



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ANÁLISIS DEL ARRANQUE, ESTABILIZACIÓN Y
OPERACIÓN DE UNA PTAR, EVALUANDO EL
DISEÑO DE LOS MÚLTIPLES DE DISTRIBUCIÓN DEL
AGUA RESIDUAL**

Astrid Lorena Macías Ospina

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental

Medellín, Colombia

2020



Análisis del arranque, estabilización y operación de una PTAR, evaluando el
diseño de los múltiples de distribución del agua residual

Autor:

Astrid Lorena Macías Ospina

Informe de práctica para optar al título de:
Ingeniera Sanitaria

Asesores:

Diana Catalina Rodríguez Loaiza (Ingeniera Sanitaria)

Francisco José Molina Pérez (Ingeniero Sanitario)

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia

2020

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	7
2. INTRODUCCIÓN	8
3. OBJETIVOS	9
3.1 Objetivo general	9
3.2 Objetivos específicos	9
4. MARCO TEÓRICO	10
4.1 Tren de tratamiento en las PTAR	10
4.2 Zona de entrada a las unidades de tratamiento	10
4.3 Tuberías con salidas múltiples	11
5. METODOLOGÍA	14
5.1 Lugar de estudio	14
5.2 Seguimiento y control en las PTAR	14
5.2.1 Medición de parámetros en la PTAR	15
5.2.1.1 Caudal	15
5.2.1.2 pH	15
5.2.1.3 Alcalinidad	15
5.2.2 Campañas de monitoreo en las PTAR	15
5.3 Diseño de los múltiples de distribución	16
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	17
6.1 Diagnóstico inicial de las PTAR	17
6.1.1 Planta de tratamiento de San Carlos	17
6.1.2 Planta de tratamiento de San Roque	18
6.1.3 Planta de tratamiento de Santiago	20
6.2 Seguimiento y control en las PTAR	21
6.2.1 Análisis del Caudal	21
6.2.1.1 Caudal PTAR San Carlos	22
6.2.1.2 Caudal PTAR San Roque	22
6.2.1.3 Caudal PTAR Santiago	23
6.2.2 Análisis del pH	23
6.2.2.1 pH PTAR San Carlos	24
6.2.2.2 pH PTAR de San Roque	25
6.2.2.3 pH PTAR de Santiago	27
6.2.3 Análisis de Alcalinidad	28
6.2.3.1 Alcalinidad en San Carlos	29
6.2.3.2 Alcalinidad en San Roque	29
6.2.3.3 Alcalinidad en Santiago	30
6.2.4 Resultados de las campañas de monitoreo	30
6.3 Problemas encontrados en las PTAR	32

6.3.1	PTAR San Carlos	33
6.3.2	PTAR de San Roque	34
6.3.3	PTAR de Santiago	34
6.4	Pre-dimensionamiento de los múltiples de distribución	36
6.4.1	Evaluación del diseño actual de los múltiples	36
6.4.1.1	Múltiples de distribución de San Carlos	37
6.4.1.2	Múltiples de distribución de San Roque	38
6.4.1.3	Múltiples de distribución de Santiago	40
6.4.2	Pre-dimensionamiento con la metodología propuesta	41
6.4.2.1	Pre-dimensionamiento de San Carlos	42
6.4.2.2	Pre-dimensionamiento de San Roque	43
6.4.2.3	Pre-dimensionamiento de Santiago	44
6.4.3	Esquema del diseño actual comparado con el pre dimensionamiento realizado.	46
7.	CONCLUSIONES	17
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de los parámetros obtenidos del muestreo y sus valores máximos admisibles por normatividad	31
Tabla 2. Eficiencias reales de las PTAR comparadas con la resolución 0631 del 2015	32
Tabla 3. Relación DBO ₅ /DQO afluentes, en las diferentes PTAR de estudio....	32
Tabla 4. Dimensiones de la tubería con salidas múltiples a la entrada del sedimentador primario de alta tasa en PTAR San Carlos	37
Tabla 5. Resultados de la última iteración usando el método de Hudson para el análisis del diseño actual de los múltiples en San Carlos	38
Tabla 6. Dimensiones de la tubería con salidas múltiples a la entrada de los reactores UASB en PTAR San Roque	38
Tabla 7. Resultados de la última iteración usando el método de Hudson para el análisis del diseño actual de los múltiples en San Roque	39
Tabla 8. Dimensiones de la tubería con salidas múltiples a la entrada de los FAFA en PTAR Santiago	40
Tabla 9. Resultados de la última iteración usando el método de Hudson para el análisis del diseño actual de los múltiples en Santiago	41
Tabla 10. Pre-dimensionamiento de las tuberías con salidas múltiples a la entrada de los sedimentadores de alta tasa en PTAR San Carlos	42
Tabla 11. Resultados de la última iteración usando el método de Hudson para el análisis del diseño actual de los múltiples en San Carlos	42
Tabla 12. Pre-dimensionamiento de las tuberías con salidas múltiples a la entrada de los reactores UASB en PTAR San Roque	43
Tabla 13. Resultados de la última iteración usando el método de Hudson para el análisis del diseño actual de los múltiples en San Roque.....	44
Tabla 14. Pre-dimensionamiento de las tuberías con salidas múltiples a la entrada de los filtros anaerobios de flujo ascendente en PTAR Santiago.....	45
Tabla 15. Resultados de la última iteración usando el método de Hudson para el análisis del diseño actual de los múltiples en Santiago.	45

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Promedio mensual del caudal en la PTAR de San Carlos.....	22
Figura 2. Promedio mensual del caudal en la PTAR de San Roque	23
Figura 3. Promedio mensual del caudal en la PTAR de Santiago	23
Figura 4. pH para el mes de diciembre 2019 en la PTAR de San Carlos	24
Figura 5. pH para el mes de enero 2020 en la PTAR de San Carlos.....	25
Figura 6. pH para el mes de febrero 2020 en la PTAR de San Carlos	25
Figura 7. pH para el mes de noviembre 2019 en la PTAR de San Roque	26
Figura 8. pH para el mes de diciembre 2019 en la PTAR de San Roque.....	26
Figura 9. pH para el mes de enero 2020 en la PTAR de San Roque	27
Figura 10. pH para el mes de febrero del 2020 en la PTAR de San Roque	27
Figura 11. pH para el mes de diciembre 2019 en la PTAR de Santiago	28
Figura 12. pH para el mes de enero 2020 en la PTAR de Santiago	28
Figura 13. Relación AI/AT para el digestor de lodos anaerobio en la PTAR de San Carlos	29
Figura 14. Relación AI/AT para el reactor UASB en la PTAR de San Roque	30
Figura 15. Relación AI/AT para el reactor UASB en la PTAR de Santiago	30

1. RESUMEN

En una población es necesario tener un tratamiento de aguas residuales óptimo con el fin de evitar problemas de salud pública y garantizar, además, una adecuada calidad de recurso hídrico impactando lo menos posible el medio ambiente. Por esto, se hace indispensable realizar el arranque, estabilización y una adecuada operación de las plantas de tratamiento de agua residual a nivel municipal. En el presente trabajo se llevó a cabo el proceso de arranque de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de los municipios de San Roque, San Carlos y el corregimiento de Santiago del municipio de Santo Domingo. Las actividades de arranque de las PTAR incluyeron: un diagnóstico inicial, mediciones in situ tales como; caudal, pH y alcalinidad y análisis de laboratorio mediante campañas de monitoreo en cada PTAR. Dentro de los problemas encontrados, se evidenció que las plantas de tratamiento de estudio no cuentan con un diseño adecuado de los múltiples de distribución a la entrada de las unidades de tratamiento (Sedimentador primario en San Carlos y Reactores anaerobios en San Roque y Santiago), se hizo un análisis del diseño actual empleando el método de Hudson el cual es comúnmente usado en las plantas de agua potable y un pre dimensionamiento con consideraciones para agua residual, el cual arrojó que a menor número de orificios y mayor diámetro de tubería se da una distribución uniforme del caudal y menor pérdida de carga.

2. INTRODUCCIÓN

En un municipio se producen grandes volúmenes de agua residual doméstica, la cual se define como aquella que ha sido utilizada por una comunidad y que contiene sólidos disueltos y en suspensión provenientes: desechos del cuerpo humano (heces y orina), lavandería, lavado personal, preparación de alimentos y limpieza en general (Mara, 2004).

La generación de estas aguas residuales afecta al medio ambiente debido a la contaminación de fuentes superficiales a partir de los vertimientos que se hacen sin un tratamiento previo y por ende influye negativamente en la población generando problemas de salud pública. Dado lo anterior es necesario diseñar, construir, estabilizar y operar adecuadamente, plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) en los municipios de tal forma que cumplan con los requerimientos presentados por la normatividad y que aseguren una eficiencia óptima en el tratamiento.

El arranque en una planta de tratamiento, es un proceso importante en la disminución de los contaminantes contenidos en el agua y éste se compone de varios elementos; tiene una fase preliminar donde se identifican dificultades con el sistema especialmente en el diseño, una fase de diagnóstico la cual presenta información más detallada del proceso, una fase de seguimiento durante la cual se realizan campañas de monitoreo para verificar el cambio de la eficiencia y se ejecuta la capacitación a los operarios y finalmente, se desarrollan los manuales de operación y mantenimiento de la PTAR.

En el presente trabajo, además de acompañar el arranque, se llevó a cabo el análisis del diseño de los múltiples de distribución o alimentación del agua residual en los casos de estudio de la PTAR de los municipios de San Roque, San Carlos y del corregimiento de Santiago del municipio de Santo Domingo, en el departamento de Antioquia.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar el diseño actual de los múltiples de distribución en las plantas de tratamiento de aguas residuales, analizando su funcionamiento durante el proceso de arranque, estabilización y operación.

3.2 Objetivos específicos

- Analizar el funcionamiento actual de los múltiples de distribución, mediante observaciones en campo, monitoreos de parámetros fisicoquímicos y mediciones in situ en las plantas de tratamiento.
- Comparar el diseño actual presentado en los múltiples de distribución a la entrada de las unidades de tratamiento de aguas residuales con el diseño realizado a través de la metodología para sedimentadores de alta tasa en plantas de potabilización.
- Proponer una metodología de diseño y un pre dimensionamiento para la distribución del agua residual en sedimentadores de alta tasa y reactores anaerobios.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Tren de tratamiento en las PTAR

Convencionalmente, las plantas de tratamiento municipales en Antioquia están constituidas por tratamientos preliminares tales como el cribado y desarenado, seguidos de tratamientos primarios en los que se suelen incluir sedimentadores de alta tasa y finalmente tratamientos secundarios para la remoción de materia orgánica, en los cuales se utilizan comúnmente reactores anaerobios tipo UASB y reactores FAFA. Los reactores UASB pueden utilizarse tanto para tratamiento primario como secundario. Para el tratamiento de los lodos es común emplear lechos de secado.

A continuación, se describe en detalle los objetivos de cada proceso tratamiento:

- **Cribado:** Su propósito es eliminar material grueso, como basuras, ramas, entre otros, que puedan dañar equipos o bloquear válvulas, canales, tuberías y accesorios (Qasim & Zhu, 2018).
- **Desarenado:** Elimina materiales inertes y densos como arenas, limos, vidrios, huesos, cáscaras de huevo, etc. (Qasim & Zhu, 2018)
- **Sedimentador de alta tasa:** Su finalidad es eliminar los sólidos orgánicos sedimentables, aumentando el área superficial a través de placas inclinadas (Qasim & Zhu, 2018). Para la entrada a estas unidades se usan tuberías perforadas como sistemas de distribución del caudal.
- **Reactores anaerobios:** Son procesos biológicos en ausencia de oxígeno molecular, donde los aceptores de electrones suelen ser el dióxido de carbono o el sulfato (Akunna, 2019) y su principal objetivo es eliminar sustancias orgánicas solubles y sólidos en suspensión que no se removieron en los anteriores tratamientos (Qasim & Zhu, 2018). Normalmente a la entrada de estas unidades se utilizan tuberías perforadas.
- **Lechos de secado:** Su propósito es dar una disposición y tratamiento final a los lodos generados en la planta.

4.2 Zona de entrada a las unidades de tratamiento

El diseño de la zona de entrada a las unidades de tratamiento es considerado de gran importancia ya que este permite la distribución homogénea del caudal en cada unidad y de esta manera se puede evitar cortocircuitos en el sistema, lo cual contribuye al buen funcionamiento y diseño de las demás

unidades (Valencia, 1972). Los objetivos de la zona de entrada para los sedimentadores primarios de alta tasa son:

- Distribuir el afluente lo más uniformemente posible en toda el área trasversal de la unidad de tratamiento.
- Evitar corrientes de agua que puedan provocar movimientos rotacionales y cambios cinéticos.
- Disipar la energía que trae el agua desde los sistemas previos.
- Evitar velocidades muy altas que puedan resuspender los lodos ya depositados (Pérez, 1996).

Para los reactores anaerobios el propósito de la zona de entrada es similar al de los sedimentadores; dividir el flujo uniformemente en el fondo del reactor, garantizando el contacto de los microorganismos con el agua residual. Por esto se hace necesario tener un dispositivo que divida el flujo afluente en varias partes iguales (Van Haandel & Lettinga, 1994).

Tanto para el sedimentador primario de alta tasa como para el reactor anaerobio es necesario tener dispositivos en la zona de entrada que cumplan un objetivo común: distribuir el caudal de forma uniforme, para lo cual es necesario el diseño de tuberías con salidas múltiples.

4.3 Tuberías con salidas múltiples

Las tuberías con salidas múltiples consisten en un conducto principal con orificios laterales normalmente espaciados a intervalos regulares (Imagen 1), por medio de los cuales se pretende alcanzar la distribución de flujo requerida y garantizar un adecuado comportamiento hidráulico de la estructura a la cual esté asociada el múltiple (Cabrera & Otaya, 2014).

El diseño de los múltiples de distribución ha estado muy enfocado en los sistemas de potabilización, específicamente en los sedimentadores de alta tasa, con el método propuesto por Hudson en 1981 el cual formula ecuaciones que permiten la distribución uniforme del flujo en los dispositivos de entrada y está basado principalmente en el coeficiente de pérdida de carga, la velocidad real en los orificios y el gradiente de velocidad medio (Hudson, 1981).

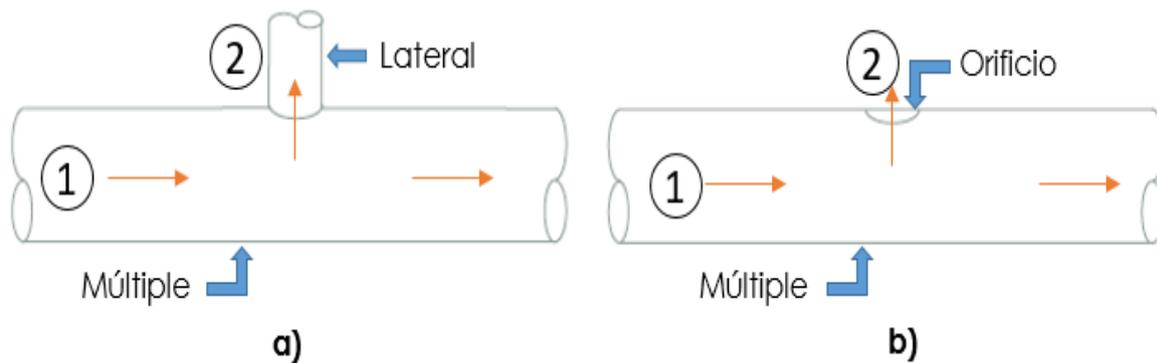


Imagen 1. Flujo en múltiples y tipos de distribución a) Tubería con salidas múltiples en forma de lateral. b) Tubería con salidas múltiples en forma de orificio.

