efluente del sedimentador final se realiza por medio de canaletas perforadas que conducen el agua hacia un canal común, que transporta el agua hacia el tanque de cloración. En la **figura 39** se detalla la construcción del sedimentador final.



**Figura 39.** Sedimentador final

Los módulos de cloración se encuentran al lado del sedimentador secundario, compartiendo una pared entre sí. Consta de baffles deflectores que cambian el sentido del agua con la finalidad de generar mezcla con el cloro y a su vez aumentar el contacto. La cloración es la última etapa del tratamiento, posteriormente, el agua sometida al proceso de desinfección es descargada a la Quebrada La Dorada. En la **tabla 32** se presentan los parámetros de diseño.

**Tabla 32.** Parámetros de diseño de cloración

| Parámetro                   | Valor | Unidad         |
|-----------------------------|-------|----------------|
| TRH                         | 60    | min            |
| Volumen de la cámara        | 45    | m <sup>3</sup> |
| Ancho                       | 2,0   | m              |
| Longitud total              | 13,0  | m              |
| Distancia entre deflectores | 1,0   | m              |
| Número de deflectores       | 12    | und            |
| Profundidad                 | 1,70  | m              |

En campo se evidenció que el tanque de cloración efectivamente se encuentra justo al lado del sedimentador secundario, tal como se presenta en el diseño en planta. Las dimensiones se encuentran acorde a lo presentado en el diseño, sin embargo, se encontraron diferencias en la distancia entre deflectores, debido a que se evidenció que unos deflectores se encontraban a una distancia diferente entre sí. En la **tabla 33** se presenta la contrastación entre el diseño y la construcción del tanque de cloración.

**Tabla 33.** Contrastación del diseño y construcción del tanque de cloración

| Parámetro                   | Diseño | Construcción  |
|-----------------------------|--------|---------------|
| Ancho                       | 2,0 m  | 2,0 m         |
| Longitud total              | 13,0 m | 13,0 m        |
| Distancia entre deflectores | 1,0 m  | 0,75 a 0,94 m |
| Número de deflectores       | 12 und | 12 und        |
| Profundidad                 | 1,70 m | 1,70 m        |

#### 4.2.9 Lecho de secado

Los lodos provenientes de la purga realizada tanto al tanque homogeneizador como al reactor UASB, se disponen en el lecho de secado, el cual, cuenta con cinco compartimentos, donde se depositan los lodos hasta que alcanzan el grado de maduración. En la **tabla 34** se presentan los parámetros de diseño.

**Tabla 34.** Parámetros de diseño del lecho de secado

| Parámetro                   | Valor       | Unidad         |
|-----------------------------|-------------|----------------|
| Módulos                     | 5           | und            |
| Área superficial total      | 34          | m <sup>2</sup> |
| Ancho cada módulo           | 2           | m              |
| Largo cada módulo           | 4           | m              |
| Tubería de drenaje          | 4           | pul            |
| Pendiente de drenaje        | >1          | %              |
| Espesor de grava            | 0,02        | m              |
| Tamaño de grava             | 0,03 a 0,25 | m              |
| Espesor de arena            | 0,02        | m              |
| Tamaño efectivo de la arena | 0,3 a 0,75  | mm             |

Los lechos de secado cuentan con cinco compartimentos con una geometría rectangular. Un compartimiento corresponde para el tanque homogeneizador y cuatro compartimentos para las dos unidades del reactor UASB. La purga del tanque homogeneizador se evacua mediante una tubería de 6" al respectivo compartimiento. Del reactor UASB se realiza la purga mediante una tubería de 4", la cual, cuenta con una tee para desviar los lodos al siguiente compartimiento del lecho de secado. La descarga de lodos a cada compartimiento se controla mediante una llave de paso como se observa en la **figura 40**.



**Figura 40.** Tubería de distribución de la purga de lodos

En la **tabla 35** se presenta un resumen de las diferencias entre el diseño y construcción.

**Tabla 35.** Contratación diseño/construcción del lecho de secado

| Parámetro         | Diseñado | Construido |
|-------------------|----------|------------|
| Módulos           | 5,0 und  | 5,0 und    |
| Ancho cada módulo | 2,0 m    | 2,5 m      |
| Profundidad       | ---      | 0,60 m     |
| Largo cada módulo | 4,0 m    | 4,6 m      |

Estas unidades presentan diferencias en el dimensionamiento con respecto al diseño y construcción y con el material de la capa filtrante. El lecho de secado cuenta con una pendiente mayor del 1% y una tubería de drenaje de 4", sin embargo, no fue posible ubicar la tubería de drenaje ya que los compartimientos del lecho de secado se encuentran colmatados (**figura 41**), al costado del lecho de secado existe una cámara que conduce el agua filtrada del lecho de secado hacia otra cámara de salida que desemboca el agua a la quebrada La Dorada, por lo que se puede deducir que no hay recirculación del lixiviado para su respectivo tratamiento.



**Figura 41.** Lecho de secado

## 4.3 IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS Y PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN

### 4.3.1 Caudales de diseño

En la **tabla 36** se presenta la información recopilada de la memoria de diseño y los datos recopilados del DANE para el cálculo de los caudales de diseño de la PTAR.

**Tabla 36.** Información de la población considerada en el cálculo de caudales de diseño

| Dato                        | Valores diseño<br>(Ospina, 2004) | Valores recopilados<br>(DANE, 2018) | Unidad |
|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------|
| Población (2004)            | 4.612                            | 3.331 (2005)                        | Hab    |
| Tasa de crecimiento medio   | 2%                               | -                                   | -      |
| Población proyectada (2024) | 6.853                            | 5.785                               | Hab    |

Analizando la información empleada para el cálculo de los caudales, se pudo identificar que en la memoria de diseño de la PTAR la Dorada seleccionó una población inicial mayor a la reportada en el censo del año 2005, además, se pudo evidenciar que la población proyectada se calculó, empleando una tasa de crecimiento medio anual del 2%, sin sus respectivos cálculos por los métodos de proyección empleando tasas de crecimiento aritmético, geométrico y exponencial.

Por otra parte, la población proyectada por el DANE para el año 2024 corresponde a 5.785 habitantes, una población menor a la población proyectada en la memoria de diseño de la PTAR, la cual, corresponde a 6.853 habitantes.

Se pudo evidenciar que en el caudal medio de agua residual no se tuvieron en cuenta los aportes correspondientes del caudal comercial e institucional, únicamente se consideró el caudal doméstico, lo que significa un error en el cálculo, debido a que, las PTAR domésticas deben incluir los aportes de agua residual provenientes de estos sectores, además se resalta que, según el plan de desarrollo del municipio de San Miguel, la principal actividad económica y fuente de ingresos del municipio proviene del sector comercio, por lo tanto, el aporte de agua residual comercial podría ser significativo para el caudal de diseño de la PTAR.

Para efectuar el recálculo de los caudales de diseño, inicialmente se tuvo en cuenta la información preliminar como la altitud del municipio y la población de diseño.

La altitud del municipio permite estimar la dotación, la cual según el RAS (2017) para una altitud menor a 1.000 msnm se establece una dotación de 140 L/hab-d. La población de diseño corresponde al número de habitantes proyectado por el DANE al periodo de diseño (2024). Posteriormente, se procedió a realizar el cálculo del caudal doméstico de agua residual, el cual

considera la dotación, la población de diseño y el coeficiente de retorno, que según el RAS (2017) cuando no se cuenta con información y datos de campo, se debe tomar un valor de 0,85.

Cabe mencionar que, el municipio no cuenta con acueducto, por lo tanto, no se tiene información de consumos, número de suscriptores comercial e institucional, por lo tanto, se asumieron valores recomendados por la normativa colombiana RAS (2017) para las contribuciones comerciales e institucionales.

Para los caudales no domésticos se estimaron las áreas comerciales e institucionales. Las cuales corresponden a los comercios ubicados en la vía principal que atraviesa la cabecera municipal, las áreas comerciales ubicadas en los alrededores del parque central Jacinto Torres y hacia la terminal de transportes. Para el área institucional, se consideró el área de dos hoteles, un hospital y cuatro instituciones educativas. El RAS (2017) establece contribuciones comerciales e institucionales de 0,5 L/s·ha, por lo tanto, teniendo en cuenta esta recomendación se obtuvieron los caudales no domésticos.

Conociendo los valores de caudal doméstico, comercial e institucional, se procedió a calcular el caudal medio de agua residual correspondiente a la suma de estos caudales. Finalmente, para calcular el caudal de diseño medio (que corresponde a la suma entre el caudal medio de agua residual y el caudal de infiltración), es necesario conocer el caudal de infiltración, que considera un coeficiente  $C_i$  cuyo valor puede estar entre 0,05 y 1 L/s·km, dependiendo del estado del alcantarillado, que puede variar debido a fisuras, instalaciones inadecuadas o su antigüedad. Para el alcantarillado de La Dorada se estableció un valor de coeficiente  $C_i$  de 0,5 L/s·km y según el Plan de Manejo Ambiental suministrado por Corpoamazonía, se tiene una longitud del alcantarillado de 5.286,7 m.

Para el caudal de diseño máximo se debe considerar un factor de mayoración para el caudal medio de agua residual. Este factor se calculó por medio de la ecuación planteada por Mara (2003). Además, se debe considerar el caudal de infiltración anteriormente calculado para obtener el caudal de diseño máximo.

Se pudo evidenciar en la memoria de diseño de la PTAR la Dorada que en el cálculo de caudal de diseño medio no se consideró el caudal de infiltración. Además, también se evidenció que el caudal de diseño medio fue hallado mediante el producto del caudal de diseño máximo con un coeficiente de retorno de 0,70, lo que refleja un error en el cálculo de caudales, por tal motivo, el caudal medio de agua residual tiene un valor superior al caudal de diseño medio, lo que representa un grave error que se puede manifestar en el diseño al no tener la capacidad suficiente para tratar el agua residual producida por el municipio.

En la **tabla 37** se presenta una comparación de los resultados de los caudales planteados en la memoria de diseño y los recalculados con la población proyectada por el DANE al año 2024.

**Tabla 37.** Comparación de los caudales de diseño

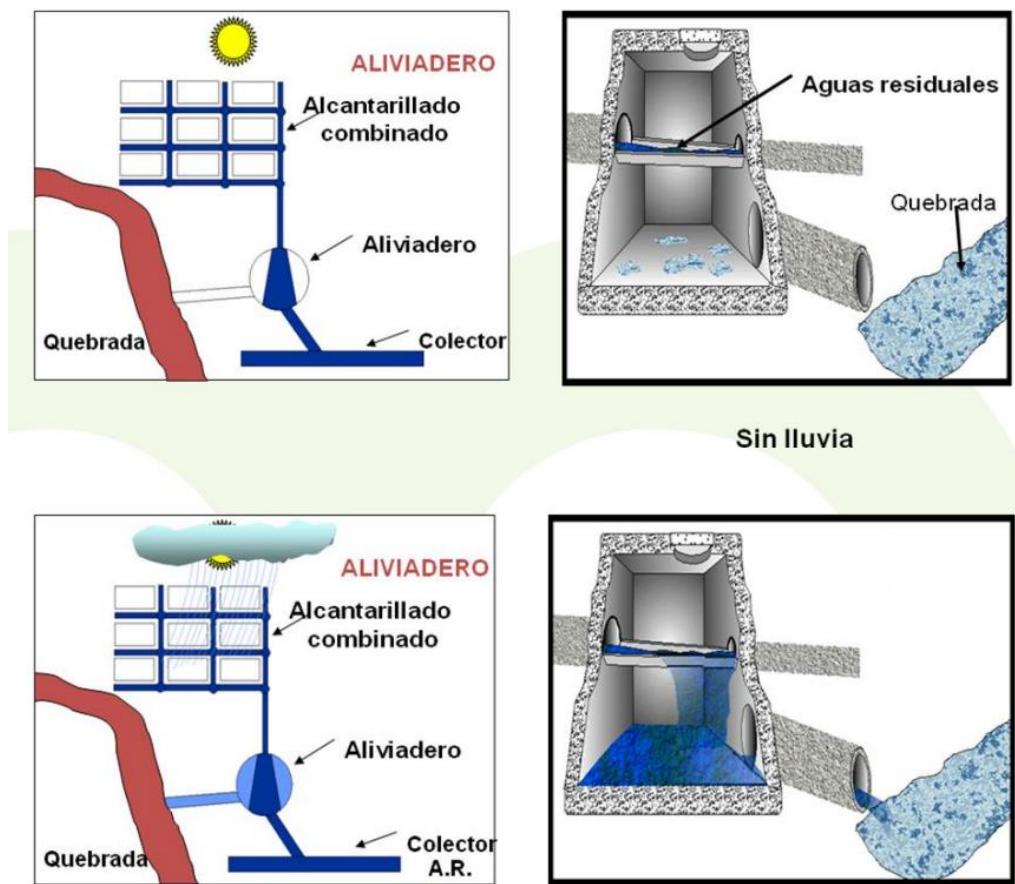
| Parámetro                         |                             | Valor diseñado | Valor calculado     | Unidad             |
|-----------------------------------|-----------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| Altitud del municipio             |                             | -              | 380 <sup>(1)</sup>  | msnm               |
| Población de diseño               |                             | 6.853          | 5.785               | hab                |
| Dotación                          |                             | 173,3          | 140 <sup>(2)</sup>  | L/hab-d            |
| Factor de mayoración              |                             | 1,30           | 3,3 <sup>(3)</sup>  | -                  |
| Coeficiente de retorno            |                             | 0,70           | 0,85 <sup>(1)</sup> | -                  |
| Caudal doméstico de agua residual |                             | 13,75          | 7,97                | L/s                |
| Caudal no doméstico               | Área comercial              | -              | 9,75                | ha                 |
|                                   | Contribución comercial      | -              | 0,5 <sup>(2)</sup>  | L/s·ha comercial   |
|                                   | Caudal comercial            | -              | 4,87                | L/s                |
|                                   | Área institucional          | -              | 1,48                | ha                 |
|                                   | Contribución institucional  | -              | 0,5 <sup>(2)</sup>  | L/s·ha institución |
|                                   | Caudal institucional        | -              | 0,74                | L/s                |
| Caudal medio agua residual        |                             | 13,75          | 13,58               | L/s                |
| Caudal de infiltración            | Coeficiente Ci              | -              | 0,5                 | L/s·km             |
|                                   | Longitud del alcantarillado | -              | 5.286,7             | m                  |
|                                   | Caudal de infiltración      | -              | 2,64                | L/s                |
| Caudal de diseño medio            |                             | 12,50          | 16,23               | L/s                |
| Caudal de diseño máximo           |                             | 18             | 47,53               | L/s                |

**Fuente:** <sup>(1)</sup> Alcaldía de San Miguel (2020); <sup>(2)</sup> RAS (2017); <sup>(3)</sup> Mara (2003)

La diferencia entre los caudales recalculados y los empleados para el diseño de la PTAR es muy significativa y refleja un punto crítico del diseño, principalmente al evidenciar que el caudal de diseño medio es menor que el caudal doméstico. Los caudales de diseño determinan un dimensionamiento correcto de las unidades de tratamiento, así como sus conducciones, tuberías, velocidades, cargas orgánicas y producción de lodos.

#### 4.3.2 Estructura de separación de caudales

Se destaca la ausencia de una estructura de separación de caudales en el alcantarillado combinado del municipio de La Dorada. La estructura de separación de caudales permite en eventos de lluvias, conducir hacia la PTAR el caudal correspondiente al que aporta el agua residual doméstica y a su vez, desviar el exceso hacia la fuente receptora. En la **figura 42** se presenta el funcionamiento de esta estructura.



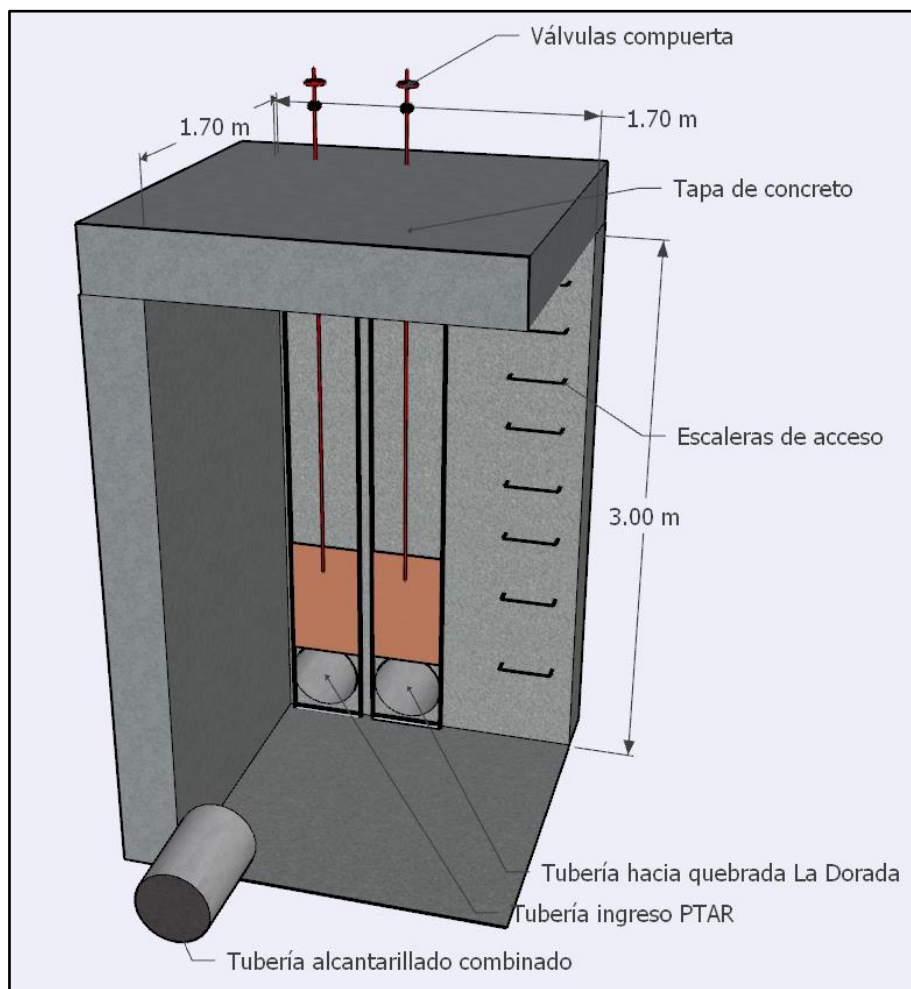
**Figura 42.** Estructura de separación de caudales del alcantarillado combinado  
Fuente: EPM (2010)

Se recomienda que el alcantarillado combinado del municipio cuente con esta estructura de separación de caudales antes de la estructura de entrada a la PTAR. De no contar con esta estructura, en el evento de lluvias, las unidades de la PTAR tratarán-recibirán un mayor caudal para lo cual fueron diseñadas afectando la eficiencia de los procesos involucrados y la calidad del efluente.

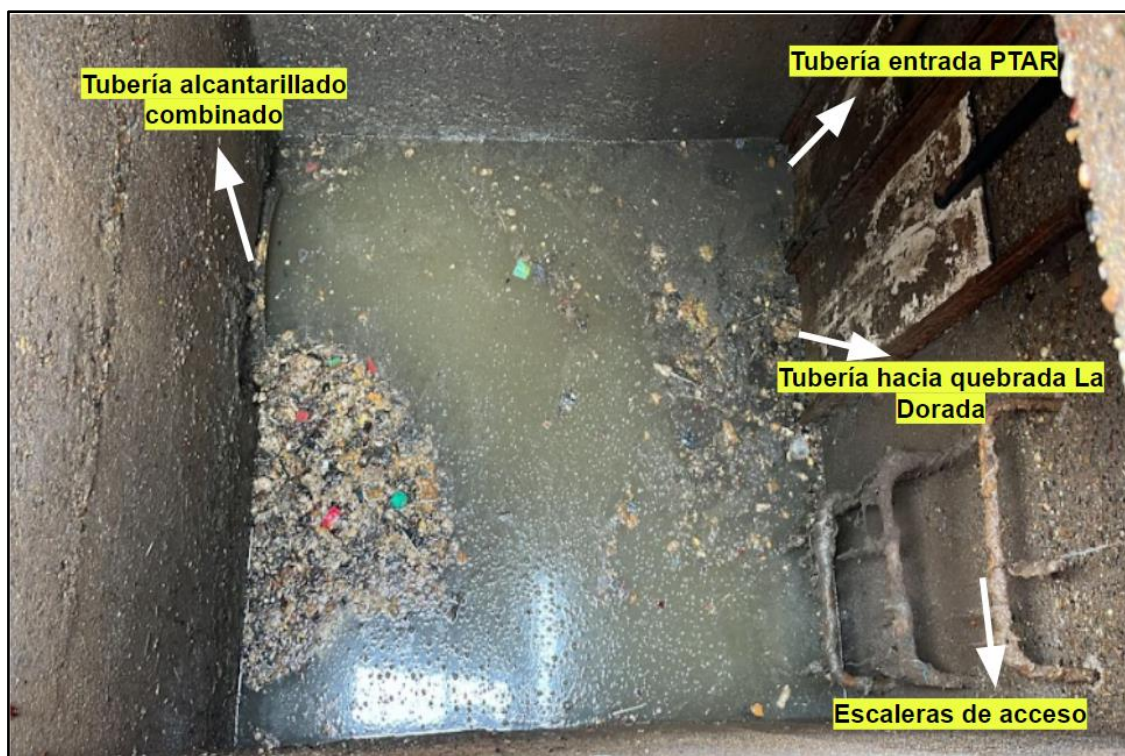
Adicionalmente, se recomienda estimar el caudal de diseño máximo ( $Q_{dM\acute{a}x}$ ) para el nuevo periodo de diseño, ya que, el periodo de diseño de la PTAR se culmina en el año 2024. Una vez determinado el nuevo  $Q_{dM\acute{a}x}$ , se debe garantizar en la estructura de separación de caudales que ingrese este caudal a la PTAR para asegurar el buen funcionamiento de las unidades de tratamiento. Cabe resaltar que, el  $Q_{dM\acute{a}x}$  estimado al año 2024 es de 47,53 L/s, sin embargo, este caudal de entrada a la planta no aplica para el nuevo periodo de diseño.

#### 4.3.3 Estructura de entrada (Canal de entrada + By-pass)

En la estructura de entrada se evidenciaron varios puntos críticos, principalmente en el diseño, ubicación y operación. Además, se identificó que el alcantarillado combinado no cuenta con una estructura de separación de caudales previa para garantizar el ingreso del caudal correspondiente a la capacidad de tratamiento de la PTAR, ya que, la estructura actual recibe todo el caudal del alcantarillado combinado de la cabecera municipal, en la **figura 43** se presenta un esquema de la estructura de entrada y en la **figura 44** se observa la unidad en funcionamiento.



**Figura 43.** Representación gráfica de la estructura de entrada



**Figura 44.** Estructura de entrada a la PTAR

La estructura cuenta con una escalera de acceso a la unidad para labores de mantenimiento, sin embargo, en la actualidad no se contempla como una labor del operario, debido a la elevada profundidad, además, para acceder a la unidad se debe levantar una tapa de concreto que, debido su peso, resulta imposible levantarla por una sola persona. También, se evidencia que, el fondo de la estructura está colmatada de sedimentos y no cuenta con una pasarela, ubicada a una altura superior al nivel del agua residual, para brindar estabilidad al operario y no exponerlo al contacto con agua residual, ya que, le puede generar enfermedades por el contacto de materia orgánica en descomposición y por la presencia de organismos patógenos.

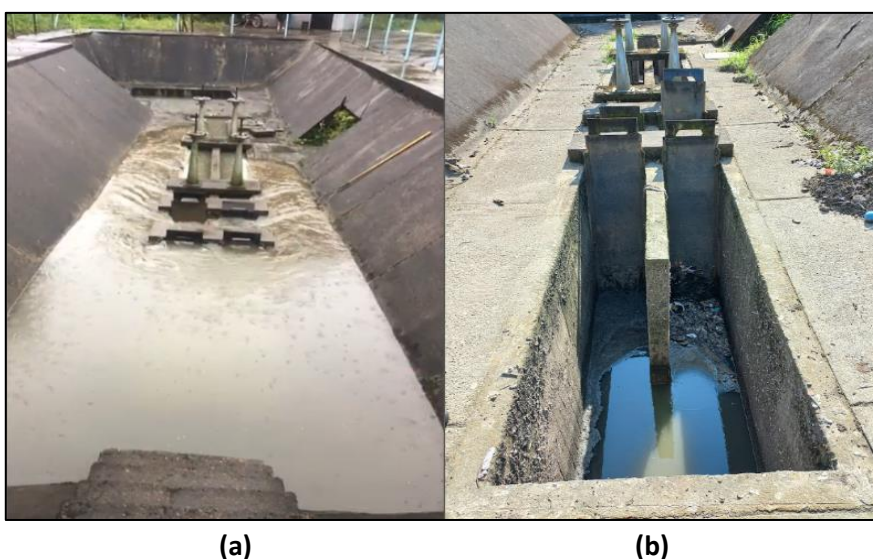
Las válvulas que controlan el ingreso de agua residual a la PTAR están fuera de la valla que delimita el terreno de la PTAR, es decir que, no cuentan con ningún tipo de cerramiento (**figura 45**), por lo que, pueden ser fácilmente manipuladas por personas externas a la operación de la planta, y se expone a que, sea desviado el caudal necesario que requiere la planta para operar. Adicionalmente, las válvulas se encuentran sin ningún tipo de protección a la intemperie encontrándose en estado de alta corrosión, cubiertas de musgo y polvo. El mal estado de las válvulas puede dificultar la rápida manipulación, en caso de presentar una emergencia que requiera evitar el ingreso del agua residual a la PTAR.



**Figura 45.** Válvulas estructura de entrada

Por otra parte, dentro de las actividades de operación de la PTAR no se contempla manipular las válvulas, estas siempre se encuentran levantadas, generando problemas operacionales.

La falta de control en el caudal de entrada a la PTAR genera en temporada de altas precipitaciones que la PTAR reciba un alto caudal, superior a su capacidad, en consecuencia, se generan rebosamientos en las estructuras, principalmente en el tratamiento preliminar (**figura 46**). Por otro lado, en verano, el agua residual que entra al tratamiento es mínima, ya que gran parte del caudal sale por la tubería que conduce hacia la fuente receptora. Cabe destacar que, en los dos escenarios hay descarga directa y constante a la fuente hídrica.



**Figura 46.** Situación de la PTAR en temporada invernal **(a)** en comparación con la temporada de verano **(b)**

Otro aspecto por destacar en la cámara de entrada es que la tubería que conduce a la fuente receptora debería contar con una rejilla media, para retener una parte de los residuos sólidos

que vienen con el agua residual, y de esa forma disminuir el impacto negativo que tendrá su descarga directa a la fuente (**figura 47**). Según García y Pérez (sf) la descarga de agua residual a la fuente hídrica sin ningún tipo de tratamiento es altamente peligrosa para la agricultura, la pesca, las actividades recreativas, entre otras, ya que, puede causar enfermedades, por agentes infecciosos procedentes de la excreta. Cabe destacar que, aguas abajo de la PTAR los campesinos no cuentan con un sistema de agua potable, muchos hacen uso del agua de la Quebrada Dorada (fuente receptora) para lavar ropa, bañarse e incluso para pescar, lo cual, puede dar lugar a problemas epidemiológicos graves.



