PRODUCTO 3

INFORME TÉCNICO DEL ARRANQUE Y PUESTA EN MARCHA DE LA PTAR BARRIO HORIZONTES, CORREGIMIENTO DE PUERTO PERALES, MUNICIPIO DE PUERTO TRIUNFO

CONTRATO: No. S-CPS-831-2025

ACTA DE INICIO: 5 de enero de 2026

PARTES: CORNARE & CEAM

SUPERVISORA: Beatriz Elena Tamayo Correa

Tabla de contenido

1. INTRODUCIÓN *3*
2. OBJETIVOS *4*
2.1 Objetivo general 4
2.2 Objetivos específicos 4
3. ALCANCE *4*
4. MARCO CONCEPTUAL *5*
4.1 Agua residual doméstica (ARD) 5
4.2 Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas 5
4.3 Tecnología MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) 6
4.4 Parámetros operativos críticos 7
4.5 Parámetros de calidad del efluente — Resolución 0699 de 2021 8
5. INFORME TÉCNICO DE SEGUIMIENTO *10*
5.1 Caudal de diseño 11
5.2 Canal de entrada 11
5.2.1 Estado actual 11
5.3 Unidad de cribado 14
5.3.1 Estado actual 15
5.4 Canal desarenador 16
5.4.1 Estado actual 17
5.5 Vertedero sutro 19
5.5.1 Estado actual 20
5.6 Bypass después de preliminares 22
5.6.1 Estado actual 22
5.7 Consideraciones para la optimización del perfil hidráulico 24
5.8 Sistema compacto MBBR 25
5.8.1 Estado actual 26
5.8.2 Parámetros operativos del sistema compacto MBBR 30
5.9 Sistema Fotovoltaico 33
5.10 Campo de infiltración 35
5.11 Gestión de lodos 36
6. BIBLIOGRAFÍA *39*

1. INTRODUCIÓN

La calidad del recurso hídrico es resultado tanto de fenómenos naturales como de la intervención humana, siendo la descarga de aguas residuales sin tratar una de las principales fuentes de contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. En este contexto, el tratamiento de aguas residuales domésticas en los centros poblados constituye un elemento clave para la protección del recurso hídrico y la salud pública.

El presente documento es uno de los productos del contrato suscrito entre CORNARE y CEAM, y tiene como propósito evaluar el estado actual de la PTAR Barrio Horizontes del corregimiento de Puerto Perales en el municipio de Puerto Triunfo, verificar las condiciones para su puesta en marcha mediante la verificación hidráulica de las unidades de tratamiento, la estimación de los TRH e identificar las alternativas de optimización que deberán implementarse en etapas posteriores para garantizar el cumplimiento sostenido de los límites de vertimiento y la consecuentemente, de la calidad del recurso hídrico.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar el estado de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del barrio Horizontes, en el corregimiento Puerto Perales (Puerto Triunfo), verificando las condiciones de la infraestructura para su puesta en marcha, así como identificar alternativas encaminadas a optimizar el funcionamiento hidráulico y operativo del sistema de tratamiento en etapas posteriores.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar la inspección técnica de las estructuras y unidades que conforman la PTAR del barrio Horizontes, con el fin de identificar su estado físico y funcional.
- Identificar las necesidades de mantenimiento, adecuación o intervención requeridas para garantizar la operatividad del sistema de tratamiento.
- Identificar alternativas de optimización orientadas a mejorar el funcionamiento hidráulico y operativo de la PTAR.
- Formular recomendaciones técnicas para la implementación de acciones de mejora y fortalecimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales.

3. ALCANCE

Reportar el estado actual de la PTAR Barrio Horizontes, incluyendo la verificación hidráulica de sus unidades de tratamiento y las condiciones requeridas para su puesta en marcha. Los elementos pendientes de implementación en la

infraestructura existente constituyen el insumo técnico para la formulación de recomendaciones de optimización a desarrollar en etapas posteriores.

4. MARCO CONCEPTUAL

4.1 Agua residual doméstica (ARD)

Las aguas residuales domésticas son aquellas provenientes del uso del agua en actividades del hogar, tales como el lavado, la preparación de alimentos, el aseo personal y la descarga de inodoros. Su composición incluye materia orgánica biodegradable, sólidos suspendidos, nutrientes como nitrógeno y fósforo, grasas y aceites, y microorganismos patógenos. La concentración de los contaminantes varía segun los hábitos de la población, el consumo per cápita de agua y las características socioeconómicas de la población (Metcalf & Eddy, 2014).

4.2 Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas

Un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas (STAR) tiene como propósito remover los contaminantes presentes en el agua residual hasta alcanzar una calidad que permita su disposición final sin generar impactos negativos sobre el ambiente y la salud pública. Los STAR se estructuran en niveles de tratamiento que actúan de forma secuencial, y cuya combinación determina la eficiencia global del sistema (Romero, 2000).

La PTAR Barrio Horizontes cuenta con los siguientes niveles de tratamiento, según lo consignado en el permiso de vertimientos. Pretratamiento: Conformado por un canal de entrada con rejas de cribado con pasarela y castillas, un par de desarenadores, un vertedero tipo proporcional sutro y zona de depósito de

arenas, cada una con sus respectivas compuertas de aislamiento. Tratamiento primario y secundario: llevado a cabo mediante una PTAR Compacta de tecnología MBBR, que integra en una sola unidad los procesos biológicos de remoción de materia orgánica, clarificación y pulimento del efluente.

4.3 Tecnología MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor)

El reactor de biopelícula de lecho móvil, conocido por sus siglas en inglés MBBR (*Moving Bed Biofilm Reactor*), es un proceso híbrido de tratamiento biológico de aguas residuales que incorpora materiales de soporte dentro de un reactor de crecimiento suspendido (Riffat, 2013). Fue desarrollado en Noruega a finales de la década de 1980, como respuesta a las limitaciones que presentaban los sistemas de biopelícula convencionales para la remoción de nitrógeno en efluentes de alta carga orgánica (Santos et al., 2020).

Su principio de funcionamiento se basa en la combinación de dos mecanismos biológicos: la biomasa suspendida, característica de los sistemas de lodos activados convencionales, y la biomasa adherida, propia de los sistemas de biopelícula. Para promover la adherencia de la biomasa, se introducen en el reactor pequeñas piezas de polietileno de alta densidad (HDPE), denominadas *carriers* o soportes, sobre cuya superficie se forma y desarrolla la biopelícula microbiana activa. Estos soportes se mantienen en suspensión y en movimiento continuo a lo largo de todo el volumen del reactor, quedando retenidos mediante tamices ubicados en el extremo de salida (Yang Qiqi et al., 2012).

En la PTAR Barrio Horizontes, el proceso biológico implementado corresponde a este tratamiento de crecimiento adherido en condiciones aerobias, donde los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica están

fijos sobre los *carriers*, mientras el homogenizador aireado promueve las bacterias aeróbicas necesarias para garantizar la eficiencia biológica del sistema.