Fuente: Autoría propia

En la imagen 1, la pérdida de carga entre 1 y 2 tanto para la distribución del flujo en el lateral como para el del orificio, está expresada por la siguiente ecuación (CEPIS, 2006):

$$\Delta h = h_L + \frac{V_L^2}{2g} \quad (1)$$

Donde:

Δh : Pérdidas de carga entre 1 y 2 (m)

h_L : Pérdidas de entrada al lateral (Debidas al giro) (m)

V_L : Velocidad de flujo en el lateral (m/s)

g : Aceleración de la gravedad (m/s²)

A partir de la ecuación (1) es posible desarrollar y encontrar una expresión para el coeficiente de pérdida de carga total (β) (CEPIS, 2006):

$$\beta = 1 + \theta + (V_c/V_L)^2 * \varphi \quad (2)$$

Donde:

1: Pérdida de carga debida a la disipación de energía en el lateral

θ : Coeficiente de pérdida de carga en la entrada

φ : Coeficiente de pérdida de carga en el cambio de dirección de la corriente

V_c : Velocidad en la tubería de distribución (m/s)

V_L : Velocidad en los laterales u orificios (m/s)

El coeficiente de pérdida de carga total (β) se relaciona con dos coeficientes que adoptan diferentes valores experimentales según Hudson, dependiendo del tipo de distribución (Imagen 1) (Taborda, s.f)

- a) Lateral: $\theta=0,4$, $\varphi=0,9$. Se adoptan estos valores si la longitud del lateral es mayor a 3 veces el diámetro del múltiple (Hudson, 1981).
- b) Orificio: $\theta=0,7$, $\varphi=1,67$. Se adoptan estos valores si la longitud del lateral es menor o igual a 3 veces el diámetro del múltiple (Hudson, 1981).

Suponiendo que las pérdidas para cada lateral son las mismas, con el fin de garantizar una adecuada distribución y que los tamaños de los orificios o laterales sean iguales, es posible deducir la ecuación (3) a partir de un balance de masas (CEPIS, 2006)

$$V_{L1} = \frac{Q_t}{A_L * \sqrt{\beta_1} * (\sum_{i=1}^n (1/\sqrt{\beta_i}))} \quad (3)$$

Donde:

Q_t : Caudal total por distribuir (m^3/s)

A_L : Área de cada uno de los laterales u orificios (m^2)

La ecuación anterior será útil para corregir la velocidad del primer orificio o lateral, para las demás velocidades se usa la ecuación (4) (Taborda, s.f)

$$V_{Li} = V_{L(i-1)} * \sqrt{\frac{\beta_{(i-1)}}{\beta_i}} \quad (4)$$

Para comprobar el gradiente de velocidad medio en los laterales u orificios se utiliza la siguiente expresión (CEPIS, 2006):

$$G = \left(\frac{\gamma}{2\mu g}\right)^{0.5} * \left(\frac{f}{4R_h}\right)^{0.5} * V_L^{1.5} \quad (5)$$

Donde:

γ : Densidad del agua (kg/cm^3)

μ : Viscosidad absoluta (kg/cm^2*s)

f : Coeficiente de Darcy (Varía entre 0,015 y 0,03)

R_h : Radio hidráulico de la sección (m)

En las plantas de tratamiento de agua residual se están usando este tipo de dispositivos, para realizar el ingreso y distribución del agua residual tanto a sedimentadores de alta tasa como a reactores anaerobios, por lo cual es necesario verificar y plantear las condiciones adecuadas de estos diseños, partiendo de la información que se tiene en sistemas de potabilización.

5. METODOLOGÍA

5.1 Lugar de estudio

San Carlos (Imagen 2a) es un municipio con una extensión de 702 km². Actualmente cuenta con un sistema de recolección de aguas residuales que descarga a la planta de tratamiento, las cuales posteriormente son vertidas en el río San Carlos (Alcaldía Municipal San Carlos Antioquia, 2016). Por su parte, el municipio de San Roque (Imagen 2b) cubre una extensión de 40.715 hectáreas, cuenta con una planta de tratamiento operada a partir de un sistema de bombeo. Actualmente descarga sus aguas residuales directamente a la quebrada San Roque (Alcaldía Municipal San Roque, 2016). Finalmente, el corregimiento de Santiago (Imagen 2c) está ubicado en el municipio de Santo Domingo y cuenta con una planta de tratamiento compacta, actualmente descarga sus aguas residuales a la quebrada mas cercana.



Imagen 2. Ubicación de los municipios y corregimiento de estudio. **a)** San Carlos, **b)** San Roque y **c)** Santiago.

Fuente: Google Earth.

5.2 Seguimiento y control en las PTAR

Se realizaron diferentes visitas técnicas a las tres plantas de tratamiento para evaluar parámetros de control necesarios en su arranque y estabilización (Caudal, pH y alcalinidad), realizar campañas de monitoreo que evidenciaran el cumplimiento de la normatividad, encontrar posibles problemas en las PTAR y conocer el estado actual de las tuberías de distribución a la entrada de las unidades de tratamiento.

5.2.1 Medición de parámetros en la PTAR

5.2.1.1 Caudal

La medición del caudal se realizó de forma horaria en cada una de las PTAR. En San Roque y en Santiago se utilizó el método del flotador, en el cual, mediante una pelota, la longitud y ancho del canal conocidos se encuentra la velocidad (longitud/tiempo recorrido por la pelota) y con esta velocidad y la altura de la lámina de agua h se halla el caudal (velocidad* h *ancho canal). En San Carlos se hizo la medición de este parámetro mediante una canaleta Parshall ubicada en la zona de entrada de la PTAR.

5.2.1.2 pH

La medida de éste parámetro se hizo de forma horaria (aproximadamente 8 mediciones diarias) empleando un pHmetro y tomando datos del afluente y efluente de la PTAR.

5.2.1.3 Alcalinidad

Para determinar la relación alcalinidad intermedia/alcalinidad total (AI/AT) se tomaron muestras del efluente diariamente y se hicieron titulaciones con ácido sulfúrico de 0,1 N llevando la muestra a un pH de 5,75 y luego a pH 4,3. Se tomaron los datos de los volúmenes gastados en las titulaciones y se encontró la alcalinidad parcial (AP), total (AT) e intermedia (AI) mediante las ecuaciones 6, 7 y 8 (APHA, 2017):

$$AP = \frac{\text{Volumen}_{5,75} * 0,1N * 50000}{\text{Volumen}_{muestra}} \quad (6)$$

$$AT = \frac{\text{Volumen}_{4,3} * 0,1N * 50000}{\text{Volumen}_{muestra}} \quad (7)$$

$$AI = AT - AP \quad (8)$$

5.2.2 Campañas de monitoreo en las PTAR

El muestreo compuesto es la combinación de muestras simples tomadas en el mismo sitio durante diferentes tiempos y de esta manera, es posible calcular las respectivas cargas o eficiencias de los sistemas de tratamiento (Cornare, 2014), en este caso se hicieron campañas de monitoreo mediante muestreos compuestos en el afluente y efluente de las tres PTAR de estudio para componer 4000 mL al final de la jornada, tomando alícuotas cada hora, durante 8 horas, en las cuales fue posible calcular su volumen mediante la

ecuación (9), teniendo en cuenta el volumen de la alícuota debe ser proporcional al caudal instantáneo (Q_i). Al finalizar la campaña de muestreo se preservaron las muestras y fueron llevadas al laboratorio de Cornare para el análisis fisicoquímico bajo la metodología del Standar Methods (APHA, 2017) y posteriormente realizar los respectivos análisis y comparaciones con la normatividad vigente.

$$V_{alícuota} = \frac{V_{total}(4L) * Q_i}{Q_{promedio} * (Número\ de\ alícuotas)} \quad (9)$$

5.3 Diseño de los múltiples de distribución

Para hacer un diagnóstico inicial de los múltiples de distribución a la entrada de las unidades de tratamiento en las PTAR fue necesario revisar los planos y cálculos de diseño, de donde fue posible extraer datos como caudales de diseño, número y diámetros de los orificios y diámetros de las tuberías.

A partir de estos datos recolectados se evaluó la eficiencia de los múltiples de distribución actuales usando la metodología propuesta por Hudson para la zona de entrada en sedimentadores primarios de alta tasa en plantas de tratamiento de agua potable. Se usó este método y se hicieron las respectivas consideraciones y modificaciones que se deben tener en cuenta para agua residual.

Finalmente, después de evaluar las tuberías de distribución actuales, se hizo un nuevo pre-dimensionamiento, que permitiera un mejor funcionamiento de las unidades y a la vez proponer este método de diseño para los múltiples de distribución en agua residual, teniendo en cuenta una metodología usada en plantas de potabilización.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1 Diagnóstico inicial de las PTAR

A continuación, se presentan los hallazgos encontrados en las visitas técnicas iniciales, en las tres plantas de tratamiento de estudio.

6.1.1 Planta de tratamiento de San Carlos

Este municipio cuenta con un tratamiento primario, compuesto por un canal de entrada, vertedero lateral o aliviadero, dos unidades de cribado y dos desarenadores y una canaleta Parshall para el aforo del caudal. Como tratamiento primario cuenta con dos sedimentadores primarios de alta tasa, cada uno tiene en su zona de entrada dos tuberías con salidas múltiples para la distribución del caudal, además, cuentan con placas inclinadas de asbesto cemento en su zona de sedimentación, dos canaletas dientes de sierra para la recolección del efluente y una tubería de purga de lodos en el fondo que evacua y transporta los lodos hacia un digestor anaerobio, el cual unido a cinco lechos de secado hacen el tratamiento de los lodos de la PTAR (Imagen 3).

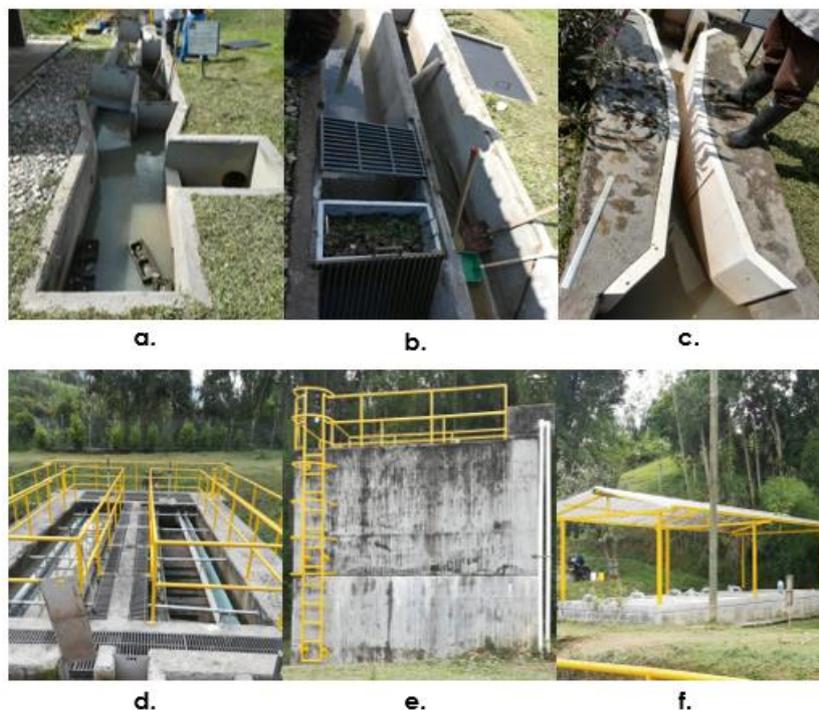


Imagen 3. Unidades de tratamiento en el municipio de San Carlos. **a.** Canal de entrada y vertedero lateral **b.** Cribado y desarenador **c.** Canaleta Parshall **d.** Sedimentadores primarios de alta tasa **e.** Digestor anaerobio **f.** Lechos de secado.

Fuente: Autoría propia.

En la imagen 4 se presenta un esquema de la distribución de los flujos en el tren de tratamiento de esta PTAR.

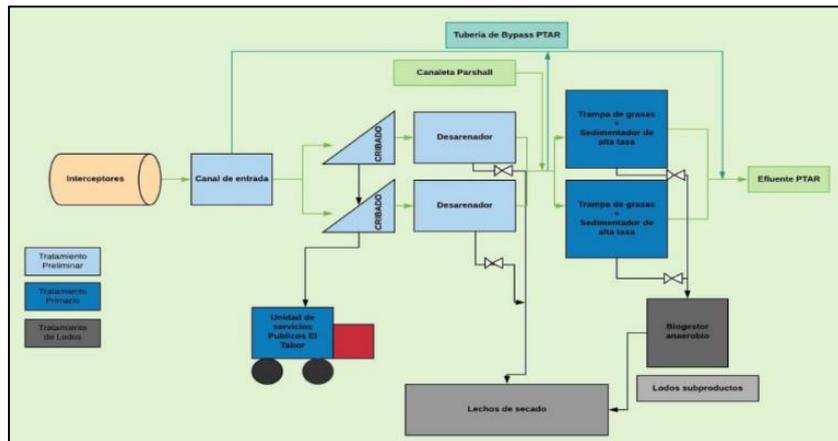


Imagen 4. Esquema del tren de tratamiento de la PTAR de San Carlos

Fuente: Informe de diagnóstico PTAR San Carlos

6.1.2 Planta de tratamiento de San Roque

Este municipio cuenta con un tratamiento preliminar compuesto por dos rejillas de cribado con sus respectivas canastillas para la limpieza de las mismas y dos desarenadores en paralelo. Dichos tratamientos se encuentran a una cota menor comparado con las demás unidades de la PTAR, por esto se tiene una estación de bombeo que cumple la función de transportar el agua residual hacia el tratamiento secundario. Dicha estación cuenta con 3 bombas (2 en funcionamiento y 1 deshabilitada para situaciones de emergencia). De la estación de bombeo, el agua residual se dirige a un reactor UASB, compuesto por 2 módulos, cada uno de los cuales cuenta con una tubería con salidas múltiples como estructura de entrada, una canaleta dientes de sierra para la recolección del clarificado y dos válvulas de purga de lodos que descargan directamente a los 4 lechos de secado, los cuales realizan el tratamiento de los lodos en la PTAR (Imagen 5).



Imagen 5. Unidades de tratamiento en el municipio de San Roque. **a.** Tratamiento preliminar **b.** Estación de bombeo **c.** Reactor UASB **d.** Lechos de secado

Fuente: Autoría propia.

En la imagen 6 se muestran las unidades de tratamiento descritas previamente y el esquema de funcionamiento de la PTAR, teniendo en cuenta que la planta cuenta con el espacio para construir los FABA, los cuales están proyectados para un futuro.