**Figura 47.** Punto de descarga de agua residual de exceso a la fuente hídrica receptora

Por otra parte, asumiendo una velocidad de entrada de 0,6 m/s, se evidenció en el cálculo de la estructura de entrada que la unidad está sobredimensionada, puesto que, la estructura tiene la capacidad de recibir un caudal mucho mayor al diseñado para el periodo 2024. Al comprobar la capacidad de la estructura con un caudal de 1 m<sup>3</sup>/s se alcanzaría una profundidad del agua de 1 metro, es decir, 2 metros de borde libre. En la **Tabla 38**, se presentan las propuestas de optimización de la estructura de entrada.

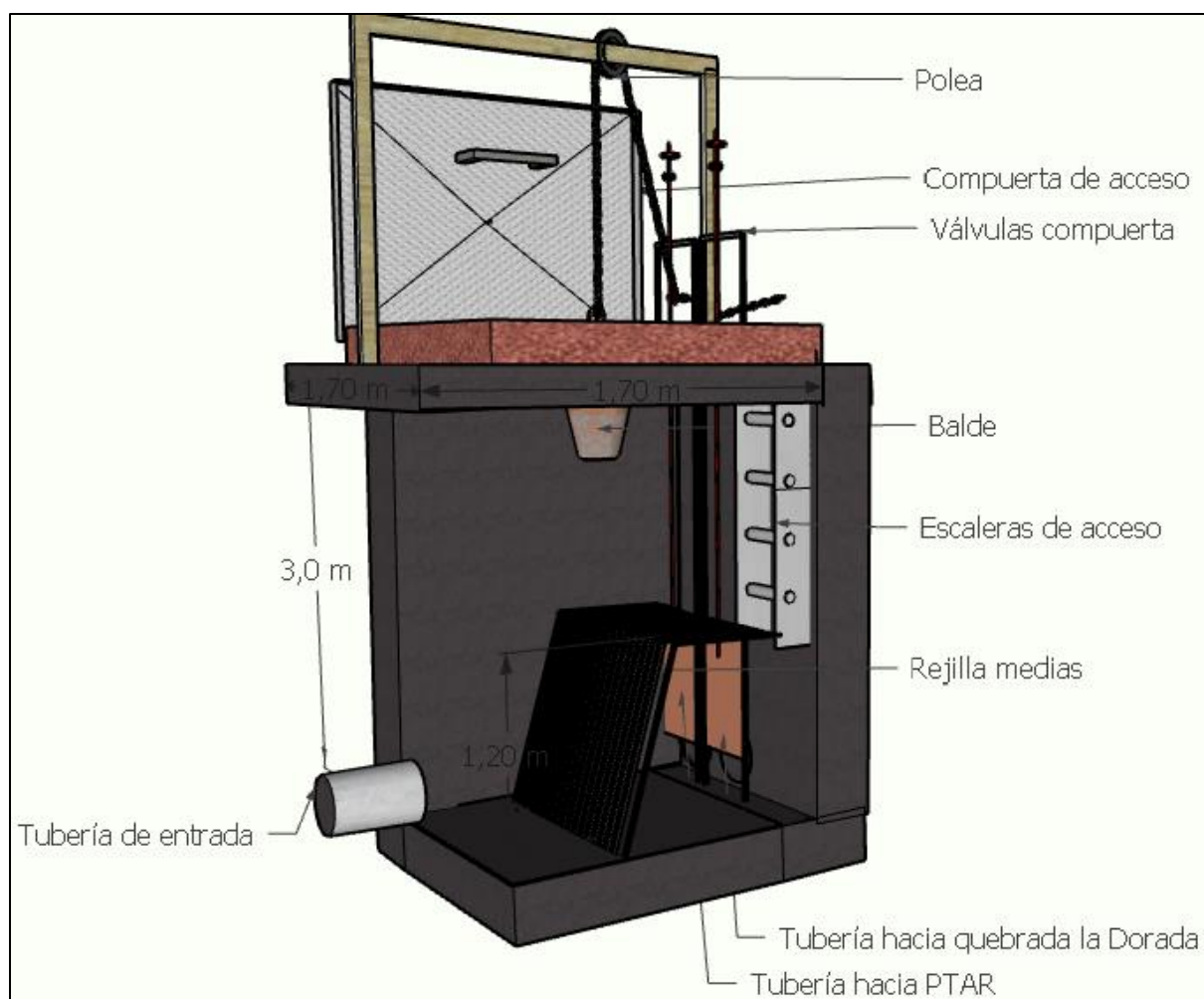
**Tabla 38.** Propuestas de optimización de la estructura de entrada (By-pass)

| Punto crítico         | Estrategia de optimización                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mantenimiento general | Se debe realizar un mantenimiento general de la cámara de entrada, donde se extraigan todos los sedimentos y lodos acumulados dentro de la cámara. Para ello se recomienda el uso de una Vactor. Este servicio puede ser dado por las empresas municipales o se puede adquirir a través de una empresa especializada en limpieza de sedimentos de agua residual.                           |
| Vallas                | Es necesario colocar una valla metálica alrededor de las válvulas de compuerta, para evitar que personas externas a la operación de planta puedan manipularlas. Además, se recomienda que se aplique pintura anticorrosiva para protegerlas de la oxidación, ya que, al estar expuestas a la intemperie, polvo y emisiones del paso constante de vehículos pueden fácilmente deteriorarse. |

**Tabla 38.** Propuestas de optimización de la estructura de entrada (BY-PASS)

| Punto crítico                 | Estrategia de optimización                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tapa de concreto              | Cambiar la tapa de concreto de la estructura de entrada por una de acero inoxidable para facilitar el ingreso del operario a las labores de mantenimiento.                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Escaleras de acceso           | El acceso a la estructura de entrada es indispensable para las labores de mantenimiento y se debe brindar al operario un acceso seguro para no comprometer la salud física y mental, es por ello, que se recomienda cambiar las varillas incrustadas en la pared de hormigón por escaleras fabricadas en acero inoxidable con peldaños antideslizantes, para ofrecer seguridad y evitar el deterioro del material. |
| Rejillas medias               | Se recomienda instalar rejillas medias en el fondo de la estructura de entrada, para retener los residuos sólidos y evitar que lleguen a la fuente receptora.                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Pasarela                      | La estructura de entrada debe contar con una pasarela a una altura de 1,20 m para brindar estabilidad al operario al realizar el mantenimiento de las rejillas medias.                                                                                                                                                                                                                                             |
| Rastrillo                     | Se recomienda el uso de rastrillo para facilitar el arrastre de los residuos sólidos hasta la pasarela. El rastrillo debe tener una abertura de 1/8 a 3/4” (Belzona, 2010).                                                                                                                                                                                                                                        |
| Polea                         | Se recomienda instalar una polea en la estructura de entrada. El operario debe depositar los residuos sólidos en un balde y posteriormente halar la cuerda para lograr el movimiento de la rueda o eje y extraer el balde hasta el nivel del terreno.                                                                                                                                                              |
| Carreta                       | Es necesario que la PTAR cuente con una carreta dentro de sus herramientas de trabajo, con el objetivo de que el operario no realice fuerza al transportar los residuos sólidos húmedos al lugar asignado para la disposición de residuos sólidos.                                                                                                                                                                 |
| Mantenimiento de las válvulas | Realizar mantenimiento preventivo de las válvulas para facilitar la manipulación de éstas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

En la **figura 48** se presenta lo recomendado para optimizar la estructura de entrada.



**Figura 48.** Propuestas de optimización para la estructura de entrada a la PTAR

#### 4.3.4 Cribado

En la **tabla 39** se presentan los criterios de diseño recomendados por la literatura y los valores adoptados en la construcción de la PTAR para el cribado. En la **figura 49** se presenta un esquema del cribado construido en la PTAR.

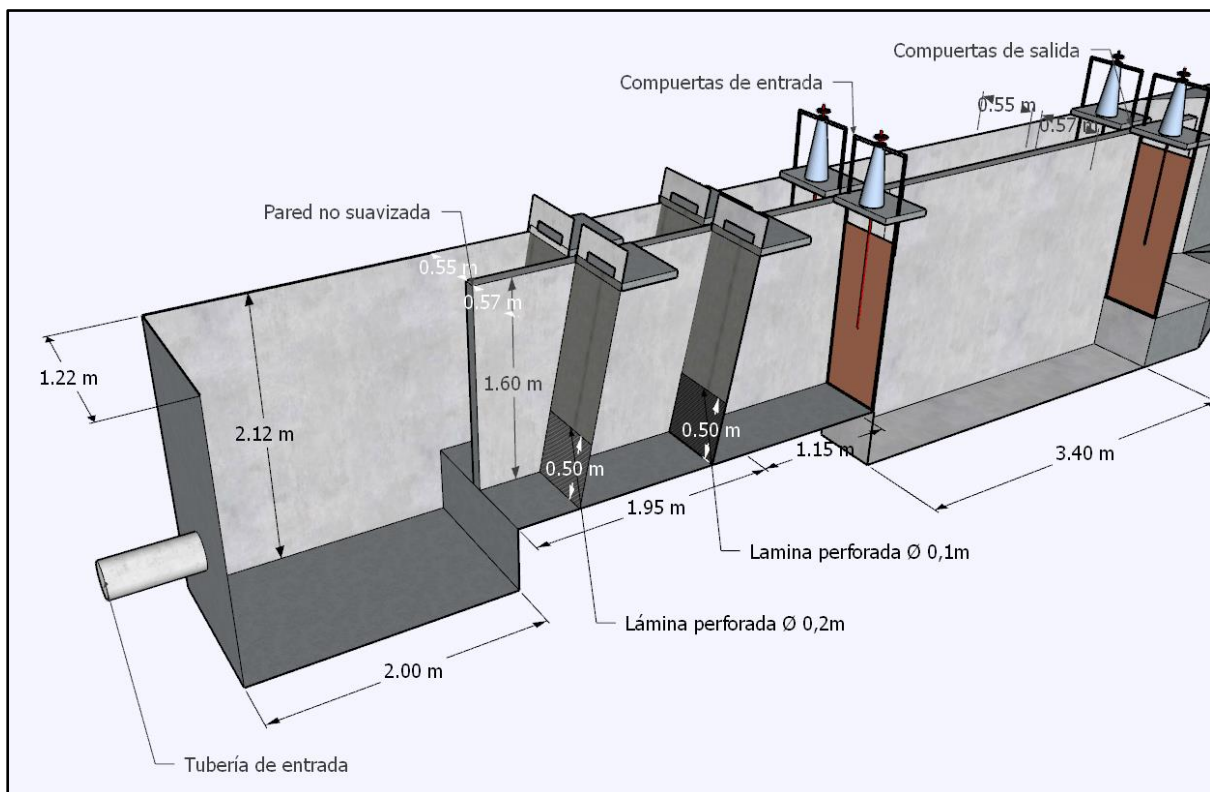
**Tabla 39.** Criterios de diseño de rejillas según su clasificación

| Criterio              | Valor recomendado          | Valor adoptado   | Unidad |
|-----------------------|----------------------------|------------------|--------|
| Número de líneas      | Mínimo dos en paralelo     | dos              | -      |
| Geometría de la barra | Trapezoidal <sup>(1)</sup> | Lámina perforada | -      |

**Tabla 39.** Criterios de diseño de rejillas según su clasificación

| Criterio                                       | Valor recomendado                                   |                                                                                     | Valor adoptado                                        | Unidad        |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------|
| Espaciamiento de rejillas                      | Media                                               | 20 a 40 <sup>(1)</sup><br>25 a 50 <sup>(3)(4)</sup>                                 | Se implementaron dos juegos de láminas en serie de 25 | mm            |
|                                                | Fina                                                | 10 a 20 <sup>(1)</sup>                                                              | No hay                                                | mm            |
| Dimensión de la barra<br>(Ancho x Espesor)     | Media                                               | 7,9x50 <sup>(1)</sup><br>9,5x38,1 <sup>(1)</sup><br>9,5x50 <sup>(1)</sup>           | Ø20                                                   | mm            |
|                                                | Fina                                                | 6,4 x 38,1 <sup>(1)</sup><br>7,9 x 38,1 <sup>(1)</sup><br>9,5 x 38,1 <sup>(1)</sup> | Ø10                                                   | mm            |
| Inclinación de la rejilla<br>(limpieza manual) | 45 a 60 <sup>(1)(2)</sup><br>25 a 50 <sup>(3)</sup> |                                                                                     | 79                                                    | Grados<br>(°) |

**Fuente:** <sup>(1)</sup> Jordão y Pessoa (2011); <sup>(2)</sup> CONAGUA (2015); <sup>(3)</sup> Metcalf y Eddy (2003);  
<sup>(4)</sup> Romero (2004)



**Figura 49.** Representación gráfica del cribado y desarenador actual

La principal diferencia encontrada en el cribado con respecto a las recomendaciones de la literatura está en la construcción del cribado con láminas perforadas, en lugar de barras paralelas como mecanismo de retención de sólidos. Las láminas perforadas no son recomendadas para PTAR con limpieza manual, ya que, fácilmente pueden obstruirse, y tienen una dificultad de mantenimiento superior a las barras. Según Crites y Tchobanoglous (2000), únicamente se recomienda láminas perforadas de 3 a 9,5 mm de diámetro para tamices de limpieza mecánica.

Según Bernier (2015), cuando se compara la pérdida de carga de las barras paralelas y las láminas perforadas como mecanismos de retención de sólidos, se debe tener en cuenta que la pérdida de carga es predominantemente una función del área abierta, la capacidad de limpieza y la prevención de obstrucciones. En este sentido, las barras paralelas son las más recomendadas, ya que, facilitan las condiciones anteriores, obteniendo una pérdida de carga menor y constante a comparación con láminas perforadas.

La ausencia de cribado fino permitirá el paso de sólidos con mayor a 20mm hacia las unidades de tratamiento posterior, lo que puede generar taponamientos en las diferentes conducciones presentes en la PTAR, sobre todo en el tratamiento biológico donde se tienen distribuciones por medio de tuberías perforadas, los sólidos que no fueron retenidos en el cribado terminarán obstruyendo el paso del agua residual generando zonas muertas y distribución desigual dentro de los reactores UASB y filtros percoladores.

También se determinó que la inclinación del sistema de cribado de la PTAR es de 79° (**figura 50**) con respecto al horizontal, valor que se encuentra por encima de lo recomendado. Esta poca inclinación dificulta notablemente la limpieza al operario, dado que, no puede emplear un rastrillo para extraer los residuos sólidos. Los residuos sólidos se extraen por medio de una red presentada en la **figura 51**, la cual dificulta el retiro de los residuos sólidos que se quedan retenidos en los agujeros de las láminas de cribado. Se destaca la ausencia de la canastilla para el drenaje de los residuos recolectados, cuya finalidad es reducir su porcentaje de humedad antes de su disposición final.



**Figura 50.** Inclinación de la rejilla



**Figura 51.** Herramienta empleada para el retiro de residuos sólidos

La limpieza y el mantenimiento de las rejillas es un trabajo dispendioso para el operario, en primera instancia porque el acceso al sistema preliminar se encuentra por debajo del nivel de terreno y el operador debe bajar y subir escaleras para cargar los residuos sólidos mediante un balde que tiene un peso considerable debido al contenido de agua residual de los sólidos. Estos residuos recolectados son conducidos a un lugar que ha sido destinado para enterrarlos sin ningún tipo de tratamiento ni la aplicación de cal (**figura 52**). Además, se observó que el lugar se encuentra descubierto, lo que representa un punto clave para la proliferación de vectores y roedores (**figura 53**).



**Figura 52.** Agujero para el depósito de residuos sólidos



**Figura 53.** Agujero con cubierta vegetal

Por otra parte, las escaleras de acceso al tratamiento preliminar no cuentan con pasamanos y presentan humedad, lo que podría presentar un riesgo de accidente laboral (**figura 54**). Adicionalmente, la huella de las escaleras es menor a la recomendada por la Norma Técnica Colombiana 4145, tal como se presenta en la **Tabla 40**.



**Figura 54.** Estado actual de las escaleras de acceso al sistema preliminar

**Tabla 40.** Recomendaciones para huella y contrahuella para escaleras

| Criterio                       | Valor recomendado | Valor construido | Unidad |
|--------------------------------|-------------------|------------------|--------|
| Huella mínima por cada escalón | 28                | 21               | cm     |
| Contrahuella por cada escalón  | 18                | 19               | cm     |

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 4145 (2012)

En la **Figura 55** se observa una de las láminas perforadas del cribado levantada, evidenciando una falta de mantenimiento, lo que indica una grave falencia en la operación de la planta, ya que permite el paso libre de residuos sólidos, causando un desequilibrio en el funcionamiento de las posteriores unidades de tratamiento.



**Figura 55.** Lámina levantada

En la **Figura 56** se observan los problemas hidráulicos que se presentan, relacionados principalmente con la inequitativa distribución del flujo para los dos canales que hacen parte del cribado, esto trae como consecuencia un mayor flujo por el canal derecho y un menor flujo por el canal izquierdo, afectando significativamente las velocidades requeridas para un correcto funcionamiento de las unidades. Además, el canal izquierdo se encuentra con acumulación de sedimentos, estancamiento de agua residual y con alta presencia de moscas.



**Figura 56.** Distribución ineficiente del caudal en las líneas de tratamiento

Se pudo evidenciar que el canal de entrada a la PTAR tiene una profundidad mayor que los canales de cribado, con una diferencia de 0,52m, lo cual, genera cortocircuitos hidráulicos y acumulación de sedimentos que generan malos olores. Además, la pared que divide las dos líneas de cribado no cuenta en la parte frontal con un suavizado de forma triangular, para evitar recirculaciones o zonas muertas y suavizar el paso del flujo hacia las líneas de cribado.

Los canales de cribado no cuentan con compuertas antes de las rejillas para controlar el paso del caudal, es decir que en el momento de realizar mantenimiento o limpieza no es posible cerrar una línea de tratamiento, se debe cerrar todo el ingreso de agua residual desde la estructura de entrada para el mantenimiento de esta estructura.

Se analizó el dimensionamiento del canal de aproximación con el caudal de diseño máximo de 18 L/s de la memoria de diseño de la PTAR. Se observó que, al asumir una velocidad del agua de 0,5 m/s en el canal de aproximación se tiene una profundidad del agua de 3 cm, lo cual nos indica un sobredimensionamiento de este canal. La profundidad del agua es tan baja que puede ser fácilmente obstruida por sólidos grandes, causando zonas muertas y líneas preferenciales de flujo. Por lo tanto, se realizó el mismo análisis con el caudal de diseño máximo recalculado (47,5 L/s) y se obtuvo una profundidad del agua de 7,8 cm, lo cual, continúa presentando sobredimensionamiento.

Al analizar las líneas de cribado, considerando una velocidad de paso de 1,2 m/s a través de las láminas perforadas medias, se obtuvo un nivel de agua de 5 cm, lo cual confirma que cada línea también se encuentra sobredimensionada. Al contar con una profundidad del agua muy baja se generarán obstrucciones en el fondo de las láminas perforadas. Por lo tanto, al analizar

el dimensionamiento actual con el caudal reajustado y considerando el cambio de las placas perforadas por rejillas medias, se obtiene una profundidad del agua de 10 cm. Como se puede observar la profundidad del agua sigue siendo baja. Por lo que se realizó un dimensionamiento del canal de entrada y cribado con el caudal de diseño máximo recalculado (47,5 L/s).

En la **tabla 41** se presenta una comparación entre el cribado construido y las dimensiones recalculadas las cuales incluyen las consideraciones de la literatura. Cabe resaltar que, el redimensionamiento corresponde al diagnóstico del diseño realizado al periodo 2024, es decir que, es lo que se hubiese esperado en el diseño inicial.

**Tabla 41.** Comparación entre el cribado construido y el reajustado

| Parámetro                               | Construido<br>(Qdmáx = 18 L/s) | Reajustado<br>(Qdmáx = 47,53 L/s)            |      | Unidad |
|-----------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|------|--------|
| Profundidad canal aproximación          | 2,12                           | 1,2                                          |      | m      |
| Ancho canal de aproximación             | 1,22                           | 0,32                                         |      | m      |
| Velocidad de aproximación               | 0,5                            | 0,5                                          |      | m/s    |
| Profundidad del agua                    | 3                              | 30                                           |      | cm     |
| Canal de transición a líneas de cribado | No construido                  | Longitud                                     | 1,0  | m      |
|                                         |                                | Ángulo transición                            | 12   | °      |
| Ancho canales de cribado                | 0,55                           | 0,30                                         |      | m      |
| Velocidad de paso                       | 1,2                            | 1,2                                          |      | m/s    |
| Tipo de cribado                         | Lámina perforada               | Rejillas medias y finas                      |      | ---    |
| Profundidad del agua en cribado         | 4,90 cm                        | 20 cm<br>(Considerando el cambio a rejillas) |      | cm     |
| Cámara de integración de caudales       | No construido                  | Ancho                                        | 0,75 | m      |
|                                         |                                | Longitud                                     | 0,61 | m      |
|                                         |                                | Tubería nominal                              | 315  | mm     |

En la **Tabla 42** se presentan propuestas de optimización para el cribado de la PTAR.

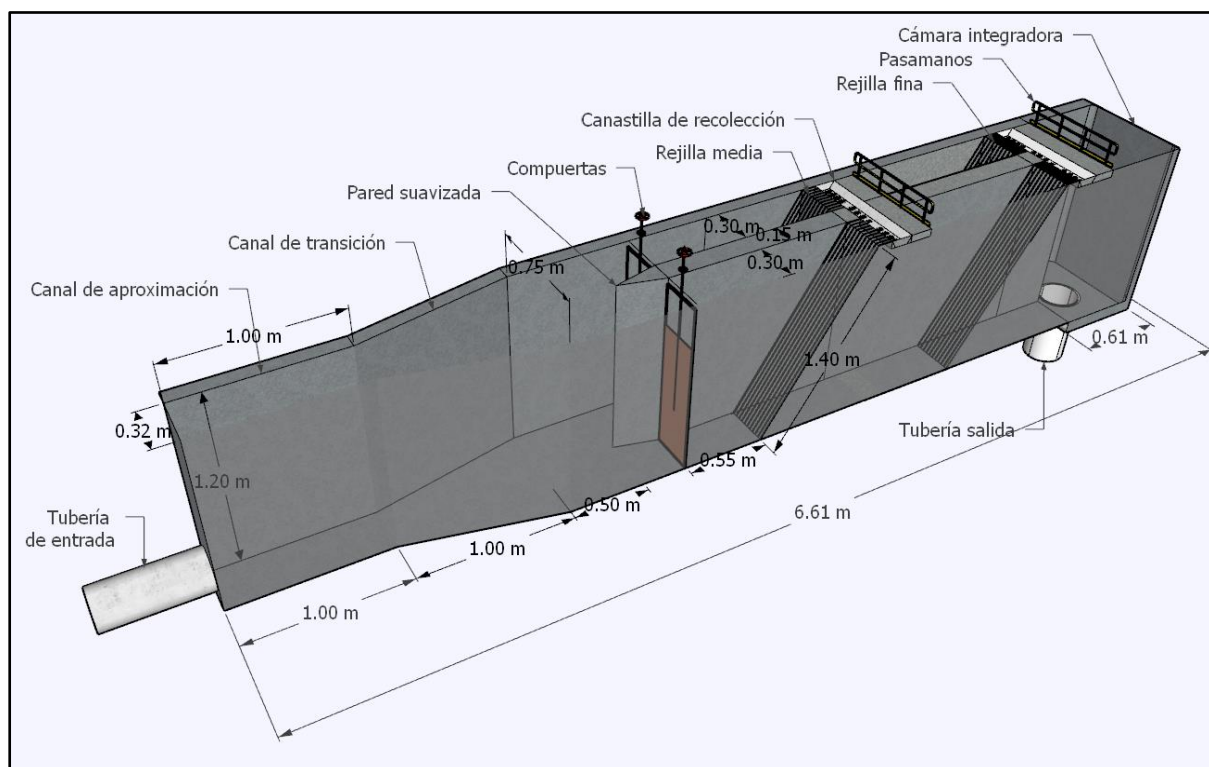
**Tabla 42.** Propuestas de optimización para el cribado

| Punto crítico                         | Estrategia de optimización                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Canal de aproximación                 | Se propone rellenar en concreto el desnivel del canal de aproximación, ya que, la diferencia de profundidades no tiene ninguna función y sólo genera colmatación en la zona. Al realizar esta modificación no afecta la tubería de entrada que se encuentra a una altura de 1,20 m desde el nivel de terreno.                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Profundidad de los canales de cribado | Para establecer una profundidad uniforme en todo el cribado, se plantea establecer la profundidad de las líneas de cribado a 1,20 m para que quede al mismo nivel del canal de aproximación.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Canal de transición                   | Se recomienda la implementación de un canal de transición que permita un flujo del agua uniforme hacia las líneas de cribado.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Suavizado                             | Se recomienda que la pared que divide las dos líneas de cribado cuente en la parte frontal, con un suavizado de forma triangular, para evitar recirculaciones o zonas muertas y suavizar el paso del flujo hacia las líneas de cribado.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Compuertas de entrada                 | Se recomienda que cada línea de cribado cuente con una compuerta para controlar o restringir el paso del caudal a las líneas de tratamiento, esto con el fin de facilitar las labores de mantenimiento.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Laminas perforadas                    | Sustituir las láminas perforadas por rejillas medias y finas conservando el tipo de limpieza manual, En la <b>tabla 40</b> se presentó la geometría y los valores recomendados por la literatura. Cabe resaltar que, lo ideal es que las PTAR cuenten con el tipo de limpieza mecánica por su ventaja de evitar las frecuencias de mantenimiento, sin embargo, al considerar que el municipio de La Dorada tiene un servicio de energía deficiente, se recomienda conservar la limpieza manual para no afectar el funcionamiento de la PTAR y prevenir obstrucciones constantes. |
| Rastrillo                             | Se recomienda cambiar la red como herramienta para la limpieza del cribado por un rastrillo. Belzona (2010) recomienda que para plantas de tratamiento de limpieza manual se utilice rastrillo con una apertura de 1/8 a 3/4” para facilitar el arrastre de los residuos sólidos hasta la canastilla de escurrimiento.                                                                                                                                                                                                                                                           |

**Tabla 42.** Propuestas de optimización para el cribado

| Punto crítico                                      | Estrategia de optimización                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Canastilla de escurrimiento                        | Retirar las placas de concreto y realizar la extensión de las barras permitiendo que el operario pueda emplear el rastrillo para conducir los sólidos hacia una canastilla de escurrimiento. El objetivo de la canastilla es permitir el drenaje temporal del material removido (Metcalf y Eddy, 2003), para posteriormente llevarlo a su disposición final. |
| <b>ACCESO AL SISTEMA DE TRATAMIENTO PRELIMINAR</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Pasamanos                                          | Es necesario que las escaleras de acceso al tratamiento preliminar tengan pasamanos a los lados, para brindarle seguridad al operario, además, de servir como medio de apoyo al subir o bajar escaleras.                                                                                                                                                     |
| Huella y contrahuella                              | Se recomienda corregir la huella y contrahuellas de las escaleras de acceso al sistema preliminar de acuerdo con lo recomendado por la NTC 4245 (tabla 40).                                                                                                                                                                                                  |

En la **figura 57** se ilustra todas las recomendaciones expuestas y las dimensiones ideales que se debieron considerar según el análisis realizado con el caudal de diseño máximo para el 2024.



