



Autor: Santiago Londoño Vélez
Revisado por: Francisco José Molina Pérez

**Guía de diseño conceptual y operación de Plantas de
Tratamiento de Aguas Residuales domésticas en
pequeñas comunidades para profesionales**



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Facultad de Ingeniería



El número de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas (PTAR) en Antioquia aumentó 74 % en los últimos nueve años. Este aumento nos mostró que necesitamos una guía para prevenir errores de diseño, instalación y operación en las futuras PTAR. Entonces diseñamos una guía para satisfacer esta nueva necesidad. Para diseñar esta guía tuvimos cuatro objetivos. El primero, elegir 89 PTAR de la experiencia que teníamos para operar estas PTAR. El segundo, clasificar estas PTAR en niveles y tecnologías. El tercero, describir varios errores de diseño conceptual en las PTAR. El cuarto, diseñar esta guía con las tecnologías más usadas en Antioquia. Aquí describimos que las PTAR usan una combinación de varios niveles y tecnologías. Estos niveles son pretratamiento, tratamiento primario, secundario y tratamiento de lodos. Estas tecnologías son sedimentadores primarios (con placas inclinadas), reactores UASB, reactores PBR, reactores anaerobios de lodos y lechos de arena. Estas PTAR tienen poblaciones menores a 30.000, varios errores de diseño y problemas operacionales. Estos errores son la inapropiada localización de estas PTAR, los tiempos de retención hidráulicos bajos en estos reactores PBR y los lechos de arena tiene un tamaño muy pequeño. Estos problemas operaciones son la distribución desigual del caudal de ingreso y salida en estos reactores UASB y PBR. Sugerimos usar esta guía de 2 maneras. La primera, para prevenir estos errores de diseño en las futuras PTAR. La segunda, para mejorar la capacitación de los operarios a cargo de estas PTAR. Entonces si tienes que diseñar una PTAR. ¡Esta es tu guía!

Santiago Londoño Vélez

**Guía de diseño conceptual y operación de
Plantas de Tratamiento de Aguas
Residuales domésticas en pequeñas
comunidades para profesionales**



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Facultad de Ingeniería



Título: Guía de diseño conceptual y operación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales domésticas en pequeñas comunidades para profesionales.

Nuestro texto de investigación: State-of-the-art review on WWTPs in Antioquia: levels, technologies, flaws and operational setbacks. Revista Producción + limpia. Unilasallista Editorial Lasallista. Publicado: 2023-07-12. En este *texto* describimos brevemente las tecnologías más usadas en las PTAR de Antioquia, varios errores de diseño conceptual y varios problemas operacionales. El texto está conectado con esta guía de PTAR.

Diseño, ilustración y fotos por: Santiago Londoño Vélez

Autor: Santiago Londoño Vélez

Revisado por: Francisco José Molina Pérez

Primera edición: noviembre de 2023

ISBN: 978-628-95881-3-2

Universidad de Antioquia, Medellín.

Antioquia. Colombia.

1. ¿CÓMO USAR ESTA GUÍA?

Podríamos usar esta guía de cuatro maneras. La primera, como un estándar de diseño para simplificar los permisos de una planta de tratamiento de aguas residuales (*PTAR*) (Langergraber et al., 2018). La segunda, como una guía con las tecnologías usadas en las *PTAR* de Antioquia para profesionales. La tercera, como un texto para mejorar la capacitación de los operarios quienes operan las *PTAR*. La cuarta, como un estándar para prevenir errores de diseño en las futuras *PTAR*.

He aquí dos maneras para prevenir *errores* de diseño en las *PTAR*. La primera, mostramos los *errores* usuales de varias tecnologías. Indicamos varias definiciones de estas tecnologías anaerobias para solucionar estos *errores*. Estas definiciones son el tiempo de retención hidráulico, la distribución ordenada de elementos prefabricados y la distribución igual del caudal a la entrada y salida (Von Sperling & Chernicharo, 2005; Metcalf & Eddy, 2014; Qasim & Zhu, 2018). Distribución ordenada significa que estos elementos prefabricados estén en el lugar que les corresponde según los diseños.

La segunda, actualizamos a los ingenieros y operarios con las prácticas más recientes del diseño y operación de varias *PTAR*. Además mejoramos

las guías para entrenar estos operarios con buenas prácticas operacionales y de documentación disponibles.