4.4 Parámetros operativos críticos

Las PTAR con tecnologías de biopelícula de lecho móvil operan bajo el principio de remoción secuencial de contaminantes, donde parámetros como el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), la Relación de Llenado (*FR*) de los medios de soporte biológico y la concentración de oxígeno disuelto (OD) son determinantes en el desempeño de las unidades de tratamiento (Santos et al., 2020; Yang Qiqi et al., 2012). Un TRH insuficiente limita los procesos de estabilización biológica, mientras que condiciones inadecuadas de aireación o de llenado del reactor comprometen la eficiencia de remoción de materia orgánica y la calidad del efluente entregado al campo de infiltración.

La eficiencia del reactor MBBR está determinada por tres parámetros operativos fundamentales. La Relación de Llenado (*Filling Ratio* — FR) debe mantenerse entre 20% y 70%, siendo el 40% el valor óptimo que garantiza mayor estabilidad y eficiencia de remoción de DQO, alcanzando hasta un 95% en operación continua (Santos et al., 2020). El Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) debe ser de mínimo 4 horas cuando se opera con FR del 40%, tiempo necesario para que los procesos de degradación biológica se complete y finalmente, la concentración de Oxígeno Disuelto (OD) debe mantenerse en niveles adecuados mediante el homogenizador aireado, garantizando la actividad metabólica de los microorganismos aerobios de la biopelícula y evitando condiciones anóxicas no deseadas en el reactor (Yang Qiqi et al., 2012).

4.5 Parámetros de calidad del efluente — Resolución 0699 de 2021

Dado que el vertimiento de La PTAR Horizontes es a suelo, el marco normativo aplicable para las características de sus efluentes es la Resolución 0699 de 2021, que establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas Tratadas al suelo. Esta resolución define los criterios que debe tener el efluente para cumplir con las condiciones establecidas en el permiso de vertimientos. Para la PTAR del Barrio Horizontes aplica la Tabla 2, Categoría III, tal como se indica en el Artículo Tercero, numeral 2 del permiso de vertimientos. Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, y sus valores límites máximos permisibles establecidos en el Artículo 4 de la Resolución 0699 de 2021, que debe cumplir el efluente de la PTAR en el punto de control del vertimiento son los siguientes:

Tabla 1. Criterios de calidad del efluente exigibles a la PTAR Horizontes

Parámetros	**Unidad**	**Categoría III**
Generales		
Temperatura	°C	±5°C del promedio anual
pH	-	6.5–8.5
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	200
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	90
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	1.5
Grasas y aceites	mg/L	20
Fenoles	mg/L	0.01
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	0.5
Conductividad eléctrica	µS/cm	700
Compuestos de fósforo		
Fósforo total (P)	mg/L	2
Compuestos de nitrógeno		
Nitratos ($N\text{-}NO_3^-$)	mg/L	10
Nitrógeno total (N)	mg/L	20
Parámetros de salinidad y sodicidad		
Relación de Absorción de Sodio (RAS)	-	3
Cloruros (Cl^-)	mg/L	140

Sulfatos ($SO4^{2-}$)	mg/L	250
Metales y metaloides		
Aluminio (Al)	mg/L	1
Cadmio (Cd)	mg/L	Análisis y reporte
Zinc (Zn)	mg/L	2
Cobre (Cu)	mg/L	1
Cromo (Cr)	mg/L	Análisis y reporte
Manganeso (Mn)	mg/L	0.2
Plata (Ag)	mg/L	0.05
Plomo (Pb)	mg/L	0.1
Hidrocarburos		
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/L	1
Parámetros microbiológicos		
Coliformes totales	NMP/100 mL	Análisis y reporte

5. INFORME TÉCNICO DE SEGUIMIENTO



Figura 1. Vista aérea de la PTAR Horizontes.
Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

El sector Horizontes del corregimiento de Puerto Perales cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas dimensionada para un caudal de diseño de 0,45 L/s, con disposición final del efluente tratado mediante un campo de infiltración.

El tren de tratamiento de esta PTAR está conformado por las siguientes unidades:

- Un (1) canal de entrada
- Dos (2) rejas de cribado dispuestas en paralelo
- Un (1) canal desarenador de dos (2) módulos en paralelo
- Un (1) vertedero sutro
- Un (1) bypass después de preliminares
- Un (1) sistema compacto MBBR
- Un (1) campo de infiltración al suelo tipo espina de pescado

5.1 Caudal de diseño

Para el dimensionamiento de la PTAR del sector Horizontes se consideró una población de 304 habitantes, distribuidos sobre un área tributaria de 3,80 ha, con una densidad de 80 hab/ha, una ocupación promedio de 4 habitantes por vivienda y 20 viviendas por hectárea. Con base en estos parámetros poblacionales y en la dotación neta asignada, las memorias de cálculo establecen un caudal de diseño de 0,49 L/s**,** valor que sirve de referencia para la verificación hidráulica de cada unidad del tren de tratamiento. Cabe señalar que el caudal autorizado en el permiso de vertimientos es de 0,45 L/s, correspondiente al caudal medio diario de aguas residuales domésticas.

5.2 Canal de entrada

Es la estructura en la cual descarga la tubería del interceptor de conducción en la planta de tratamiento (Galeano & Rojas, 2016). En esta unidad se depositan piedras, gravilla, algunas arenas y elementos con gran peso que son transportados por el alcantarillado, por esto su limpieza se limita a retirar el material depositado y así evitar que el agua residual sea evacuada por el vertedero de excesos sin ningún tratamiento (Ochoa, 2010).

5.2.1 Estado actual

El canal de entrada de la PTAR Horizontes está construido en concreto reforzado y cuenta con una tubería de ingreso en PVC de 8 pulgadas de diámetro. Durante la visita técnica se identificó la presencia de vegetación en el canal y un plástico utilizado para taponar la entrada a la planta, así como una derivación del flujo antes del ingreso al sistema de tratamiento (Figura 2). Asimismo, se observó una derivación del flujo previa al ingreso al sistema de tratamiento, que genera una descarga de agua residual cruda directamente sobre el suelo (Figura 3),

condición que puede corregirse fácilmente como parte de las actividades de alistamiento previas a la puesta en marcha.



(a) (b)

Figura 2. Canal de entrada PTAR Horizontes (a) Plástico en la caja de inspección previo al ingreso a la PTAR (b) presencia de maleza y residuos sólidos en canal
Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

Notas:

1. Para garantizar que todo el caudal ingrese al tren de tratamiento y se evite cualquier descarga por fuera del punto autorizado en el permiso de vertimientos, se recomienda retirar los residuos sólidos y la vegetación presentes en el canal, remover el plástico instalado en la caja de ingreso y limpiar los sedimentos acumulados en el fondo del canal, dado que estos materiales reducen la sección hidráulica.