**Figura 57.** Propuestas de optimización del canal de entrada y cribado considerando el caudal recalculado ( $Q_{d\text{máx}} = 47,53 \text{ L/s}$ )

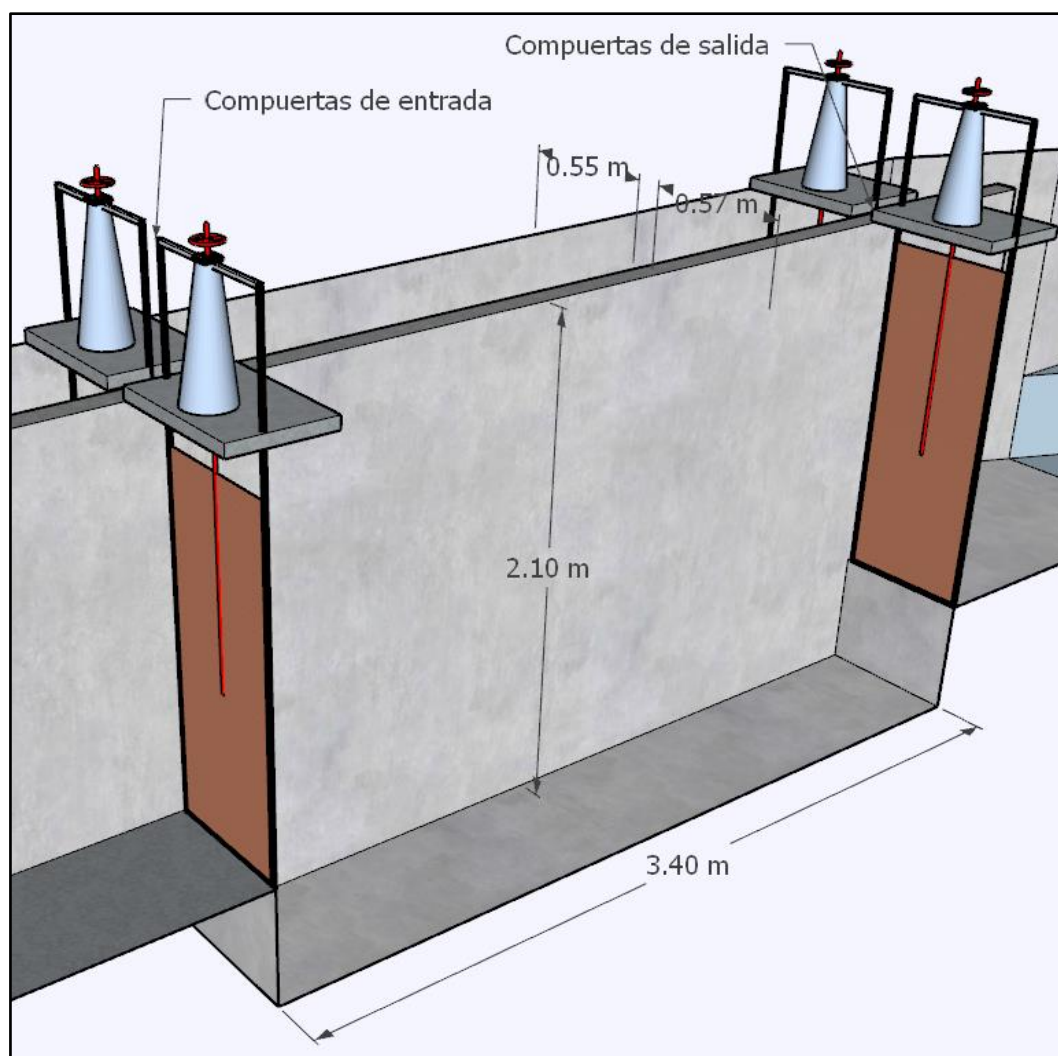
### 4.3.5 Desarenador

En la **tabla 43** se presentan los criterios de diseño del desarenador horizontal y los valores construidos. En la **Figura 58** se presenta un esquema de los desarenadores construidos.

**Tabla 43.** Parámetros de diseño del desarenador

| Criterio                      | Valor recomendado                                       | Valor construido | Unidad            |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------|-------------------|
| Número de líneas              | 2 <sup>(8)(3)</sup>                                     | 2                | und               |
| Profundidad                   | 2 a 5 <sup>(4)</sup>                                    | 2                | m                 |
| Profundidad del agua          | ≥0,5 <sup>(8)</sup><br>0,6-1,5 <sup>(6)</sup>           | ---              | m                 |
| Longitud                      | 3-25 <sup>(6)</sup>                                     | 3,5              | m                 |
| Relación largo/ancho          | 10:1 a 15:1 <sup>(7)</sup>                              | 6:1              | --                |
| Velocidad horizontal          | 0,3 <sup>(1)(2)(3)</sup>                                | 0,3              | m/s               |
| Cantidad de material retenido | 4-200 <sup>(2)</sup><br>Valor típico: 15 <sup>(2)</sup> | ---              | mL/m <sup>3</sup> |
| Diámetro de la partícula      | 0,2 a 0,4 <sup>(1)</sup><br>≥0,21 <sup>(2)</sup>        | ---              | mm                |
| Velocidad de sedimentación    | ≥0,02 <sup>(1)(2)</sup>                                 | ---              | m/s               |
| Pendiente                     | 1 a 8                                                   | 0                | %                 |
| Unidades en paralelo          | 2 <sup>(5)</sup>                                        | 2                | --                |

Fuente: <sup>(1)</sup> Jordão y Pessôa (2011); <sup>(2)</sup> Romero (2004); <sup>(3)</sup> Crites y Tchobanoglous (2000);  
<sup>(4)</sup> RAS (2000); <sup>(5)</sup> RAS (2017); <sup>(6)</sup> Water Environment Federation (2010);  
<sup>(7)</sup> Rodríguez (2022); <sup>(8)</sup> CONAGUA (2015)



**Figura 58.** Representación gráfica desarenador

La literatura recomienda construir dos unidades en paralelo principalmente por cuestiones operativas, dado que permite realizar mantenimiento a una unidad mientras la otra se encuentra en funcionamiento, por tal motivo, ambas líneas deben ser diseñadas para tratar todo el caudal de diseño. En la PTAR La Dorada, la unidad cuenta con compuertas a la entrada y salida (**figura 59**), pero en el mismo canal donde se encuentra el cribado, está ubicado el desarenador. Esta situación no permite la independencia del funcionamiento de una línea del cribado con la desarenación, lo que significa que, si una línea del cribado sale de funcionamiento, la desarenación también lo hará. No hay forma de controlar el caudal de entrada a los desarenadores para las labores de mantenimiento, dado que, aunque el desarenador tiene compuerta en la entrada, el diseño no permite controlar el paso del agua residual. Al cerrar la compuerta de entrada al desarenador se generará un represamiento del flujo en el canal dando paso a un rebosamiento, ya que no hay forma de dividir el caudal hacia la línea contigua de desarenación. Para evitar este tipo de situaciones es necesario implementar una caja que recolecte el efluente del cribado, y luego se conduzca a una caja de distribución de caudales (CADICA) o en su defecto a un canal de transición, que permita controlar el ingreso del agua

residual a los desarenadores y en caso de cerrar alguna línea, se distribuya el caudal de forma homogénea hacia la línea abierta.



**Figura 59.** Línea de cribado y desarenador

Es importante mencionar que las dos líneas de los desarenadores, al igual que los dos canales de cribado, presentan diferencias en las dimensiones. Es decir que, un desarenador tiene un área transversal superior, que influye en la reducción de la velocidad horizontal. La literatura recomienda diseñar los desarenadores con una velocidad horizontal de  $0,3\text{m/s}$  dado que esta velocidad permite que descendan las partículas pesadas inorgánicas, mientras que las partículas orgánicas tienden a resuspender y transportarse a través de la cámara de desarenación (Romero, 2004).

También, se evidencia que los desarenadores no cuentan con una pantalla perforada para una correcta distribución del flujo. Según Henao (2021) la pantalla perforada se encarga en gran medida de controlar las condiciones del flujo y sean lo más cercanas a un flujo uniforme, sin estas, no es posible establecer las condiciones del flujo que propicien la separación de partículas sólidas-líquido.

En campo, se evidenció que el desarenador no tiene pendiente, tolva de arenas, ni tubería de purga, componentes esenciales para el correcto funcionamiento de la unidad. La pendiente del desarenador permite que las arenas sean conducidas por medio de gravedad hacia la tolva de arenas, la cual recolecta y facilita la extracción de las arenas por medio de una válvula de purga. Además, la literatura recomienda que los desarenadores de limpieza manual deben proveer espacio para el almacenamiento de las arenas sedimentadas (Sánchez y Jerez, 2018), lo cual, en el diseño y construcción de la unidad no se contempló.

El operario de la planta menciona que no realiza el retiro de sedimentos de esta unidad, es decir que la purga de arenas no se realiza de manera manual, ni por medio de válvulas ni medios mecánicos. Evacuar los sedimentos de la unidad es una labor indispensable para asegurar que

el desarenador tenga una operación normal y eficiente. El mal funcionamiento de la unidad puede ser perjudicial para los tratamientos posteriores, en especial para el sistema biológico, ya que, las partículas sólidas elevan la turbiedad e inhiben los procesos biológicos hasta el punto de depositarse en el reactor, causando elevadas pérdidas de carga y reduciendo la calidad del efluente (OPS, 2005).

También se evidenció que al costado del desarenador hay dos cámaras, las cuales se encuentran inundadas de agua residual, no es claro el funcionamiento ni está especificado en los planos (**figura 60**). El operario desconoce el funcionamiento de las cámaras y menciona que siempre se encuentran en este estado.



**Figura 60.** Cámara del desarenador

CONAGUA (2015) recomienda que el desarenador de flujo horizontal cuente con vertedero sutro para regular la velocidad de flujo independientemente del tirante. La PTAR La Dorada no cumple con esta recomendación, dado que fue diseñada con la configuración de una canaleta Parshall. La canaleta Parshall es utilizada generalmente para la medición de caudal en canales abiertos y es comúnmente utilizada para agua potable (Hidalgo, 2017). Para tratamiento de agua residual no es recomendada porque la acumulación de sedimentos modifica la medición de caudal. En la **figura 61** se puede evidenciar que, debido al aumento de caudal y arrastre de partículas, la canaleta Parshall presenta colmatación, hasta cubrirse totalmente con el paso de agua residual.



**Figura 61.** Canaleta Parshall

En temporada de verano generalmente el nivel de agua residual es bajo, evidenciándose la regleta de medición de caudal. Sin embargo, esta unidad para tratamiento de agua residual no es recomendada como estructura de medición de caudales ni reguladora de velocidad.

Al analizar las dimensiones construidas del desarenador considerando el caudal de diseño máximo de la memoria de diseño correspondiente a 18 L/s y considerando el criterio de velocidad horizontal de 0,3m/s, se evidenció que se tiene una profundidad del agua de 11 cm, la cual no cumple con la mínima recomendada por la literatura, además, la construcción tampoco cumple con la relación largo/ancho recomendada por la literatura para asegurar la velocidad de sedimentación. Por lo tanto, se calculó la profundidad con el caudal de diseño máximo recalculado correspondiente a 47,53 L/s, obteniendo una profundidad de 29 cm, aunque, la profundidad aumenta en comparación con la calculada inicialmente, el valor sigue manteniéndose por debajo de lo recomendado por la literatura. Por lo que, se calcularon nuevamente las dimensiones dando cumplimiento a los criterios recomendados por la literatura. En la **tabla 44** se presenta una comparación entre el desarenador construido y el redimensionado al periodo 2024.

**Tabla 44.** Comparación entre el desarenador construido y el reajustado

| Parámetro                              | Construido<br>( $Q_{d\text{máx}} = 18 \text{ L/s}$ ) | Reajustado<br>( $Q_{d\text{máx}} = 47,53 \text{ L/s}$ )                                           | Unidad |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Estructura de distribución de caudales | No construida                                        | CADICA rectangular de dos salidas con vertederos triangulares con compuertas ( <b>figura 61</b> ) | --     |
| Ancho de cada desarenador              | 0,55                                                 | 0,32                                                                                              | m      |

**Tabla 44.** Comparación entre el desarenador construido y el reajustado

| Parámetro                         | Construido<br>(Qdmáx = 18 L/s) | Reajustado<br>(Qdmáx = 47,53 L/s) | Unidad |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------|
| Velocidad horizontal              | 0,3                            | 0,3                               | m/s    |
| Profundidad del agua              | 29                             | 50                                | cm     |
| Largo desarenador                 | 3,40                           | 4,75                              | m      |
| Relación largo / ancho            | 6:1                            | 15:1                              | --     |
| Pendiente de fondo                | 0                              | 5                                 | %      |
| Control de velocidad              | Canaleta Parshall              | Vertedero sutro                   | --     |
| Cámara de integración de caudales | No construido                  | Ancho = 0,73                      | m      |
|                                   |                                | Longitud = 0,52                   | m      |
|                                   |                                | Tubería nominal = 315             | mm     |

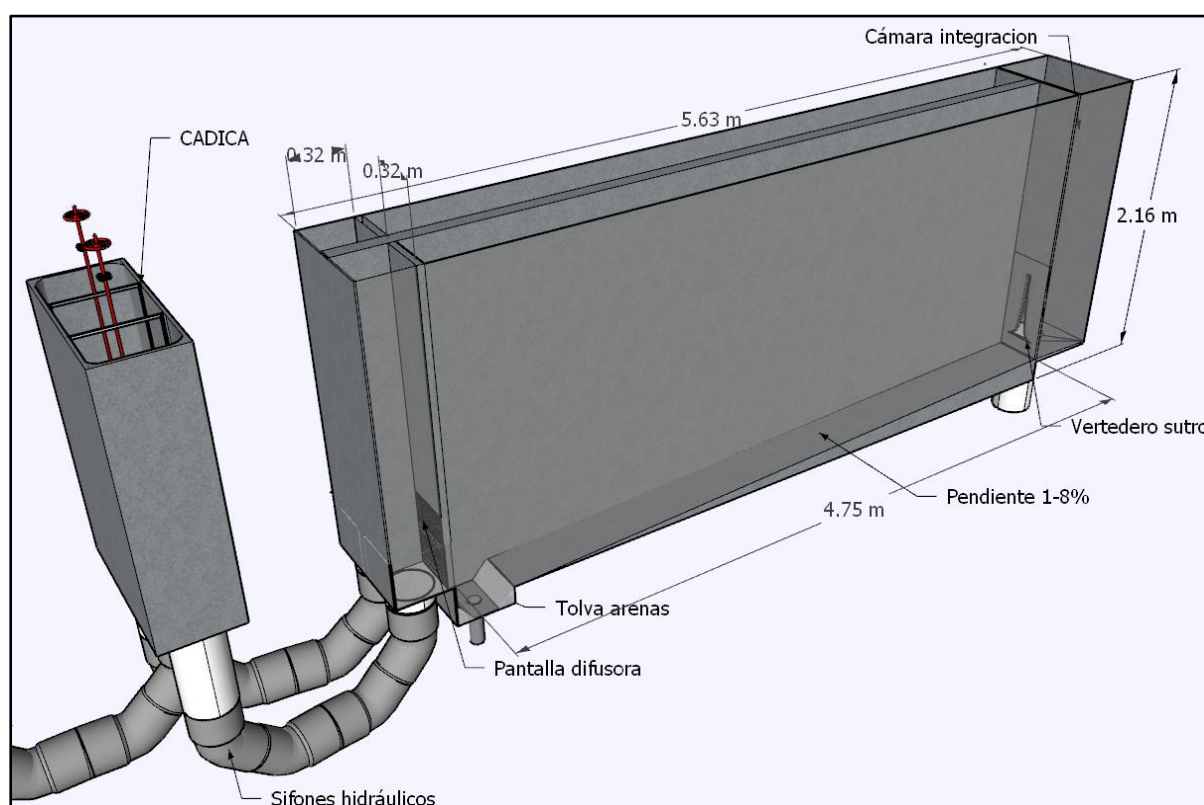
En la **tabla 45** se presentan las propuestas de optimización para el desarenador y en la **figura 62** se ilustra lo recomendado con sus dimensiones.

**Tabla 45.** Propuestas de optimización para el desarenador de flujo horizontal

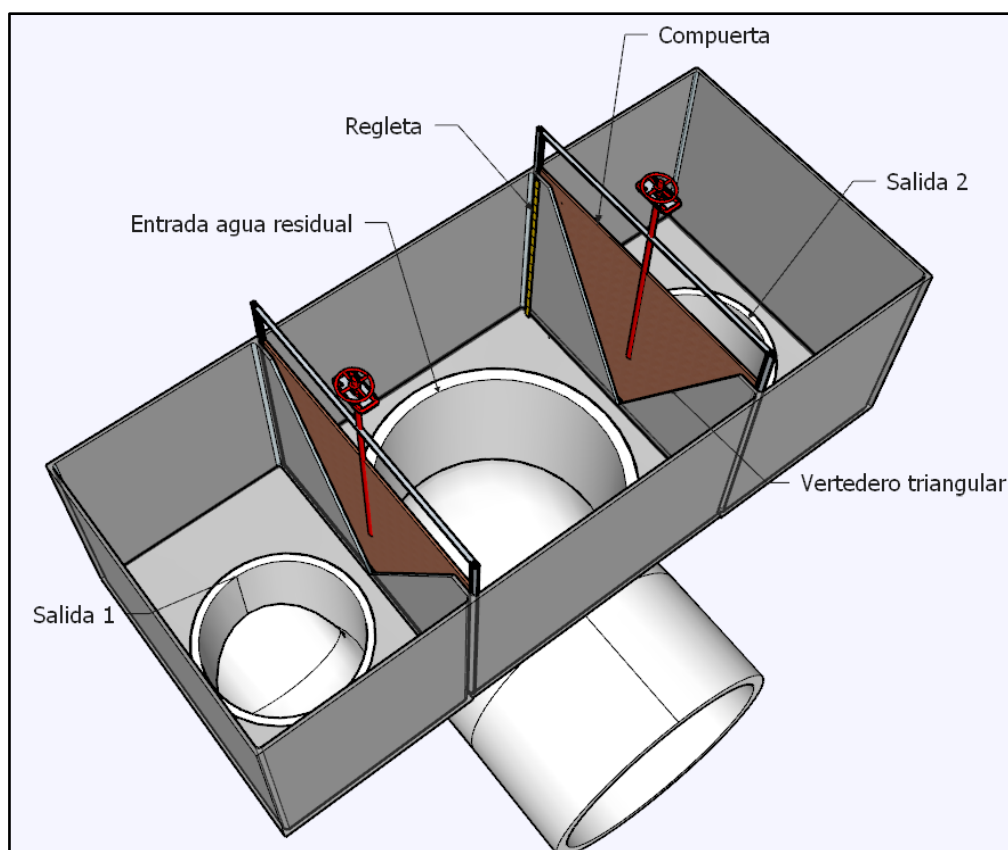
| Punto crítico            | Estrategia de optimización                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Distribución de caudales | Se propone implementar una caja de distribución de caudales (CADICA) que permita distribuir el caudal de manera homogénea hacia las líneas de desarenación. En la <b>figura 63</b> se presenta la CADICA de geometría rectangular recomendada, cuya entrada esté ubicada en el centro y distribuya el agua hacia las dos salidas de los laterales, por medio de vertederos triangulares. También se recomienda que la CADICA tenga compuertas en los vertederos de salida para permitir el cierre de alguna línea en situaciones de mantenimiento sin afectar el proceso de tratamiento de la PTAR. |
| Pantalla difusora        | Se recomienda implementar pantallas perforadas con orificios circulares, en la entrada de cada desarenador. Estas pantallas son recomendadas para distribuir el caudal uniformemente a través de toda la sección transversal, de modo que se logre disipar la energía que trae el agua y garantizar una velocidad longitudinal uniforme (RAS, 2000). Además, permiten evitar las líneas preferenciales de flujo y las zonas muertas.                                                                                                                                                                |

**Tabla 45.** Propuestas de optimización para el desarenador de flujo horizontal

| Punto crítico                                    | Estrategia de optimización                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ausencia de pendiente de fondo                   | El desarenador debe tener una pendiente de fondo de 1 a 8 % para remover las arenas, de modo que permita que los sólidos descendan por medio de gravedad hacia la tolva de arena.                                                                                     |
| Ausencia de tolva de arenas                      | Se recomienda implementar una tolva de arena en la parte inicial del fondo del desarenador, la cual recolecta y facilita la extracción de las arenas. La tolva debe ser de forma trapezoidal y debe tener un tiempo de almacenamiento mínimo de 1 día (Romero, 2004). |
| Ausencia de válvula y tubería de purga de arenas | La tolva de arenas debe tener una válvula y tubería de purga que permita la salida de las arenas sedimentadas hacia el lecho de secado.                                                                                                                               |
| Control de velocidad                             | Se propone la implementación de un vertedero “Sutro” como sección de control de velocidad a la salida del desarenador independientemente del tirante (Crites y Tchobanoglous, 2000) (Romero, 2004).                                                                   |



**Figura 62.** Estructura del desarenador considerando caudal de 47,53 L/s



**Figura 63.** CADICA rectangular de dos salidas

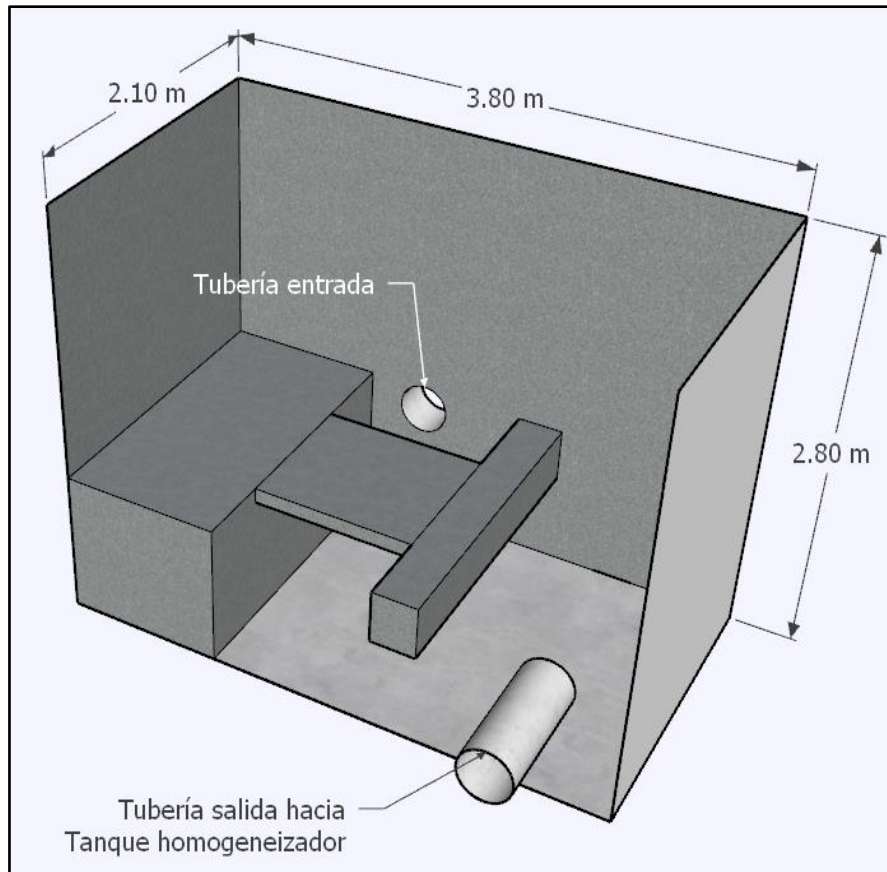
#### 4.3.6 Trampa de grasas

En la **tabla 46**, se presentan los principales parámetros de diseño y valores construidos de la trampa de grasas. En la **figura 64 y 65** se presenta un esquema de la trampa de grasas construida.

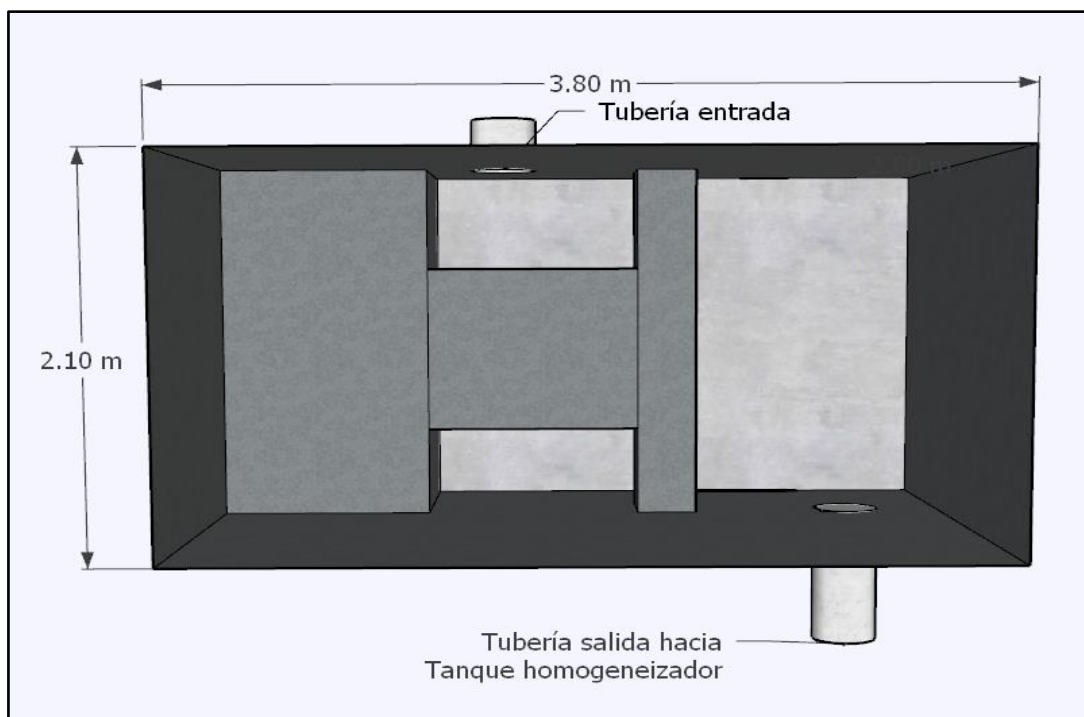
**Tabla 46.** Parámetros de diseño de la trampa de grasas

| Criterio                | Valor recomendado                                                          | Valor construido | Unidad |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------|--------|
| TRH                     | 2,5 a 3,0 <sup>(1)</sup>                                                   | 5,54             | min    |
| Relación<br>Largo/Ancho | 1:1 a 3:1 <sup>(1)</sup><br>3:1 <sup>(3)</sup><br>2:1 a 3:2 <sup>(2)</sup> | 1,8:1            | ---    |
| Profundidad             | >0,8 <sup>(2)</sup>                                                        | 2,80             | m      |
| Borde libre             | 0,3 <sup>(2)</sup>                                                         | ---              | m      |

Fuente: <sup>(1)</sup> RAS (2017); <sup>(2)</sup> OPS (2003); <sup>(3)</sup> Wang et al. (2010)



**Figura 64.** Esquema isométrico de la trampa de grasas



**Figura 65.** Vista en planta de la trampa de grasas

La configuración de la trampa de grasas de la PTAR La Dorada no permite la adecuada separación de las grasas. El mal diseño y construcción, así como la ubicación de la tubería de entrada y salida al mismo nivel y no sumergidas, no permiten las condiciones favorables para la separación y retención de las grasas (Wang et al., 2010). La literatura recomienda que, el extremo final de la tubería de entrada tenga una sumergencia de por lo menos 0,15 m, mientras que la tubería de salida debe localizarse por lo menos a 0,15 m del fondo del tanque y con una sumergencia de por lo menos 0,9 m (RAS, 2000).

En el diseño de la trampa de grasas contemplaron la construcción de una placa de concreto, ubicada a lo largo de la estructura. Lo cual, se encuentra con alta acumulación de sólidos y sedimentos (**figura 66**), evidenciándose el mal diseño del cribado y desarenador. También se observó que, la estructura tiene un bafle, el cual está mal diseñado, ya que, una parte del agua residual fluye por encima y otra parte pasa por la parte inferior del bafle hacia la tubería de salida. Según Rodríguez, (2022) los baffles deben estar instalados a lo largo de la cámara, con ventanas en el fondo para permitir el paso del agua y para garantizar un flujo a pistón horizontal que favorezca la flotación de la grasa contenida en el agua residual.