Nosotros definimos esta guía como un estándar. En esta guía indicamos varios diseños de las tecnologías usadas en *PTAR* para estudiantes, ingenieros y funcionarios del saneamiento. Nos referiremos a estos estudiantes, ingenieros y funcionarios del saneamiento como profesionales.

Intentamos usar las palabras con precisión en esta guía para prevenir ambigüedades (Goldberg, [1990](#); Cassany, [1993](#)). Sí, intentamos porque no es fácil usar las palabras con precisión y siempre podemos mejorar. Así que usamos palabras simples, claras y las necesarias para ser eficientes con el diseño de esta guía (Wells, [2004](#); Oppenheimer, [2005](#)).



Lugar: PTAR del municipio de San Francisco (2021).
© Foto: Cortesía de la empresa de servicios públicos de San Francisco.

Autor:

Santiago Londoño Vélez

santiago.londonov@udea.edu.co

Grupo de investigación en Gestión y Modelación Ambiental GAIA

Revisado por:

Francisco José Molina Pérez

francisco.molina@udea.edu.co

Grupo de investigación en Gestión y Modelación Ambiental GAIA

Primera edición 2023

© noviembre de 2023

2. AUTOR

Mi nombre es **Santiago Londoño Vélez**. Usé palabras simples, claras y efectivas para escribir las frases de esta guía. Estudié ingeniería sanitaria y una maestría en ingeniería ambiental en la Universidad de Antioquia. Trabajo como asesor de puesta en marcha y operación de varias *PTAR* en Antioquia.

3. REVISADO POR

Conoce a **Francisco José Molina Pérez**. Francisco revisó esta guía. Él estudió ingeniería sanitaria en la Universidad de Antioquia y una especialización en ingeniería ambiental de la Universidad de Sao Pablo (Brasil). También estudió dos maestrías y un doctorado. La primera maestría en ingeniería sanitaria y ambiental en la Universidad del Valle (Cali). La segunda maestría en estudios avanzados en la Universidad Santiago de Compostela (España). Y un doctorado en ingeniería química y ambiental en esta última universidad. Él tiene varios años de experiencia en investigación. Francisco trabaja como profesor de *PTAR* y como coordinador del Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental (GAIA) en la Universidad de Antioquia. También trabaja como asesor para diseñar y operar varias *PTAR* en Antioquia.

4. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los operarios y profesionales por ayudarnos con la puesta en marcha y operación de varias *PTAR* en Antioquia. Agradecemos a dos grupos y subgrupos de personas por ayudarnos a guiar estos profesionales. Estos grupos son Cornare y la Universidad de Antioquia. Estos subgrupos son la Corporación Académica Ambiental y el grupo GAIA.

Estos grupos mejoraron la puesta en marcha y la operación de estas *PTAR* en Antioquia. Guiamos a varios estudiantes de ingeniería sanitaria con buenas prácticas. Y diseñamos esta guía de *PTAR* en pequeñas comunidades para profesionales.

Pensamos en diseñar esta guía hace varios años para prevenir errores en las futuras *PTAR* de Antioquia. En estos años lideramos a varios grupos de personas. Unas profesionales y operarios. Otras del equipo de puesta en marcha de las *PTAR*. Todas ayudaron anónimamente con esta guía.

Yo Santiago Londoño Vélez agradezco a mi familia, a los profesores Francisco José Molina Pérez y Juan David Gómez González por «afilar el lapicero» conmigo para escribir esta guía.



Lugar: PTAR Granada (2021).

Página en blanco

5. PTAR

Sabemos que eres exigente con la descripción de una *PTAR*. Por lo tanto, te describimos una *PTAR* para prevenir ambigüedades.

Una *PTAR* doméstica es una instalación artificial para eliminar sólidos del **agua residual** generada en los hogares, instituciones, centros comerciales y empresas. Esta *PTAR* usa una combinación de varias tecnologías para prevenir la polución de ríos. Y estas tecnologías tienen operaciones físicas unitarias para eliminar sólidos y procesos biológicos unitarios para transformar la materia orgánica de esta **agua residual**.