2. Además, se recomienda aprovechar el canal de entrada como punto de muestreo del afluente, con el fin de conocer las características del agua residual que ingresa al sistema y consecuentemente ajustar los parámetros operativos. Como mínimo, se sugiere realizar mediciones periódicas de los siguientes parámetros en el afluente:
    - **pH:** indicador del equilibrio ácido-base del agua residual, cuyas variaciones extremas pueden inhibir la actividad biológica del reactor MBBR.
    - **Temperatura:** parámetro que influye directamente en la velocidad de las reacciones biológicas y en la eficiencia de remoción de materia orgánica del sistema.
    - **Conductividad eléctrica:** permite detectar variaciones en la concentración de sólidos disueltos e identificar posibles ingresos de aguas de origen diferente al doméstico.
    - **Sólidos sedimentables:** indicador de la carga de partículas gruesas que ingresan al sistema, útil para evaluar la eficiencia del pretratamiento y anticipar riesgos de colmatación en unidades posteriores, especialmente en el campo de infiltración.

3. Estas mediciones pueden realizarse con equipos portátiles de bajo costo y deben quedar registradas en una bitácora de operación, siendo esta información la línea base para el seguimiento del desempeño del sistema.

4. Se recomienda establecer una frecuencia de extracción de los sólidos del canal de entrada, acorde con base en la observación de la tasa de acumulación de material bajo las condiciones de operación.

Se identificaron dos puntos de descarga de aguas residuales sin tratar en la zona adyacente a los desarenadores (Figura 3) condición que se suma a la derivación observada en el canal de entrada.



(a) (b)

Figura 3. Puntos de descarga identificados en la PTAR Horizontes (a) descarga al lado del canal de entrada (b) descarga adyacente al desarenador. Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

Nota: Se recomienda eliminar o clausurar este punto de alivio, garantizando que la totalidad del caudal afluente sea conducido hacia el reactor biológico en cumplimiento de las condiciones establecidas en el permiso de vertimientos.

5.3 Unidad de cribado

El cribado es la operación unitaria que separa el material grueso del agua residual mediante su paso a través de rejas o cribas, constituyendo normalmente la primera barrera de protección en una planta de tratamiento. Su función es retener el material que podría dañar equipos, bloquear válvulas, tuberías y

accesorios, previniendo problemas de operación y mantenimiento en las unidades posteriores (Romero, 2000; Qasim & Zhu, 2018).

5.3.1 Estado actual

La PTAR Horizontes cuenta con dos rejas de cribado en paralelo para operación alterna, dotadas de canastillas de recolección y escurrimiento de los residuos sólidos, así como pasarela para el posicionamiento del operador durante las labores de mantenimiento. La infraestructura se encuentra correctamente instalada y en buen estado.



Figura 4. Unidad de cribado. Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

Notas:

1. Para garantizar el adecuado funcionamiento de esta unidad, se recomienda establecer rutinas de mantenimiento que incluyan la inspección y remoción periódica de los sólidos retenidos en las rejillas con una frecuencia mínima de tres veces al día, preferiblemente en los horarios

pico. Esto es muy importante para el buen desempeño del sistema, dado que el vertimiento se realiza al suelo, de modo que la acumulación de sólidos en las etapas iniciales incrementa progresivamente la carga sobre las unidades posteriores y puede comprometer la capacidad de infiltración y la vida útil del sistema de disposición final.

2. Se recomienda disponer de un rastrillo para la extracción de sólidos y un recipiente con tapa destinado exclusivamente al depósito temporal de los residuos extraídos.
3. El material extraído debe pesarse en cada jornada y registrarse en la bitácora de operación; el seguimiento de este indicador a lo largo del tiempo permite estimar la carga de sólidos gruesos que ingresa al sistema, identificar variaciones asociadas a eventos de lluvia o cambios en los hábitos de la comunidad, y ajustar la frecuencia de mantenimiento.

5.4 Canal desarenador

El desarenador es una unidad de pretratamiento destinada a la remoción de arenas, gravas y otras partículas inorgánicas de alta densidad, cuyo peso específico y velocidad de sedimentación son mayores que los de la materia orgánica. Su función principal es proteger las unidades y equipos ubicados en las unidades posteriores frente al desgaste mecánico, así como prevenir la acumulación de depósitos en tuberías, canales y demás estructuras (Romero, 2000). Su principio de funcionamiento se basa en la sedimentación diferencial: las partículas inorgánicas se depositan rápidamente en el fondo de la unidad, mientras que la materia orgánica, de menor densidad, permanece en suspensión y continúa su tránsito hacia las etapas de tratamiento posteriores (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005).

5.4.1 Estado actual

La PTAR Horizontes cuenta con dos canales desarenadores de flujo horizontal dispuestos en paralelo, dotados de compuertas de aislamiento y un sistema de desagüe que en la configuración actual corresponde al mismo bypass de la planta (Figura 5).Las tuberías de limpieza conducen hacia una caja forrada con geotextil para la retención de sólidos; sin embargo, esta configuración no garantiza la gestión adecuada del material sedimentado y puede presentar dificultades en la operación rutinaria (Figura 6).



Figura 5. Desarenador construido en PTAR Horizontes.
Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

Esto representa un riesgo , dado que al utilizar el bypass como mecanismo de evacuación de la fase líquida durante las jornadas de mantenimiento, las arenas depositadas en el fondo del canal inevitablemente van ser arrastradas junto con el flujo y terminar siendo descargadas en dicha caja. Esta situación se generaría dado que las compuertas de bypass se encuentran ubicadas a nivel de piso,

cualquier apertura de estas conlleva inevitablemente el arrastre del material sedimentado acumulado en el fondo del canal (Figura 6).



Figura 6. Desarenador y caja para desaguado de preliminares
Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

Notas:

1. Para corregir esto, se recomienda instalar en el fondo de la tolva del desarenador una tubería de drenaje independiente del bypass, que permita evacuar solamente la fase líquida durante las jornadas de mantenimiento. Esta tubería debe conectarse a una caja de válvulas que

permanezca cerrada y sea accionada únicamente durante la limpieza alternada de los canales.

2. Para evitar el escape de material sólido a través de esta tubería, se recomienda instalar tuberías perforadas para garantizar que únicamente la fase líquida sea evacuada mientras las arenas permanecen en el fondo de la tolva del desarenador para la extracción manual.
3. Asimismo, se recomienda implementar un sistema de desaguado para las arenas previo a su disposición final. Dado que durante el mantenimiento, las arenas extraídas tendrán una consistencia semilíquida debido a su alto contenido de humedad, lo que dificulta su manejo y transporte. Un sistema de desaguado permitirá reducir el contenido de humedad hasta obtener una consistencia manejable. Una vez desaguadas, las arenas deben ser entregadas al recolector para su transporte hasta el relleno sanitario.