**Figura 66.** Estructura de la trampa de grasas

Adicionalmente, es importante resaltar que la trampa de grasas no cuenta con una cubierta y presenta exposición constante al sol y a la lluvia, lo que dificulta aún más la formación de la capa de grasa en la superficie. Según Wang et al. (2010) la temperatura es un factor importante en el diseño de la trampa de grasas, ya que las variaciones de temperatura provocan densidades no uniformes, reduciendo la eficiencia de la unidad.

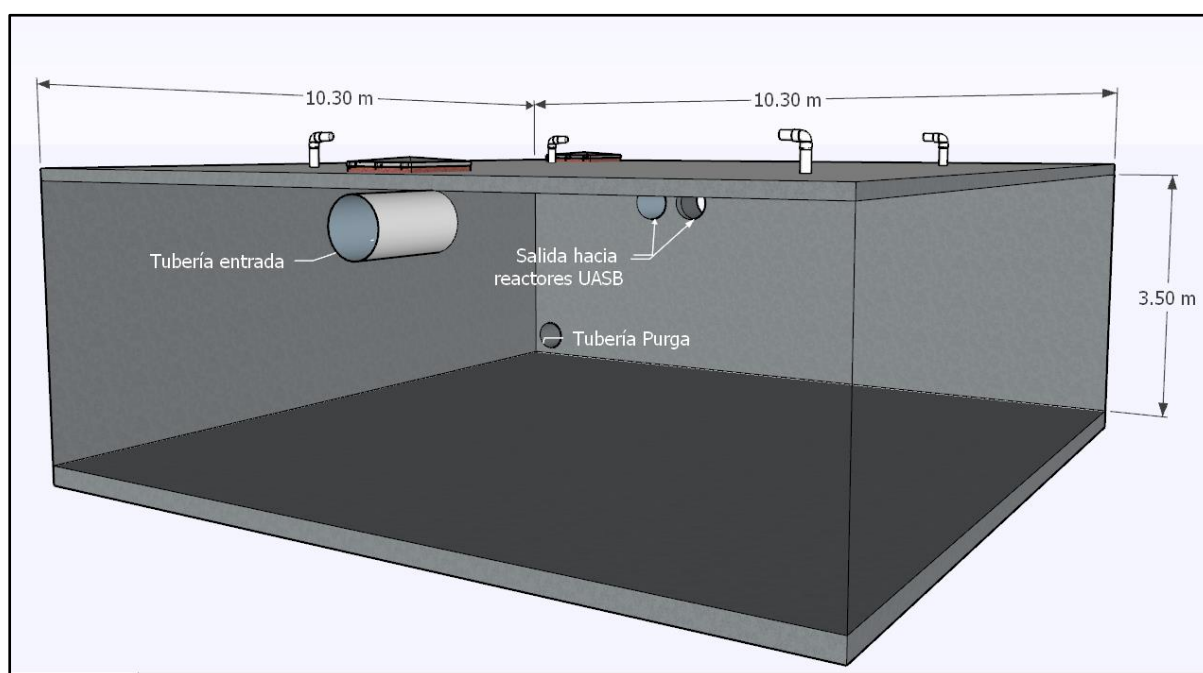
Al calcular el tiempo de retención hidráulico (TRH) de la trampa de grasa, con la base a la profundidad del agua de 0,5 m, se obtuvo un TRH de 5,54min, lo cual, supera lo recomendado por la literatura (**Tabla 47**). Se comprobó que para dar cumplimiento al TRH recomendado se debe tener una profundidad del agua de 0,25 m, sin embargo, este valor se encuentra por debajo

de la tubería de salida. Cumplir con TRH es indispensable para lograr la remoción de las grasas y aceites. Además, con un TRH superior al recomendado, afecta directamente el volumen interno de la estructura debido a la acumulación por sólidos sedimentables (Ayquipa, 2021), lo cual se pudo evidenciar en la PTAR La Dorada.

El operario menciona que no se realiza mantenimiento a la trampa de grasas debido a la profundidad, ya que realizar la limpieza de forma manual sin contar con más personal se torna una labor dispendiosa por la cantidad de sedimentos que se debe extraer de la unidad. Al no recibir un mantenimiento constante, pueden presentarse efectos negativos en las siguientes unidades del tratamiento biológico. En las visitas técnicas realizadas no se evidenció la flotación de las grasas en la estructura, confirmando su mal funcionamiento. La presencia de grasa en el agua residual dificulta el contacto de la materia orgánica con los microorganismos, lo cual reduce las eficiencias de remoción del tratamiento secundario.

#### 4.3.7 Tanque homogeneizador

Los tanques de igualación son implementados en PTAR donde se presentan variaciones significativas en el caudal y en las características fisicoquímicas, especialmente en procesos industriales donde se hace necesario igualar el agua residual antes de ser sometida a tratamiento. En el caso de La PTAR La Dorada, que trata agua residual doméstica, no se presentan variaciones significativas del caudal y de las características fisicoquímicas, por lo que, el diseño y construcción de un tanque homogeneizador es innecesario. En la **figura 67** se ilustra el tanque homogeneizador construido.



**Figura 67.** Representación gráfica del tanque homogeneizador

Entre las principales falencias se encuentra la falta de mantenimiento del tanque. Hay presencia de residuos sólidos, lo cual, indica que el sistema preliminar no está funcionando

correctamente. Además, se observa que la unidad se encuentra colmatada (**figura 68**) y presenta rebosamiento en temporada de invierno (**figura 69**), esta situación es altamente crítica, ya que, el agua residual producto del rebosamiento fluye hacia la quebrada La Dorada sin ningún tipo de tratamiento.



**Figura 68.** Interior del tanque homogeneizador



**Figura 69.** Rebosamiento del tanque homogeneizador

Del tanque homogeneizador salen dos tuberías donde cada una transporta agua residual hacia un módulo de reactor UASB. Esta distribución de caudales es inadecuada e incontrolada, debido a la inexistencia de una caja de distribución de caudales que asegure la división homogénea del flujo hacia los reactores UASB. Este diseño inadecuado influye en constantes variaciones de caudales que ingresan a los reactores UASB, afectando su tiempo de retención hidráulico.

Se propone emplear el área disponible del tanque homogeneizador para ubicar la trampa de grasa. Al calcular el tiempo de retención hidráulico (TRH) con las dimensiones actuales del tanque homogeneizador y el caudal de diseño medio (QdMed) de 16,23 L/s (recalculado), se evidenció que no cumple el TRH de 2,5 a 3,0 minutos recomendado por la literatura, debido que se tendría una profundidad del agua de 2,8 cm. Por lo tanto, se recalcularon las dimensiones teniendo en cuenta los criterios recomendados (**Tabla 46**). Los resultados se presentan en la **Tabla 47**.

**Tabla 47.** Dimensiones de la trampa de grasas recalculada

| Parámetro                      | Valor calculado | Unidad            |
|--------------------------------|-----------------|-------------------|
| QdMed (2024)                   | 0,0162          | m <sup>3</sup> /s |
| Largo                          | 1,70            | m                 |
| Ancho                          | 1,70            | m                 |
| Profundidad útil               | 0,8             | m                 |
| Borde libre                    | 0,20            | m                 |
| TRH                            | 2,97            | min               |
| Baffles                        | 2               | Und               |
| Ancho de las ventanas          | 0,5             | m                 |
| Altura de las ventanas de paso | 0,5             | m                 |
| Pendiente                      | 5               | %                 |

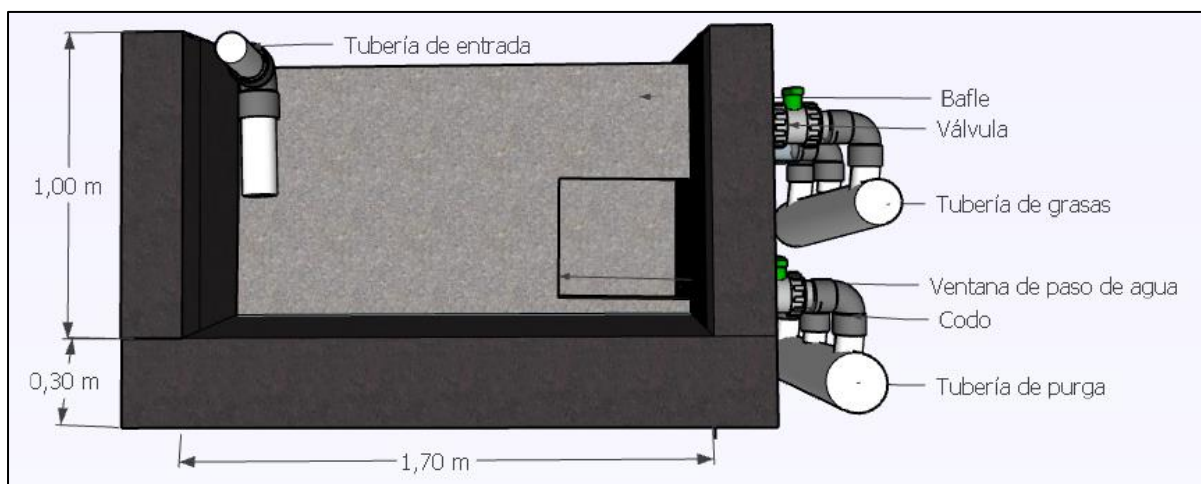
Las dimensiones expuestas son las que tuvieron que haberse diseñado inicialmente, para la trampa de grasas hasta el periodo de diseño 2024. Por otro lado, en la **tabla 48** se presentan las propuestas de optimización para la trampa de grasas de la PTAR, que incluye las consideraciones de la literatura y en la **figura 70, 71 y 72** se ilustra todas las dimensiones y las recomendaciones.

**Tabla 48.** Propuestas de optimización de la trampa de grasas

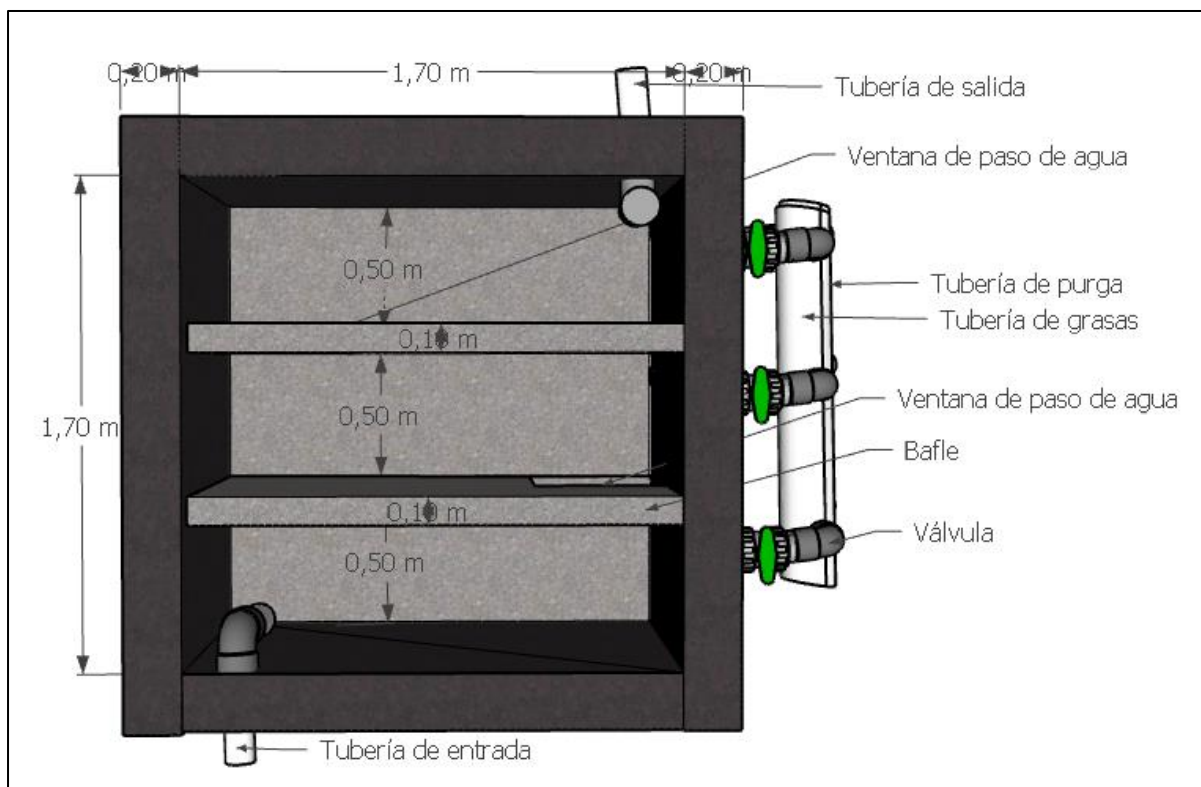
| Punto crítico                       | Propuesta de optimización                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tapa metálica                       | El RAS (2000) recomienda que la trampa de grasas tenga una cubierta para prevenir o reducir olores. Además, permite mantener la temperatura del agua baja en el interior y evitar que la grasa se disuelva y se mezcle con el agua. Por lo tanto, se propone la construcción de cuatro cubiertas, diseñadas en poliéster reforzado con fibra de vidrio, con un espesor de 1,0 mm. Este material facilita la manipulación al operario, ya que son muy livianas, además, es resistente a la corrosión, productos químicos y condiciones climáticas.                                                                                                                                                                                                              |
| Tubería de entrada y salida         | Se recomienda que el ingreso de agua residual a la trampa de grasa sea por medio de un codo de 90° y un diámetro mínimo de 75 mm y la salida por medio de una tee con un diámetro mínimo de 75 mm (OPS, 2003).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|                                     | Crites & Tchobanoglous (2000) recomiendan que la entrada a la trampa esté ubicada de manera invertida, es decir, por debajo del nivel de agua y la salida cerca al fondo de esta. Por lo tanto, la tubería de entrada debe tener una sumergencia de por lo menos 15 cm, mientras que la tubería de salida debe localizarse por lo menos a 15 cm del fondo del tanque (RAS, 2000).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Baffles                             | Se recomienda instalar dos baffles a lo largo de la cámara, para garantizar un flujo a pistón horizontal que favorezca la separación de las grasas. Cada baffle debe tener ventanas de paso de agua ubicadas en la parte inferior. El primer deflector tendrá la ventana en la parte inferior derecha, mientras el segundo baffle tendrá la ventana en la parte izquierda. Es importante resaltar que cada ventana tenga en la parte inferior, un muro de 0,05 m de alto, con el fin de facilitar la retención y remoción de los sólidos. Cabe resaltar que, el objetivo de esta unidad no es retener sólidos, dado que se tiene un tiempo de retención de 3 minutos, pero, existe la probabilidad de llegue una cantidad de sólidos y arenas del desarenador. |
| Tubería y válvula de purga          | Para evitar la acumulación de posibles lodos sedimentados en el fondo de la trampa de grasas se recomienda instalar tres tuberías de purga de 2 pulgadas. Cada tubería debe estar ubicada entre cada sección del baffle y contar con una válvula para su respectiva evacuación de lodos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Tubería y válvula de purga de grasa | Para extraer las grasas flotantes de la unidad, se recomienda instalar tres tuberías de purga de grasas 2 pulgadas. Cada tubería debe estar ubicada entre cada sección del baffle y contar con una válvula para su evacuación.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

**Tabla 48.** Propuestas de optimización de la trampa de grasas

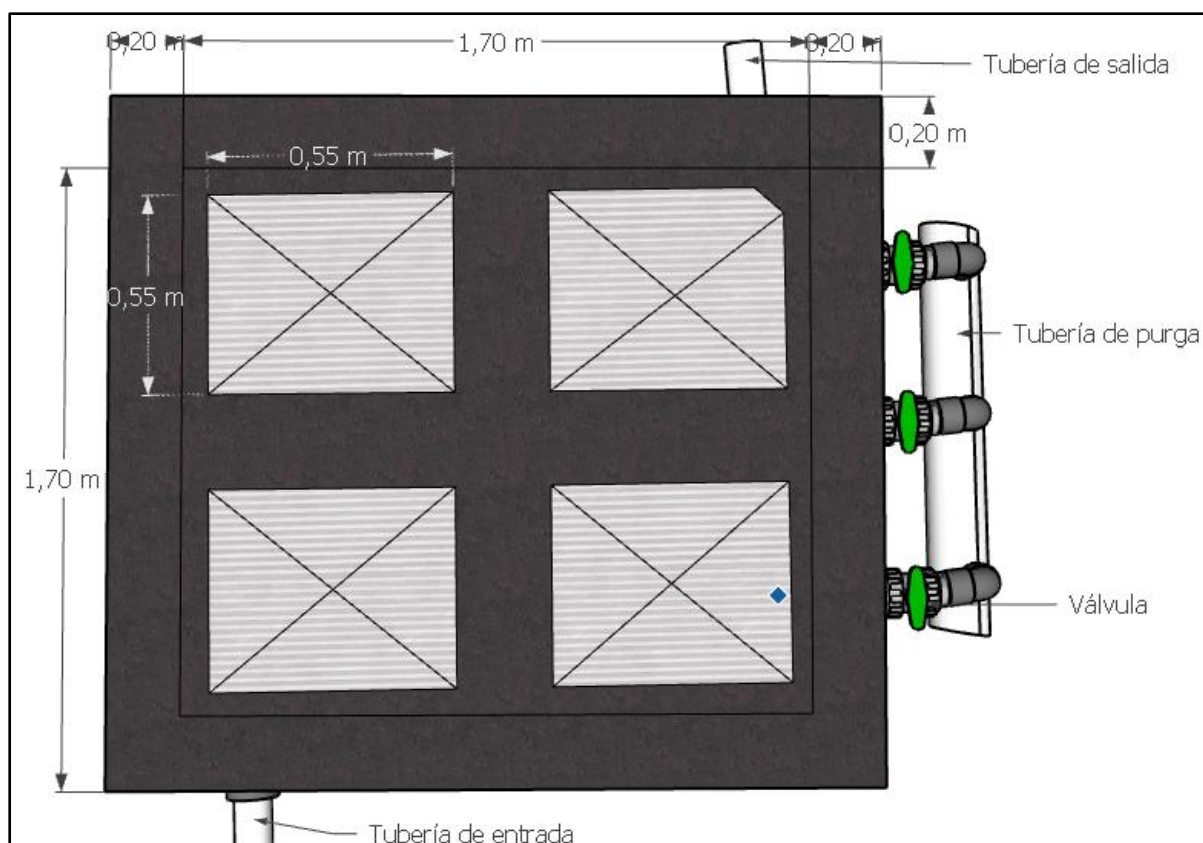
| Punto crítico | Propuesta de optimización                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mantenimiento | El RAS (2017) recomienda que el mantenimiento a la trampa de grasas debe hacerse cada vez que se alcance el 75% de la capacidad de retención de grasa, para prevenir la generación de malos olores, colmatación y posibles rebosamientos de grasas. |



**Figura 70.** Vista corte: Propuesta de optimización de la trampa de grasas



**Figura 71.** Vista en planta: Propuesta de optimización del interior de la trampa de grasas



**Figura 72.** Vista en planta: Propuesta de optimización de la cubierta de la trampa de grasas

### 4.3.8 Reactor UASB

Los principales parámetros de diseño para el reactor UASB se presentan en la **tabla 49**.

**Tabla 49.** Parámetros de diseño del reactor UASB

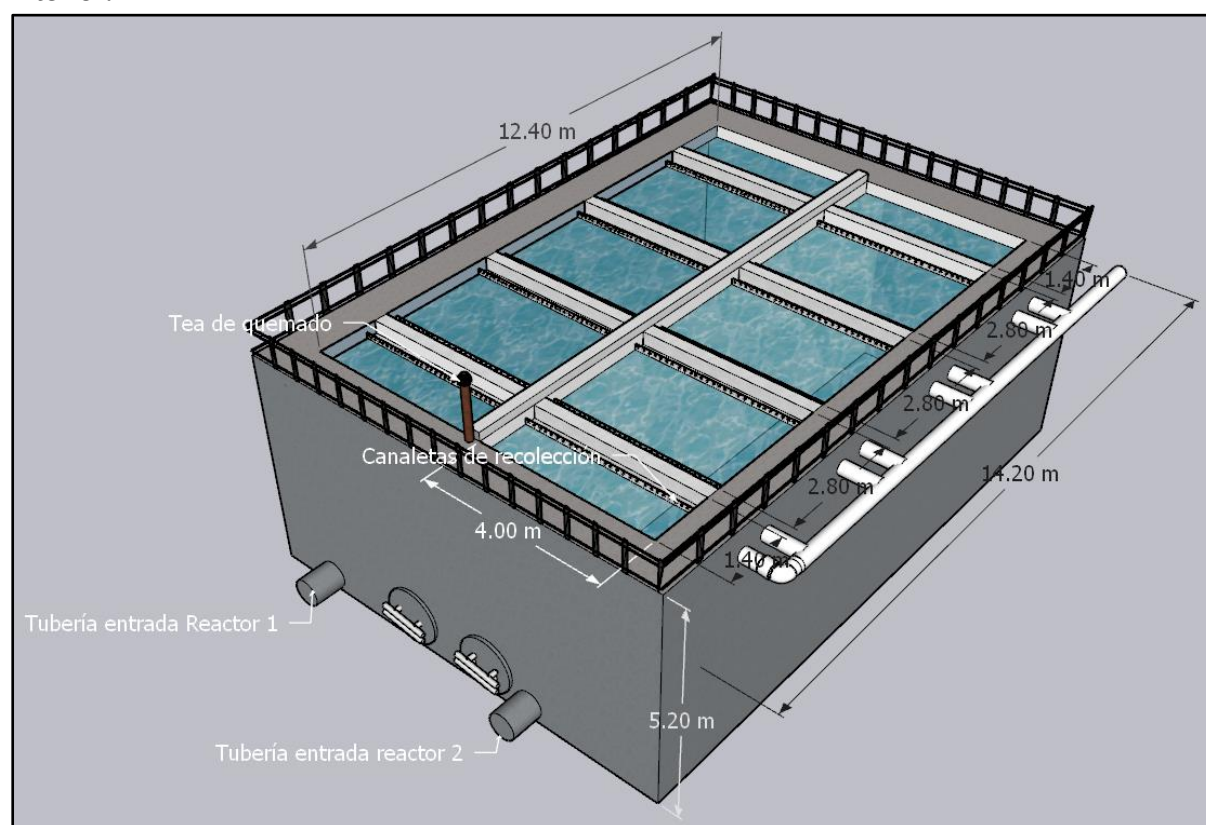
| Parámetro                               | Valor recomendado                                                                        | Valor construido | Unidad |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------|
| Temperatura                             | 18-24 <sup>(1)</sup><br>20-25 <sup>(3)</sup>                                             | 20               | °C     |
| Tiempo de retención<br>hidráulico (TRH) | 4 - 6 <sup>(1)</sup><br>≥ 6 <sup>(2)</sup><br>> 6-9 <sup>(3)</sup><br>> 4 <sup>(4)</sup> | 10,14            | h      |
| Velocidad ascendente                    | < 0,7 <sup>(2)</sup><br>0,5 - 0,7 <sup>(3)(4)</sup>                                      | 0,45             | m/h    |
| Altura efectiva del<br>reactor          | 4 - 6 <sup>(1) (2)</sup><br>3 - 6 <sup>(3)</sup><br>4 - 5 <sup>(4)</sup>                 | 4,60             | m      |

**Tabla 49.** Parámetros de diseño del reactor UASB

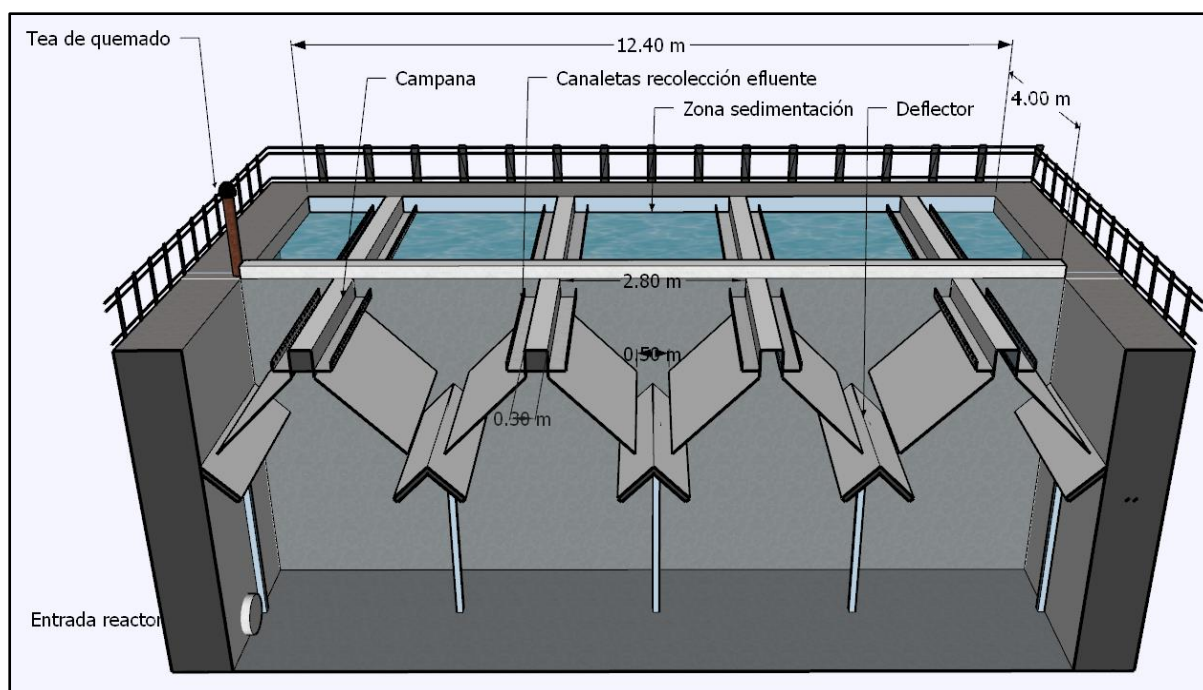
| Parámetro                                                                       | Valor recomendado                        | Valor construido | Unidad     |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------|------------|
| Inclinación de la pared del compartimiento de sedimentación                     | >50 <sup>(2)</sup><br>>45 <sup>(3)</sup> | 45               | (°) Grados |
| %Área de paso del sedimentador con respecto al área superficial del reactor     | 20 <sup>(5)</sup>                        | 12               | %          |
| Traslapo del deflector de gases, con relación al ancho de paso del sedimentador | ≥0,10 <sup>(3)</sup>                     | 0,30             | m          |
| Diámetro de tubos de distribución del afluente                                  | 75-100 <sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup>     | 76,2             | mm         |

Fuente: <sup>(1)</sup> Van Haandel y Lettinga (1994); <sup>(2)</sup> Jordão y Pessôa (2011);  
<sup>(3)</sup> Chernicharo (2007); <sup>(4)</sup> van Lier (2008); <sup>(5)</sup> Rodríguez (2022)

En la **figura 73** se ilustra la construcción del reactor UASB y en la **figura 74** se ilustra el interior.



**Figura 73.** Representación gráfica reactor UASB



**Figura 74.** Representación gráfica del interior del reactor UASB según memoria de cálculo

El estado actual del sistema preliminar y el tanque homogeneizador indica que el reactor UASB recibe una alta carga de sólidos, incluso se evidenció presencia de residuos sólidos en las canaletas de recolección, confirmando la ineficiencia del sistema preliminar. Lo que puede afectar las tuberías de distribución del agua residual, el desarrollo de la biomasa y el proceso de digestión anaerobia.