He aquí el diagrama de flujo de una *PTAR* (Fig 1):

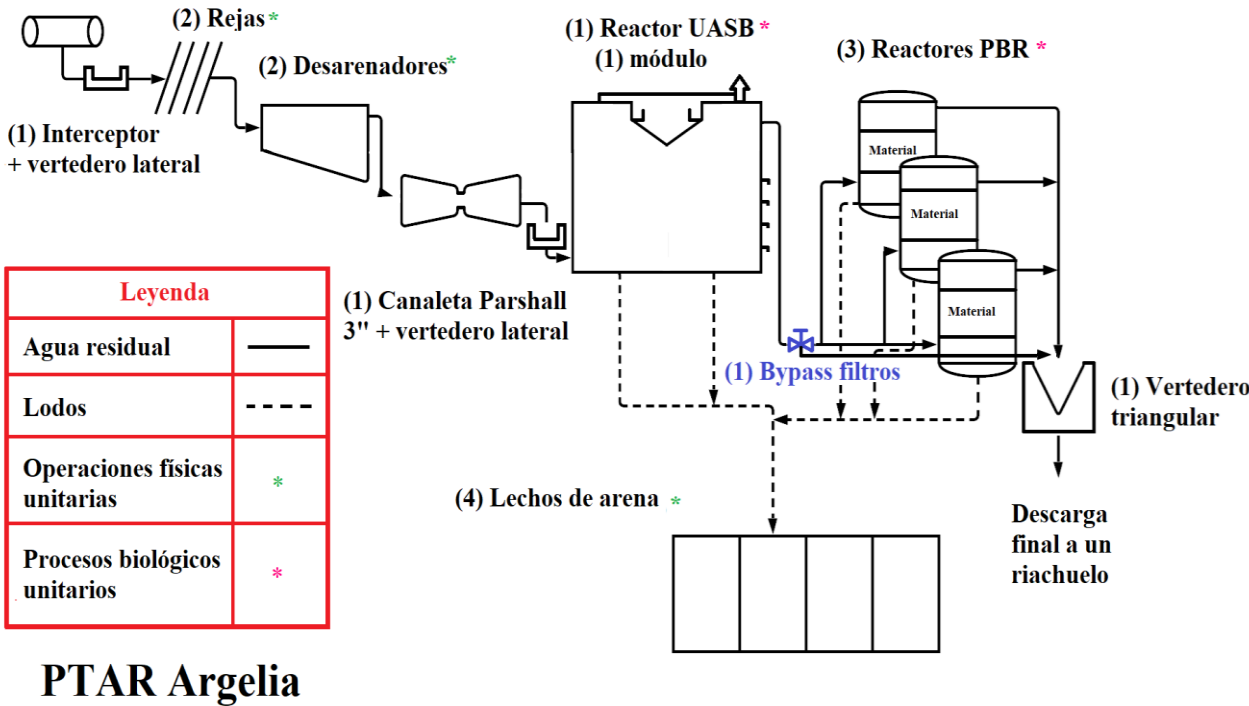


Fig 1. Diagrama de flujo de una *PTAR*.



Lugar: tecnologías preliminares de la PTAR Sonsón (2018).

Página en blanco.

ÍNDICE

1.	¿CÓMO USAR ESTA GUÍA?	4
2.	AUTOR	8
3.	REVISADO POR	8
4.	AGRADECIMIENTOS	9
5.	PTAR	12
6.	CAUDALES	29
6.1	Caudal de agua residual doméstica	30
6.2	Caudal medio diario	30
6.3	Caudal máximo horario	31
6.4	Caudal medio	32
6.5	Caudal mínimo diario	32
7.	ESTIMAR CAUDALES	35

8. UBICACIÓN DE LAS REJAS	46
9. DESCRIPCIÓN DE LAS REJAS	47
9.1 Velocidades del agua antes y a través de las rejas	52
9.2 Pérdida hidráulica de las rejas	54
10. DISEÑO DE LAS REJAS	58
10.1 Reja para sólidos medianos	58
10.2 Pérdidas para rejas sucias	63
11. OPERACIÓN DE LAS REJAS	66
11.1 Extraer sólidos gruesos y medianos	67
12. UBICACIÓN DEL DESARENADOR	73
13. DESCRIPCIÓN DEL DESARENADOR	74
13.1 Sedimentación discreta o tipo I	81
14. DISEÑO DEL DESARENADOR	83
15. OPERACIÓN DEL DESARENADOR	93