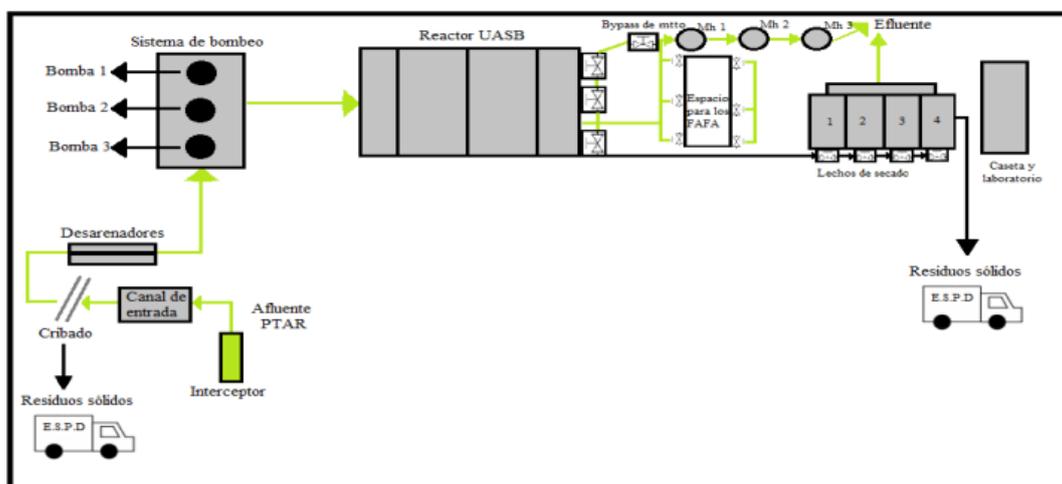


Imagen 6. Diagrama de flujo del tren de tratamiento de la PTAR de San Roque

Fuente: Informe de diagnóstico PTAR San Roque

6.1.3 Planta de tratamiento de Santiago

La PTAR del corregimiento de Santiago es de tipo compacta y está constituida por un tratamiento preliminar que cuenta con un canal de entrada, una reja de cribado y un desarenador, el cual tiene una desventaja y es que no se encuentra conectado a un ducto para realizar la descarga de las arenas retenidas. Posteriormente se tienen dos reactores anaerobios, divididos en cuatro compartimientos, de los cuales los dos primeros son tanques sépticos, el tercero es un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) que cuenta con tuberías con salidas múltiples en su estructura de entrada y el cuarto es un sedimentador secundario. Finalmente, se tienen 2 lechos de secado en la PTAR conectados a los reactores anaerobios para hacer el tratamiento de los lodos (Imagen 7).

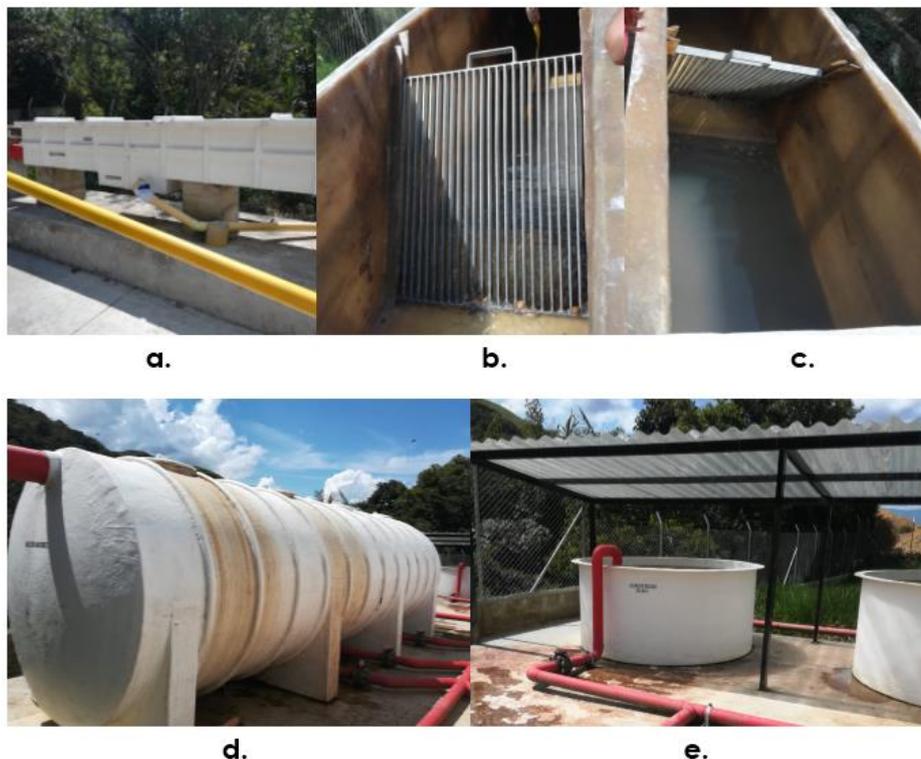


Imagen 7. Unidades de tratamiento en el corregimiento de Santiago. **a.** Tratamiento preliminar **b.** Rejas de cribado **c.** Desarenador **d.** Reactores anaerobios **e.** Lechos de secado

Fuente: Autoría propia.

En la imagen 8 se muestran el esquema del tren de tratamiento completo de la PTAR de Santiago.

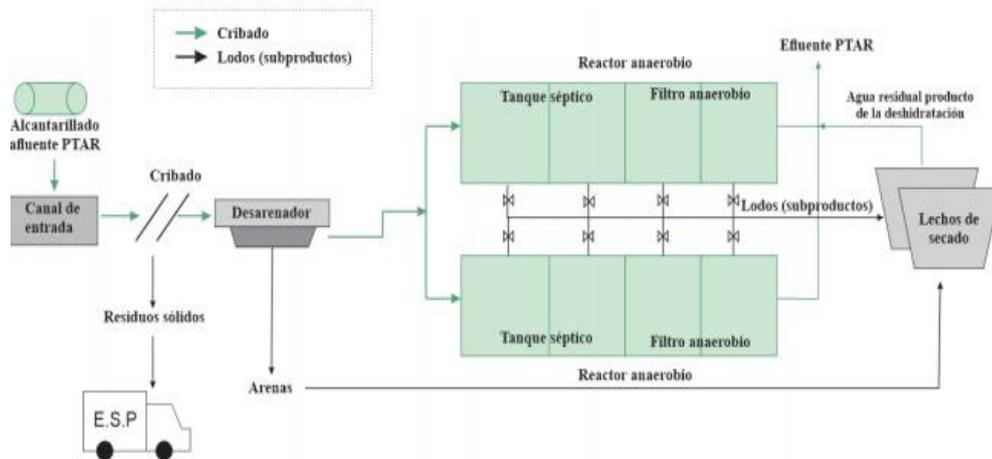


Imagen 8. Diagrama de flujo del tren de tratamiento de la PTAR de Santiago
Fuente: Informe de diagnóstico PTAR Santiago

6.2 Seguimiento y control en las PTAR

A continuación, se presentan las gráficas de los parámetros principales medidos in situ en cada una de las PTAR de estudio teniendo en cuenta que se incluyeron los datos hasta la fecha en que se hizo acompañamiento por parte de los ingenieros residentes en la planta. También se muestran los respectivos resultados de las campañas de monitoreo con el fin de verificar su cumplimiento con la Resolución 0631 del 2015

6.2.1 Análisis del Caudal

Se hicieron promedios diarios y luego mensuales para los caudales en cada PTAR, con los cuales fue posible realizar las gráficas presentadas a continuación, estas cuentan con su respectiva desviación estándar con el fin de observar su variación a lo largo de cada mes.

En general para las tres PTAR se encontró que la variación del caudal está asociada principalmente a las temporadas de invierno y verano, debido a que todas cuentan con alcantarillado combinado y adicionalmente, se encontró un efecto asociado a la población flotante en cada lugar, ya que se evidenció que el caudal aumentaba en fin de semana o en días en que se tuvieran festividades, por otro lado a lo largo del día se observó que el caudal aumenta en las horas de la mañana por las actividades rutinarias de la población y en las horas de la tarde con el retorno de las personas a sus hogares.

6.2.1.1 Caudal PTAR San Carlos

En la figura 1 se puede evidenciar que el caudal mayor en la PTAR de San Carlos ocurrió en el mes de octubre con un valor de 16,04 L/s debido a la temporada de invierno presentada en este mes y el valor menor se dio en enero con un valor de 13,02 L/s. Además, se observa que los caudales tuvieron una baja variación a lo largo de los meses, teniendo un valor de 14,63 L/s como promedio durante los días de arranque de la PTAR.

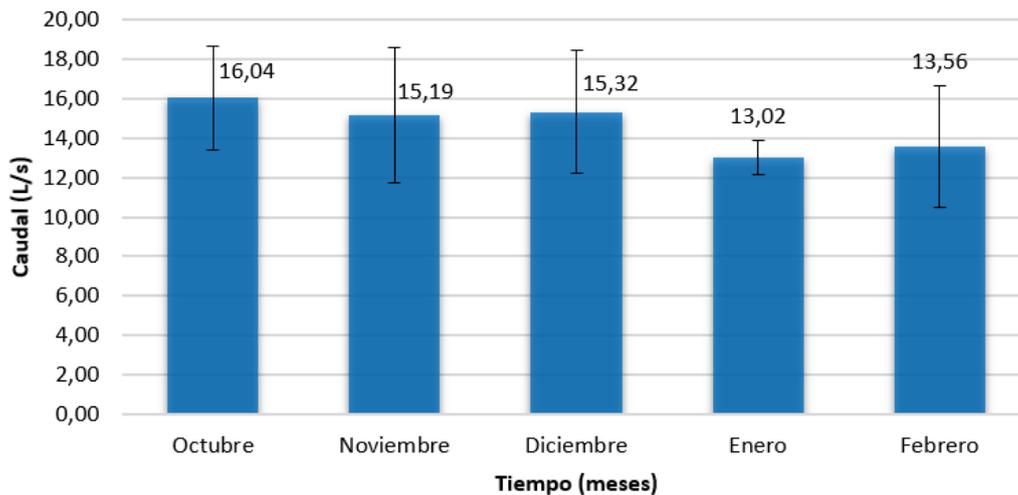


Figura 1. Promedio mensual del caudal en la PTAR de San Carlos

6.2.1.2 Caudal PTAR San Roque

Para la PTAR del municipio de San Roque el caudal mayor se presentó en el mes de octubre con un valor de 19,44 L/s, y el menor en el mes de febrero con un valor de 12,89 L/s y 14,60 L/s como promedio de todos los meses (Figura 2). Cabe resaltar que en el mes de octubre se presentaron inconvenientes para medir este parámetro, debido a que las lluvias inundaron los preliminares en varias ocasiones dificultando el proceso de medición.

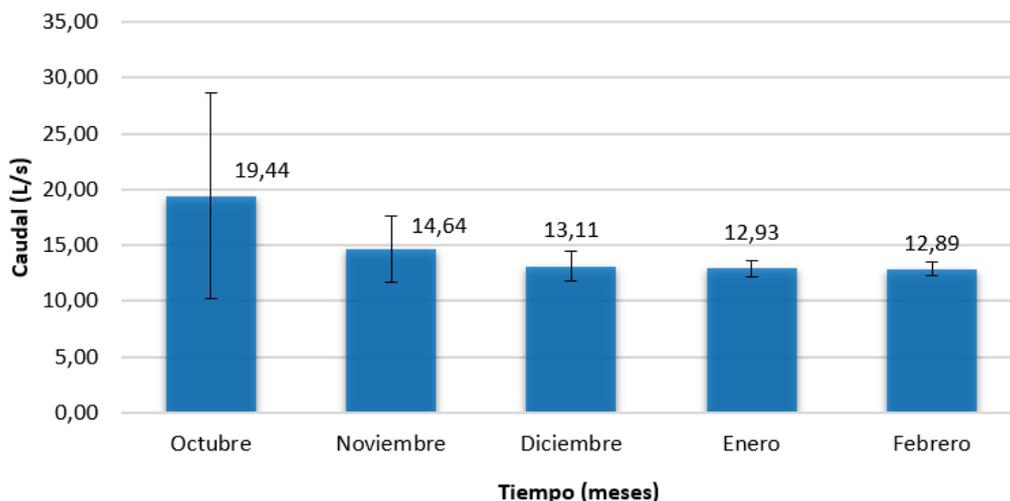


Figura 2. Promedio mensual del caudal en la PTAR de San Roque

6.2.1.3 Caudal PTAR Santiago

De la figura 3 se concluye que el caudal menor se dio en el mes de noviembre (2,64 L/s), el mayor en octubre (3,26 L/s) y se obtuvo, además, un valor de 3,07 L/s como promedio durante todo el proceso de arranque de la PTAR.

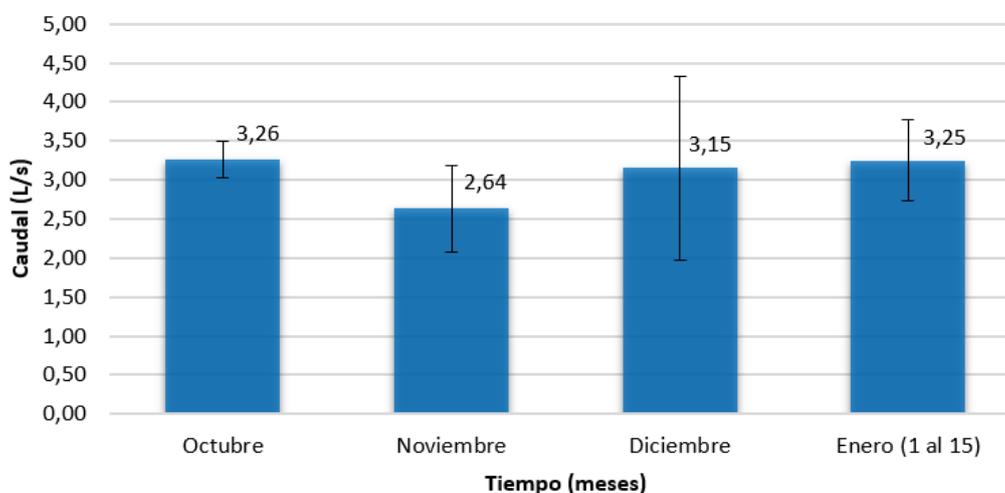


Figura 3. Promedio mensual del caudal en la PTAR de Santiago

6.2.2 Análisis del pH

Se analizaron los pH diarios tomados de forma horaria en el afluente y efluente de las PTAR con sus respectivas barras de error para observar su desviación a lo largo del día, con esta información fue posible realizar las gráficas y análisis presentados a continuación.

6.2.2.1 pH PTAR San Carlos

En las figuras 4, 5 y 6 se presentan los valores de pH para los meses de diciembre de 2019, enero y febrero de 2020, respectivamente en el municipio de San Carlos.