Jordão y Pessôa (2011) relacionan la temperatura del agua residual con el tiempo de retención hidráulico, donde mencionan que, para temperaturas menores a 18°C, el TRH debe ser superior a 10 horas, mientras que, para temperaturas tropicales mayores a 18°C, el TRH recomendado es entre 6 a 8 horas, el tiempo de retención hidráulico escogido influye directamente en el dimensionamiento del reactor, es decir que a mayor tiempo de retención hidráulico se incrementa el volumen del reactor. Los reactores UASB de la PTAR La Dorada no cumplen con esta recomendación, ya que, al comprobar el TRH, se evidencio que tienen un tiempo de retención hidráulico de 10,14 horas en una zona donde la temperatura del agua es de 20°C. Aquí radica la importancia de conocer los criterios recomendados por la literatura para obtener un buen diseño, teniendo presente las condiciones de la zona, para evitar sobredimensionamientos y sobrecostos.

Por otra parte, la altura útil de los reactores UASB cumple con los rangos recomendados por la literatura. La altura es un criterio que incide en la eficiencia del reactor, ya que determina la velocidad ascensional del agua residual. No cumplir con este criterio puede afectar negativamente la turbulencia del afluente y disminuir el contacto del agua residual con la biomasa. Además, un diseño con altura excesiva afecta la solubilidad del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) dado que a mayor altura hay mayor concentración de CO<sub>2</sub> disuelto, generando una disminución del pH y afectando el proceso de digestión anaerobia (Rodríguez, 2022).

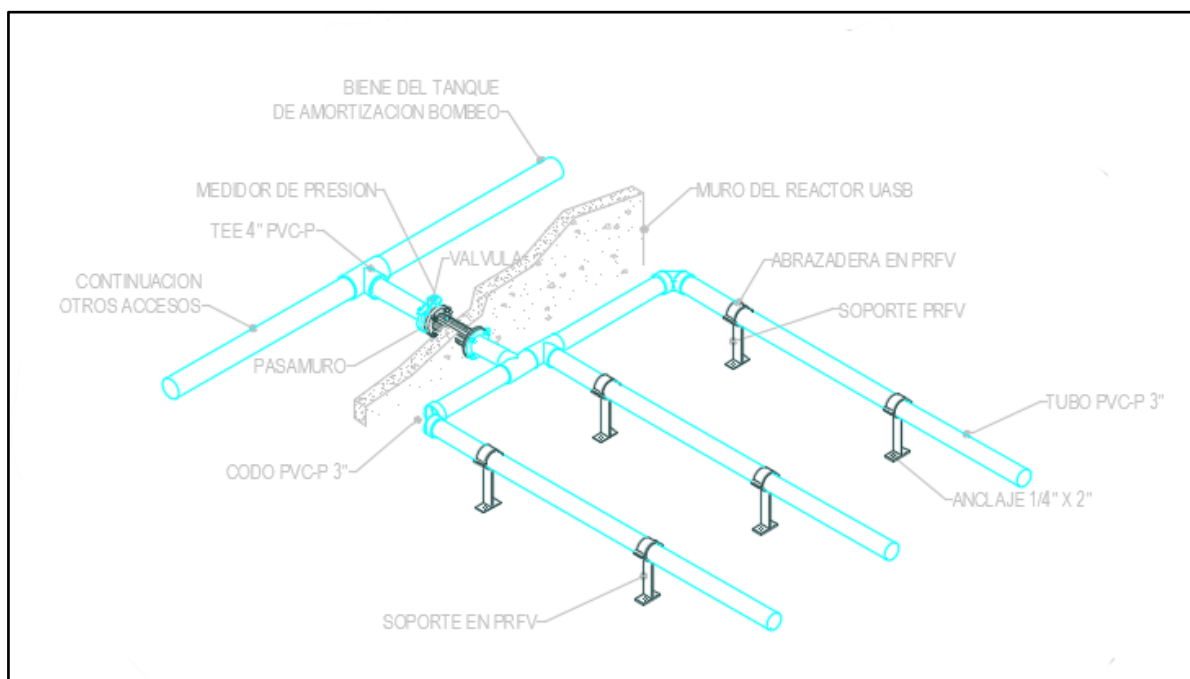
Comprobando la velocidad ascendente del reactor para el TRH de 10,14 h y 4,6 m de profundidad útil, se obtuvo una velocidad de 0,45 m/s, la cual se encuentra dentro de lo recomendado por la literatura. Es importante mantener la velocidad dentro de los rangos recomendados, dado que, según Chernicharo (2007) una velocidad ascendente alta genera arrastre de sólidos y pérdida de biomasa, lo cual, afecta el tiempo de contacto del agua residual con la biomasa y a su vez, la eficiencia de remoción del sistema.

Según los planos de diseño suministrados por las Empresas de Servicios Públicos Domiciliarios de La Dorada, la distribución del agua residual en el reactor se realiza mediante tres tuberías perforadas de 3" (76,2 mm). Según Chernicharo (2007), el diámetro de la tubería de alimentación debe permitir una velocidad descendente inferior a 0,2m/s para evitar que la tubería arrastre aire hacia el interior del reactor. Van Haandel y Lettinga (1994) mencionan que, una distribución de agua residual ineficiente con presencia de inyección de aire al reactor puede provocar aireación del lodo anaerobio perjudicando la metanogénesis, incluso puede causar una mezcla explosiva por el biogás acumulado junto al separador trifásico. También menciona que, no es recomendable que la alimentación al reactor UASB se realice por medio de tuberías perforadas, porque pueden obstruirse con facilidad y afectar la distribución uniforme del agua residual, además, puede generar la formación de zonas muertas en el manto de lodos.

Por otra parte, el método de distribución del agua residual dentro del reactor UASB es ineficiente, dado que, no existe una unidad o caja de distribución de caudales (CADICA) que permita distribuir el caudal de manera equitativa en todas las tuberías internas. En la **figura 75** se indican las tuberías provenientes del tanque homogeneizador que ingresan por el fondo del reactor UASB y, se divide a los tubos de distribución internos que se muestran en la **figura 76**. Es importante resaltar la importancia de la distribución uniforme en el reactor UASB para garantizar un mejor régimen de mezcla y una reducción en la aparición de zonas muertas en el manto de lodos. Además, se evidenció que no existe CADICA que permita la correcta división del caudal que proviene del tanque homogeneizador, de este modo, no es posible asegurar una alimentación homogénea a los reactores UASB.



**Figura 75.** Tuberías principales de alimentación a los reactores UASB



**Figura 76.** Plano tuberías de distribución internos de los reactores UASB  
Fuente: Ospina (2004)

Por otra parte, el separador trifásico (gases, sólidos y líquidos) que está ubicado en la parte superior del reactor, direcciona el biogás hacia las campanas de recolección y permite la sedimentación de los sólidos para retornarlos hacia el manto de lodos. Por lo cual, el ángulo de inclinación de la pared del compartimiento de sedimentación (Pantalla) y el deflector deben ser bien diseñados, para permitir la separación del gas, líquidos y sólidos. Aunque en los planos de diseño la pantalla del sedimentador cumple con el ángulo mínimo recomendado por la literatura y el deflector tiene un traslape de 0,3 m (**tabla 50**) se evidenció en la PTAR que el biogás se libera por la zona de recolección del efluente. También se pudo observar en los planos de diseño que el ancho de paso a través del sedimentador es de 0,4 m, lo cual, al considerar una velocidad de paso de 2,5m/h se obtiene un área de paso de 14,60m<sup>2</sup> considerando los cuatro sedimentadores, esto representa un 12% área superficial total del reactor, valor que se encuentra por debajo de las recomendaciones de la literatura. Además, los reactores UASB no están cubiertos, es decir que no cuentan con un sello hidráulico que permita su hermeticidad. En la **figura 77** se puede observar el escape de los gases a la atmósfera, incrementando los problemas de olores y corrosión de las estructuras.



**Figura 77.** Liberación de burbujas de biogás por la zona de recolección del efluente

Las emisiones fugitivas de los gases del reactor UASB presentan fuertes olores y han generado corrosión. En la **figura 78** se presenta la tea sin funcionamiento y en estado de abandono, por lo que se ha generado deterioro del metal por la ausencia de la cubierta y de la quema del biogás en la tea. La corrosión hace presencia en todas las superficies metálicas de la estructura (**figura 79**), presentando un alto riesgo para el operario en las labores de mantenimiento, ya que, el pasamanos y escaleras que son útiles para brindar seguridad y accesibilidad al reactor UASB y filtro percolador se encuentran deterioradas. Además, los fuertes olores en la zona pueden causar mareo, náuseas e incluso presentar caídas, además se destaca la ausencia de implementos de seguridad o elementos de protección personal para las labores de mantenimiento que realiza el operario.



**Figura 78.** Tea de quemado sin funcionamiento

Freire et al. (2018) mencionan que, los fuertes olores se presentan por la mezcla el  $H_2S$  en la atmósfera, lo cual, genera un riesgo a la salud humana, cuando expone por encima de 10 ppmv por 6-7 h causa irritación ocular, a exposiciones de 100-200 ppmv entre los 20 min, genera pérdida momentánea de conciencia y otros efectos graves como edema pulmonar y convulsión. Finalmente, a exposiciones por encima de 900 ppmv por aproximadamente 1 min puede causar la muerte.



**Figura 79.** Corrosión generada por los gases del Reactor UASB

En cuanto a la recolección del efluente, esta se realiza mediante canaletas perforadas (**figura 80**). Estas canaletas requieren un constante mantenimiento, debido a la ineficiencia del sistema preliminar para retener los sólidos. En el reactor UASB se han encontrado residuos sólidos como: toallas higiénicas, colillas de cigarrillo y bolsas. La literatura recomienda que la recolección del efluente se realice mediante canaletas con vertederos triangulares. Sin embargo, el método de recolección es menos eficiente, debido a que, las experiencias han demostrado que se deterioran fácilmente y requieren un mayor mantenimiento, por lo tanto, se recomienda que la recolección del efluente se realice mediante tubería con tees sumergidas (Rodríguez, 2022).



**Figura 80.** Parte superior de los reactores UASB

Los reactores cuentan con una tubería principal que conduce la purga de lodos al lecho de secado. La tubería principal recibe la purga de tres puntos, ubicados a lo largo del reactor (eje horizontal). Adicionalmente, cada punto cuenta con tres válvulas de descarga ubicadas en eje vertical, con diferencias de altura de aproximadamente un metro. Chernicharo (2007) recomienda que la purga debe realizarse en dos alturas diferentes, una ubicada en el fondo del reactor donde se retira el lodo más concentrado y, el otro punto debe ubicarse entre 1,0 y 1,5 m por encima del fondo del reactor. En el caso de la PTAR La Dorada, no se cumple con esta recomendación. Además, la tubería de purga superior no cumple la función de remover los lodos, dado que se encuentra muy cerca de la zona de recolección del efluente (**figura 81**). Además, se pudo identificar que no se cuenta con la flauta de tuberías de muestreo, impidiendo identificar el exceso de lodo en los diferentes niveles del reactor, lo cual, la purga por exceso del lodo se realiza de acuerdo con el criterio del operario.



**Figura 81.** Tuberías de purga de lodos

Se comprobó el comportamiento del TRH con el caudal recalculado y se evidenció una mejora en el valor logrando que se ajuste dentro de lo recomendado por la literatura. En la **Tabla 50** se presenta la comparación del reactor UASB construido y el propuesto teniendo en cuenta las recomendaciones de la literatura. Cabe resaltar que, las dimensiones no fueron modificadas, debido al cumplimiento del TRH para el caudal recalculado, sin embargo, para el nuevo periodo de diseño, se recomienda realizar una evaluación para establecer si resulta necesario una unidad adicional de reactor UASB.

**Tabla 50.** Comparación entre reactor UASB construido y el propuesto con optimizaciones

| Parámetro             | Construido<br>( $Q_{dmed} = 12,5 \text{ L/s}$ ) | Reajustado<br>( $Q_{dmed} = 16,23 \text{ L/s}$ ) | Unidad |
|-----------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------|
| Número de reactores   | 2                                               | 2                                                | und    |
| Ancho de cada reactor | 4                                               | 4                                                | m      |
| Largo de cada reactor | 12,4                                            | 12,4                                             | m      |
| Profundidad útil      | 4,6                                             | 4,6                                              | m      |
| TRH                   | 10,14                                           | 7,8                                              | h      |
| Velocidad ascendente  | 0,45                                            | 0,58                                             | m/h    |
| Ancho de campana      | 0,3                                             | 0,3                                              | m      |

**Tabla 50.** Comparación entre reactor UASB construido y el propuesto con optimizaciones

| <b>Parámetro</b>                              | <b>Construido<br/>(Qdmed = 12,5 L/s)</b> | <b>Reajustado<br/>(Qdmed = 16,23 L/s)</b> | <b>Unidad</b>         |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|
| Número de sedimentadores por reactor          | 4                                        | 4                                         | und                   |
| Ancho de sedimentación                        | 2,8                                      | 2,8                                       | m                     |
| Ancho de paso                                 | 0,4                                      | 0,7                                       | m                     |
| % Área total de paso / Área superficial total | 12,90                                    | 20,96                                     | %                     |
| TRH sedimentador                              | 1,33                                     | 1,52                                      | h                     |
| Traslapo del deflector                        | 0,3                                      | 0,16                                      | m                     |
| Área superficial cada reactor                 | 49,6                                     | 49,6                                      | m <sup>2</sup>        |
| Área por punto de alimentación                | No considerado                           | 3,1                                       | m <sup>2</sup> /punto |
| Puntos de alimentación totales por reactor    | No construido                            | 16                                        | puntos                |
| Puntos de alimentación por sedimentador       | No construido                            | 4                                         | puntos                |
| Diámetro tuberías de alimentación             | 3                                        | 3                                         | pulg                  |
| Velocidad descendente                         | No aplica                                | 0,11                                      | m/s                   |
| Recolección del efluente                      | Canaleta con perforaciones circulares    | Tees sumergidas                           | ---                   |

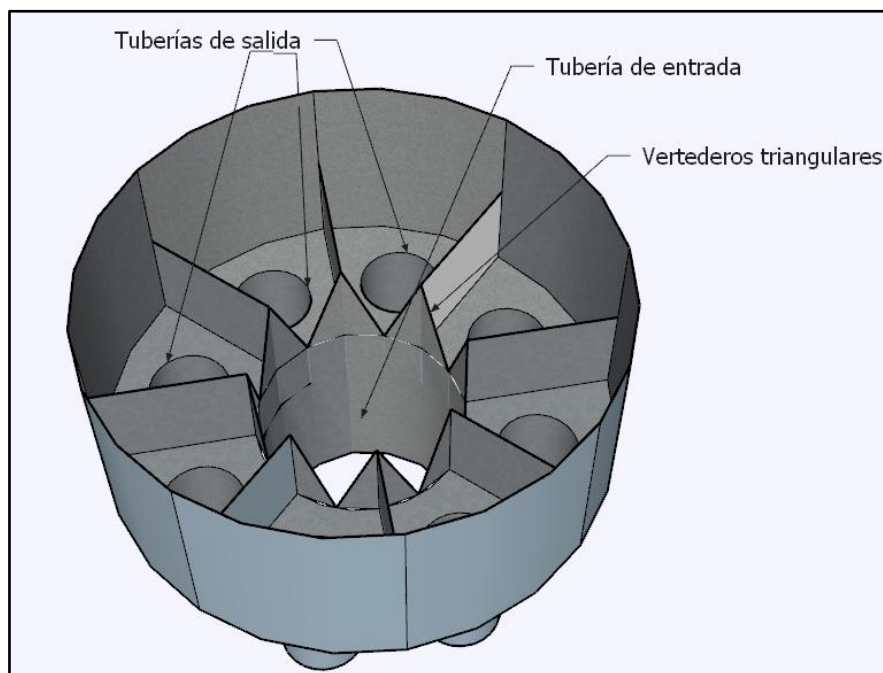
En la **tabla 51** se presentan en las propuestas de optimización para los reactores UASB.

**Tabla 51.** Propuestas de optimización del reactor UASB

| Punto crítico                                                               | Propuesta de optimización                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Distribución del caudal efluente de la trampa de grasa hacia reactores UASB | Se debe implementar una caja de distribución de caudales (CADICA) a la salida de la trampa de grasa que permita la división del caudal a los ocho compartimientos de sedimentación que tienen en total los dos reactores UASB. Considerando que la salida de la trampa de grasa tiene un nivel superior a la cubierta de los reactores UASB, se recomienda aprovechar el nivel del terreno para que las tuberías de salida de la CADICA lleguen a la cubierta de los reactores UASB sin requerir la implementación de equipos de bombeo. En la <b>figura 82</b> se presenta el esquema de la CADICA de ocho salidas.                 |
| Distribución del caudal de alimentación                                     | Para lograr la distribución homogénea del afluente dentro del reactor UASB, debe realizarse a través de cajas de distribución de caudales (CADICA). Las CADICAS deben estar ubicadas en la parte superior del reactor y están formadas por una cámara de entrada y dos o más cámaras de salida, donde el agua residual se distribuya equitativamente hacia las cámaras de salida por medio de vertederos triangulares, permitiendo la división del caudal a las tuberías de alimentación del reactor (Chernicharo, 2007). En la <b>figura 83</b> , se presenta un esquema de la CADICA de alimentación interna a los reactores UASB. |
| Tuberías de distribución internas                                           | Las tuberías de distribución internas deben abarcar un área de 2 a 4 m <sup>2</sup> del fondo del reactor (van Lier, 2008), y deben ser ubicadas entre 0,10 a 0,15m del fondo del reactor (Chernicharo, 2007).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Separador trifásico                                                         | Se debe revisar el separador trifásico para efectuar correcciones de las pérdidas de biogás por la zona de sedimentación. Se propone incrementar el ancho de paso a 0,7m con la finalidad de acercarse al porcentaje ideal del área de paso con respecto al área superficial total y se provee un traslapo de 0,16 m del deflector que permite la separación del gas hacia las campanas recolectoras y evitar su escape por la zona de sedimentación. Se recomienda cambiar la estructura del deflector a rombo sólido para evitar acumulaciones de gas dentro de la estructura existente.                                           |
| Recolección y quema del biogás                                              | Se recomienda iniciar el proceso de quema de biogás con la finalidad de evitar los fuertes olores y la corrosión que presenta la unidad y su alrededor. Es ideal instalar mediciones para establecer un control sobre el biogás generado y poder evaluar el funcionamiento de la digestión anaerobia.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

**Tabla 51.** Propuestas de optimización del reactor UASB

| Punto crítico                       | Propuesta de optimización                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sin cubierta                        | Se requiere el cubrimiento de los reactores UASB para evitar el escape de gases y evitar los riesgos inherentes del gas metano que es altamente combustible y contribuye al efecto invernadero (Chernicharo, 2007), además, en la parte superior de la cubierta estarán ubicadas las CADICAS de alimentación a los reactores.                                                                                                       |
| Sistema de muestreo de lodos        | Se recomienda implementar la flauta de muestreo de lodos, que consiste en instalar tubos de muestreo en PVC con diámetro de 50 mm, estos deben ubicarse a lo largo de la pared vertical, cada 50 cm y desde fondo hasta la parte inferior del deflector de gases. Se realiza con el fin de identificar la altura de la concentración del manto de lodo y determinar si es necesario realizar el proceso de purga (Chernicharo,2007) |
| Reparación general de los pasamanos | Los pasamanos del reactor UASB deben ser reemplazados por nuevos con pintura anticorrosiva, esta reparación se requiere con urgencia debido al riesgo inminente que presenta el operario al rondar el funcionamiento de la unidad de tratamiento.                                                                                                                                                                                   |
| Recolección del efluente            | Se recomienda que la recolección del efluente se realice por medio de tees sumergidas por su mayor eficiencia debido a la baja probabilidad de obstrucciones. En la <b>figura 84</b> se ilustra el tipo de recolección.                                                                                                                                                                                                             |



**Figura 82.** Representación gráfica CADICA de ocho salidas

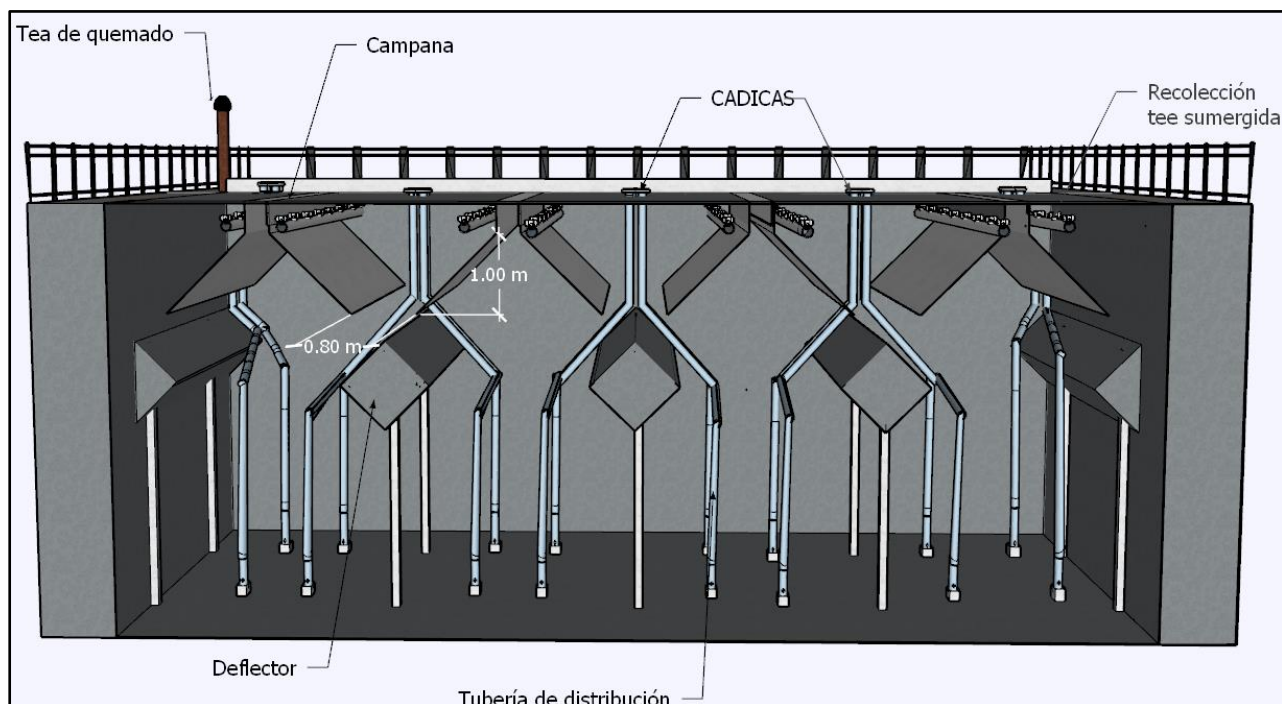


**Figura 83.** CADICAS para alimentación interna a los reactores UASB  
Fuente: Chernicharo (2007)



**Figura 84.** Recolección del efluente por medio de tees sumergidas  
Fuente: Rodríguez (2022)

En la **figura 85** se presenta el reactor UASB con las modificaciones planteadas.



**Figura 85.** Reactor UASB con propuestas de optimización

#### 4.3.9 Filtro percolador

En la **tabla 52** se presentan los parámetros de diseño del filtro percolador y en la **figura 86** se presenta el esquema del filtro percolador.

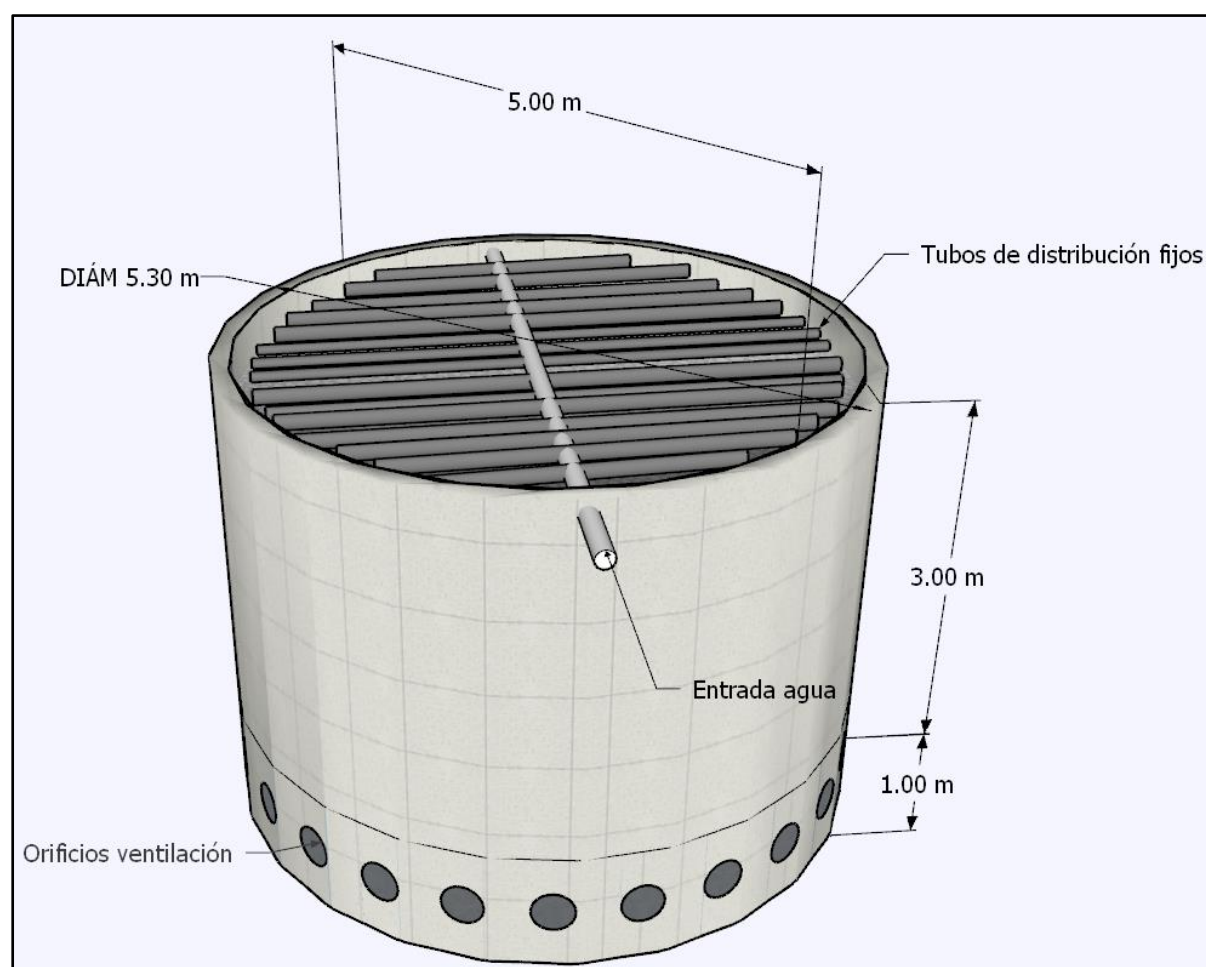
**Tabla 52.** Parámetros de diseño del filtro percolador

| Parámetro                       | Valor recomendado                       | Valor construido                            | Unidad                           |
|---------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|
| Geometría                       | Circular                                | Circular                                    | -                                |
| Carga hidráulica superficial    | 20 a 30 <sup>(1) (2)</sup>              | 27,5                                        | m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d |
| Recolección del efluente        | Canal recolector central <sup>(3)</sup> | Tuberías incrustadas en una columna central | ---                              |
| Medio de soporte                | Plástico <sup>(2)</sup>                 | Plástico                                    | ---                              |
| Volumen del sistema de drenaje  | 15 a 20 <sup>(1)</sup>                  | 27,4                                        | %Volumen útil                    |
| Profundidad del medio filtrante | 2,0 a 3,0 <sup>(1) (2)</sup>            | 2,65                                        | m                                |

**Tabla 52.** Parámetros de diseño del filtro percolador

| Parámetro                                               | Valor recomendado                        | Valor construido | Unidad |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------|--------|
| Pendiente de drenaje                                    | 1 a 5 <sup>(4)</sup><br>5 <sup>(3)</sup> | ---              | %      |
| Sistema de distribución                                 | Brazos giratorios <sup>(2)</sup>         | Tuberías fijas   | ---    |
| Distancia de medio de soporte a tubería de distribución | 0,10 a 0,15 <sup>(4)</sup>               | 0,10             | m      |

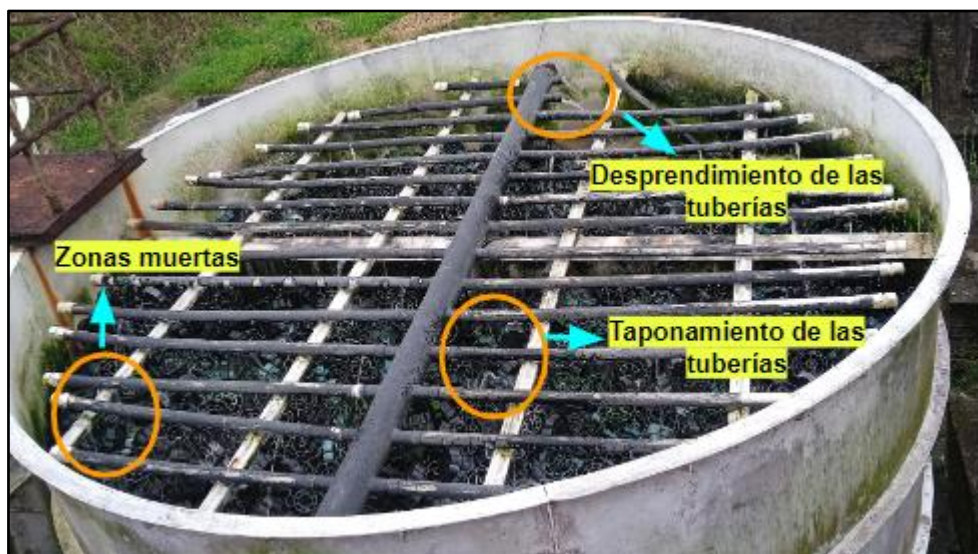
Fuente: <sup>(1)</sup> Chernicharo y Gonçalves (2005); <sup>(2)</sup> Chernicharo (2007);  
<sup>(3)</sup> CONAGUA (2015); <sup>(4)</sup> Rodríguez (2022)



**Figura 86.** Representación gráfica del filtro percolador exterior

La geometría circular del filtro percolador se encuentra acorde con las recomendaciones de la literatura. Los filtros percoladores circulares tienen una ventaja sobre los rectangulares en la reducción de zonas muertas.