15.1	Extraer arenas	94
16.	UBICACIÓN DE LA CANALETA PARSHALL	100
17.	DESCRIPCIÓN DE LA CANALETA PARSHALL	102
18.	OPERACIÓN DE LA CANALETA PARSHALL	107
18.1	Canaleta de 3"	108
18.2	Canaleta de 6"	110
19.	UBICACIÓN DEL SEDIMENTADOR	116
20.	DESCRIPCIÓN DEL SEDIMENTADOR PRIMARIO	117
20.1	Tiempo de retención hidráulico	122
20.2	Carga superficial	122
20.3	Carga de sólidos	123
20.4	Carga hidráulica sobre vertederos	124
20.5	Tubería para extraer sólidos sedimentados	124
20.6	Velocidad del agua en los canales de ingreso	125

20.7	Velocidad ascensional del agua	125
20.8	Eficiencia de eliminación de sólidos suspendidos	125
20.9	Sedimentación floculenta o tipo II	129
21.	DISEÑO DEL SEDIMENTADOR PRIMARIO	131
22.	OPERACIÓN DEL SEDIMENTADOR PRIMARIO	138
22.1	Extraer sólidos flotantes	139
22.2	Extraer sólidos sedimentados	141
22.3	Medir pH y temperatura	142
22.4	Estimar sólidos sedimentables	143
22.5	Variables fisicoquímicas	145
23.	UBICACIÓN DEL REACTOR UASB	151
24.	DESCRIPCIÓN DEL REACTOR UASB	152
25.	DESCRIPCIÓN DEL TRATAMIENTO ANAEROBIO	158
26.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	161

26.1	Tiempo de retención hidráulico	164
26.2	Carga orgánica volumétrica	165
26.3	Velocidad ascensional	165
26.4	Altura	166
26.5	Eficiencia de eliminación de materia orgánica	166
26.6	Eficiencia de eliminación de materia orgánica	167
26.7	Tubería para ingresar el agua	167
26.8	Materiales para construir el reactor	168
27.	DISEÑO DEL REACTOR UASB	175
28.	OPERACIÓN DEL REACTOR UASB	199
28.1	Extraer sólidos flotantes	200
28.2	Muestrear lodos	202
28.3	Extraer lodos	204
28.4	Medir pH y temperatura	206
28.5	Estimar sólidos sedimentables	207

28.6	Estimar alcalinidad	208
28.7	Estabilizar el pH	211
28.8	Variables fisicoquímicas	215
29.	UBICACIÓN DEL REACTOR PBR	221
30.	DESCRIPCIÓN DEL REACTOR PBR	222
30.1	Tiempo de retención hidráulico	226
30.2	Carga orgánica volumétrica	227
30.3	Carga hidráulica superficial	227
30.4	Altura del material de soporte	227
30.5	Eficiencia de eliminación de materia orgánica	230
30.6	Eficiencia de eliminación de materia orgánica	230
30.7	Tubería para ingresar el agua	231
30.8	Canaleta para evacuar el agua	232
30.9	Válvulas para muestrear el lodo	234
31.	DISEÑO DEL REACTOR PBR	237

32. OPERACIÓN DEL REACTOR PBR	244
32.1 Extraer sólidos flotantes	245
32.2 Muestrear lodos	247
32.3 Extraer lodos	247
32.4 Medir pH y temperatura	249
32.5 Estimar sólidos sedimentables	249
32.6 Estimar alcalinidad	249
32.7 Variables fisicoquímicas	250
33. UBICACIÓN DEL REACTOR ANAEROBIO DE LODOS	255
34. DESCRIPCIÓN DEL REACTOR ANAEROBIO DE LODOS	256
34.1 Tiempo de retención hidráulico de los sólidos	259
34.2 Tasa de carga de los sólidos volátiles para reactores de una fase	260
34.3 Disminución de sólidos volátiles	261
34.4 Producción de biogás	262

34.5	Cantidad calorífica de los lodos del agua residual	262
35.	DISEÑO DEL REACTOR DE LODOS	265
36.	OPERACIÓN DEL REACTOR ANAEROBIO DE LODOS	275
36.1	Extraer sólidos flotantes	276
36.2	Muestrear lodos	278
36.3	Extraer lodos	280
36.4	Medir pH y temperatura	280
36.5	Estimar sólidos sedimentables	281
36.6	Estimar alcalinidad	281
36.7	Variables fisicoquímicas	281
37.	UBICACIÓN DE LOS LECHOS DE ARENA	288
38.	DESCRIPCIÓN DE LOS LECHOS DE ARENA	289
39.	DISEÑO DE LOS LECHOS DE ARENA	296
39.1	Lechos de arena para sedimentadores y reactores PBR	296