Se concluye que el pH del afluente de la PTAR de San Carlos osciló entre 6,50 y 7,29 en diciembre, 6,89 y 7,26 en enero y 6,83 y 7,26 en febrero, dichos valores están cercanos a la neutralidad y aunque no se cuenta en esta PTAR con tratamiento biológico para las aguas residuales, es importante tener en cuenta el pH en el afluente para un tratamiento secundario a futuro. Por otro lado, el pH en el efluente osciló entre 6,60 y 7,18 en diciembre, 6,81 y 7,25 en enero y 6,83 y 7,18 en febrero, estos valores también están cercanos a la neutralidad y por lo tanto no ocasionarán acidificación en el cuerpo de agua receptor.

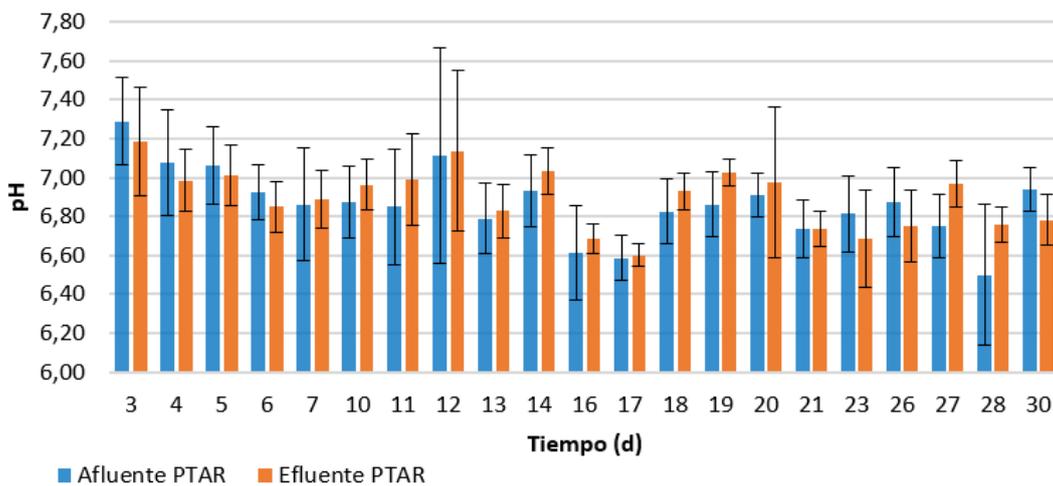


Figura 4. pH para el mes de diciembre 2019 en la PTAR de San Carlos

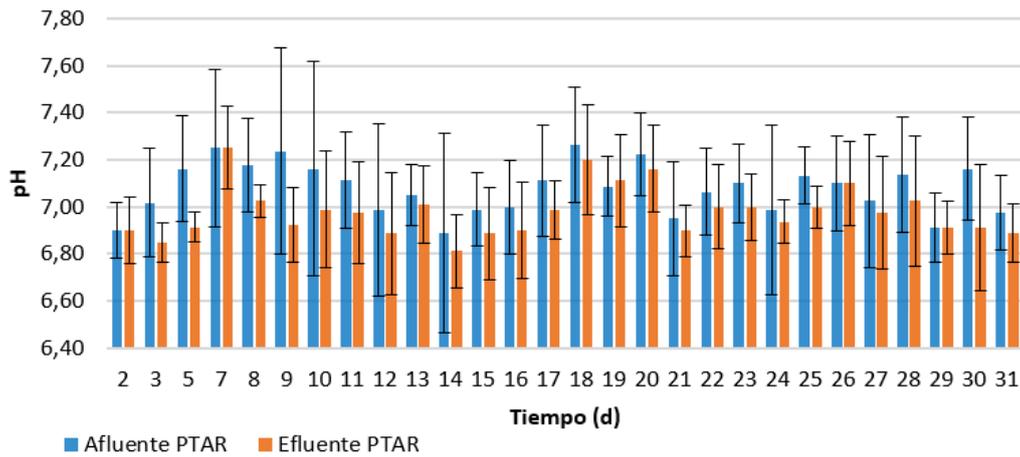


Figura 5. pH para el mes de enero 2020 en la PTAR de San Carlos

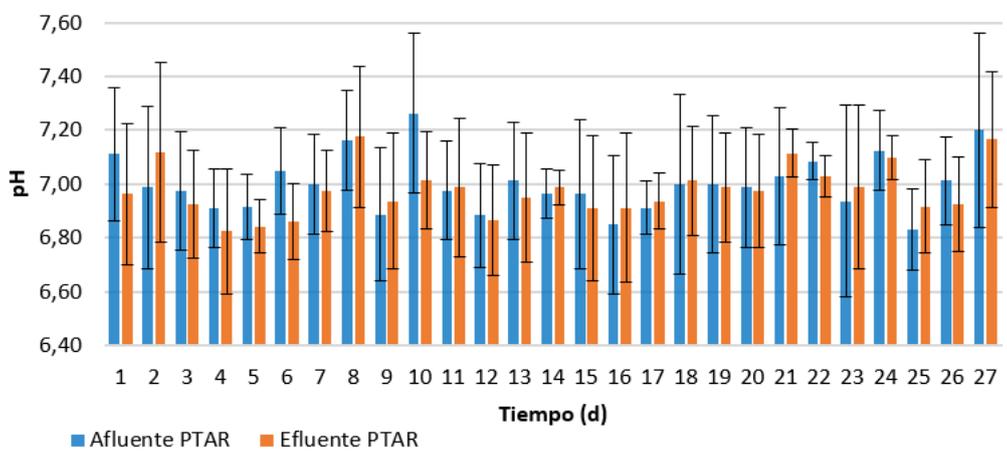


Figura 6. pH para el mes de febrero 2020 en la PTAR de San Carlos

6.2.2.2 pH PTAR de San Roque

En las figuras 7, 8, 9 y 10 se muestran los valores de pH en el afluente y efluente para los meses de noviembre y diciembre de 2019, enero y febrero de 2020, respectivamente en la PTAR de San Roque.

Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaerobia tienen unos valores de pH de actividad óptimos en torno a la neutralidad. El óptimo es entre 5.5 y 6.5 para microorganismos acidogénicos, entre 7.8 y 8.2 para metanogénicos y para cultivos mixtos el rango se encuentra entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el ideal (FAO, 2011). Según lo anterior y observando las figuras 7, 8, 9 y 10, se concluye que en los meses de noviembre y diciembre el pH afluente estuvo fuera del rango recomendado, estando entre intervalos de 6.68-6.96 y 6.63-6.97 respectivamente, sin embargo, estuvieron cerca de lo recomendado por la literatura (6.8 a 7.4). Por

otro lado, en los siguientes meses se estabilizó el pH del afluente y estuvo dentro del rango recomendado, oscilando entre valores de 6,89 y 7,20 para enero y 6,92 y 7,08 para febrero.

Para el pH efluente se evidencia que en el mes de noviembre disminuyó el pH a la salida de la PTAR (6,65-6,79) comparado con el afluente, esto es lo esperado en la etapa de arranque debido a la acumulación de ácidos grasos volátiles en el reactor. Sin embargo, el pH efluente para los demás meses se estabilizó, oscilando entre valores de 6,67-7,00 para diciembre, 6,90-7,16 para enero y 7,00-7,08 para febrero. La estabilización del pH es una situación positiva en el proceso y da indicios de la buena operación en el reactor, debido a que posiblemente no se están acumulando AGV, aunque lo anterior debe comprobarse con las pruebas de alcalinidad.

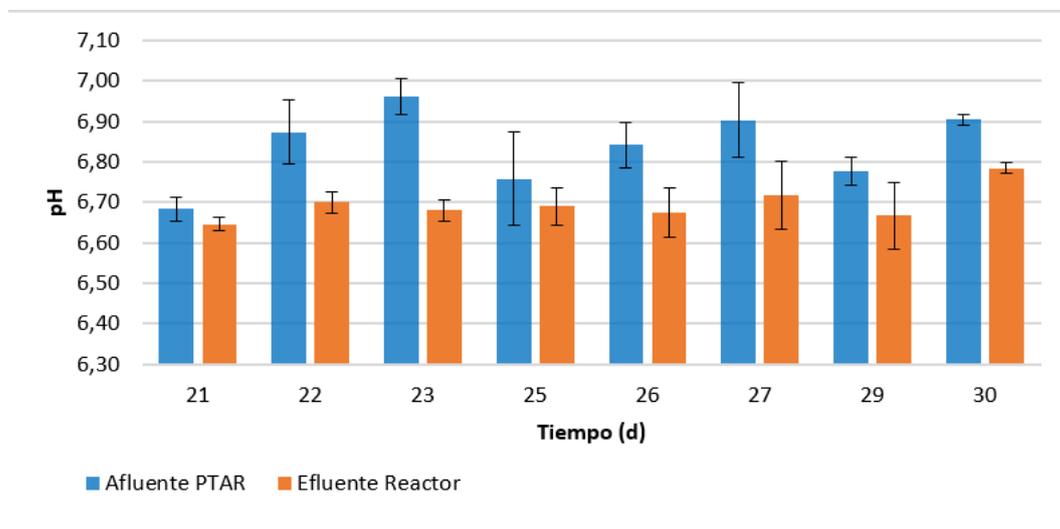


Figura 7. pH para el mes de noviembre 2019 en la PTAR de San Roque

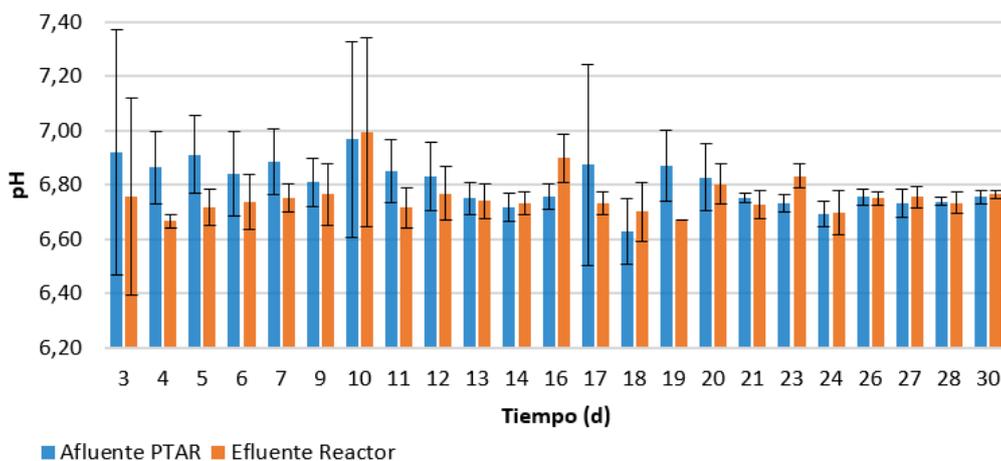


Figura 8. pH para el mes de diciembre 2019 en la PTAR de San Roque

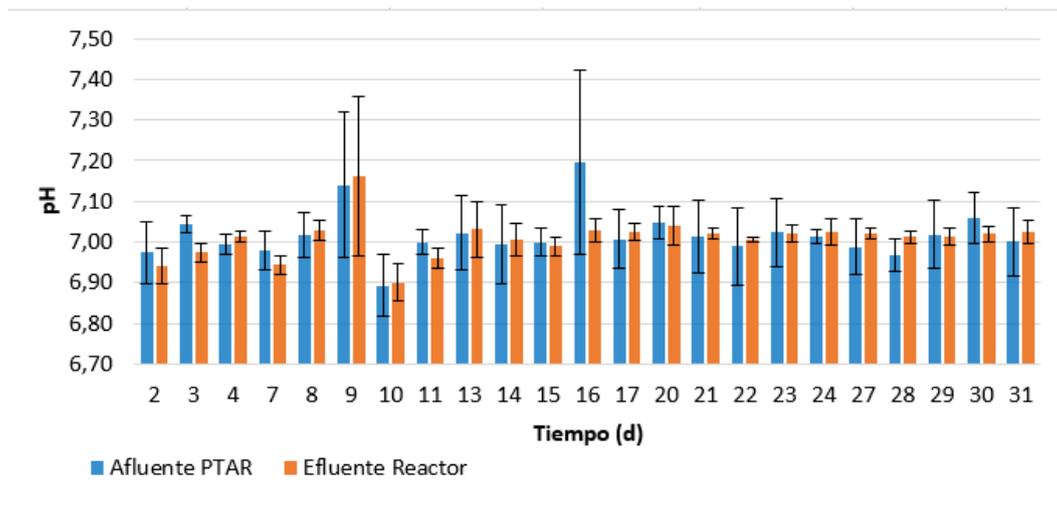


Figura 9. pH para el mes de enero 2020 en la PTAR de San Roque

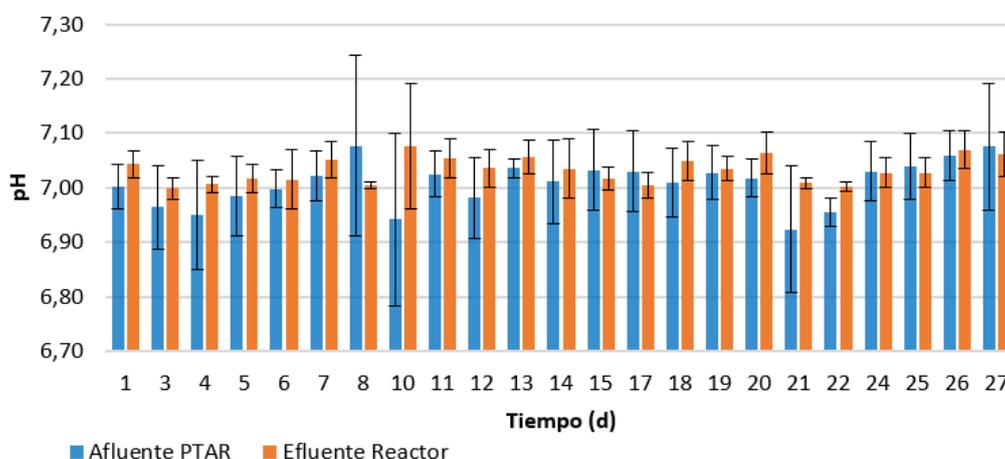


Figura 10. pH para el mes de febrero del 2020 en la PTAR de San Roque

6.2.2.3 pH PTAR de Santiago

En las figuras 11 y 12 se presentan los valores de pH en el afluente y efluente para los diferentes días de los meses de diciembre de 2019 y enero de 2020, respectivamente en la PTAR de Santiago.

En las figuras 11 y 12 se evidencia que por lo general el pH en el afluente de la PTAR de Santiago es alcalino, oscilando entre valores de 7,20 y 7,99 para el mes de diciembre y de 7,28 y 7,66 para enero, estando así fuera del rango recomendado por la literatura (6,8 a 7,4) y afectando posiblemente el proceso de degradación de la materia orgánica. El pH en el efluente disminuyó para todos los días con respecto al del afluente, oscilando entre valores de 6,96 y 7,38 para diciembre y de 7,10 a 7,44 en enero, esto es lo esperado debido a la acumulación de AGV, sin embargo, el pH en el efluente se mantuvo muy

cercano a la neutralidad, por lo tanto, no se tuvo acidificación en la fuente receptora y posibles afectaciones en esta.