5.5 Vertedero sutro

El vertedero Sutro es un dispositivo hidráulico de medición de caudal cuya característica fundamental es que el caudal (Q) es directamente proporcional a la carga hidráulica (H) (Pozo Román, s.f.). Esta linealidad se logra mediante una geometría en la que la forma de la escotadura sigue la expresión:

$$x = b \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(1 - \frac{a}{y}\right)\right)$$

donde x e y corresponden a las coordenadas de la escotadura, b es el ancho de la mitad de la base y a es la altura del rectángulo inferior (Pozo Román, s.f.).En este el caudal se calcula mediante las siguientes expresiones, según la condición de tirante:

Cuando el tirante supera el rectángulo inferior (H > a):

$$Q = 2b\sqrt{2ga}\left(H+\frac{a}{3}\right)$$

Cuando el tirante se encuentra dentro del rectángulo inferior (H < a):

$$Q_1 = \frac{4b\sqrt{2g}}{3}\left[(H+a)^{3/2} - H^{3/2}\right]$$

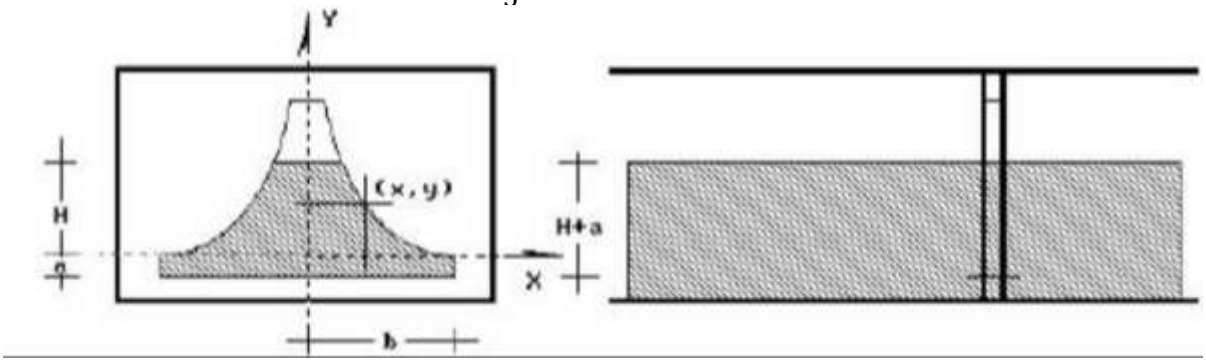


Figura 7. Representacion esquematica del vertedero sutro mostrando la geometría de escotadura y relación entre carga hidráulica (H) y ancho variable de sección. Fuente: Pozo Román, F. (s.f.). Medición de caudal. Capítulo 2, p. 46.

A partir del diseño se puede determinar la constante de proporcionalidad K que simplifica la estimación del caudal. Esta constante se derivada de los parámetros geométricos del vertedero, permite expresar el caudal como sigue:

$$Q = \mathrm{K} * h$$

donde *h* es la lámina de agua medida sobre la cresta del vertedero y *K* es la constante de descarga propia del diseño. De esta manera, el operador de la planta puede estimar el caudal que ingresa al sistema de tratamiento con tan solo medir el nivel del agua sobre el vertedero y aplicar esta expresión.

5.5.1 Estado actual

Durante la visita técnica se observó que el caudal afluente no lograba superar la altura del rectángulo inferior del vertedero Sutro, circulando por debajo de esta sección sin alcanzar la zona de control de la escotadura (Figura 8). Esto impide

que el vertedero opere bajo el régimen de proporcionalidad para el cual fue diseñado, imposibilitando la estimación de caudal.

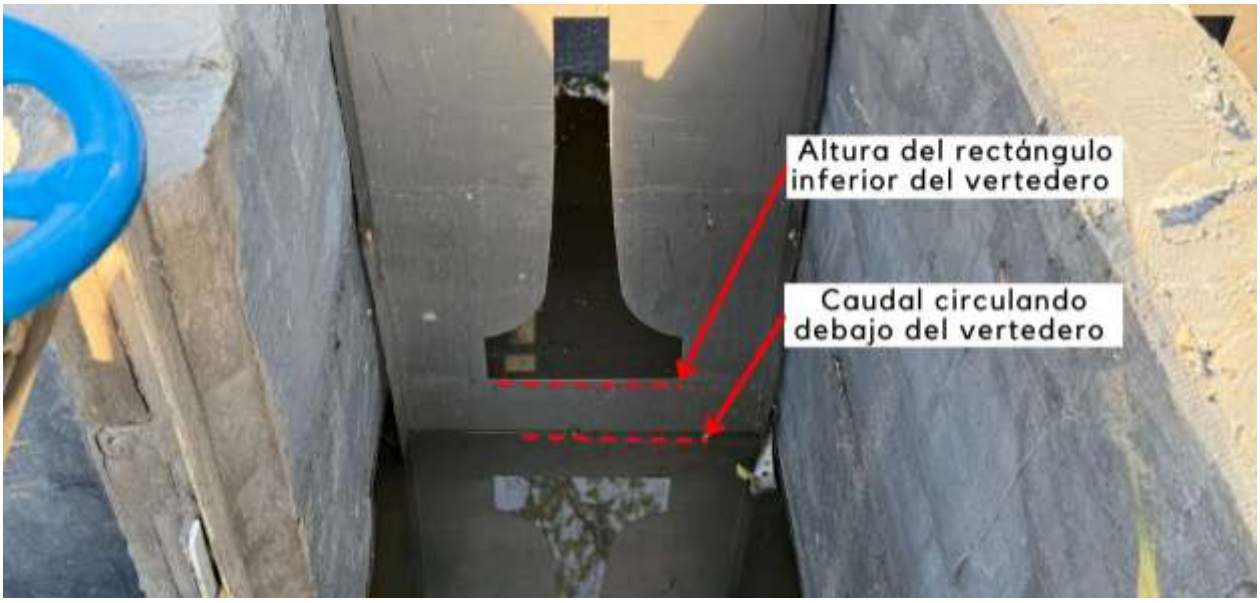


Figura 8. Altura de la cresta vertedero Sutro respecto al tirante en el canal.
Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

Notas:

1. Se recomienda ajustar la altura de la cresta del vertedero de manera que el tirante mínimo coincida o supere el nivel del rectángulo inferior, garantizando que los caudales bajos sean aforados.
2. Complementariamente, se recomienda instalar una regla limnimétrica, que permita al operario registrar el nivel de la lámina de agua e identificar los caudales.
3. Asimismo se recomienda que el diseñador del vertedero suministre al operario la constante K del diseño, acompañada de una tabla o curva de aforo que relacione el nivel de agua medido sobre la cresta con el caudal.

5.6 Bypass después de preliminares

El bypass es una estructura hidráulica de control que cumple dos funciones dentro del sistema de tratamiento. En primer lugar, permite desviar el flujo de agua residual cuando el caudal afluente supera el caudal de diseño de la PTAR, protegiendo las unidades posteriores de sobrecargas hidráulicas. En segundo lugar, actúa como mecanismo de protección del reactor biológico ante la detección de condiciones adversas en el afluente como presencia de tóxicos, variaciones extremas de pH o cargas orgánicas atípicas que puedan afectar la actividad de los microorganismos, permitiendo desviar temporalmente el flujo mientras se restablecen las condiciones normales de operación.

5.6.1 Estado actual

La unidad de bypass cuenta con compuertas tipo volante en acero, instaladas a nivel del fondo del canal desarenador (Figura 9).