En cuanto al sistema de distribución, el filtro percolador fue construido con tuberías fijas, compuesto por una tubería principal y treinta tuberías laterales perforadas. Este sistema de alimentación fija no es el más recomendado por la literatura (**tabla 52**) puesto que presenta desventajas sobre los sistemas móviles, como: desprendimiento y taponamiento constante de las tuberías fijas, además se generan zonas muertas que incrementan la presencia de insectos, fuertes olores y disminuye el área útil del filtro debido al crecimiento disperso de la biopelícula, que puede terminar desprendiéndose del medio filtrante por la falta de contacto con el agua residual. En general, la distribución de caudales no es correcta, puesto que, las ramificaciones iniciales transportan mayor caudal y disminuye el flujo al paso por la tubería principal, aumentando la presencia de las zonas muertas, especialmente en los últimos tramos de alimentación (**Figura 87**).



**Figura 87.** Sistema de distribución ineficiente del filtro percolador

El filtro percolador cumple con la profundidad del medio filtrante. Según Chernicharo (2007), las experiencias prácticas han demostrado que se producen resultados satisfactorios de remoción de DBO cuando la altura del medio filtrante se encuentra dentro del rango recomendado.

Por otra parte, el filtro percolador consta de un medio filtrante plástico conocido como “Rosetones” o “Rosetas” los cuales son muy usados porque tienen área superficial mayor y favorece el crecimiento de la biomasa mejorando la eficiencia de remoción. Además, el porcentaje de espacios vacíos entre 90 y 97% permite una mayor adherencia de la biomasa por  $m^3$  (Chernicharo, 2007) y permite una mayor aireación, (CONAGUA, 2015). El peso de cada roseta es de 103 gramos, por lo que, el medio de soporte no requiere de un refuerzo estructural

extremo (TL Ingeambiente, 2016). En la actualidad, los rosetones plásticos se fabrican en el país, lo que facilita su obtención a bajo costo.

La ventilación en un filtro percolador es indispensable para mantener las condiciones necesarias para el tratamiento aerobio. Para lograrlo, la literatura recomienda implementar ventanas horizontales y verticales que alcancen un área de ventilación de  $0,1 \text{ m}^2$  entre cada 3 a 4,6 m de perímetro (CONAGUA, 2015). El filtro percolador de la PTAR La Dorada cuenta con orificios de 0,14 m de diámetro que abarcan un área de ventilación de  $0,16 \text{ m}^2$  por cada 4 m de perímetro ubicada en el fondo del filtro (**Figura 88**), sin embargo, es recomendable que la zona central del filtro también cuente con ventilación, para permitir una completa aireación del medio y favorecer el proceso aerobio.

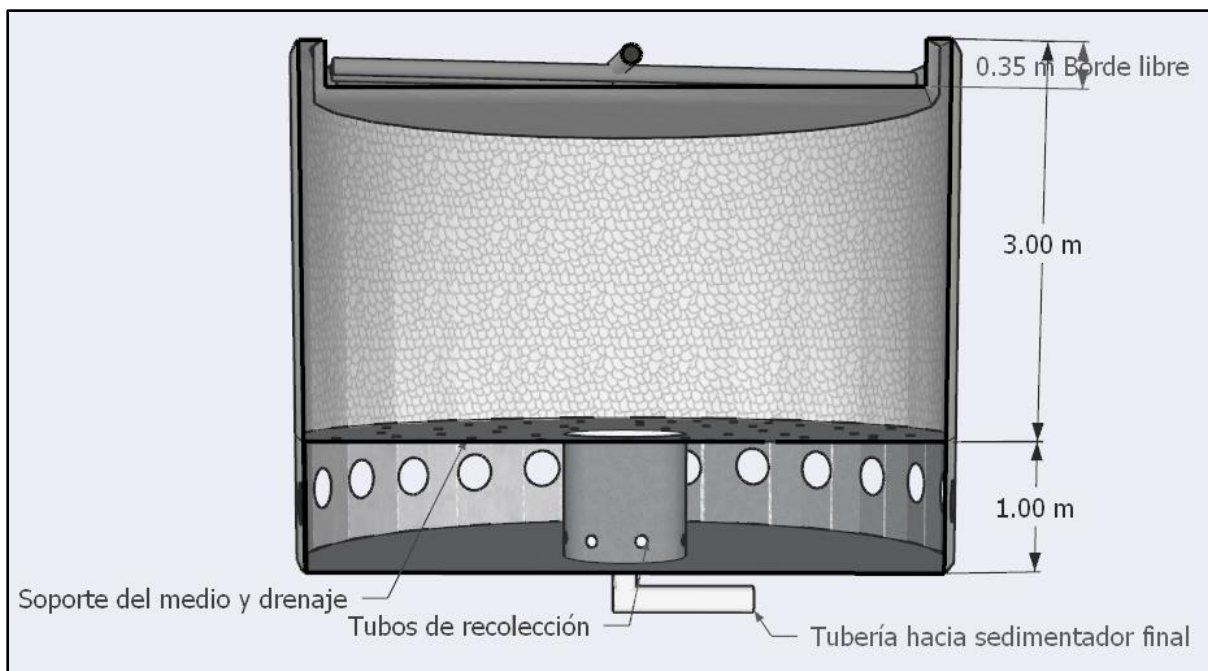


**Figura 88.** Ventilación natural del filtro percolador

Por otra parte, la literatura recomienda que las placas que sostienen el medio filtrante deben contar con unas ranuras con unas aberturas del 15% del área superficial del filtro, para garantizar la ventilación natural (RAS, 2000). Sin embargo, en la visita se evidenció que no cumple con este diseño. En la **figura 89** se evidencia que las ranuras no son proporcionales y homogéneas en toda la placa. Se podría pensar que es causado por el taponamiento de los orificios. Por lo que, el mal diseño o taponamiento de esta estructura afecta el paso de la ventilación natural hacia filtro, requerida para garantizar el oxígeno que los microorganismos necesitan para llevar a cabo sus procesos metabólicos, lo que afecta el desempeño de la unidad. En la **figura 90** se presenta el corte interior del filtro percolador.



**Figura 89.** Placas del filtro percolador



**Figura 90.** Corte interior del filtro percolador

La literatura recomienda que, un filtro percolador debe ser diseñado con un canal de desagüe y una pendiente que permita recoger el efluente del fondo del filtro. Sin embargo, la PTAR no cumple con estas recomendaciones ya que gran parte del efluente se encuentra acumulado en el piso, debido a la baja pendiente (**figura 91**). Esta acumulación de agua estancada genera malos olores y proliferación de vectores, lo que representa un riesgo sanitario por enfermedades transmitidas por estos organismos.



**Figura 91.** Acumulación de agua sin drenar en el piso del filtro percolador

El principal parámetro por considerar en el dimensionamiento del filtro percolador es la carga hidráulica, que se define como el caudal aplicado por área superficial. Este parámetro asegura una formación y espesor uniforme de la biopelícula, mejorando el rendimiento general del filtro (Luna, 2022). Por lo que, al calcular la capacidad que tienen los dos filtros percoladores para tratar el caudal de diseño medio 16,23 L/s (recalculado), se evidencio que los filtros percoladores están subdimensionados, es decir, que están trabajando con una carga hidráulica de  $35,71 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$  superior a la recomendada para postratamiento de reactores UASB que corresponde de 20 a  $30 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ . Por lo tanto, se planteó la construcción de un filtro percolador adicional a los construidos con las mismas dimensiones de los filtros existentes, para que operen con las cargas hidráulicas recomendadas por la literatura. En la **Tabla 53** se presentan las diferencias consideradas en el diseño actual y recalculado del diseño del filtro percolador.

**Tabla 53.** Comparación del filtro percolador construido y el propuesto con optimizaciones

| Parámetro        | Construido<br>( $Q_{\text{dmed}}=12 \text{ L/s}$ ) | Reajustado<br>( $Q_{\text{dmed}}=16,23 \text{ L/s}$ ) | Unidad |
|------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------|
| Medio de soporte | Rosetas                                            | Rosetas                                               | ---    |
| #Unidades        | 2                                                  | 3                                                     | und    |

**Tabla 53.** Comparación del filtro percolador construido y el propuesto con optimizaciones

| Parámetro                                               |                         | Construido<br>(Q <sub>dmed</sub> =12 L/s) | Reajustado<br>(Q <sub>dmed</sub> =16,23 L/s) | Unidad                           |
|---------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|
| Carga hidráulica                                        |                         | 27,5                                      | 24,00                                        | m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d |
| Diámetro                                                |                         | 5                                         | 5                                            | m                                |
| Altura útil                                             |                         | 3                                         | 3                                            | m                                |
| Distribución fija                                       | Tubería principal       | 6                                         | ---                                          | pulg                             |
|                                                         | Tuberías laterales      | 2                                         | ---                                          | pulg                             |
|                                                         | #Tuberías laterales     | 30                                        |                                              |                                  |
| Distribución móvil                                      | Tubería de alimentación | ---                                       | 6                                            | pulg                             |
|                                                         | Tubería de distribución | ---                                       | 4                                            | pulg                             |
|                                                         | # de brazos             | ---                                       | 2                                            | Und                              |
| Distancia de medio de soporte a tubería de distribución |                         | 0,35                                      | 0,15                                         | m                                |
| Pendiente del medio de soporte                          |                         | ---                                       | 5                                            | %                                |
| Ancho canal de drenaje                                  |                         | ---                                       | 0,3                                          | m                                |
| Altura canal de drenaje                                 |                         | ---                                       | 0,2                                          | m                                |
| Número de ventanas                                      |                         | ---                                       | 4                                            | und                              |

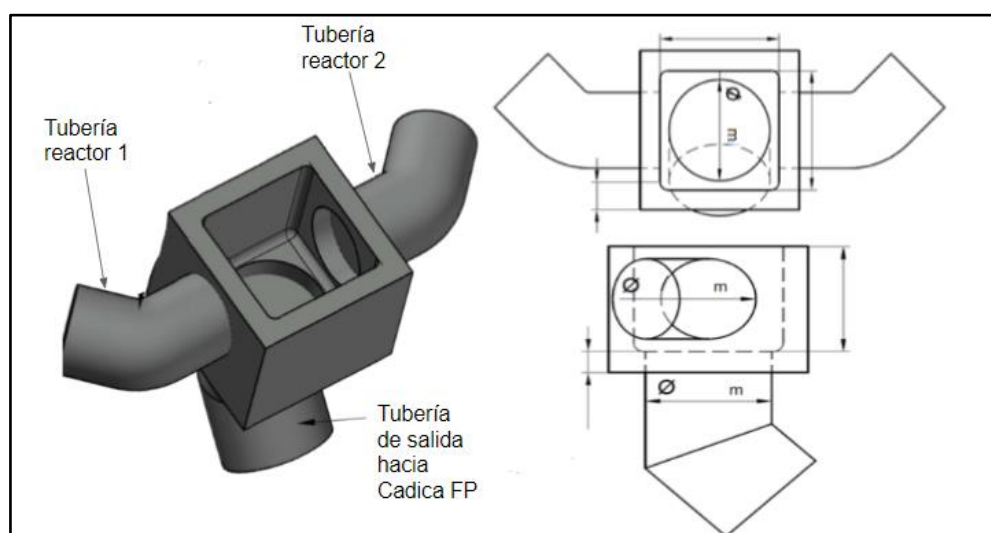
En la **Tabla 54** se presentan las propuestas de optimización para el filtro percolador

**Tabla 54.** Propuestas de optimización del filtro percolador

| Punto crítico                    | Propuesta de optimización                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caja de integración de caudales  | Es necesaria la construcción de una cámara de integración de caudales para recolectar el efluente de los reactores UASB y posteriormente conducir el caudal hacia la CADICA. En la <b>figura 92</b> se presenta lo recomendado.                                                                                                |
| Caja de distribución de caudales | Se propone implementar una caja de distribución de caudales (CADICA) que permita recoger el efluente del reactor UASB y distribuir a los tres filtros percoladores de forma homogénea. En la <b>figura 93</b> se presenta la CADICA, cuya entrada debe estar ubicada en el centro y distribuir el agua hacia las tres salidas. |

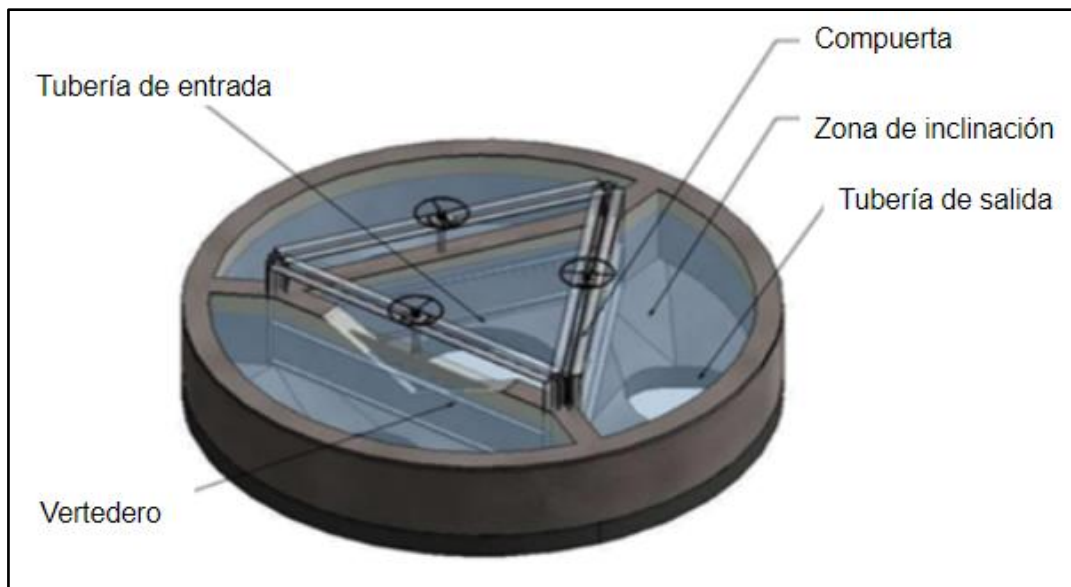
**Tabla 54.** Propuestas de optimización del filtro percolador

| Punto crítico           | Propuesta de optimización                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bomba de agua           | Se recomienda instalar una bomba para elevar el agua residual hacia los brazos rotativos del filtro percolador.                                                                                                                              |
| Distribución del caudal | Reemplazar las tuberías fijas por tuberías móviles con dos brazos montados sobre un pivote central (CONAGUA, 2015). La cabeza hidráulica debe ser de 0,6m y la velocidad de rotación de 0,3 a 5 v/min (Rodríguez, 2022).                     |
| Ventilación             | Para proveer una ventilación en la zona central del filtro, se recomienda que el diseño de los filtros percoladores tengan 8 ventanas horizontales, ubicadas dos ventanas en cada lado con dimensiones de 0,5m X 0,1m cada 4 m de perímetro. |
| Ranuras                 | Las ranuras que sostiene el medio de soporte deben contar con unas aberturas del 15% del área superficial del filtro, para garantizar la ventilación natural (RAS, 2000).                                                                    |
| Canal de desagüe        | Se recomienda que en el fondo del filtro percolador haya un canal central para recoger el agua residual tratada (Metcalf y Eddy, 2003) tanto el piso como el sistema de drenaje deben tener una pendiente de 1 a 5% (CONAGUA, 2015).         |
| Mantenimiento general   | Es necesario realizar un mantenimiento general de la unidad que permita destapar las ranuras obstruidas del falso fondo, para así mejorar el drenaje del agua percolada                                                                      |



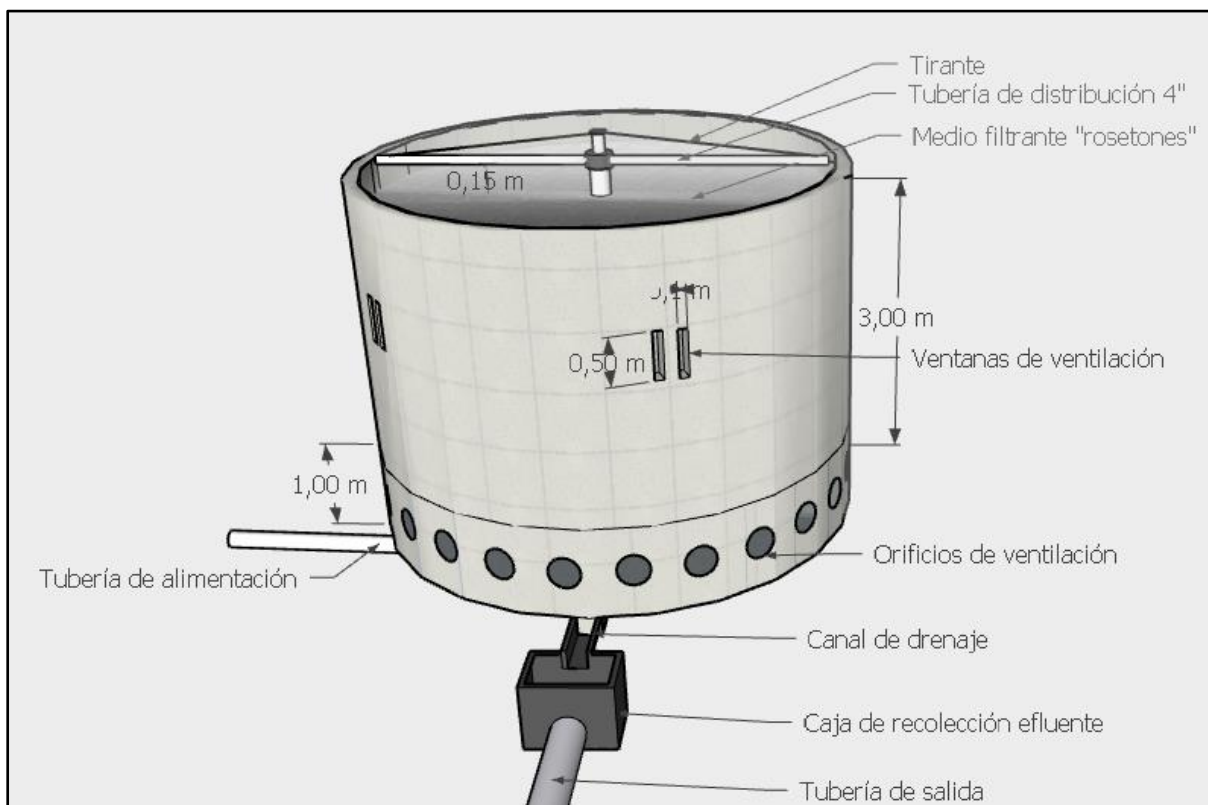
**Figura 92.** Estructura de caja de integración de caudales

Fuente: Rodríguez (2022)

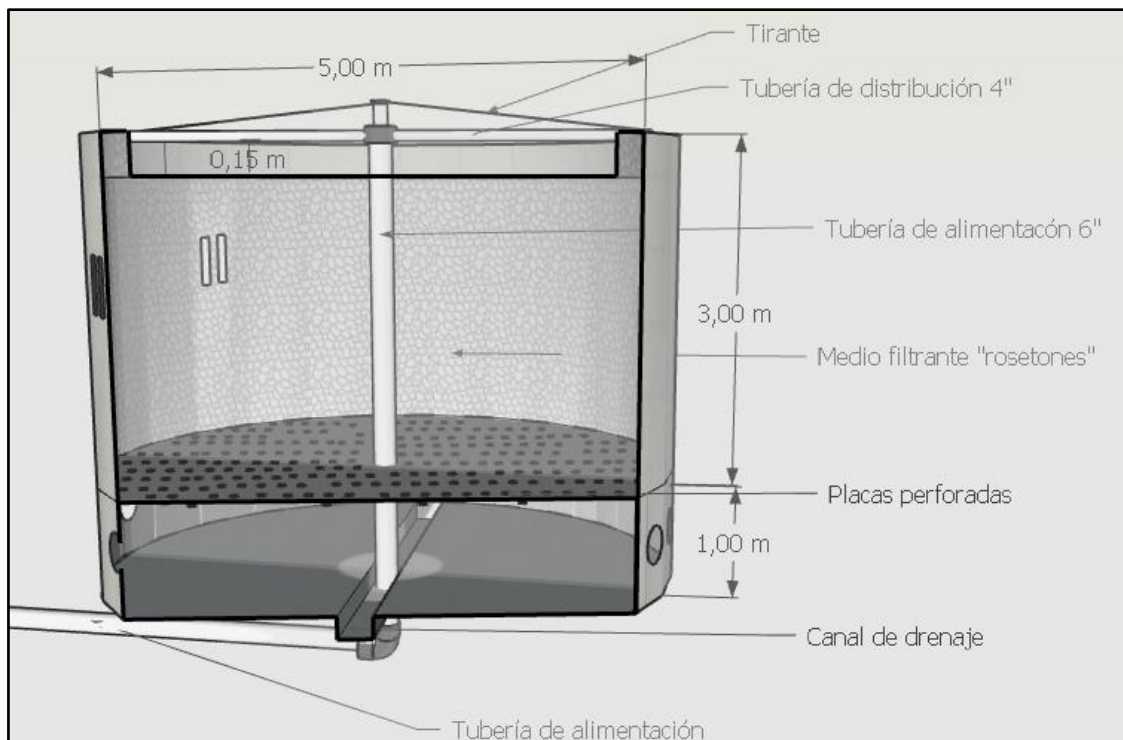


**Figura 93.** Representación gráfica CADICA de tres salidas  
Fuente: Rodríguez (2022)

En la **figura 94 y 95** se ilustra todas las recomendaciones expuestas con dimensiones ideales que se debieron considerar para diseño del filtro percolador.



**Figura 94.** Propuesta de optimización del filtro percolador



**Figura 95.** Esquema en corte de las propuestas de optimización del filtro percolador

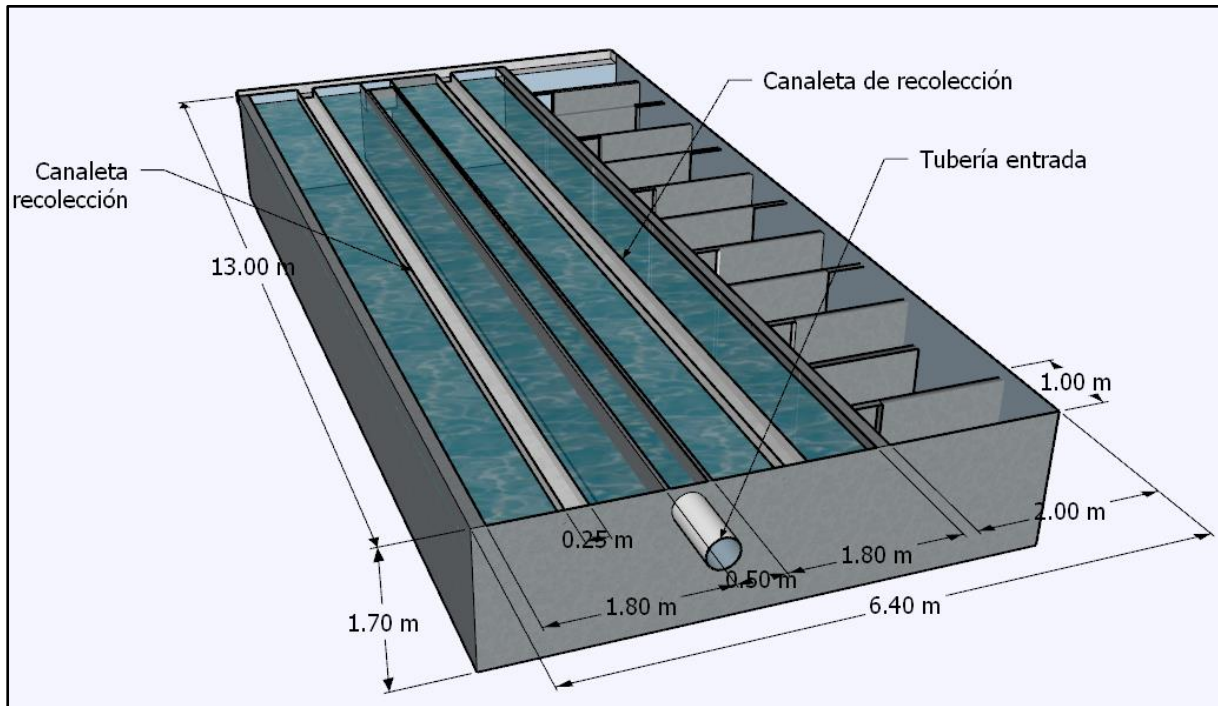
#### 4.3.10 Sedimentador final y cloración

Los parámetros de diseño del sedimentador final se presentan en la siguiente **Tabla 55**. En la **figura 96** se representa gráficamente el exterior de la unidad y en la **figura 97** se presenta un corte interior.