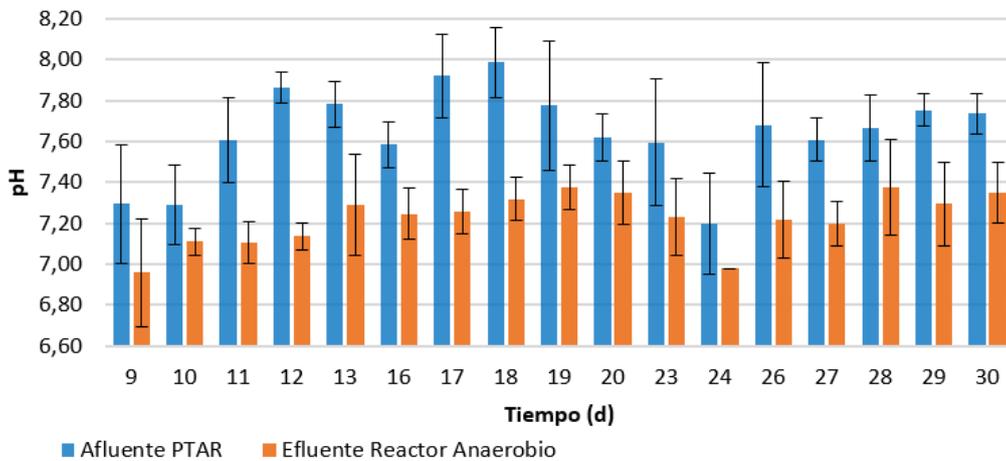


Figura 11. pH para el mes de diciembre 2019 en la PTAR de Santiago

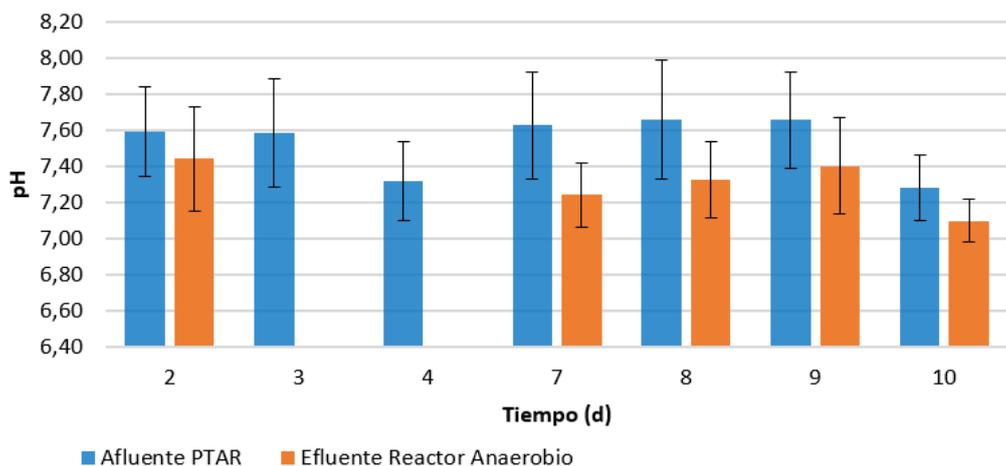


Figura 12. pH para el mes de enero 2020 en la PTAR de Santiago

6.2.3 Análisis de Alcalinidad

Una adecuada relación AI/AT debe ser $< 0,3$ con un rango de variabilidad que puede oscilar entre 0,2-0,4, lo que indica que por lo menos el 60% de la alcalinidad total del sistema tiene que estar en forma de alcalinidad bicarbonática (Rozzi, 1986). En general se ha encontrado que valores entre 0,2-0,3 muestran un buen funcionamiento en el reactor, mientras que valores menores a 0.20 indican subalimentación y mayores a 0,35 principios de acidificación (Rojas, 2004).

Para verificar lo anterior se realizó la medición de alcalinidad en el efluente de los reactores anaerobios de San Roque y Santiago y en el digestor anaerobio de lodos del municipio de San Carlos con el fin de encontrar la relación AI/AT que permite tomar decisiones en el momento en que se presente acidificación en el reactor. A continuación, se muestran las gráficas de este parámetro de control en las PTAR de estudio.

6.2.3.1 Alcalinidad en San Carlos

En la figura 13 se muestra la relación AI/AT medida en la PTAR de San Carlos, tomando una relación de AI/AT máxima de 0,3 según lo recomendado en las referencias bibliográficas. En este caso fue necesario añadir cal en varias ocasiones en el mes de diciembre cuando la relación superó el valor de 0,3, esto permitió tener la alcalinidad en un rango favorable en los siguientes días para evitar acidificación en el sistema.

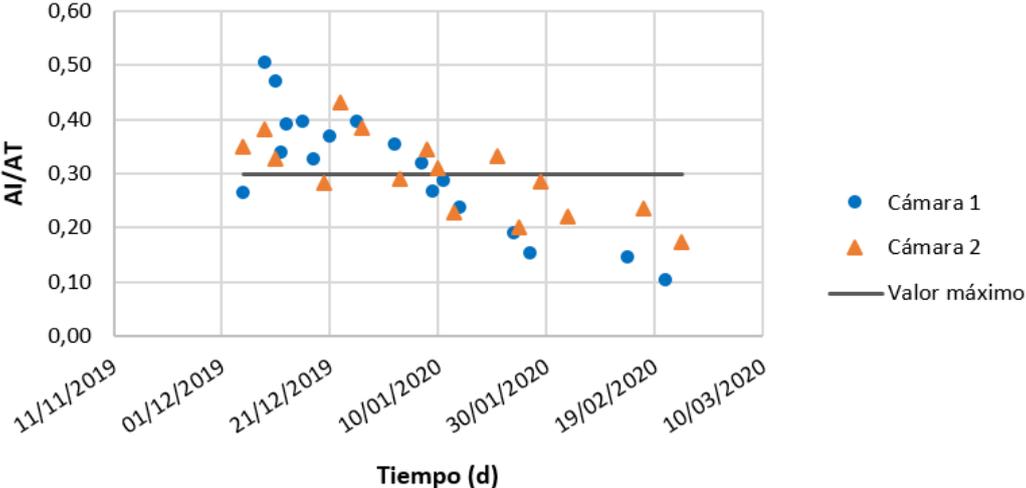


Figura 13. Relación AI/AT para el digestor de lodos anaerobio en la PTAR de San Carlos

6.2.3.2 Alcalinidad en San Roque

En la figura 14 se muestra la relación AI/AT para el reactor UASB en el municipio de San Roque y se observa que estos valores se mantuvieron por debajo de 0,3 por lo cual no fue necesario añadir una solución buffer al sistema (cal). Lo anterior indica que no se acumularon ácidos grasos volátiles en el reactor y por el contrario fueron consumidos en el tratamiento.

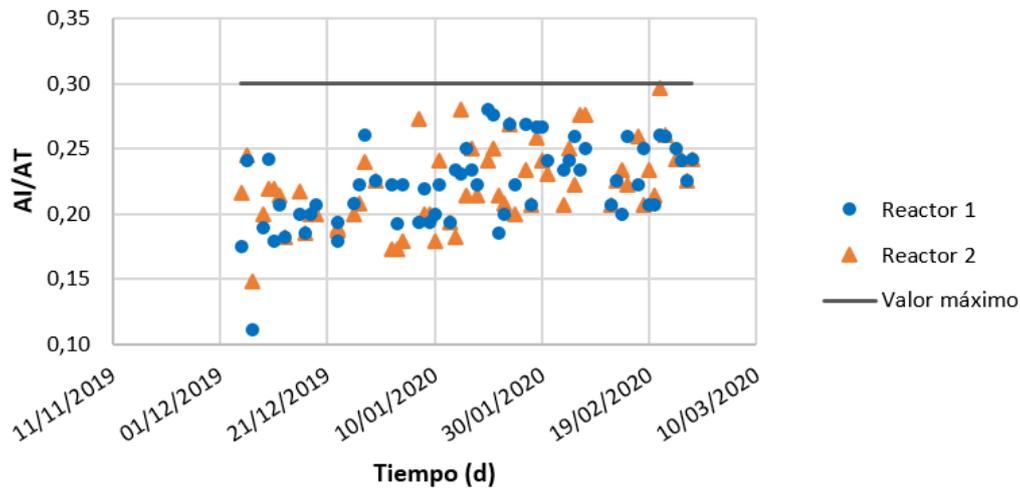


Figura 14. Relación Al/AT para el reactor UASB en la PTAR de San Roque

6.2.3.3 Alcalinidad en Santiago

En la figura 15 se evidencia que la relación Al/AT en la PTAR del corregimiento de Santiago, se mantuvo por debajo de 0,3 en la mayoría de los días, indicando una adecuada capacidad tampón del bicarbonato y una baja concentración de AGV.

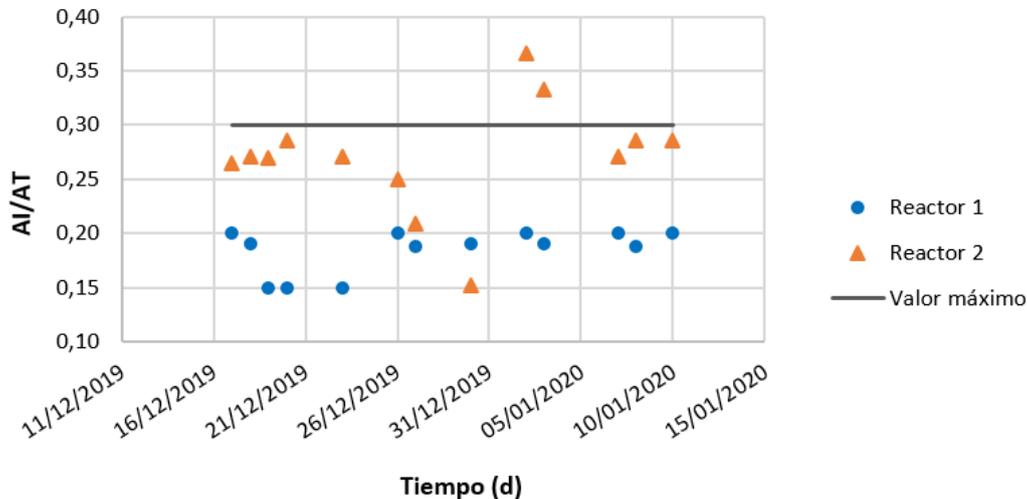


Figura 15. Relación Al/AT para el reactor UASB en la PTAR de Santiago

6.2.4 Resultados de las campañas de monitoreo

En las tablas 1, 2 y 3 se presentan los resultados de las campañas de muestreo en cada una de las PTAR de estudio, las eficiencias del sistema de tratamiento comparadas con las exigidas por la resolución 0631 del 2015 y la relación DBO_5/DQO . Cabe resaltar que no se incluyeron resultados del municipio de

San Carlos, debido a que la fecha del muestreo no se ajustó a la entrega del presente trabajo.

En la tabla 1 se evidencia que los parámetros que cumplieron con el valor máximo admisible para ambas PTAR, fueron: temperatura, pH, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos sedimentables (SSed). La PTAR del municipio de San Roque cumplió con todos los parámetros, mientras que la del corregimiento de Santiago tuvo valores por encima del admisible en los parámetros de demanda química de oxígeno (DQO) y grasas y aceites.

Tabla 1. Resultados de los parámetros obtenidos del muestreo y sus valores máximos admisibles por normatividad

PARÁMETRO	PTAR SAN ROQUE		PTAR SANTIAGO		Valor máximo admisible por la Resolución 0631 del 2015
	AFLUENTE	EFLUENTE	AFLUENTE	EFLUENTE	
Temperatura (°C)	22,51	22,61	21,70	21,61	40
pH (Unidades de pH)	6,83	7,00	7,16	6,98	6,0 a 9,0
DQO (mg/L)	285,9	125,4	314,8	189,6	180
DBO ₅ (mg/L)	122,5	40,6	61,7	56,5	90
SST (mg/L)	62,9	33,5	42,3	71,9	90
SSed (mL/L)	0,1	<0,1	0,1	0,4	5
Grasas y aceites (mg/L)	27,1	<15,0	67,9	21,5	20
Nitrógeno amoniacal (mg/L NH ₃ -N)	19,17	14,78	11,77	12,44	Análisis y Reporte
Nitritos (mg NO ₂ ⁻ -N /L)	<0,002	<0,002	<0,002	0,02	Análisis y Reporte
Nitratos (mg NO ₃ ⁻ -N /L)	-	-	<0,400	<0,400	Análisis y Reporte
Fósforo total (mg-P/L)	2,671	3,162	2,899	2,337	Análisis y Reporte

La tabla 2 muestra las eficiencias para cada una de las plantas de tratamiento. Se concluye que en la PTAR del municipio de San Roque las eficiencias de DQO, DBO₅ y grasas y aceites reales, estuvieron por encima de las eficiencias teóricas. Para la PTAR del corregimiento de Santiago, solo fue posible realizar la comparación con el parámetro de grasas y aceites, debido a que los demás parámetros presentan un valor mayor en el efluente dando como resultado una eficiencia negativa y por lo tanto poco representativa. La eficiencia del parámetro de grasas y aceites en la PTAR de Santiago no cumplió con la resolución, estando por debajo de lo exigido en esta.

Tabla 2. Eficiencias reales de las PTAR comparadas con la resolución 0631 del 2015

PARÁMETRO	EFICIENCIAS SAN ROQUE		EFICIENCIAS SANTIAGO	
	Eficiencia real* (%)	Eficiencia Teórica** (%)	Eficiencia real* (%)	Eficiencia Teórica** (%)
DQO	56,14	37,04	39,77	42,82
DBO	66,86	26,53	8,43	-
SST	46,74	-	-	-
Grasas y aceites	44,65	26,20	68,34	70,54

*Calculada con los datos de laboratorio

** Calculada con los valores máximos permitidos por la resolución 0631 de 2015

Con la relación DBO_5/DQO se extrae información sobre la biodegradabilidad de las aguas residuales y el tipo de tratamiento a emplear. Si esta relación es menor a 0,2 entonces son aguas poco biodegradables, generalmente asociado a aguas residuales de naturaleza industrial y son convenientes los tratamientos físicoquímicos. Si está entre 0,2 y 0,4 moderadamente biodegradable y si es mayor a 0,4, entonces se habla de un vertimiento muy biodegradable. Mientras más alta sea esta relación, indica más biodegradabilidad y por lo tanto posible tratamiento biológico. Según lo anterior, se observa en la tabla 3, que la PTAR del corregimiento de Santiago tiene una relación muy baja ($< 0,2$) indicando que a la planta está ingresando material poco biodegradable, mientras que en la PTAR del municipio de San Roque se obtuvo una relación mayor ($> 0,4$), dando indicios de la alta biodegradabilidad del afluente, lo cual se comprueba con las eficiencias altas en esta planta, sobre todo en el parámetro de DBO_5 .

Tabla 3. Relación DBO_5/DQO afluentes, en las diferentes PTAR de estudio.

RELACIÓN DBO_5/DQO	
San Roque	0,428
Santiago	0,196

6.3 Problemas encontrados en las PTAR

A continuación, se presentan algunos de los problemas encontrados en cada una de las PTAR de estudio a lo largo de la fase de arranque, operación y mantenimiento de las mismas. Cabe resaltar que se evidenció una situación común en las tres plantas al revisar los planos y hojas de cálculo de diseño, referente al diseño de los múltiples de distribución a la entrada de las unidades de tratamiento (Sedimentador primario en San Roque y Reactores anaerobios en San Carlos y Santiago); no se encontraron cálculos para estas tuberías de

distribución, por lo cual se hizo una revisión de las dimensiones actuales para verificar si el diseño era el adecuado.