Figura 9. Bypass después de preliminares.
Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

Durante la visita se observó que las compuertas no logran un cierre completo, permitiendo el paso continuo de una fracción del caudal hacia la caja #2 y posteriormente al suelo. Aunado a lo anterior, los vástagos de las compuertas se deflectan al ejercer el esfuerzo de cierre. Tal como se describió en las secciones anteriores, la ubicación de las compuertas a ras del fondo del canal implica que, al accionarlas, las arenas y sedimentos acumulados sean arrastrados junto con la fase líquida hacia la caja #2 (Figura 10).

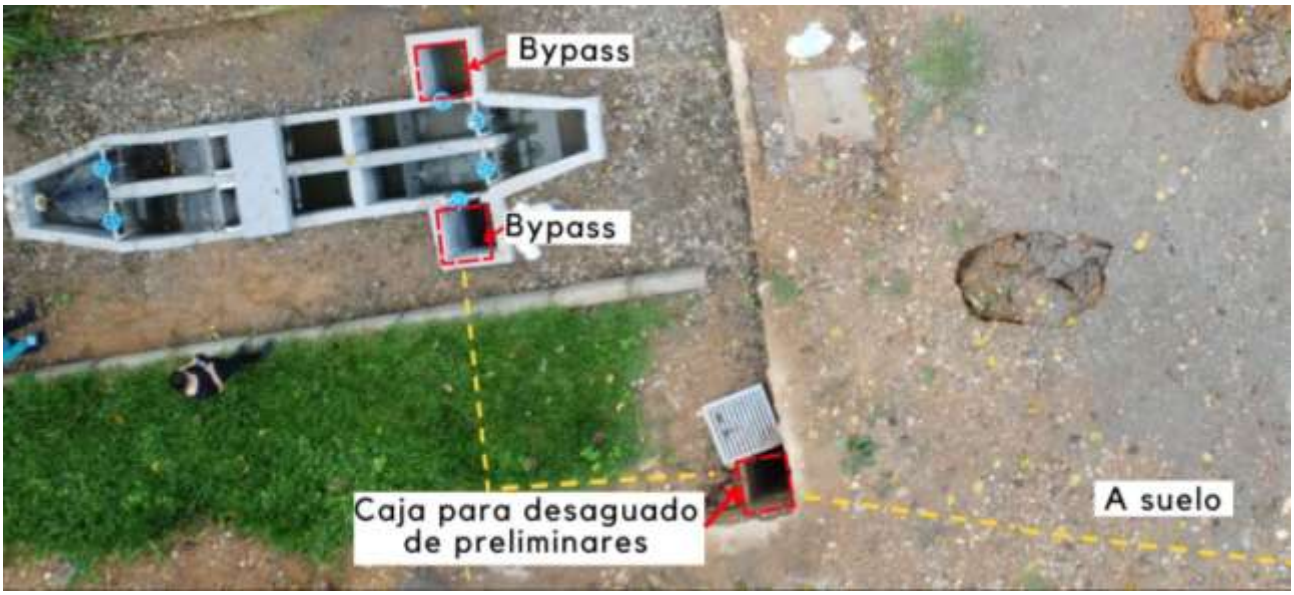


Figura 10. Sistema de bypass y caja de desaguado de preliminares.
Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

Notas:

1. Se recomienda reemplazar los vástagos por elementos de mayor rigidez.
2. Se recomienda elevar el umbral del vertedero del bypass respecto al fondo del canal desarenador, generando una altura P suficiente que evite el arrastre de sólidos sedimentados al momento de accionar las compuertas.
3. Se recomienda reconducir el agua y los sedimentos provenientes de la caja #2 hacia una unidad que permita la gestión adecuada de los sólidos

que allí se depositarían, eliminando la descarga al suelo y asegurando que todo el caudal reciba tratamiento antes de su vertido en el campo de infiltración.

5.7 Consideraciones para la optimización del perfil hidráulico

Durante las visitas de seguimiento realizadas a la PTAR en los meses de febrero, marzo y abril de 2026, se observó de manera recurrente que el nivel de la lámina de agua en las unidades de pretratamiento no alcanza la cota requerida para permitir el flujo continuo por gravedad hacia el reactor MBBR (Figura 11). Esta condición ha impedido en la mayoría de las ocasiones que el agua residual fluya hacia el reactor biológico.

Esta situación sugiere la necesidad de revisar el perfil hidráulico del sistema, verificando las cotas de instalación de las tuberías, las cajas de inspección intermedias y la entrada al MBBR, con el fin de identificar si existen restricciones hidráulicas que limiten el flujo bajo las condiciones de caudal promedio.

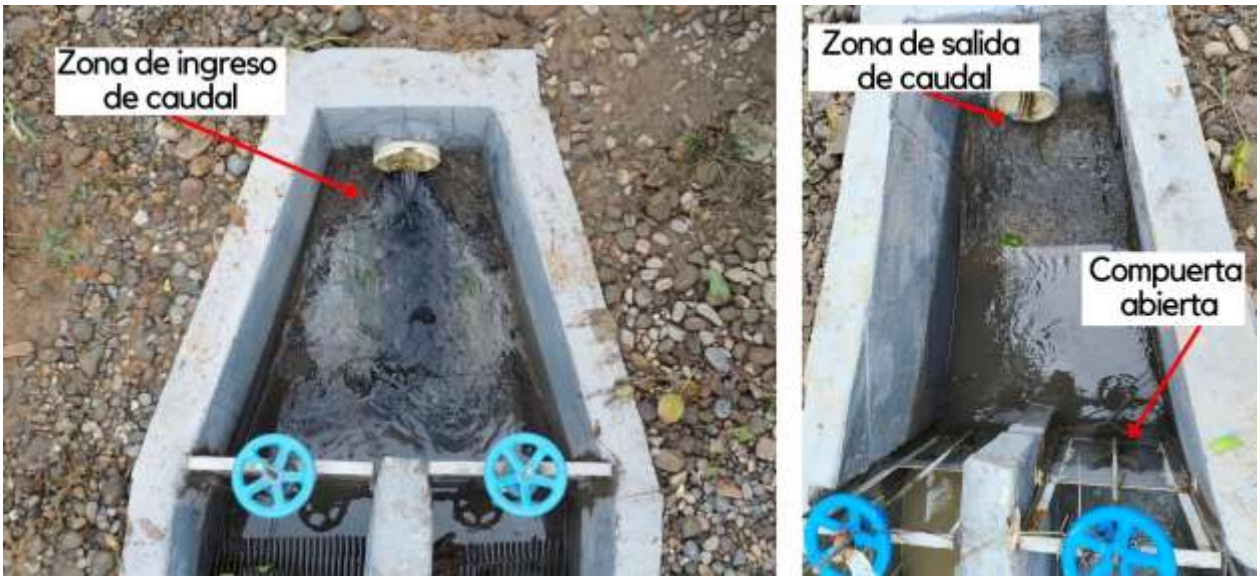




Figura 11. Condición de flujo hacia el reactor MBBR durante las visitas de seguimiento. Fuente: registro fotográfico visitas de febrero, marzo y abril de 2026.