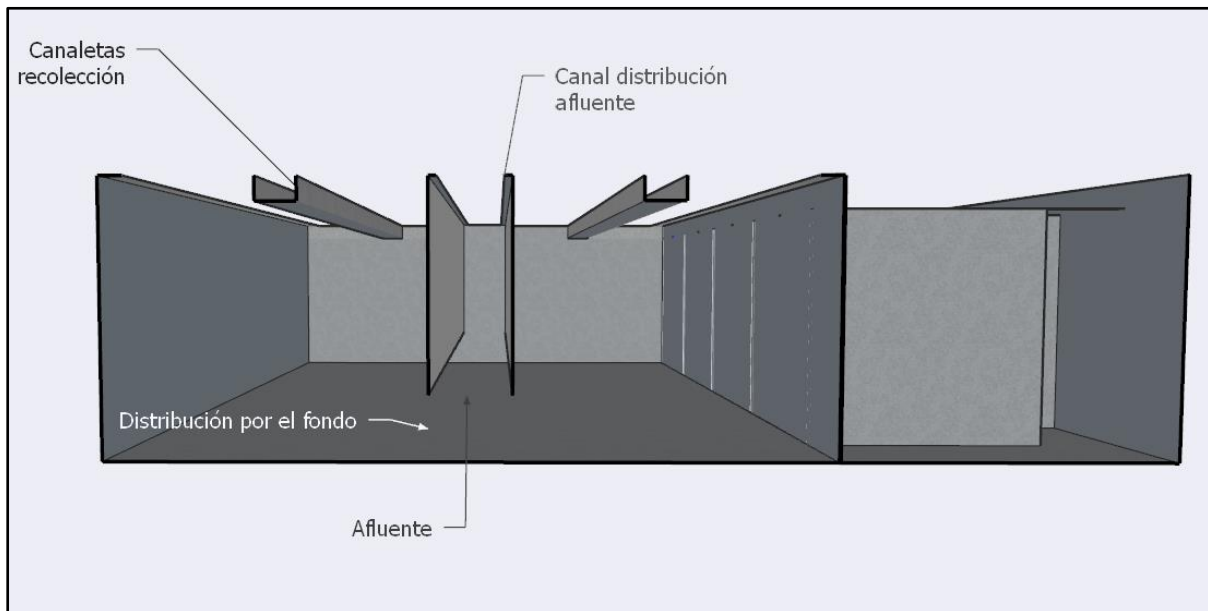
**Tabla 55.** Parámetros de diseño del sedimentador final

| Parámetro                      | Recomendado                                                                                        | Construido | Unidad                            |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------------------------|
| Tasa de aplicación superficial | 16 - 24 <sup>(1)</sup><br>14 - 27 <sup>(2)(7)</sup>                                                | 20,76      | m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d |
| Profundidad del agua           | 3,0 - 3,7 <sup>(1)</sup><br>3 - 4,5 <sup>(2)</sup><br>> 2 <sup>(5)</sup><br>2,5 - 4 <sup>(7)</sup> | 1,5        | m                                 |
| Relación Longitud-Ancho        | 3:1 y 5:1 <sup>(1)(5)</sup><br>1,5:1 y 15:1 <sup>(3)</sup><br>3:1 a 6:1 <sup>(6)</sup>             | 3:1        | -                                 |
| Pendiente                      | 1 <sup>(3)</sup><br>> 2 <sup>(4)</sup><br>1 a 2 <sup>(5)</sup>                                     | 0          | %                                 |

Fuente: <sup>(1)</sup> Romero (2004); <sup>(2)</sup> Metcalf y Eddy (2003); <sup>(3)</sup> RAS (2017); <sup>(4)</sup> RAS (2000);  
<sup>(5)</sup> CONAGUA (2015); <sup>(6)</sup> OPS (2005); <sup>(7)</sup> Chernicharo (2007)



**Figura 96.** Representación gráfica sedimentador final y cloración



**Figura 97.** Interior del sedimentador final

La distribución del caudal hacia las dos unidades se realiza por medio de un canal central (**figura 98**) que cuenta con una abertura en el fondo, donde distribuye el flujo hacia los laterales donde se encuentran los módulos lamelares. La distribución del caudal de esta manera no permite una homogeneidad en todo el sedimentador. Se pudo evidenciar que la unidad no cuenta con un mantenimiento adecuado, esto implica una reducción en el volumen útil de sedimentación, además, realizar el mantenimiento de esta unidad, implica paralizar la unidad

de tratamiento e incluso la PTAR, ya que no existe en el sedimentador final una válvula de purga de lodos que permita el retiro de los sólidos sedimentados.



**Figura 98.** Entrada al sedimentador final

El sedimentador final cumple con la relación longitud-ancho. La longitud en un sedimentador es muy importante para asegurar que, las partículas con velocidades de sedimentación igual o mayor a la velocidad crítica de sedimentación ( $V_c$ ) tengan el tiempo necesario para asentarse antes de llegar a la salida (Strande et al, 2014) (Heinss et al, 1998).

Por otra parte, la profundidad del sedimentador final rectangular se encuentra por debajo de las recomendaciones de la literatura. Según Takács y Ekama (2017), los sedimentadores con profundidades menores de 2,5 a 3,0 m son más susceptibles a la sobrecarga de sólidos, dado que pueden llegar fácilmente hacia las canaletas de recolección del efluente y hasta generar un lavado de los lodos debido a su resuspensión.

La literatura recomienda que, un sedimentador final debe contar con una pendiente para evacuar los lodos hacia la tolva, con la finalidad de facilitar su evacuación periódica. Aunque, en los planos de diseño se observa una tolva ubicada en el centro de la unidad, en la visita se evidenció que no fue construida. La estructura presenta colmatación y los lodos flotan hasta ser recolectados en la canaleta y son conducidos a la zona de cloración, lo cual indica una grave falencia operativa.

También se evidenció que la zona de entrada del sedimentador final rectangular no cuenta con una pantalla perforada para permitir el paso del flujo de manera uniforme, tal como lo recomienda la OPS (2005). Según el RAS (2000) las pantallas difusoras son recomendadas para distribuir el caudal uniformemente a través de toda la sección transversal, de modo que,

se logre disipar la energía que trae el agua y garantizar una velocidad longitudinal uniforme. Para lograrlo, la zona de entrada debe tener un número de Reynolds lo más bajo posible y el número de Froude más elevado para tender a un flujo laminar y estabilizar el flujo (Maldonado, 2000). La alimentación por medio del canal central no garantiza la distribución del agua de manera uniforme.

El sedimentador final cuenta con módulos lamelares hexagonales, que fueron provistos para mejorar la velocidad de sedimentación, sin embargo, Takács y Ekama (2017) mencionan que, los módulos lamelares son menos utilizados, debido a la posibilidad de la acumulación de lodos en el interior de las superficies inclinadas de las placas, lo que resulta en la necesidad constante de realizar mantenimiento, e incluso en casos extremos, el taponamiento de los lamelares pueden generar cúmulos de lodos anaerobios, producir gases y causar el flotamiento de los lodos. En la **figura 99** se puede evidenciar que la ausencia de mantenimiento ha generado el desgaste de los módulos lamelares a tal punto de causar su desprendimiento.



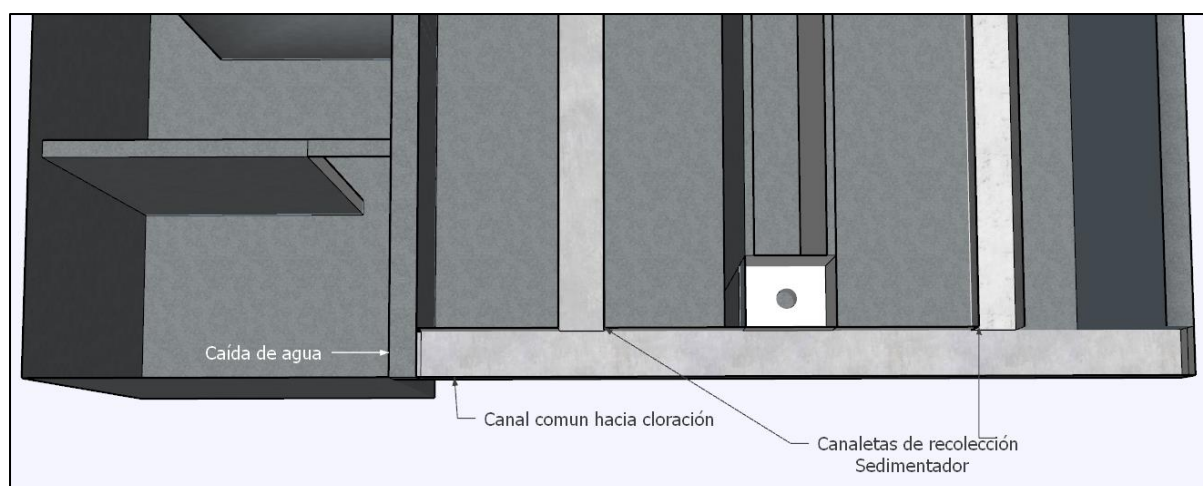
**Figura 99.** Falencias encontradas sedimentador final

Por otra parte, la recolección del efluente del sedimentador final se realiza por medio de canaletas perforadas, la recolección no se realiza de manera uniforme, tal como se presenta en la **figura 100**. Esto induce a generar líneas preferenciales de flujo y generar zonas muertas en el sedimentador.



**Figura 100.** Recolección ineficiente del efluente del sedimentador final

Se evidenció que el sedimentador final no cuenta con válvula de purga de lodos, es decir que, el mantenimiento se debe realizar de manera manual. Sin embargo, hace más de tres años la PTAR no recibe mantenimiento y en la actualidad realizar el mantenimiento a esta estructura para extraer los lodos, implica paralizar la planta, ya que se debe drenar el agua de la unidad y extraer los módulos lamelares para realizar una limpieza ideal con una buena purga de lodos. El mal diseño y construcción de la unidad, se refleja en la resuspensión de los lodos que alcanzan la canaleta de recolección, generando el paso de partículas suspendidas a la siguiente fase del tratamiento. En la **figura 101** se presenta un detalle en la recolección del efluente del sedimentador final que conduce hacia el tanque de cloración.



**Figura 101.** Recolección del efluente del sedimentador final

No es recomendable realizar procesos de cloración en tratamiento de agua residual. La calidad del efluente de los sedimentadores secundarios no es la adecuada para realizar el proceso de cloración, dado que, el efluente no se encuentra clarificado y cuenta con sólidos suspendidos (**figura 102**). Realizar el proceso de cloración bajo esta calidad de agua puede resultar peligroso, por la formación de trihalometanos, compuesto químico conocido por sus propiedades mutagénicas y cancerígenas, que pueden afectar a la población que hace uso del recurso hídrico aguas abajo de la descarga de la PTAR La Dorada. La cloración de agua residual también puede provocar la formación de clorofenoles lo que daría lugar a malos olores (Velázquez et al., 2018).



**Figura 102.** Presencia de lodos en el sistema de cloración

Para las propuestas de optimización del sedimentador inicialmente se evaluó la ampliación del ancho tomando el área de la zona de cloración como parte del sedimentador. Teniendo en cuenta esta ampliación, se comprobó que la tasa de aplicación superficial se encuentra dentro de los rangos recomendados por la literatura, considerando que la zona de entrada tendría una distancia de 0,50 m hasta la pantalla perforada, lo que reduce la longitud total útil a 12,50 m. En la **Tabla 56** se presenta la comparación entre lo construido y lo propuesto con las modificaciones en las dimensiones. En la **tabla 57** se describe a mayor profundidad las propuestas de optimización planteadas para el sedimentador final.

**Tabla 56.** Comparación del sedimentador final construido y el propuesto con optimizaciones

| <b>Parámetro</b>               | <b>Construido<br/>(Qdmed=12 L/s)</b> | <b>Reajustado<br/>(Qdmed=16,23 L/s)</b> | <b>Unidad</b>                     |
|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|
| Ancho                          | 4                                    | 6                                       | m                                 |
| Largo                          | 13                                   | 12,50                                   | m                                 |
| Profundidad del agua           | 1,5                                  | 2,5                                     | m                                 |
| Área superficial               | 52                                   | 75                                      | m <sup>2</sup>                    |
| Tasa de aplicación superficial | 20,76                                | 18,69                                   | m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d |
| TRH                            | 1,73                                 | 3,20                                    | h                                 |
| Modo de limpieza               | Manual                               | Mecánica (Barrelos)                     | --                                |

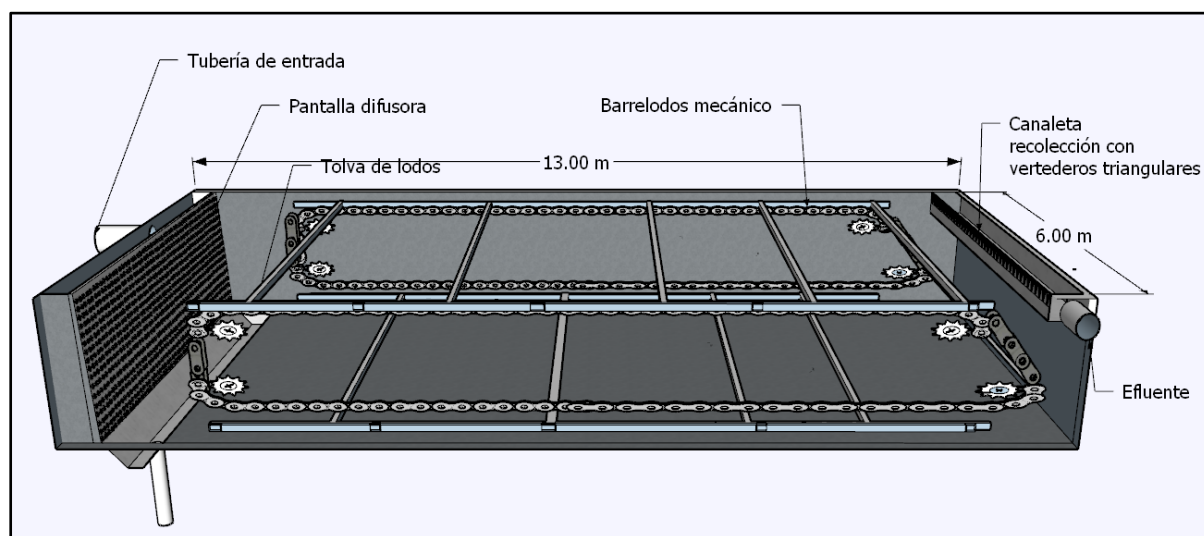
**Tabla 57.** Propuesta de optimización del sedimentador final

| <b>Punto crítico</b>                                                    | <b>Propuesta de optimización</b>                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cloración                                                               | Se propone ampliar el área del sedimentador tomando los dos metros correspondientes a la zona de cloración, obteniendo un ancho total del sedimentador de 6 metros.                                                                            |
| Profundidad                                                             | Se propone incrementar la profundidad del sedimentador final, aumentando las paredes de la estructura hasta elevarlas 1 metro, para alcanzar la profundidad del agua mínima recomendada de 2,5 metros.                                         |
| Ausencia de pantalla perforada                                          | Se recomienda implementar pantallas perforadas a la entrada del sedimentador final para proveer una distribución uniforme del caudal y evitar la formación de líneas preferenciales de flujo y cortocircuitos hidráulicos.                     |
| Mantenimiento deficiente y dificultoso a causa de los módulos lamelares | Retirar los módulos lamelares e instalar un equipo mecánico conocido como barrelos, el cual permite ajustar la frecuencia de mantenimiento según los requerimientos de la PTAR, para mantener el volumen útil del sedimentador (Romero, 2004). |
| Sin tolva de lodos y tubería de purga                                   | Se recomienda la implementación de una tolva de lodos que reciba los sedimentos empujados por el barrelos. Esta tolva debe contar con una tubería y válvula de purga que permita que los sólidos sean conducidos hacia los lechos de secado.   |

**Tabla 57.** Propuesta de optimización del sedimentador final

| Punto crítico                     | Propuesta de optimización                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pendiente de fondo                | Se debe establecer una pendiente de fondo del 1 - 2 % que permita que los sólidos desciendan a la tolva de lodos por medio de gravedad.                                                                               |
| Canaletas de recolección          | Se propone reemplazar las canaletas de recolección con orificio circulares por canaletas de recolección triangulares. Las cuales, permiten que el agua sea recolectada sin inconvenientes por posibles taponamientos. |
| Bomba para los lodos sedimentados | Se propone la implementación de una bomba que permita la llegada de los lodos hasta el lecho de secado.                                                                                                               |

En la **figura 103** se presenta el diseño propuesto para el sedimentador final.



**Figura 103.** Diseño del sedimentador secundario con las propuestas de optimización

#### 4.3.11 Lecho de secado

En la **tabla 58**, se presentan recomendaciones para el diseño del lecho de secado con especificaciones del espesor de la capa de arena, grava, granulometría del medio filtrante, entre otros.

**Tabla 58.** Parámetros de diseño del lecho de secado

| Parámetros           | Valor recomendado                      | Valor construido | Unidad |
|----------------------|----------------------------------------|------------------|--------|
| Módulo               | ---                                    | 5                | und    |
| Ancho de cada módulo | 4,5 a 18 <sup>(4)</sup> <sup>(5)</sup> | 2,5              | m      |
| Largo de cada módulo | 15 a 45 <sup>(4)</sup> <sup>(5)</sup>  | 4,6              | m      |

**Tabla 58.** Parámetros de diseño del lecho de secado

| Parámetros             | Valor recomendado                                     | Valor construido | Unidad |
|------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|--------|
| Profundidad            | 0,20 a 0,30 <sup>(3)</sup>                            | 0,6              | m      |
| Tubería de drenaje     | 4 <sup>(2)</sup>                                      | 4                | pul    |
| Pendiente de drenaje   | 1 <sup>(2)</sup>                                      | 1                | %      |
| Espesor capa de grava  | 0,20 a 0,46 <sup>(2) (5)</sup>                        | 0,20             | m      |
| Espesor capa de arena  | 0,30 a 0,46 <sup>(2)</sup>                            | 0,20             | m      |
| Granulometría de grava | 3 a 25 <sup>(1) (2)</sup>                             | 0,10             | mm     |
| Granulometría de arena | 0,3 a 1,2 <sup>(1)</sup><br>0,3 a 0,75 <sup>(2)</sup> | 0,3 a 0,75       | mm     |

Fuente: <sup>(1)</sup> Lin (2014); <sup>(2)</sup> RAS (2000); <sup>(3)</sup> Foladori et al. (2013); <sup>(4)</sup> Tilley et al. (2018);  
<sup>(5)</sup> CONAGUA (2015)

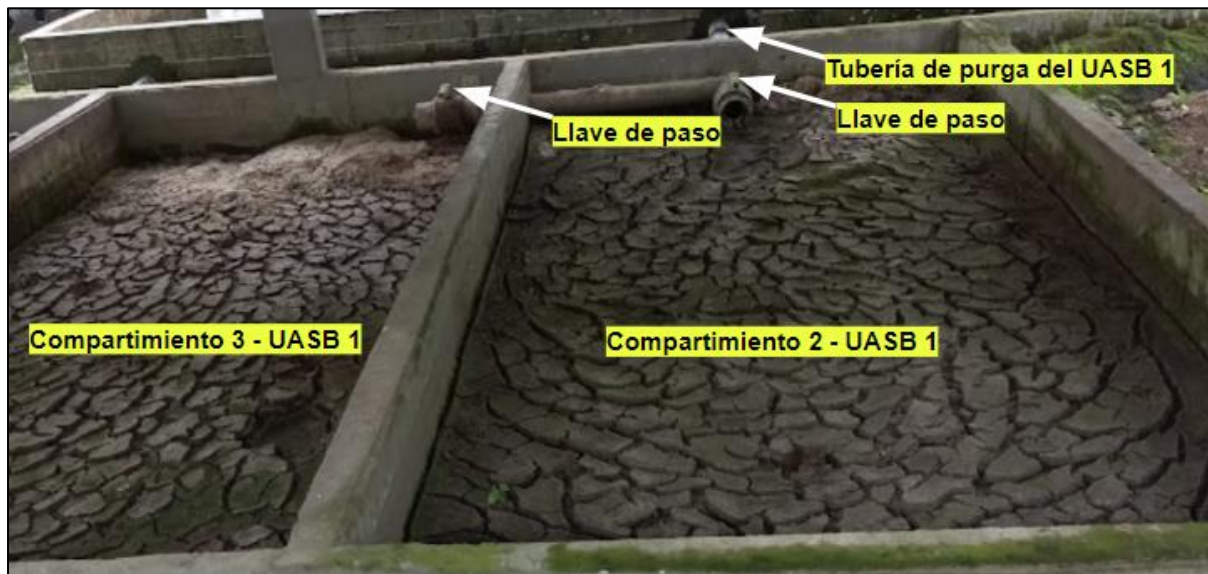
En campo se evidenció que los compartimientos del lecho de secado se encuentran colmatados y con cubierta vegetal (**figura 104**) la colmatación de los lodos está a sólo 5 cm por debajo de la tubería de purga.



**Figura 104.** Lecho de secado de la PTAR

El operario menciona que la unidad no ha recibido mantenimiento desde hace más de tres años. Los lodos biológicos que se disponen en los lechos de secado son los correspondientes del tanque homogeneizador y reactor UASB. Cabe resaltar que, el lecho de secado tiene cinco compartimentos: uno para tanque homogeneizador, dos para el reactor UASB 1 y dos para

reactor UASB 2, los cuales se alternan cada semana para la purga del reactor UASB, el operario decide a cuál compartimento va a descargar y lo controla mediante una tee ubicada en la tubería (figura 105).



**Figura 105.** Compartimientos del lecho de secado para reactor UASB 1

Es evidente que alternar un compartimento cada semana no va a permitir la deshidratación de los lodos. Según Tilley et al (2018), los lodos deshidratados pueden removerse después de 10 a 15 días dependiendo de las condiciones climáticas. Sin embargo, el lecho de secado de la PTAR no es afectado por la precipitación, ya que se encuentra cubierto, además, no es afectado por escorrentía superficial ni por goteras. Por lo que, se podría esperar que en el tiempo recomendado los lodos se puedan secar hasta alcanzar un contenido de sólidos entre 30 a 50%.

También se observó que el lecho de secado no cumple con la profundidad recomendada por la literatura. Según Tilley et al (2018), la profundidad de la capa del lodo no debe superar los 0,3 m. Disponer de una capa superior, dificulta las eficiencias del secado. Además, al incrementar una capa de 10 cm de lo recomendado por la literatura, puede duplicar el tiempo de secado en las mismas condiciones climáticas (Pescad, 1971) (Dodane y Ronteltap, 2014).

La capa de arena está ubicada encima de la grava y generalmente cuando se realiza el mantenimiento de los lodos, se remueve una cantidad de esta capa filtrante, por lo que la literatura recomienda conservar el espesor del material filtrante para mantener las condiciones de drenaje y evitar que el lodo tapone los espacios entre la grava.

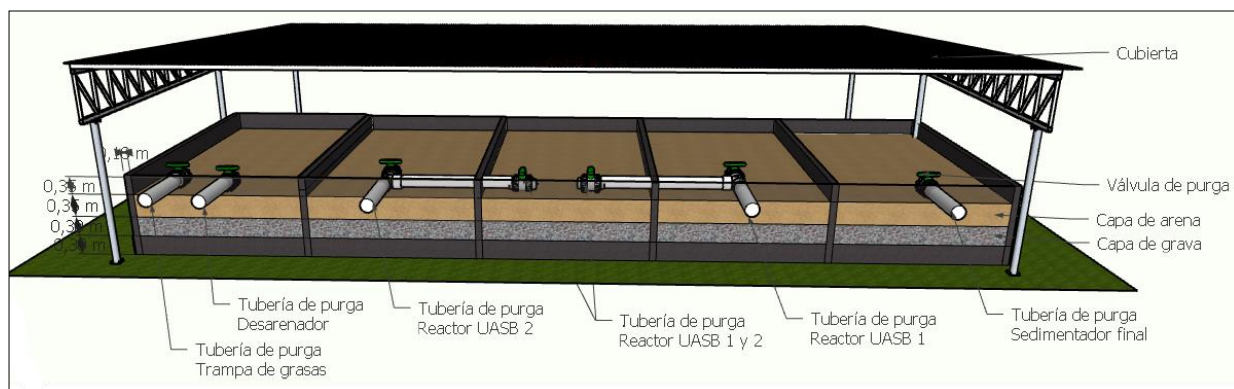
Finalmente se observó que el lecho de secado cuenta con una pendiente para el drenaje del agua residual. El agua residual drenada conduce a una cámara de salida donde se mezcla con el efluente de la PTAR, luego desemboca en la fuente receptora. Según Jaramillo (1985) el agua drenada del lecho de secado se debe recircular. Sin embargo, se pudo evidenciar que no se realiza la recirculación del lixiviado en esta estructura.

En la **Tabla 59** se presentan las propuestas de optimización del lecho de secado.

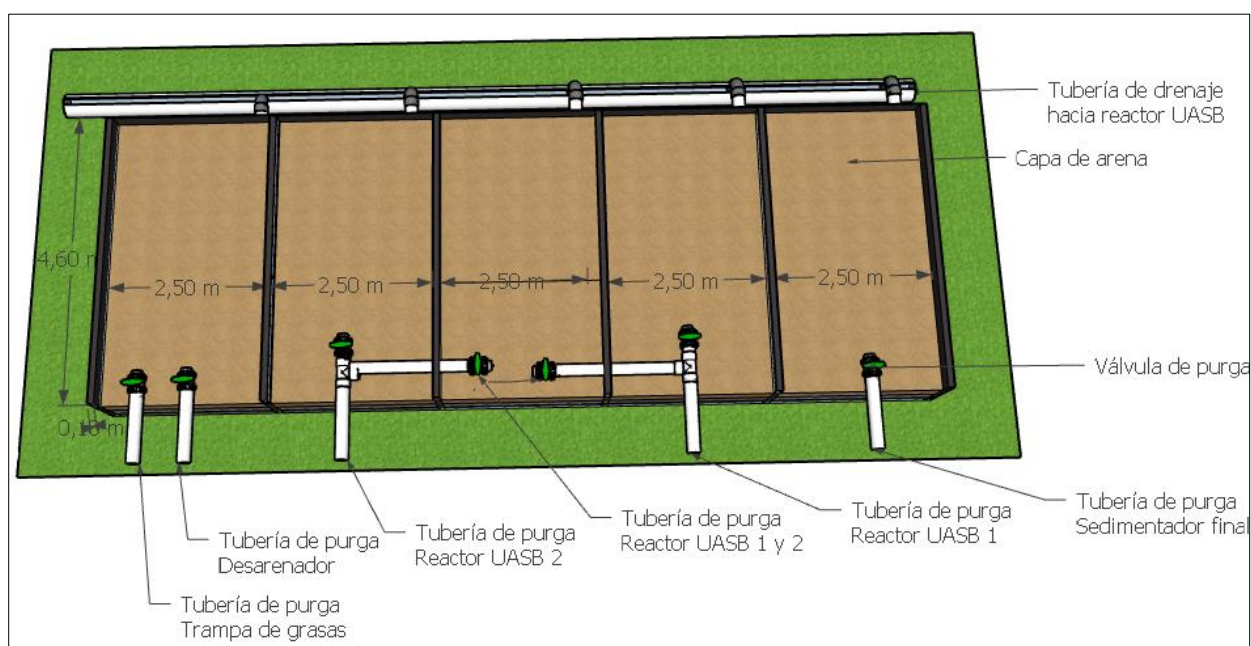
**Tabla 59.** Propuestas de optimización del lecho de secado

| Punto crítico                                  | Propuesta de optimización                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Compartimentos del reactor UASB                | <p>Se recomienda que los compartimientos de los reactores UASB 1 y 2 sean alternados para la purga, de 10 a 15 días para su respectiva deshidratación. Es importante mencionar que la capa de lodos no supere los 0,30 m porque puede duplicar el tiempo de deshidratación.</p> <p>El lodo deshidratado se puede aprovechar para agricultura debido a la alta carga de nutrientes que presentan. Sin embargo, es necesario una caracterización física y microbiológica para determinar si es apto para su aprovechamiento, de lo contrario se debe disponer en un relleno sanitario (Lawrence et al., 2007).</p> |
| Espesor de la arena                            | Se recomienda aumentar la capa de arena de 0,30 a 0,46 m, ya que la actual, está por debajo de lo recomendado por la literatura. Además, la granulometría de la arena debe conservarse entre 0,3 a 0,75 mm.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Granulometría de la grava                      | Se recomienda cambiar la granulometría de la grava de 3 a 25 mm, ya que, la actual granulometría es menor a la recomendada por la literatura. La granulometría del medio filtrante es importante porque permite que el agua se drene rápidamente, lo que ayuda a prevenir el crecimiento de moho. También ayuda a que el lecho se seque rápidamente, reduciendo el riesgo de posibles daños a la estructura por acumulación de agua.                                                                                                                                                                             |
| Capa de los medios filtrantes en Mantenimiento | Se recomienda que, en el mantenimiento de los lechos de secado, se mantenga el espesor de la capa filtrante. En caso de removerse un porcentaje de la capa filtrante, se debe añadir. El espesor de la capa de grava debe mantenerse entre 0,20 a 4,6 m y espesor capa de arena entre 0,30 a 0,46 m. Es importante tener en cuenta estas recomendaciones porque ayuda a prevenir que el agua y los contaminantes se filtren en el suelo y alcancen el agua subterránea. Además, ayuda a mantener el lecho de secado limpio y funcionando correctamente.                                                          |
| Bombas de recirculación                        | Se recomienda la implementación de bombas que permitan la recirculación del agua drenada en los lechos de secado hacia el reactor UASB.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

En la **Figura 106 y 107** se presentan los esquemas del lecho de secado.