6.3.1 PTAR San Carlos

Uno de los problemas principales de la PTAR de San Carlos, es la descarga diaria de vertimientos inusuales, lo cual puede afectar el tratamiento de las aguas residuales si los vertimientos tienen características de agua residual no doméstica. En la imagen 9 se muestran algunas de las descargas observadas en la jornada de operación de la planta.



Imagen 9. Descargas inusuales en la PTAR del municipio de San Carlos
Fuente: Informe técnico 2 PTAR San Carlos

Adicionalmente, se encontraron problemas de diseño en el canal de entrada, ya que la velocidad en este punto es muy baja ($<0,3$ m/s) lo cual causa sedimentación de arena y material orgánico tanto en el canal de entrada como en el desarenador, lo anterior se puede evidenciar en la imagen 10a. Como solución, se instalaron bloques de concreto disminuyendo el área y aumentando así la velocidad a la entrada de la planta (Imagen 10b).



a)



b)

Imagen 10. Canal de entrada **a)** Sedimentación de material orgánico **b)** Instalación de ladrillos en el canal de entrada para aumentar la velocidad

Fuente: Informe técnico 2 PTAR San Carlos

Finalmente, se presentaron inundaciones en la planta, debido a que el aliviadero lateral no tenía la capacidad para evacuar el caudal de exceso en las épocas de lluvia cuando se supera el caudal máximo de diseño de la PTAR.

Como solución, se diseñó y construyó un segundo aliviadero después de los tratamientos preliminares, con el cual la PTAR ha funcionado óptimamente.

6.3.2 PTAR de San Roque

La unidad de preliminares en esta PTAR se encuentra a una cota menor comparada con los demás tratamientos, por lo que se requiere de bombeo, esto y con el hecho de tener un alcantarillado combinado en el municipio, ha ocasionado que en épocas de invierno se presenten inundaciones de los tratamientos preliminares, dificultando la debida operación y funcionamiento de la planta. (Imagen 11).

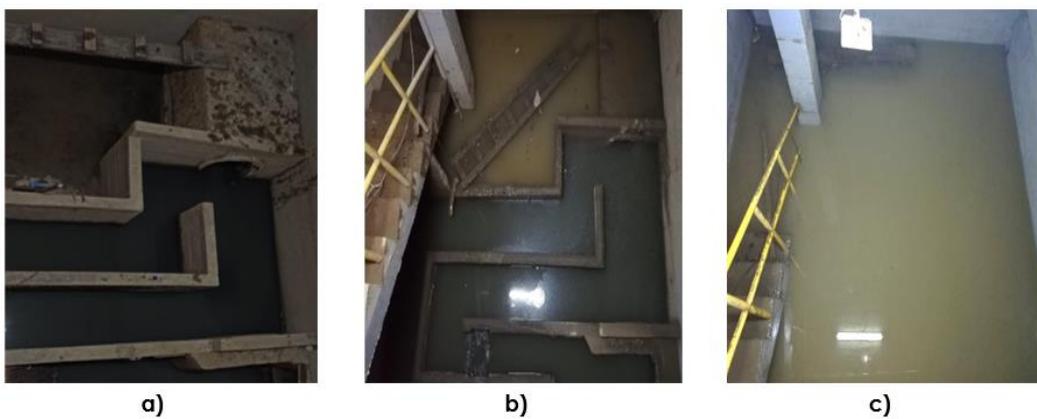


Imagen 11. Problema en tratamiento preliminar de San Roque **a)** Tratamiento preliminar sin inundación **b)** Tratamiento preliminar con inundación leve **c)** Tratamiento preliminar con inundación prolongada.

Fuente: Informe técnico 1 PTAR San Roque

Se presentaron inconvenientes para arrancar el reactor UASB de la PTAR de San Roque, debido a fugas encontradas en las tuberías que conducen el efluente del reactor al manhole, el cual finalmente descarga las aguas tratadas a la quebrada San Roque. Las tuberías fueron reparadas a tiempo evitando que el efluente se esparciera por la PTAR y ocasionara malos olores. Cabe resaltar que el reactor UASB no cuenta un sistema de captación de biogás y con quemador de gases, el cual es un aspecto importante a tener en cuenta, ya que la quema del biogás es uno de los indicadores de la eficiencia del sistema de tratamiento y ayuda en la toma de decisiones, además es vital que en las PTAR se controle la liberación de este gas a la atmósfera para minimizar los gases de efecto invernadero.

6.3.3 PTAR de Santiago

En los tratamientos preliminares de la PTAR se encontraron algunos problemas: el cribado no cuenta con canastilla de recolección de residuos y el

desarenador no tiene un ensanchamiento para reducir la velocidad de flujo y favorecer la sedimentación de arenas, por lo cual se da la sedimentación de material orgánico. Por otro lado, en esta unidad no se cuenta con una tubería de purga perforada en el fondo que evacúe solo el agua residual y permita la limpieza de las arenas sedimentadas, además su tubería de descarga no tiene una conexión a la tubería que entrega el agua tratada al cuerpo receptor. (Imagen 12)

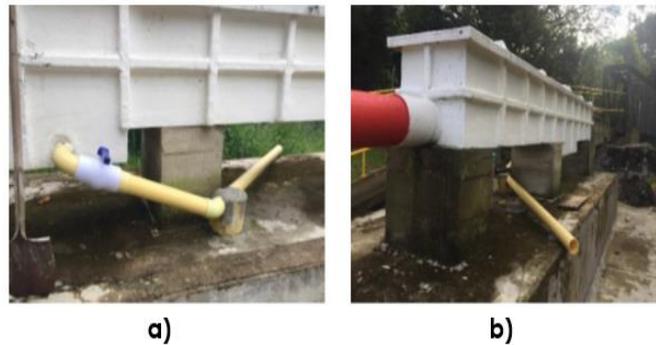


Imagen 12. Tubería de purga del desarenador **a)** Salida del desarenador **b)** Descarga
Fuente: Informe técnico 2 PTAR Santiago

Se presentaron reboses en los primeros dos compartimientos de los reactores de la PTAR, los cuales funcionan como tanques sépticos (Imagen 13). Se decidió vaciar uno de los reactores con el fin de buscar el origen de dicho problema y se encontró que las tuberías con salidas múltiples a la entrada del tercer compartimiento (FAFA) estaban obstruidas con residuos, lo cual generaba el rebose en los tanques sépticos. Además, con lo anterior fue posible obtener la información sobre las dimensiones de dichos múltiples de distribución, ya que en las hojas de cálculo de diseño no se encontraron.



Imagen 13. Rebose de agua residual en los primeros dos compartimientos del reactor anaerobio. **a)** Cámara 1 **b)** Cámara 2.
Fuente: Informe técnico 2 PTAR Santiago

6.4 Pre-dimensionamiento de los múltiples de distribución

Como se mencionó anteriormente, no se encontraron cálculos para las tuberías de entrada a las unidades de tratamiento en las tres PTAR de estudio, lo cual genera incertidumbre en el diseño adecuado de las mismas, y teniendo en cuenta el problema de rebose en el corregimiento de Santiago causado precisamente por la obstrucción de los orificios a la entrada del FAFA. Para esto, se hizo una revisión de las dimensiones actuales, usando el método propuesto por Hudson para sedimentadores de alta tasa en agua potable con el fin de evaluar la distribución uniforme del caudal, además se propuso un pre-dimensionamiento con el mismo método, teniendo consideraciones para agua residual.

6.4.1 Evaluación del diseño actual de los múltiples

A continuación se describe el proceso que debe utilizarse en el diseño de los múltiples de distribución basado en la metodología de Hudson para plantas de potabilización, este se usó para evaluar el diseño actual de estas tuberías en las PTAR luego de extraer datos como caudal de diseño, número de orificios, diámetro de orificio y tubería y los coeficientes de pérdida de carga θ y φ que para el caso de las tres PTAR tienen valores de 0,7 y 1,67 respectivamente debido al tipo de orificio (Imagen 1 y tablas 4, 6 y 8).

- a) La metodología se basa en un proceso iterativo para encontrar al final de cada iteración el coeficiente de pérdida de carga total (β) y corregir la velocidad de cada orificio. Para esto se empieza suponiendo que el caudal se distribuye igual por cada uno de los orificios (i), se organiza una tabla donde la primera columna va a ser el número de orificios y la segunda el caudal de cada orificio (Q_{Li}), es decir $Q_{Li}=Q_{\text{Diseño}}/\text{número de orificios}$.
- b) Se calcula el área del orificio con el diámetro (D_{Li}) de este ($A_{Li}=\pi D_{Li}^2/4$) y posteriormente la velocidad por cada lateral u orificio ($V_{Li}=Q_{Li}/A_{Li}$), esta velocidad se pondrá en la columna 3.
- c) En la cuarta columna se halla el caudal de la tubería (Q_{Ci}) después de cada orificio. En la primera fila (Orificio 1, $i=1$) irá el caudal de diseño total y en los siguientes disminuirá dependiendo de la cantidad que salga por cada lateral, es decir $Q_{Ci}=Q_{C(i-1)}-Q_{Li}$.
- d) Posteriormente, se encuentra el área de la tubería ($A_{Ci}=\pi D_{Ci}^2/4$), utilizando su diámetro (D_{Ci}). Con esta área y el caudal (Q_{Ci}) es posible encontrar la velocidad en la tubería ($V_{Ci}=Q_{Ci}/A_{Ci}$), la cual se ubica en la columna 5.
- e) Se halla la relación $(V_{Ci}/V_{Li})^2$, para utilizar finalmente la ecuación 2 del coeficiente de pérdida de carga (β) y encontrar así la pérdida de carga en cada orificio (β_i), mostrada en la columna 7. Además en la última

columna de la tabla es posible hallar la sumatoria de $1/\sqrt{\beta_i}$, para continuar con la siguiente iteración.

- f) Se realiza otra tabla igual a la anterior para la siguiente iteración, pero esta vez no se supone el caudal uniforme, en este paso se empieza con la columna 3 corrigiendo la primera velocidad del orificio (V_{L1}) mediante la ecuación (3) y las demás velocidades (V_{Li}) mediante la ecuación (4).
- g) Con la velocidad anterior y el área del orificio (A_{Li}) se halla el caudal en cada orificio ($Q_{Li}=V_{Li}*A_{Li}$), los cuales se ubican en la segunda columna.
- h) Se siguen los pasos a partir del numeral c) hasta que los resultados de las iteraciones sean muy parecidos. En este caso se hicieron tres iteraciones, ya que los valores se estabilizaron con facilidad.

A continuación, se presentan las dimensiones actuales de cada una de las PTAR (Tablas 4, 6 y 8), las tablas con la última iteración usando el proceso descrito anteriormente (Tablas 5, 7 y 9) y sus respectivos análisis.

6.4.1.1 Múltiples de distribución de San Carlos

En este municipio fue posible extraer los datos reales de las tuberías de distribución en campo (Tabla 4). Además, se tiene en cuenta que el caudal de diseño es 40 L/s, sin embargo, el valor utilizado en los cálculos es 10 L/s, debido a que son 2 sedimentadores (se divide el caudal a 20 L/s en cada sedimentador) y cada uno con 2 tuberías de distribución (se distribuye el caudal a 10 L/s para cada tubería).

Tabla 4. Dimensiones de la tubería con salidas múltiples a la entrada del sedimentador primario de alta tasa en PTAR San Carlos

DATOS ACTUALES DE LAS TUBERÍAS		
Caudal total	0,01	m ³ /s
Número de orificios	20	10 por cada lado
Diámetro orificio	3	Pulgadas
Diámetro tubería	8	Pulgadas
Teta	0,7	Adimensional
Fi=	1,67	Adimensional

Hudson propone que para asegurar una distribución uniforme del flujo en su ingreso se debe diseñar un sistema de distribución de tal forma que permita el ingreso del primer y último orificio de entrada al sedimentador, la diferencia de caudales no sea superior al 10 % y además las pérdidas (β) a través de cada lateral deben ser las mismas (CEPIS, 2006). En la tabla 5 se evidencia que el caudal de diseño no se distribuye uniformemente, dando una diferencia de caudales entre el primero y último orificio del 80,36 %, además las pérdidas entre los orificios son muy diferentes, por lo anterior se concluye que el diseño

no es el apropiado ya que no cumple con la función principal de los múltiples de distribución.

Tabla 5. Resultados de la última iteración usando el método de Hudson para el análisis del diseño actual de los múltiples en San Carlos

Orificios	Q_{li} (m ³ /s)	V_{li} (m/s)	Q_{ci} (m ³ /s)	V_{ci} (m/s)	$(V_{ci}/V_{li})^2$	β_i	$1/\sqrt{\beta_i}$
1	0,00019	0,04	0,010	0,31	55,72	94,75	0,10
2	0,00020	0,04	0,010	0,30	46,61	79,54	0,11
3	0,00022	0,05	0,010	0,30	38,59	66,15	0,12
4	0,00023	0,05	0,009	0,29	31,60	54,47	0,14
5	0,00025	0,06	0,009	0,28	25,55	44,36	0,15
6	0,00028	0,06	0,009	0,27	20,37	35,72	0,17
7	0,00030	0,07	0,009	0,27	16,00	28,42	0,19
8	0,00033	0,07	0,008	0,26	12,35	22,33	0,21
9	0,00037	0,08	0,008	0,25	9,36	17,33	0,24
10	0,00041	0,09	0,008	0,24	6,95	13,30	0,27
11	0,00045	0,10	0,007	0,22	5,04	10,12	0,31
12	0,00050	0,11	0,007	0,21	3,56	7,65	0,36
13	0,00056	0,12	0,006	0,19	2,45	5,79	0,42
14	0,00063	0,14	0,006	0,18	1,64	4,43	0,48
15	0,00070	0,15	0,005	0,16	1,05	3,46	0,54
16	0,00076	0,17	0,004	0,13	0,65	2,78	0,60
17	0,00083	0,18	0,004	0,11	0,37	2,32	0,66
18	0,00089	0,19	0,003	0,09	0,19	2,02	0,70
19	0,00093	0,20	0,002	0,06	0,08	1,84	0,74
20	0,00096	0,21	0,001	0,03	0,02	1,73	0,76
Caudal total=	0,01						7,26
Diferencia de caudales (%) =	80,36						

6.4.1.2 Múltiples de distribución de San Roque

Las dimensiones de las tuberías de distribución en esta PTAR se obtuvieron a partir de los planos debido a que no fue posible acceder a la hoja de cálculo de diseño. Además, en los planos no se encontró el número de orificios, esta dimensión se dedujo a partir de las separaciones mostradas en las notas de los planos. El caudal de diseño de esta PTAR es 22,1 L/s, sin embargo, se tienen dos reactores UASB, cada uno con una tubería de distribución con múltiples, por lo anterior el caudal utilizado en los cálculos es de 11,05 L/s (Tabla 6),

Tabla 6. Dimensiones de la tubería con salidas múltiples a la entrada de los reactores UASB en PTAR San Roque

DATOS ACTUALES DE LAS TUBERÍAS		
Caudal total	0,01	m ³ /s
Número de orificios	60	30 cada lado
Diámetro orificio	2	Pulgadas
Diámetro tubería	8	Pulgadas

Teta	0,7	Adimensional
Fi	1,67	Adimensional

En la tabla 7 se muestra que la diferencia de caudales en este caso es de 87,10 % (mucho mayor al 10 % permitido) y las pérdidas varían entre valores de 1,71 en el último orificio y 265,48 en el primer orificio. Con lo anterior, se evidencia que el diseño de estos múltiples de distribución no es el adecuado.