Nota: Se recomienda que esta evaluación sea realizada por el diseñador del sistema o por un profesional con experiencia en hidráulica, y que sus conclusiones queden documentadas como insumo para las intervenciones de optimización.

5.8 Sistema compacto MBBR

El MBBR es un sistema que combina los procesos de crecimiento suspendido y crecimiento adherido, aprovechando la totalidad del volumen del reactor para el desarrollo de la biomasa. Para ello, utiliza medios flotantes de simple configuración, denominados *carriers* que actúan como soporte para el crecimiento adherido de la biopelícula microbiana. El movimiento continuo de estos *carriers* dentro del reactor es inducido por la agitación generada por las burbujas del sistema de aireación, garantizando un contacto permanente entre la biomasa, el sustrato orgánico y el oxígeno disuelto (Yang Qiqi et al., 2012).

Este sistema compacto de tratamiento es eficiente en la remoción de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, facilitando la separación de sólidos en la etapa de

clarificación. El diagrama ilustrado en la Figura 12, muestra la configuración típica del sistema, que incluye una zona pre-anóxica, zonas de aireación en serie, un sistema de recirculación de nitrato y una unidad de separación de sólidos para la producción del efluente final (Chaubey, 2021, p. 121).

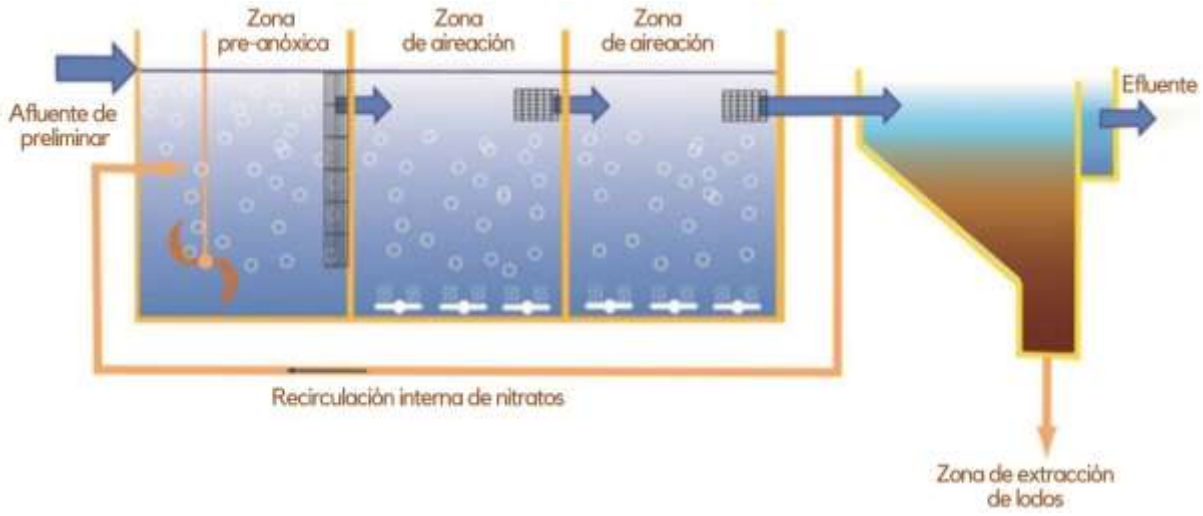


Figura 12. Diagrama de flujo del proceso de tecnologia MBBR.
Adaptado de Chaubey, M. (2021). Wastewater treatment technologies: Design considerations (p. 121). Wiley-Blackwell.

5.8.1 Estado actual

El sistema compacto MBBR instalado en la PTAR Horizontes corresponde a un reactor en PRFV, conformado por cuatro zonas de tratamiento integradas en una sola unidad: un reactor primario, un reactor biológico MBBR, un clarificador y una zona de almacenamiento de agua residual tratada (Figura 13). De acuerdo a los diseños, el sistema cuenta con un homogenizador aireado, filtros desodorizadores de carbón activado, tablero de control eléctrico y sistema de suministro de energía mediante paneles solares.

La estructura exterior en PRFV no presenta daños visibles como fisuras, deformaciones, abolladuras ni cambios de coloración (Figura 14). Sin embargo, dado que la obra aún no ha sido entregada a la fecha de la visita técnica, no

fue posible acceder al interior del reactor para verificar la presencia y condición de elementos como el agitador, los carriers y los difusores de aire.

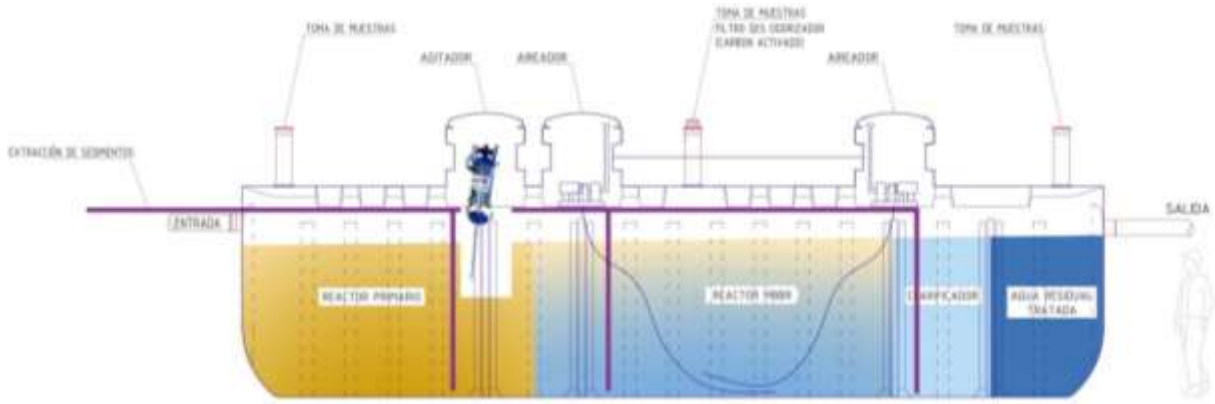


Figura 13. Esquema representativo del sistema compacto MBBR de PTAR Horizontes. Tomado de Unión Temporal Tratamiento Aguas Residuales (2025).

Nota: Se recomienda que, previo a la puesta en marcha, se realice una inspección del reactor que permita verificar la instalación de los difusores de aire, los carriers y el agitador.

El 28 de febrero de 2026 se realizó el inóculo del reactor biológico MBBR mediante la aplicación de Biodyne 301 Agroindustrial, un inoculante líquido de microorganismos formulado para sistemas de tratamiento de aguas residuales aerobios y anaerobios. Sin embargo, no fue posible obtener información del procedimiento de inoculación, desconociéndose parámetros como el volumen de producto aplicado, la presencia o ausencia de agua residual como sustrato inicial, y el estado del sistema de aireación durante la aplicación. A la fecha de la visita técnica no se había realizado ninguna inspección visual de los carriers ni existe registro fotográfico del desarrollo de biopelícula. Adicionalmente, se desconoce el número de días que el reactor ha permanecido sin recibir agua

residual, condición que representa riesgo de inanición y pérdida de la biomasa inoculada que se haya podido desarrollar por ausencia de sustrato.