**Figura 106.** Vista corte: Lecho de secado con optimizaciones



**Figura 107.** Vista en planta: Lecho de secado con optimizaciones

#### 4.3.12 Laboratorio de medición y control de parámetros

Finalmente, la PTAR La Dorada no cuenta con laboratorio ni equipos de medición para realizar chequeos de los parámetros fisicoquímicos fundamentales para verificar el buen funcionamiento y verificación de las eficiencias de la planta de tratamiento. Una PTAR requiere realizar monitoreo de los parámetros fisicoquímicos a la entrada para poder actuar en caso de una descarga de alguna sustancia que pueda afectar el tratamiento, así como también se debe realizar monitoreo de los parámetros a la salida para poder tener control de los resultados del tratamiento de la planta. Dentro de los principales parámetros fisicoquímicos que deben medirse se encuentran el pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, sólidos sedimentables, alcalinidad total, turbiedad y color real, además de controlar el proceso por medio de %DQO, %DBO y %SST.

Para el reactor UASB, Van Haandel y Lettinga (1994) y Chernicharo (2007) mencionan la importancia de realizar constantes chequeos de variables como temperatura, pH, ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad bicarbonática para controlar el funcionamiento del reactor y actuar en caso de presentarse variaciones que se encuentren por fuera de los rangos recomendados. La fase acidogénica donde se producen los ácidos grasos volátiles conllevan a una reducción en las unidades de pH. La importancia del monitoreo de la alcalinidad bicarbonática y la concentración de AGV dentro del reactor permiten evitar que se alcancen valores de pH inferiores a 6,5 und, que según Chernicharo (2007) es el valor mínimo óptimo para la metanogénesis.

En la actualidad la PTAR cuenta con una caseta que iba a ser destinada para el laboratorio, sin embargo, esta caseta se encuentra vacía y es empleada para almacén. Se recomienda emplear este espacio disponible para laboratorio. En la **tabla 60** se presentan las propuestas.

**Tabla 60.** Propuestas de optimización para el laboratorio de la PTAR

| Punto crítico        | Propuesta de optimización                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sin mobiliario       | Se debe realizar el montaje general del laboratorio, donde se cuente con mesones, lavamanos, gabinetes para almacenamiento de equipos, muestras, entre otros.                                                                                                                                                                                                                      |
| Sin equipos          | Es ideal que el laboratorio cuente con los equipos para mediciones de temperatura, pH y conductividad eléctrica, alcalinidad turbiedad y oxígeno disuelto. Además, se debe proveer de implementos de laboratorios como probetas, Erlenmeyer, tubos de ensayo, buretas graduadas, gradillas, pipetas, matraces aforados, agitadores/mezcladores, balanzas/básculas, espátulas, etc. |
| Ausencia de personal | Es ideal contar con personal de laboratorio con conocimientos en toma y análisis de muestras de agua residual.                                                                                                                                                                                                                                                                     |

## 5. CONCLUSIONES

- Se identificó que la PTAR La Dorada corresponde a una tecnología de tratamiento biológico con Reactores UASB y Filtros percoladores. La tecnología presentada en la memoria de diseño coincide con las evidenciadas en campo. Aunque se evidenció múltiples inconsistencias en las dimensiones expuestas en los planos técnicos con lo contrastado en campo.
- Al comparar los caudales de diseño de la memoria de diseño de la PTAR La Dorada con los recalculados se evidenció que, la memoria de diseño no consideró el caudal no doméstico y el caudal de infiltración y, aunque los caudales de diseño fueron menores a los recalculados, fue sobredimensionado el tratamiento preliminar. Conllevando a sobrecostos de construcción, operación, mantenimiento y pérdidas de eficiencia de la PTAR.
- Se resalta la importancia de realizar un buen diseño de la PTAR con criterios de diseño actualizados. Para lograrlo se requiere la participación de un equipo de trabajo multidisciplinario, comunicación efectiva y sinergia.
- La elección de los criterios de diseño y la ejecución de los cálculos es una parte fundamental para un diseño adecuado, que se debe complementar por medio de los planos técnicos para transmitir la información de la mejor manera a los encargados de la construcción. De esta manera, se evitan las diferencias entre lo planteado en el diseño y la construcción.
- Los criterios de diseño planteados por la literatura son el resultado de múltiples experiencias exitosas en diferentes partes del mundo, lo que hace que sean un referente para su aplicación. En la PTAR La Dorada se pudo evidenciar que se presentaron muchas diferencias de los criterios de diseño elegidos con los recomendados por la literatura, esto dificulta su buen funcionamiento, su eficiencia y su sostenibilidad como sistema de tratamiento.
- Un sistema de tratamiento de agua residual requiere una operación y mantenimiento que, aunque en su mayor parte podría parecer rutinario, demanda un conocimiento básico sobre el funcionamiento de la tecnología. En la PTAR La Dorada se pudo evidenciar la importancia de ofrecer educación y capacitación a los operarios, para facilitar su criterio en la toma de decisiones, conocer qué aspectos debe tener en cuenta y que funciones debe realizar para que el sistema opere correctamente y cómo debe actuar en caso de alguna emergencia que pueda presentarse en la PTAR
- En la PTAR La Dorada se evidenció la falta de asignación de recursos públicos para el mantenimiento y operación de todo el sistema de tratamiento. El tratamiento de agua residual es una parte fundamental para la conservación de los ecosistemas naturales. La quebrada La Dorada, fuente receptora del efluente de la PTAR, ofrece múltiples servicios ecosistémicos, debido a que no sólo es empleada como fuente de recreación

para los habitantes del municipio, sino que también se utiliza para el lavado de ropa e incluso para cocinar, debido a la ausencia de red de abastecimiento de agua potable. La falta de asignación de recursos para mantener este servicio en buen estado y con buenas eficiencias representa un riesgo sanitario para la población del municipio de La Dorada.

- De todo el sistema de tratamiento se identificó que el tratamiento preliminar presentó mayores dificultades en el diseño y construcción. Puesto a que no consideraron las recomendaciones de la literatura. Por lo que, se debe considerar las propuestas de optimización para el buen diseño, operación y mantenimiento del de las unidades de tratamiento, de modo que, permita mejorar la calidad del efluente de la PTAR.
- El manual de operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) es un documento fundamental para el correcto funcionamiento de la planta, ayuda al operario a conocer el funcionamiento de la planta, para así garantizar que la planta funcione correctamente y que se cumplan los estándares de calidad del efluente. Por lo que, se recomienda ajustar el documento para el nuevo periodo de diseño, que incluya las propuestas de optimización realizadas.

## 6. REFERENCIAS

- Akhtar, A. (2017). Anaerobic treatment of industrial wastewater under psychrophilic condition (10°C) using Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor, Lab studies. University of Stavanger. Disponible en: <https://bit.ly/3X2CbZs>
- Alcaldía de San Miguel. (2016). Plan de Desarrollo Municipal 2016-2019. Disponible en: <https://bit.ly/3ZaN9Ne>
- Alcaldía de San Miguel. (2020). Plan de Desarrollo Municipal 2020-2023. Disponible en: <https://bit.ly/3K6UOYd>
- Almeida, P., Oliveira, S. y Chernicharo, C. (2011). Operação de filtros biológicos percoladores pós-reactores UASB sem a etapa de decantação secundária. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000300010>.
- Amoatey, P. y Bani, R. (2011). Wastewater Management. Wastewater - Evaluation and Management, Capítulo 20. University of Ghana. Disponible en: <https://bit.ly/3CmDzy8>
- Anijiofor, S., Mohd, N., Saleem, S., Sakyat, S. y Gomes, C. (2017). Aerobic and Anaerobic Sewage Biodegradable Processes: The Gap Analysis. International Journal of Research in Environmental Science. <http://doi.org/10.20431/2454-9444.0303002>
- Ayquipa, N. (2021). Evaluación de la eficiencia de una trampa de grasa (interceptor de grasa hidromecánico) para el pretratamiento de aguas residuales grises en viviendas unifamiliares del distrito de Lares-Cusco - 2021. Proyecto de grado. Universidad Continental. Cusco, Perú.
- Banco Mundial. (2020). Agua Residual: De Residuo a Recurso. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/publication/wastewater-initiative>
- Bernier, T. (2015). WWEMA Window: Slots vs. Holes in Preliminary Treatment Screening. Disponible en: <https://bit.ly/3Oo1Bio>
- Belzona. (2010). Tratamiento de Aguas Residuales. Miami, Florida. Estados Unidos de América.
- Bobade, V., y Lomte, A. (2015). Challenges in UASB reactor system design: A Review. Disponible en: <https://bit.ly/3GC7ipi>
- Cardona, P. (2020). Sistema de Tratamiento Elimina Antibióticos en Aguas Residuales. Universidad Nacional de Colombia.
- Castro, J., Cabrera, Y., y Gonzales, T. Sumarriva, L. (2019). Remoción de materia orgánica en reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente en el tratamiento de aguas residuales del Canal de Huancavelica. Revista de la Sociedad Química del Perú. Disponible en: <http://bit.ly/3GaBTu7>.
- Chernicharo, C. (2007). Principios de tratamiento biológico de aguas residuales: Reactores Anaerobios. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad Federal de Minas. Belo Horizonte, Brasil.

Chernicharo, C. y Gonçalves, R. (2005). Biological wastewater treatment in Warm Climate Regions. Capítulo 43. Trickling Filters. IWA Publishing.

Chong, S., Kanti, T., Kayaalp, A. y Ming, H. (2012). The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment – A State-of-the-art review. Water Research. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.066>

Collivignarelli, M., Abbà, A., Caccamo, F., Calatroni, S., Torretta, V., Katsoyiannis, A., Carnevale, M. y Rada, E. (2021). Applications of Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) and characteristics of its microbial community: A review of bibliometric trends and recent findings. International journal of environmental research and public health. <https://doi.org/10.3390/ijerph181910326>

Carvajal, C. (2020). Modelo para comparar diseños de filtro percolador. Tesis magister. Bogotá, Colombia. Disponible: <https://bit.ly/3n9FRf2>

CONAGUA. (sf). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos de oxidación bioquímica con biomasa fija. México.

CONAGUA. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. México. ISBN: 978-968-817-880-5.

CONAGUA. (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario. Disponible en: <https://bit.ly/44UADo2>

CONAGUA. (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Tratamiento y disposición de lodos. Disponible en: <https://bit.ly/3K65g1P>

CONAGUA (sf). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento. México.

Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. McGraw Hill.

DANE. (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda. Proyecciones de población a nivel municipal. Periodo 2018 - 2035. Colombia.

Dávila, G. y Razo, E. (2007). Producción biológica de hidrógeno por vía fermentativa: Fundamentos y perspectivas. Disponible en: <https://bit.ly/3Qp2TeN>

Davis, M. y Masten, S. (2005). Ingeniería y Ciencias Ambientales. McGraw-Hill Interamericana.

Departamento Nacional de Planeación. (2020). Documento CONPES 4004: Economía circular en la gestión de los servicios de agua potable y manejo de aguas residuales. Disponible en: <https://bit.ly/3hDQrIK>

Departamento de Protección Ambiental (2016). Module 20: Trickling Filters. Disponible en: <https://bit.ly/3WMrqup>

Díaz, E., Alvarado, A. R., y Camacho, K. E. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. Quivera. Revista de Estudios Territoriales. Disponible en: <https://bit.ly/3Z8Uzl9>

Dodane, P. y Ronteltap, M. (2014). Lechos de secado sin plantas. manejo de lodos fecales, IWA Publishing.

Duque, Y. y Castillo, L. (2010). Diagnóstico del sistema combinado reactor UASB – filtro aerobio para el tratamiento de aguas residuales domésticas en el Valle del Cauca. Tesis pregrado. Universidad del Valle. Colombia.

Ellis, T. (2004). Chemistry of wastewater. Environmental and Ecological Chemistry - Vol. II. Disponible en: <https://bit.ly/3X9gVBn>

EPM. (2010). Manual para la Referenciación de Redes de Acueducto y Alcantarillado. Disponible en: <https://bit.ly/46Ri9H7>

Fahad, A., Radin, M., Saphira, M., Bakar, R. y Al-Sahari, M. (2019). Wastewater and its Treatment Techniques: An Ample Review. Indian Journal of Science and Technology. <https://doi.org/10.17485/ijst/2019/v12i25/146059>

Conil, P. (2004) La tecnología anaerobia UASB en el tratamiento de las aguas residuales domésticas: 10 años de desarrollo y maduración en América Latina. BIOTEC. Bélgica. Disponible en: <http://bit.ly/3Z0kSJ6>.

Falconer, I. (2006). ¿Are endocrine disrupting compounds a health risk in drinking water? International Journal of Environmental Research and Public Health. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph2006030020>

Ferrera, E., Ruigómez, I. y Vera, L. (2022). Preliminary Study of Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Technology for Energy Recovery from Domestic Wastewater. Bioresource Technology. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.039>

Foladori, P; Andreottola, G; Ziglio, G. (2013). Sludge Reduction Technologies in Wastewater Treatment Plants. IWA Publishing. Disponible en: <https://bit.ly/3DnpikQ>

Freire, E; Bohrer, J; Leite, C; Rafael, G. (2018). Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas. Disponible en: <https://bit.ly/44vfjpp>

García, M y Pérez, J. (Sf). Aguas Residuales. Composición. Disponible en: <https://bit.ly/3pTx5nn>

Goli, A., Shamiri, A., Khosroyar, S., Talaiekhosani, A., Sanaye, R. y Azizi, K. (2019). A review on Different Aerobic and Anaerobic Treatment Methods in Dairy Industry Wastewater. *Journal of Environmental Treatment Techniques*. Disponible en: <https://bit.ly/3VJJ6ph>

Gutiérrez, C., Pérez, J. y García, J. (2005). Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales mediante filtros percoladores. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba.

Heinss, U., Larmie, S.A., y Strauss, M. (1998). Solids Separation and Pond Systems for the Treatment of Faecal Sludges in the Tropics – Lessons Learnt and Recommendations for Preliminary Design. Report No. 05/98. Dübendorf, Suiza: EAWAG/SANDEC.

Henao, P. (2021). Estudio de un modelo físico a escala de un desarenador, para establecer la eficiencia de tres tipos de pantallas deflectoras. Tesis magíster. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Hernández, A. (1998). Depuración de aguas residuales. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Hidalgo, T. (2017). Guía práctica para aforar en canales y cauces naturales, utilizando Instrumentación básica y de bajo costo. Tesis pregrado. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador, Quito.

Jaramillo, A. (1985). Tratamiento biológico de las aguas residuales. Universidad del Valle. Colombia.

Jordão E. y Pessôa C. (2011). Tratamiento de esgotos domésticos. 6ta edição. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Rio de Janeiro, Brasil.

Kassab, G., Halalsheh, M., Klapwijk, A., Fayyad, M. y van Lier, J. (2010). Sequential anaerobic–aerobic treatment for domestic wastewater – A review. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.039>

Kujawa, R. y Zeeman, G. (2006). Anaerobic Treatment in Decentralised and Source-Separation-Based Sanitation Concepts. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11157-005-5789-9>

Kobayashi, T., Li, Y., Harada, H., Yasui, H., y Noike, T. (2009). Upgrading of the anaerobic digestion of waste activated sludge by combining temperature-phased anaerobic digestion and intermediate ozonation. *Water Science and Technology*. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.510>

Larsen, T., Udert, K. y Lienert, J. (2013). Source Separation and Decentralization for Wastewater Management. IWA Publishing. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/9781780401072>

Luna, J. (2022). Efecto de carga hidráulica y carga orgánica de las aguas residuales domésticas en el desarrollo de la capa biológica en el medio filtrante filtros percoladores de la localidad de Tuyururi - 2019. Tesis pregrado. Universidad Nacional, Perú. Facultad de Ciencias del Ambiente.

Lawrence K; Wang, N; Yung, H. (2007). Biosolids Treatment Processes (1a ed., pp. 403–430). Humana Press. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-1-59259-996-7>

Lesikar, B., y Enciso, J. (2001). Sistemas individuales para el tratamiento de aguas negras: filtro percolador. Texas A & M. Disponible en: <http://bit.ly/3hxPBwR>.

Lettinga, G. y Hulshoff Pol, L.W. (1991) UASB process design for various types of wastewater. Water Science & Technology. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wst.1991.0220>

Lin, S. (2014). Wastewater Engineering. En Water and Wastewater Calculations Manual. Tercera edición. McGraw-Hill Education. Disponible en: <http://bit.ly/3hxpezz>

Lofrano, G. y Brown, J. (2010). Wastewater management through the ages: A history of mankind. The Science of the Total Environment. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.062>

Mara, D. (2003). Domestic wastewater treatment in developing countries. Earthscan. London. United Kingdom.

Maldonado, V. (2000). Capítulo 7 Sedimentación, Manual I para Plantas Potabilizadoras, Tomo II.

Mburu, N., Tebitendwa, S., van Bruggen, J., Rousseau, D. y Lens, P. (2013). Performance comparison and economics analysis of waste stabilization ponds and horizontal subsurface flow constructed wetlands treating domestic wastewater: A case study of the Juja sewage treatment works. Journal of Environmental Management. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.031>.

Méndez, G., Sánchez, C. y Muyo, J. (2018). Manual técnico sobre tecnologías biológicas aerobias aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales. CYTED. España.

Metcalf, J., y Eddy, M. (1994). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. McGraw-Hill. Madrid, España.

Metcalf, J., y Eddy, M. (2003). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. Cuarta Edición. McGraw-Hill.

Mosquera, S y Gómez, S. (2018) Evaluación técnica, ambiental, social y económica de la planta de tratamiento de agua residual Ginebra (Valle Del Cauca). Tesis Pregrado. Universidad del valle. Facultad de Ingeniería.

Nada, T., Moawad, A., El-Gohary, F. y Farid, M. (2011) Full-scale municipal wastewater treatment by up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) in Egypt, Desalination and Water Treatment. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2577>.

Nnaji, C. (2013). A Review of the Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor. Desalination and water treatment. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.800809>

Norma Técnica Colombiana NTC 4145. (2012) Accesibilidad de las personas al medio físico. edificios y espacios urbanos y rurales. Escaleras. ICONTEC.

Noyola, A., Morgan-Sagastume, J., Guereca, L. (2013). Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Guía de Apoyo para Ciudades Pequeñas y Medianas. México.

Ospina, J. (2004) Memoria de diseño y planos técnicos de la PTAR La Dorada. San Miguel, Putumayo, Colombia.

OPS. (2003). Especificaciones técnicas para el diseño de trampa de grasa. Lima. Disponible en: <https://bit.ly/3OiEplL>

OPS. (2005). Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores. Lima. Disponible en: <https://bit.ly/3rEJ1tF>

Organización Mundial de la Salud. (2019). Saneamiento. Disponible en: <https://bit.ly/3OyLspB>

Organización Mundial de la Salud. (2020). Las 10 principales causas de defunción. Disponible en: <https://bit.ly/3q0EnG4>

Pescad, M. (1971). Sludge handling and disposal in tropical developing countries. Journal of Water Pollution and Control Federation.

Philomina, A., Konaté, Y., Sawadogo, B., Sagoe, G., Dweumfour, B., Ahmed, I. y Williams, M. (2022). Performance evaluation of a full-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor coupled with trickling filters for municipal wastewater treatment in a developing country. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10129>.

Pontes, P., Chernicharo, C. Frade, E., y Porto, M. (2003). Performance evaluation of an UASB reactor used for combined treatment of domestic sewage and excess aerobic sludge from a trickling filter. Water Science and Technology. <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0406>.

RAS. (2000). Sección II. Título E. Tratamiento de Aguas Residuales. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Económico. Colombia.

RAS. (2017). Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Colombia.

Reyes, S. y Mazzoco R. (2009). Efecto de las cargas hidráulica y orgánica sobre la remoción másica de un empaque estructurado en un filtro percolador. Revista Mexicana de Ingeniería Química.

Rincón, C., Valencia, F., Flores, M., y Camacho, O. (2009). Filtro percolador. Universidad de Pamplona. Disponible en: <http://bit.ly/3E1SpKt>.

Ríos, D., y Rafael, A. (1980). Sistema de tratamiento de aguas residuales. Vol 3. Universidad del Valle. Colombia. Rodríguez, J. (2006). Arranque y operación de reactores anaerobios. Disponible en: <https://bit.ly/3Z5ogCp>. Rodríguez, J., García, C., y Penagos, J. (2015). Analysis

of the investment costs in municipal wastewater treatment plants in Cundinamarca. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n192.44699>.

Rodríguez, J. (2022). Curso Diseño de PTAR, Clase 8: Diseño de Desarenadores. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Rodríguez, J. (2022). Curso Diseño de Reactores Anaerobios, Clase 13: Diseño de Reactor UASB. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Rodríguez, J. (2022). Curso Diseño de PTAR, Clase 12: Diseño de Filtro Percolador. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Romero, J. (2004). Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. Tercera Edición. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

Rosales, E. (2019). Diseño de un Tanque UASB para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Universidad Estatal del Sur de Manabí del Cantón Jipijapa. Universidad Estatal del Sur de Manabí.

Ruiz, I.; Álvarez J.A. y Soto, M. (2000). El potencial de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales urbanas y efluentes de baja carga orgánica. Universidade da Coruña. España.

Sánchez, J. y Jerez, L. (2018). Estudio del porcentaje de eficiencia de la remoción de arenas en desarenadores de flujo horizontal construidos respecto a teorías de diseño. Proyecto de grado. Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia.

Schellinkhout, A., Lettinga, H., Van Velsen, L. y Louwe, J. (1985). The application of the UASB reactor for the direct treatment of domestic wastewater under tropical conditions. Switzenbaum MS.

Shifrin, N. (2005). Pollution management in the twentieth century. Journal of Environmental Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:5\(676\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:5(676))

Singh, K., Viraraghavan, T. y Bhattacharyya, D. (2006). Sludge blanket height and flow pattern in UASB Reactors: Temperature effects. Journal of Environmental Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2006\)132:8\(895\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:8(895))

Strande, L., Ronteltap, M., y Brdjanovic, D. (2014). Manejo de lodos fecales: un enfoque sistémico para su implementación y operación. Tanques de sedimentación y espesamiento.

Superintendencia De Servicios Públicos Domiciliarios -(SSPD) (2019). Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado. Colombia.

Takács, I. y Ekama, G. A. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño. Capítulo 12: Sedimentación Secundaria. IWA Publishing, London, United Kingdom.

TL Ingeambiente. (2016). Rosetón para tratamiento de aguas residuales. Disponible en: <https://bit.ly/3rxtg7L>

Tilley, E; Ulrich, L; Lüthi, C; Reymond, P; Schertenleib, R; Zurbrügg, C. (2018). Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento. Dübendorf (Suiza): Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática (Eawag), 2da. edición revisada Disponible en: <https://bit.ly/3O2pLh3>

Torres, E. (1994). Proyecto de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas para reúso del agua en la agricultura. Universidad autónoma de nuevo león. Facultad de Agronomía.

Torres, E. (2018). Evaluación de las condiciones de las áreas rurales colombianas para la implementación de filtros verdes como tratamiento de agua residual. Tesis Pregrado. Universidad Católica De Colombia. Facultad de Ingeniería.

Torres, P. (2012). Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. Disponible en: <https://bit.ly/40lrliH>.

Torres, P., Rodríguez, J., Suárez, C. & Duque, Y. y Enríquez, L. (2016). Analysis of the performance of the upflow anaerobic sludge blanket – trickling filter configuration for treating domestic sewage at full scale. Afinidad -Barcelona-. Disponible en: <https://bit.ly/3GDLppD>

UNESCO (2017). Las aguas residuales: Un recurso desaprovechado. Informe mundial sobre el desarrollo de los recursos hídricos.

UNESCO (2017). ¿Son las aguas residuales el nuevo ‘oro negro’?. Disponible en: <https://es.unesco.org/news/son-aguas-residuales-nuevo-oro-negro>

Van Haandel, A. y Lettinga, G. (1994) Anaerobic sewage treatment: A practical guide for regions with a hot climate. John Wiley and Sons. Chichester, United Kingdom.

Van Lier, J., Mahmoud, N. y Zeeman, G. (2008). Biological Wastewater Treatment: Principles Modelling and Design. Capítulo 16. ISBN: 9781843391883. IWA Publishing, London, United Kingdom.

von Sperling, M. y Chernicharo, C. (2005). Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions. Department of Sanitary and Environmental Engineering. Federal University of Minas Gerais. IWA Publishing. Brazil.

Velázquez, S., Linares, I., Jiménez, M., Espinoza, M. y Chávez, M. (2018). Fundamentos y avances en la desinfección del agua residual. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/325128348\\_Fundamentos\\_y\\_avances\\_en\\_la\\_desinf](https://www.researchgate.net/publication/325128348_Fundamentos_y_avances_en_la_desinf)  
Wang, L; Shammass, N; Selke, W; Aulenbach, D. (2010). Flotation technology springer.

Water Environment Federation. (2010). Design of Municipal Wastewater Treatment Plants: WEF Manual of Practice No. 8 ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 76, 5th ed. McGrawHill, New York.

Wang, L., Shammass, N., Selke, W., Aulenbach, D. (2010). Flotation technology springer.  
Ziauddin, S., Graham, D. y Dolfing, J. (2013). Wastewater Treatment: Biological. School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University.  
<https://doi.org/10.1201/9781003045045-61>.