Tabla 7. Resultados de la última iteración usando el método de Hudson para el análisis del diseño actual de los múltiples en San Roque

Orificios	Q_{li} (m ³ /s)	V_{li} (m/s)	Q_{ci} (m ³ /s)	V_{ci} (m/s)	$(V_{ci}/V_{li})^2$	β_i	$1/\sqrt{\beta_i}$
1	0,000055	0,03	0,011	0,34	157,95	265,48	0,061
2	0,000056	0,03	0,011	0,34	149,26	250,96	0,063
3	0,000058	0,03	0,011	0,34	140,89	236,98	0,065
4	0,000059	0,03	0,011	0,34	132,84	223,54	0,067
5	0,000060	0,03	0,011	0,33	125,10	210,62	0,069
6	0,000062	0,03	0,011	0,33	117,68	198,22	0,071
7	0,000064	0,03	0,011	0,33	110,55	186,32	0,073
8	0,000065	0,03	0,011	0,33	103,73	174,92	0,076
9	0,000067	0,03	0,011	0,33	97,19	164,01	0,078
10	0,000069	0,03	0,011	0,32	90,94	153,57	0,081
11	0,000071	0,03	0,010	0,32	84,97	143,59	0,083
12	0,000073	0,04	0,010	0,32	79,27	134,07	0,086
13	0,000075	0,04	0,010	0,32	73,83	125,00	0,089
14	0,000077	0,04	0,010	0,32	68,66	116,36	0,093
15	0,000079	0,04	0,010	0,31	63,74	108,14	0,096
16	0,000082	0,04	0,010	0,31	59,07	100,34	0,100
17	0,000084	0,04	0,010	0,31	54,64	92,94	0,104
18	0,000087	0,04	0,010	0,31	50,44	85,94	0,108
19	0,000090	0,04	0,010	0,30	46,47	79,31	0,112
20	0,000093	0,05	0,010	0,30	42,73	73,06	0,117
21	0,000096	0,05	0,010	0,30	39,20	67,16	0,122
22	0,000099	0,05	0,010	0,29	35,88	61,62	0,127
23	0,000103	0,05	0,009	0,29	32,76	56,41	0,133
24	0,000107	0,05	0,009	0,29	29,84	51,53	0,139
25	0,000111	0,05	0,009	0,28	27,11	46,97	0,146
26	0,000115	0,06	0,009	0,28	24,56	42,71	0,153
27	0,000119	0,06	0,009	0,28	22,18	38,75	0,161
28	0,000124	0,06	0,009	0,27	19,98	35,07	0,169
29	0,000129	0,06	0,009	0,27	17,94	31,65	0,178
30	0,000134	0,07	0,009	0,27	16,05	28,50	0,187
31	0,000140	0,07	0,008	0,26	14,31	25,60	0,198
32	0,000146	0,07	0,008	0,26	12,72	22,93	0,209
33	0,000153	0,08	0,008	0,25	11,25	20,49	0,221
34	0,000160	0,08	0,008	0,25	9,92	18,27	0,234
35	0,000167	0,08	0,008	0,24	8,71	16,24	0,248
36	0,000175	0,09	0,008	0,24	7,61	14,41	0,263
37	0,000183	0,09	0,008	0,23	6,62	12,76	0,280
38	0,000192	0,09	0,007	0,23	5,73	11,28	0,298
39	0,000202	0,10	0,007	0,22	4,94	9,95	0,317
40	0,000212	0,10	0,007	0,21	4,23	8,77	0,338

41	0,000222	0,11	0,007	0,21	3,61	7,73	0,360
42	0,000234	0,12	0,007	0,20	3,06	6,81	0,383
43	0,000245	0,12	0,006	0,19	2,58	6,00	0,408
44	0,000258	0,13	0,006	0,19	2,16	5,30	0,434
45	0,000271	0,13	0,006	0,18	1,79	4,69	0,462
46	0,000284	0,14	0,006	0,17	1,48	4,17	0,490
47	0,000298	0,15	0,005	0,16	1,21	3,73	0,518
48	0,000311	0,15	0,005	0,15	0,99	3,35	0,547
49	0,000325	0,16	0,005	0,14	0,79	3,02	0,575
50	0,000339	0,17	0,004	0,13	0,63	2,75	0,603
51	0,000352	0,17	0,004	0,12	0,50	2,53	0,629
52	0,000365	0,18	0,004	0,11	0,38	2,34	0,654
53	0,000377	0,19	0,003	0,10	0,29	2,19	0,676
54	0,000388	0,19	0,003	0,09	0,21	2,06	0,697
55	0,000398	0,20	0,002	0,08	0,15	1,95	0,715
56	0,000407	0,20	0,002	0,06	0,10	1,87	0,731
57	0,000414	0,20	0,002	0,05	0,06	1,81	0,744
58	0,000419	0,21	0,001	0,04	0,04	1,76	0,754
59	0,000423	0,21	0,001	0,03	0,02	1,73	0,761
60	0,000426	0,21	0,000	0,01	0,00	1,71	0,765
Caudal total=	0,01						17,72
Diferencia de caudales (%)=	87,10						

6.4.1.3 Múltiples de distribución de Santiago

Para extraer la información requerida en el análisis del diseño actual, se hicieron medidas en campo en el momento en que se vació uno de los reactores, esto debido a que no se encontraron las dimensiones en planos y hojas de cálculo de diseño de los múltiples a la entrada de los FAFA. El caudal de diseño para esta PTAR es de 3,81 L/s, sin embargo, para los cálculos se tomó de 1,905 L/s debido a que la planta cuenta con dos reactores anaerobios, por lo cual, el caudal se distribuye para ambos (Tabla 8).

Tabla 8. Dimensiones de la tubería con salidas múltiples a la entrada de los FAFA en PTAR Santiago

DATOS ACTUALES DE LAS TUBERÍAS		
Caudal total=	0,0019	m ³ /s
Número de orificios=	28	14 cada lado
Diámetro orificio=	1	Pulgadas
Diámetro tubería=	4	Pulgadas
Teta=	0,7	Adimensional
Fi=	1,67	Adimensional

A partir de la tabla 9, se concluye que la PTAR de este municipio no tiene un diseño adecuado en los múltiples de distribución a la entrada de los filtros anaerobios de flujo ascendente, debido a que la diferencia de caudales entre el primero y último orificio es del 64,13 % (valor elevado que supera lo recomendado por Hudson) y las pérdidas tienen una variación significativa

Tabla 9. Resultados de la última iteración usando el método de Hudson para el análisis del diseño actual de los múltiples en Santiago

Orificios	Q_{Li} (m ³ /s)	V_{Li} (m/s)	Q_{Ci} (m ³ /s)	V_{Ci} (m/s)	$(V_{Ci}/V_{Li})^2$	β_i	$1/\sqrt{\beta_i}$
1	0,000035	0,07	0,002	0,23	11,25	20,49	0,22
2	0,000037	0,07	0,002	0,23	9,92	18,27	0,23
3	0,000039	0,08	0,002	0,23	8,71	16,24	0,25
4	0,000041	0,08	0,002	0,22	7,61	14,41	0,26
5	0,000043	0,08	0,002	0,22	6,62	12,76	0,28
6	0,000045	0,09	0,002	0,21	5,73	11,28	0,30
7	0,000047	0,09	0,002	0,21	4,94	9,95	0,32
8	0,000049	0,10	0,002	0,20	4,23	8,77	0,34
9	0,000052	0,10	0,002	0,19	3,61	7,73	0,36
10	0,000054	0,11	0,002	0,19	3,06	6,81	0,38
11	0,000057	0,11	0,001	0,18	2,58	6,00	0,41
12	0,000060	0,12	0,001	0,17	2,16	5,30	0,43
13	0,000063	0,12	0,001	0,17	1,79	4,69	0,46
14	0,000066	0,13	0,001	0,16	1,48	4,17	0,49
15	0,000069	0,14	0,001	0,15	1,21	3,73	0,52
16	0,000072	0,14	0,001	0,14	0,99	3,35	0,55
17	0,000076	0,15	0,001	0,13	0,79	3,02	0,58
18	0,000079	0,16	0,001	0,12	0,63	2,75	0,60
19	0,000082	0,16	0,001	0,11	0,50	2,53	0,63
20	0,000085	0,17	0,001	0,10	0,38	2,34	0,65
21	0,000088	0,17	0,001	0,09	0,29	2,19	0,68
22	0,000090	0,18	0,001	0,08	0,21	2,06	0,70
23	0,000092	0,18	0,001	0,07	0,15	1,95	0,72
24	0,000094	0,19	0,000	0,06	0,10	1,87	0,73
25	0,000096	0,19	0,000	0,05	0,06	1,81	0,74
26	0,000097	0,19	0,000	0,04	0,04	1,76	0,75
27	0,000098	0,19	0,000	0,02	0,02	1,73	0,76
28	0,000099	0,20	0,000	0,01	0,00	1,71	0,77
Caudal total=	0,0019050						14,10
Diferencia de caudales (%)=	64,13						

6.4.2 Pre-dimensionamiento con la metodología propuesta

Como se demostró en los cálculos anteriores el diseño de los múltiples de distribución para las tres PTAR no es el adecuado, debido a que no cumplen su función principal de distribuir uniformemente el caudal de ingreso a las unidades de tratamiento. Por esto se propuso un pre-dimensionamiento de estas tuberías utilizando la metodología de Hudson descrita en el ítem anterior y teniendo en cuenta algunas consideraciones para agua residual como la velocidad en los orificios y en las tuberías. Cabe resaltar que esta metodología es utilizada en plantas de potabilización, por lo cual en la literatura se tiene en cuenta la ecuación (5) del gradiente de velocidad, sin embargo, en estos casos no es relevante, debido a que en agua residual no es necesario mantener el floc en buenas condiciones, como si lo es para agua potable.

De manera general para los tres diseños se propuso disminuir el número de orificios y aumentar el diámetro de la tubería, de esta forma se logró una mejor distribución del caudal y tener velocidades que fueran adecuadas a cada proceso. A continuación, se presenta el pre dimensionamiento de los múltiples de distribución de las tres PTAR y sus respectivas consideraciones.

6.4.2.1 Pre-dimensionamiento de San Carlos

El principal problema en sedimentadores de alta tasa para agua residual son las obstrucciones en tubos internos y canales. El diseño de estos incluye la distribución de flujo igual a través de cada placa y la eliminación efectiva de sólidos sin resuspensión (Qasim & Zhu, 2018). Se recomiendan valores de velocidades en la entrada de esta unidad de 0,2 m/s aproximadamente, valores inferiores causan la deposición de partículas en los orificios y por ende su obstrucción y valores mayores pueden afectar el proceso de sedimentación arrastrando las partículas ya sedimentadas en las placas ocasionando la posible resuspensión de sólidos y la disminución de la eficiencia del tratamiento (Arboleda, 2000). Según lo anterior, se hizo el predimensionamiento presentado en las tablas 10 y 11.

Tabla 10. Pre-dimensionamiento de las tuberías con salidas múltiples a la entrada de los sedimentadores de alta tasa en PTAR San Carlos

DATOS DE ENTRADA PARA EL PRE DIMENSIONAMIENTO		
Caudal total=	0,01	m ³ /s
Número de orificios=	14	7 cada lado
Diámetro orificio=	2,5	Pulgadas
Diámetro tubería=	14	Pulgadas
Teta=	0,7	Adimensional
Fi=	1,67	Adimensional

En la tabla 11 se muestra que la diferencia de caudales entre el primer y último orificio con el nuevo diseño es de 9,38 %, el cual es menor al 10 % y garantiza la distribución uniforme del caudal en todo el sedimentador de alta tasa, además las pérdidas entre los orificios son muy parecidas. Se evidencia que las velocidades en los orificios (V_{li}) son muy cercanas a 0,2 m/s, lo cual puede mejorar la eficiencia del tratamiento ya que en el diseño actual (Tabla 5) se tienen velocidades muy pequeñas que pueden ocasionar la sedimentación de partículas y posible obstrucción de los orificios.

Tabla 11. Resultados de la última iteración usando el método de Hudson para el análisis del diseño actual de los múltiples en San Carlos

Oficios	Q_{li} (m ³ /s)	V_{li} (m/s)	Q_{ci} (m ³ /s)	V_{ci} (m/s)	$(V_{ci}/V_{li})^2$	β_i	$1/\sqrt{\beta_i}$
1	0,0007	0,21	0,010	0,10	0,23	2,08	0,69
2	0,0007	0,21	0,009	0,09	0,19	2,02	0,70

3	0,0007	0,22	0,009	0,09	0,16	1,97	0,71
4	0,0007	0,22	0,008	0,08	0,13	1,92	0,72
5	0,0007	0,22	0,007	0,07	0,11	1,88	0,73
6	0,0007	0,22	0,007	0,07	0,09	1,84	0,74
7	0,0007	0,23	0,006	0,06	0,07	1,81	0,74
8	0,0007	0,23	0,005	0,05	0,05	1,79	0,75
9	0,0007	0,23	0,004	0,04	0,04	1,76	0,75
10	0,0007	0,23	0,004	0,04	0,03	1,74	0,76
11	0,0007	0,23	0,003	0,03	0,02	1,73	0,76
12	0,0007	0,23	0,002	0,02	0,01	1,72	0,76
13	0,0007	0,23	0,001	0,01	0,00	1,71	0,77
14	0,0007	0,23	0,001	0,01	0,00	1,70	0,77
Caudal total=	0,0100						10,36
Diferencia de caudales (%)=	9,38						

6.4.2.2 Pre-dimensionamiento de San Roque

Para obtener un buen rendimiento de los reactores UASB, es esencial que el sustrato afluente se distribuya uniformemente en la parte inferior de los reactores, con el fin de garantizar un contacto cercano entre la biomasa y el sustrato, mejor régimen de mezcla y una menor presencia de zonas muertas en el lecho de lodo. La velocidad en la tubería de distribución debe ser lo suficientemente alta para evitar que los sólidos presentes en el afluente obstruyan con frecuencia los tubos y además, permitir una velocidad menor a 0,2 m/s de modo que las burbujas de aire ocasionalmente arrastradas hacia el interior del tubo puedan volver hacia arriba (en dirección opuesta a las aguas residuales). Por otro lado, la velocidad en los orificios debe ser mayor a 0,4 m/s para favorecer una buena mezcla, un mayor contacto con el lecho de lodo y para evitar la deposición de sólidos inertes cerca del punto de descarga del tubo (Sperling & Chernicharo, 2005). Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se propuso el pre-dimensionamiento presentado en las tablas 12 y 13.