Figura 14. Estructura exterior del Sistema compacto MBBR en PRFV.
Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

Nota: Se recomienda restablecer el flujo hacia el reactor y realizar una inspección visual de los carriers para evaluar el desarrollo de biopelícula. De no evidenciarse colonización, deberá efectuarse un nuevo proceso de inoculación, preferiblemente con biomasa activa proveniente de reactores que operen en condiciones similares, dado que este tipo de inóculo contiene comunidades microbianas ya adaptadas que reducirían el tiempo de arranque respecto al uso de inoculantes comerciales.

En cuanto a las conexiones hidráulicas, la tubería de entrada al reactor primario se encuentra conectada a la caja de inspección que viene del pretratamiento, y la tubería de salida del agua residual tratada está conectada a la caja de inspección que deriva al campo de infiltración. En la parte exterior del reactor se identificaron elementos como: tablero de control, filtro deodorizador, tapas de inspección y válvula para extracción de lodos del clarificador.



Figura 15. Identificación de las tuberías de ingreso y salida del reactor MBBR.
Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

Los taludes adyacentes al reactor MBBR no cuentan con obras de contención o estabilización (Figura 16). Se evidencio colapso parcial del talud adyacente a la estructura que podría derivar en deslizamientos que afecten la integridad del reactor en PRFV, material susceptible de fracturarse ante impactos o cargas no previstas en su diseño.



Figura 16. Colapso parcial del talud adyacente al reactor MBBR.
Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

Nota: Se recomienda perfilar los taludes con una pendiente uno horizontal por dos vertical y forrarlos con malla y grama poner una ronda de coronación en la cresta del talud.

5.8.2 Parámetros operativos del sistema compacto MBBR

La eficiencia del reactor biológico MBBR está condicionada por cuatro parámetros operativos que deben ser monitoreados y gestionados desde el arranque para garantizar su adecuado funcionamiento. A continuación se presenta la caracterización teórica de cada parámetro y su estado actual en el sistema.

Relación de Llenado (FR — Filling Ratio):

La FR es el parámetro de mayor influencia sobre la eficiencia del sistema, definida como la relación entre el volumen ocupado por los *carriers* y el volumen total del reactor biológico (VS/VR). Su rango óptimo se encuentra entre el 20% y el 70%, siendo el 40% el valor que produce los mejores resultados en operación (Santos et al., 2020). Odegaard (2006) recomienda mantener la FR por debajo del 70% para portadores plásticos cilíndricos, con el fin de garantizar una suspensión fluida y sin impedimentos del medio móvil (Yang Qiqi et al., 2012). En esta PTAR, los *carriers* ya se encuentran cargados dentro del reactor. Sin embargo, se desconoce el FR con la que fueron introducidos. Se recomienda obtener esta información del constructor o proveedor antes de la puesta en marcha, y verificarla mediante inspección en el reactor.

Tiempo de Retención Hidráulica (TRH):

El TRH es el tiempo promedio que el agua residual permanece en el reactor en contacto con la biomasa activa. Ahl et al. (2006) demostraron que el MBBR puede procesar altas cargas orgánicas con TRH de tan solo 4 horas, produciendo efluentes de alta calidad respecto a DBO, nitrógeno total y SST. Santos et al. (2020) confirmaron que con una FR del 40% es posible mantener remociones de

DQO del 95% con TRH de 4 horas, lo que representa una ventaja frente a los sistemas convencionales.

Para la PTAR Horizontes se estimaron los TRH de cada unidad bajo dos escenarios: el caudal máximo autorizado en permiso de vertimientos (0,45 L/s) y el caudal aforado durante la jornada de caracterización del 18 de marzo de 2026 (0,357 L/s). Los resultados se presentan a continuación:

1. Caudal máximo autorizado en el permiso de vertimientos (0,45 L/s).

$$TRH = \frac{15{,}9\ m^3}{0{,}00045\ \frac{m^3}{s}}$$

$$TRH = 35333\ \text{s}$$

$$\boldsymbol{TRH} = 35333\ s \times \frac{1\ h}{3600\ s}$$

$$\boldsymbol{TRH = 9{,}8\ h}$$

2. Caudal aforado durante la jornada de caracterización (≈ 0,357 L/s).

$$TRH = \frac{15{,}9\ m^3}{0{,}000357\ \frac{m^3}{s}}$$

$$TRH = 44537\ \text{s}$$

$$\boldsymbol{TRH} = 44537\ s \times \frac{1\ h}{3600\ s}$$

$$\boldsymbol{TRH = 12{,}37\ h}$$

El TRH estimado para el reactor biológico MBBR bajo condiciones reales es de 12,37 horas, valor ampliamente superior al mínimo de 4 horas reportado en la literatura, lo que indica que el reactor tiene capacidad hidráulica suficiente para tratar el caudal actual.

Oxígeno Disuelto (OD)

La concentración de OD en el reactor determina la actividad metabólica de los microorganismos aerobios de la biopelícula. La síntesis de enzimas en la biopelícula está influenciada por el nivel de oxígeno disponible, aunque las enzimas ya sintetizadas no se ven afectadas por variaciones en su disponibilidad (Yang Qiqi et al., 2012). El homogenizador aireado instalado en la cámara primaria cumple la doble función de homogenizar el caldo biológico y mantener los niveles adecuados de OD para sostener la actividad biológica del reactor.

Se cuenta con oxímetro portátil para la medición del OD en campo. Se recomienda realizar mediciones desde el inicio de la operación con una frecuencia mínima diaria durante la etapa de arranque. Adicionalmente, dado que el sistema fotovoltaico aún no ha sido verificado en condiciones de operación y se identificó que un árbol genera sombra sobre una fracción de los paneles, se recomienda verificar que la capacidad de generación energética sea suficiente para mantener el sistema de aireación operando de manera continua las 24 horas del día.

Carga Orgánica (OL — Organic Load)

Para la PTAR Horizontes, que está diseñada para tratar ARD de origen exclusivamente doméstico de 83 viviendas, la carga orgánica de entrada es relativamente baja y predecible, lo que favorece en principio la estabilidad del reactor. Los resultados de los análisis de laboratorio del afluente —DBO_5, DQO y SST— se encuentran pendientes. Una vez disponibles, se recomienda calcular la carga orgánica superficial aplicada en términos de g DBO/m^2·d, para lo cual será necesario conocer el área superficial efectiva de los *carriers* instalados, información que debe ser suministrada por el proveedor del sistema.

5.9 Sistema Fotovoltaico

El sistema fotovoltaico se encuentra conectado al tablero de control, el cual está correctamente instalado y energizado. No obstante, el arreglo de paneles sufre sombreado durante determinadas horas del día debido a la interferencia de la vegetación circundante. Este sombreado puede disminuir la eficiencia y la generación energética del sistema y favorecer la aparición de puntos calientes que pueden degradar aceleradamente las celdas y poner en riesgo la integridad de los módulos. Esta condición que puede reducir la capacidad de generación del sistema y comprometer la operación continua de los aireadores y del proceso biológico, dado que el reactor MBBR requiere aireación constante para mantener los *carriers* en suspensión, garantizar el contacto entre la biomasa y el sustrato, y sostener las condiciones aerobias necesarias para la degradación de la materia orgánica.



Figura 17. Árbol adyacente que genera sombreado parcial sobre los paneles solares instalados en la PTAR. Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

Adicionalmente, se identificó que los aireadores de la planta operan a una frecuencia nominal de 50 Hz, no obstante el Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Colombia tiene frecuencia estándar de 60 Hz. El diseño actual no

contempla un mecanismo de acoplamiento, transferencia o conmutación que permita conectar el sistema a la red del operador de red local para asegurar el respaldo energético necesario.

Adicionalmente, no se ha entregado informe de puesta en marcha donde se encuentren los diseños, memorias de cálculo y registros fotográficos del Sistema de Puesta a Tierra (SPT) y del Sistema de Protección contra Rayos (SIPRA). Asimismo, no se observa la instalación de sobretensiones transitorias (DPS) tanto en el lado de Corriente Continua (CC) como en Corriente Alterna (CA). Operar bajo estas condiciones viola el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Por otro lado, si bien el sistema aparenta ser autónomo (Off-Grid), la presencia de baterías no blinda al sistema ante fallos por descargas atmosféricas ni asegura la continuidad del servicio ante periodos prolongados de baja radiación solar.

Notas:

1. Se recomienda realizar un estudio de trayectoria solar y sombreado para cuantificar el impacto en el rendimiento energético. Como acciones correctivas, se debe proceder con la poda o reubicación del obstáculo vegetal o, en su defecto, evaluar la reubicación de las estructuras de soporte.
2. Se recomienda presentar los planos de un sistema de transferencia (manual o automática) y un esquema de sincronización que permita el suministro eléctrico las 24/7, mitigando el riesgo de paradas operativas.
3. Adicionalmente, el contratista debería entregar los protocolos de pruebas de resistencia de puesta a tierra, la certificación del RETIE para las protecciones del sistema (CC y CA) y sistemas de supresión de picos (DPS).

5.10 Campo de infiltración

Un campo de infiltración es una unidad de disposición de efluentes tratados, diseñada para la infiltración de aguas residuales previamente tratadas en el suelo. Su función es distribuir de manera uniforme el agua residual tratada sobre el terreno para que se infiltre de manera controlada en el suelo. De acuerdo con el Título E del RAS, los campos de infiltración deben ubicarse en terrenos con pendientes bajas, y la pendiente de los tubos distribuidores dentro del campo debe estar entre 0,3% y 0,5%, con el fin de favorecer una distribución uniforme del efluente a lo largo de toda la longitud de las zanjas y evitar la concentración del flujo en los puntos de menor cota.



Figura 18. Pendiente pronunciada de campo de infiltración de la PTAR Horizontes
Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

Durante la visita se observó que el campo de infiltración está ubicado en una zona con pendiente superior a la recomendada (Figura 18). Esta condición representa una oportunidad de mejora para etapas posteriores, dado que

pendientes elevadas pueden favorecer el desplazamiento del efluente tratado como escorrentía subsuperficial hacia la parte baja del talud, en lugar de promover su infiltración uniforme en el suelo.

Nota: Para optimizar el desempeño de esta unidad, se recomienda evaluar la posibilidad de realizar intervenciones de nivelación o terraceo de las zanjas distribuidoras.

5.11 Gestión de lodos

El manejo de lodos generados en la PTAR Horizontes fue proyectado inicialmente mediante extracción con vehículo Vactor y transporte hacia la PTAR principal del corregimiento de Puerto Perales, donde serían deshidratados en los lechos de secado existentes. Sin embargo, se identificaron dos condiciones que representan oportunidades de mejora para optimizar este esquema de gestión en etapas posteriores.

.



Figura 19. Estructura de acumulación de lodos PTAR Horizontes en tiempo seco.
Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

En primer lugar, la estructura destinada a la acumulación de lodos corresponde a un dado de pequeñas dimensiones cuyo volumen no es suficiente para alimentar un vehículo Vactor (Figura 19). A esta limitación se suma su ubicación, dado que está en la parte inferior de la vía de acceso construida sobre terreno natural y su diseño, dado que la tapa es una rejilla que permite el ingreso de materiales arrastrados por las lluvias. Durante la visita se observó que la estructura se encontraba con sedimentos (Figura 20).



Figura 20. Sedimentos arrastrados desde la vía de acceso.
Fuente: registro fotográfico visita técnica, 2026.

En segundo lugar, al verificar la disponibilidad de los lechos de secado de la PTAR principal del corregimiento, se encontró que estos operan bajo condiciones normales a su máxima capacidad dada la producción de lodos del sistema existente, lo que hace inviable la disposición de los lodos de la PTAR Horizontes en dicha infraestructura sin comprometer su operación.

Nota: Para etapas posteriores, se sugiere instalar un tanque de almacenamiento de lodos con capacidad mínima de 1 m³, ubicado en un sector protegido del arrastre de materiales externos y dotado de tapa hermética que impida el ingreso de sedimentos y aguas lluvias. Adicionalmente, se recomienda proyectar un sistema propio de deshidratación de lodos, dado que se evidencia la disponibilidad de terreno, y esta sería una alternativa de bajo costo y fácil implementación.

6. BIBLIOGRAFÍA

Chaubey, M. (2021). *Wastewater treatment technologies: Design considerations*. Wiley-Blackwell. https://lccn.loc.gov/2020032111

CORNARE. (2024). *Resolución N° 05233-2024. Por medio de la cual se otorga un permiso de vertimientos y se adoptan otras determinaciones*. Subdirección de Recursos Naturales. Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare. El Santuario, Antioquia, 10 de diciembre de 2024.

Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (4th ed.). McGraw-Hill.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá D.C.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Resolución 0699 del 15 de junio de 2021. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas Tratadas al suelo, y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.

Riffat, R. (2013). Fundamentals of wastewater treatment and engineering. CRC Press.

Santos, A. D., Martins, R. C., Quinta-Ferreira, R. M., & Castro, L. M. (2020). Moving bed biofilm reactor (MBBR) for dairy wastewater treatment. *Energy Reports*, 6, 340–344. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.158

Unión Temporal Tratamiento Aguas Residuales. (2025). *Memorias de diseño PTAR Horizontes, corregimiento Puerto Perales, municipio de Puerto Triunfo.*

Yang Qiqi, He Qiang, & Ibrahim, H. T. (2012). Review on moving bed biofilm processes. *Pakistan Journal of Nutrition*, *11*(9), 804–811. https://doi.org/10.3923/pjn.2012.804.811