Tabla 12. Pre-dimensionamiento de las tuberías con salidas múltiples a la entrada de los reactores UASB en PTAR San Roque

DATOS DE ENTRADA PARA EL PRE DIMENSIONAMIENTO		
Caudal total=	0,01	m ³ /s
Número de orificios=	22	11 cada lado
Diámetro orificio=	1,5	Pulgadas
Diámetro tubería=	12	Pulgadas
Teta=	0,7	Adimensional
Fi=	1,67	Adimensional

En la tabla 13 se evidencia que la diferencia de caudales es menor al 10%, arrojando un valor de 5,69 %, así se garantiza la distribución uniforme del

caudal para tener un rendimiento adecuado en el reactor. La velocidad en todos los orificios (V_{Li}) es mayor a 0,4 m/s y las velocidades en la tubería (V_{ci}) son menores a 0,2 m/s, de esta forma se asegura mezcla en el reactor y se evitan las burbujas de aire en este. De igual forma se observa que las pérdidas son muy parecidas en cada uno de los orificios, lo cual también ayuda al buen funcionamiento del sistema de tratamiento.

Tabla 13. Resultados de la última iteración usando el método de Hudson para el análisis del diseño actual de los múltiples en San Roque.

Oficios	Q_{Li} (m ³ /s)	V_{Li} (m/s)	Q_{ci} (m ³ /s)	V_{ci} (m/s)	$(V_{ci}/V_{Li})^2$	β_i	$1/\sqrt{\beta_i}$
1	0,00048	0,42	0,011	0,15	0,13	1,91	0,72
2	0,00049	0,43	0,011	0,14	0,12	1,89	0,73
3	0,00049	0,43	0,010	0,14	0,10	1,87	0,73
4	0,00049	0,43	0,010	0,13	0,09	1,86	0,73
5	0,00049	0,43	0,009	0,12	0,08	1,84	0,74
6	0,00050	0,43	0,009	0,12	0,07	1,82	0,74
7	0,00050	0,44	0,008	0,11	0,07	1,81	0,74
8	0,00050	0,44	0,008	0,10	0,06	1,79	0,75
9	0,00050	0,44	0,007	0,10	0,05	1,78	0,75
10	0,00050	0,44	0,007	0,09	0,04	1,77	0,75
11	0,00050	0,44	0,006	0,08	0,04	1,76	0,75
12	0,00051	0,44	0,006	0,08	0,03	1,75	0,76
13	0,00051	0,44	0,005	0,07	0,02	1,74	0,76
14	0,00051	0,45	0,005	0,06	0,02	1,73	0,76
15	0,00051	0,45	0,004	0,06	0,02	1,73	0,76
16	0,00051	0,45	0,004	0,05	0,01	1,72	0,76
17	0,00051	0,45	0,003	0,04	0,01	1,71	0,76
18	0,00051	0,45	0,003	0,04	0,01	1,71	0,76
19	0,00051	0,45	0,002	0,03	0,00	1,71	0,77
20	0,00051	0,45	0,002	0,02	0,00	1,70	0,77
21	0,00051	0,45	0,001	0,01	0,00	1,70	0,77
22	0,00051	0,45	0,001	0,01	0,00	1,70	0,77
Caudal total=	0,011						16,53
Diferencia de caudales (%)=	5,69						

6.4.2.3 Pre-dimensionamiento de Santiago

Un aspecto muy importante del diseño de los filtros anaerobios de flujo ascendente es el detalle de los dispositivos de entrada y salida de aguas residuales, ya que la eficiencia del sistema de tratamiento depende sustancialmente de la buena distribución del flujo en el lecho filtrante y esta distribución está sujeta al cálculo correcto de los dispositivos de entrada y salida. La velocidad del flujo ascendente debe mantenerse por debajo del límite por encima del cual los sólidos se pierden significativamente en el efluente. En reactores a gran escala, la velocidad de flujo ascendente suele ser de alrededor 2 m/h (Sperling & Chernicharo, 2005). Teniendo en cuenta lo

anterior y los problemas de rebose de reactores en la PTAR se realizó el pre-dimensionamiento mostrado en las tablas 14 y 15

Tabla 14. Pre-dimensionamiento de las tuberías con salidas múltiples a la entrada de los filtros anaerobios de flujo ascendente en PTAR Santiago

DATOS DE ENTRADA PARA EL PRE DIMENSIONAMIENTO		
Caudal total=	0,0019	m ³ /s
Número de orificios=	12	6 cada lado
Diámetro orificio=	1,5	Pulgadas
Diámetro tubería=	8	Pulgadas
Teta=	0,7	Adimensional
Fi=	1,67	Adimensional

En la tabla 15, se observa que en el pre-dimensionamiento se decidió aumentar tanto el diámetro de la tubería como el del orificio, esto debido al problema de la PTAR mencionado con anterioridad referente al rebose de los reactores, el cual se da por el taponamiento con residuos de las tuberías y de los orificios, el aumento del diámetro podría dar solución a este inconveniente. En la tabla 15 se evidencia que la diferencia de caudales es del 8,39 % (menor al 10%), lo cual garantiza la distribución uniforme del caudal, aportando a la eficiencia del tratamiento. Por otro lado, las velocidades en los orificios (V_{Li}) son mayores que en el diseño actual, esto también podría ayudar al problema del rebose. Sin embargo, para el diseño se tuvo en cuenta que estas velocidades no deben ser tan grandes como en los reactores UASB ($> 4\text{m/s}$) debido a que se necesitan velocidades de flujo ascendente bajas para que los sólidos no salgan en el efluente y por el contrario permanezcan en el lecho filtrante o rosetas, por lo anterior se decidió no aumentar significativamente este parámetro.

Tabla 15. Resultados de la última iteración usando el método de Hudson para el análisis del diseño actual de los múltiples en Santiago.

Oficios	Q_{Li} (m ³ /s)	V_{Li} (m/s)	Q_{ci} (m ³ /s)	V_{ci} (m/s)	$(V_{ci}/V_{Li})^2$	β_i	$1/\sqrt{\beta_i}$
1	0,00015	0,13	0,0019	0,06	0,20	2,03	0,70
2	0,00015	0,13	0,0018	0,05	0,16	1,97	0,71
3	0,00015	0,14	0,0016	0,05	0,13	1,92	0,72
4	0,00016	0,14	0,0014	0,04	0,11	1,88	0,73
5	0,00016	0,14	0,0013	0,04	0,08	1,84	0,74
6	0,00016	0,14	0,0011	0,03	0,06	1,80	0,74
7	0,00016	0,14	0,0010	0,03	0,05	1,78	0,75
8	0,00016	0,14	0,0008	0,03	0,03	1,75	0,76
9	0,00016	0,14	0,0007	0,02	0,02	1,73	0,76
10	0,00016	0,14	0,0005	0,02	0,01	1,72	0,76
11	0,00016	0,14	0,0003	0,01	0,00	1,71	0,77
12	0,00016	0,14	0,0002	0,01	0,00	1,70	0,77
Caudal total=	0,0019						8,91
Diferencia de caudales (%) =	8,39						

6.4.3. Esquema del diseño actual comparado con el pre dimensionamiento realizado.

En la Imagen 14 se presenta un esquema del diseño actual de los múltiples de distribución y su cambio al realizar el pre dimensionamiento para cada una de las PTAR de estudio.

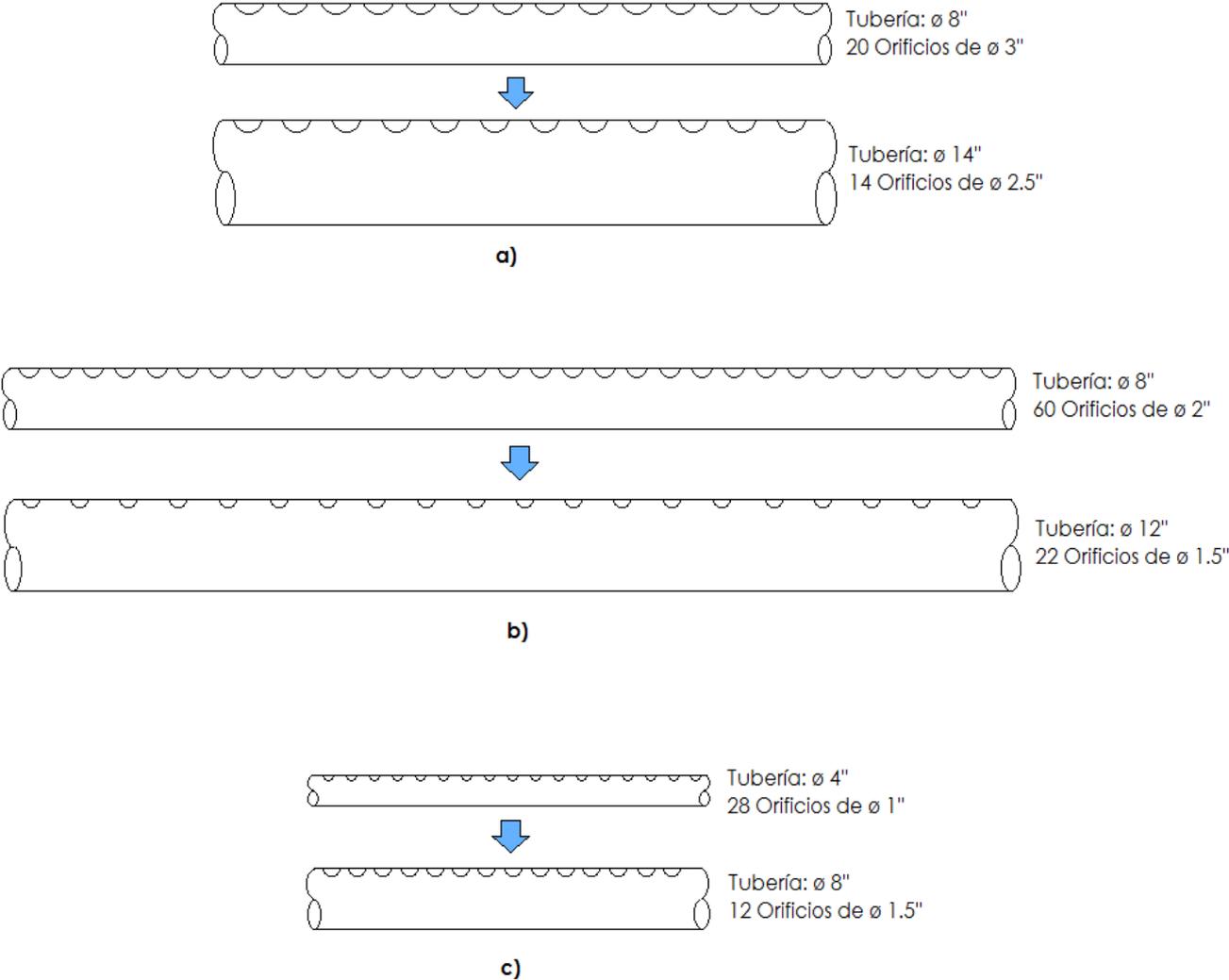


Imagen 14. Esquema del diseño actual de los múltiples de distribución y su cambio con el nuevo pre dimensionamiento. **a)** San Carlos **b)** San Roque **c)** Santiago.

Fuente: Autoría propia

7. CONCLUSIONES

- El arranque óptimo de una PTAR no solo está asociado a las buenas prácticas operacionales dentro de ella, como las mediciones in situ de caudal, pH y alcalinidad y ex situ de DQO, DBO₅, sólidos suspendidos totales y grasas y aceites, sino que también está ligado a los diseños adecuados de las unidades de tratamiento.
- Es importante tener un buen diseño en las tuberías de alimentación de las unidades de tratamiento como sedimentadores de alta tasa, reactores UASB y FAFA, ya que pueden afectar el funcionamiento y operación de todo el sistema.
- Un número de orificios elevado en las tuberías con múltiples y un diámetro de tubería bajo, ocasionan una distribución no uniforme del caudal y pérdidas de carga mayores.
- El diámetro del orificio es el parámetro predominante para controlar la velocidad a la entrada de la unidad de tratamiento (velocidad en los orificios), este permite mantener una velocidad tal que, no se depositen residuos que puedan taponar los orificios y evitar así el la distribución deficiente de agua residual.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akunna, J. (2019). *Anaerobic Waste-Wastewater Treatment and Biogas Plants*. New York: Taylor & Francis Group.
- Alcaldía Municipal San Carlos Antioquia. (2016). *Plan de desarrollo del municipio de San Carlos (2016-2019)*. San Carlos.
- Alcaldía Municipal San Roque . (2016). *Plan de desarrollo municipal de San Roque* .
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Pollution Control Federation (WPCF). (2012). *Standard methods for examination of water and wastewater*. Washington.
- Arboleda Valencia, J. (1972). *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua (Vol. 13)*. Lima, Perú: McGraw-Hill Interamericana.
- Arboleda Valencia, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua (Vol I)*. McGraw-Hill Interamericana.
- Cabrera Viveros, J. A., & Otaya Bolaños, F. J. (Mayo de 2014). *Determinación y evaluación de la distribución de flujo y su eficiencia, en la estructura de entrada sumergida para el conducto principal y laterales de sección constante y variable, en un tanque decantador de placas inclinadas*. Obtenido de <http://biblioteca.udenar.edu.co:8085/atenea/biblioteca/90179.pdf>
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (2006). *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida*. Lima.
- Cornare. (2014). *Instructivo recolección muestras de agua*. Medellín.
- Hudson Jr, H. E. (1981). *Water Clarification processes: practical design and evaluation*. USA: Litton Education Publishing, Inc.
- Londoño Velez, S. (2019). *Curso de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas*. Medellín.
- Mara, D. (2004). *Domestic wastewater treatment in developing countries*. Estados Unidos: Earthscan.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

- Pérez Parra, J. (1996). Manual de Potabilización del Agua. Medellín: Centro de Investigaciones UdeA.
- Qasim , S. R., & Zhu, G. (2018). *Wastewater Treatment and Reuse. Theory and Design Examples* (Vol. 1). New York: Taylor & Francis Group.
- Rojas, O. (2004). Capacidad tampón en reactores anaerobios. Curso sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales, Programa de Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Rozzi, A. (1986). Parámetros de operación y control de los procesos anaeróbicos. Tercer Seminario sobre depuración anaeróbica de aguas residuales, Valladolid, España.
- Sperling, M. V., & Chernicharo, C. A. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions* (Vol I). Londres: IWA Publishing.
- Taborda Rueda, L. (s.f.). Notas del curso Sistemas de Tratamiento de agua potable: Módulo 3. Sedimentación.
- Van Haandel, A. C., & Lettinga, G. (1994). *Tratamiento Anaeróbico de Esgotos. Un manual para regiones de clima quente*. Campina Grande: Egraf.
- Vargas Sampedro, J. (2019). *Arranque y estabilización de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de San Roque*.
- Vargas Sampedro, J. (2019). *Arranque y estabilización de la planta de tratamiento de aguas residuales el municipio de San Carlos*.
- Vargas Sampedro, J. (2019). *Arranque y estabilización de la planta de tratamiento de aguas residuales en el corregimiento de Santiago*.