39.2	Lechos de arena para reactores UASB	303
40.	OPERACIÓN DE LOS LECHOS DE ARENA	308
40.1	Extraer lodos	309
41.	TEXTOS CITADOS	312
42.	FORMATOS PARA LOS OPERARIOS	319
42.1	Canal de entrada	319
42.2	Rejas	320
42.3	Desarenadores	321
42.4	Caudal de ingreso	322
42.5	Sedimentador y reactores PBR: pH y temperatura	323
42.6	Reactor UASB: pH y temperatura	324
42.7	Descarga momentánea de aguas residuales industriales	325
42.8	Sedimentador: sólidos flotantes	326
42.9	Reactor UASB: sólidos flotantes	327

42.10	Sedimentador: sólidos sedimentados	328
42.11	Sedimentador: sólidos sedimentables	329
42.12	Reactor UASB: biogás	330
42.13	Reactor UASB: tuberías	331
42.14	Reactores PBR: sólidos flotantes	332
42.15	Reactor UASB, PBR y reactor de lodos: alcalinidad	333
42.16	Reactor UASB y reactor PBR: sólidos sedimentables	334
42.17	Reactor UASB: muestreo de lodos	335
42.18	Reactor UASB: pH y temperatura de los lodos	336
42.19	Reactor de lodos: sólidos flotantes	337
42.20	Reactor de lodos: biogás	338
42.21	Reactor de lodos: tuberías	339
42.22	Reactor de lodos: muestreo de lodos	340
42.23	Reactor de lodos: pH y temperatura	341
42.24	Reactor de lodos: sólidos sedimentables	342

42.25	Lechos de arena: ingreso de lodo	343
42.26	Lechos de arena: lodo	344
42.27	Lechos de arena: lodo seco	345
42.28	Lechos de arena: arena	346

Página en blanco.

1

Caudales

Objetivo principal

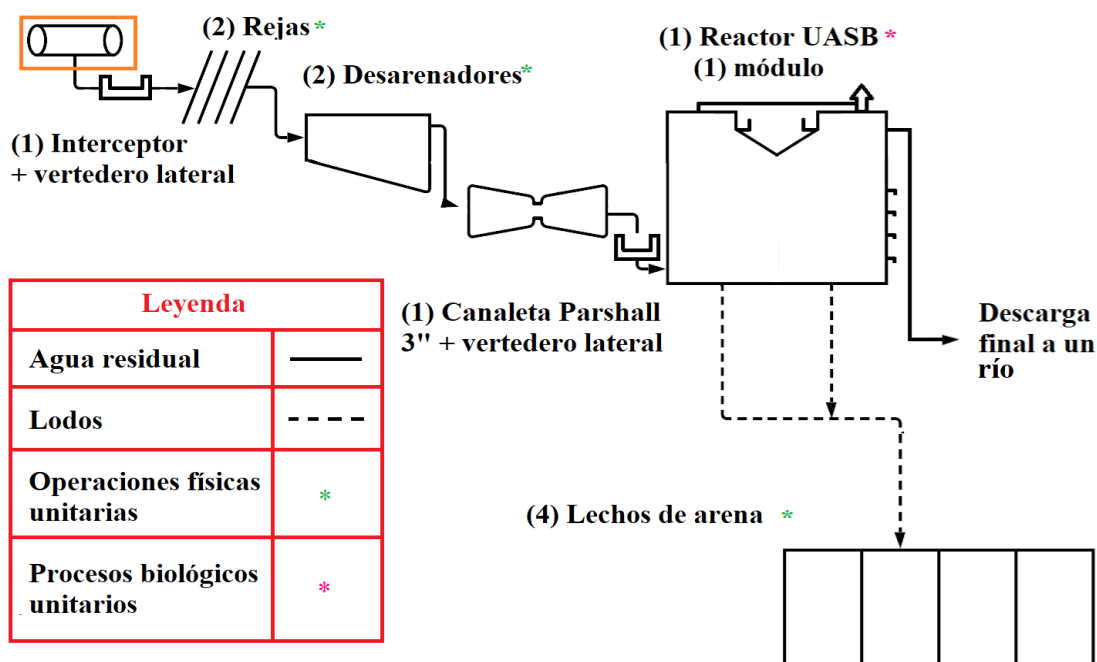
- Estimar los caudales de ingreso a una PTAR.



Lugar: interceptor de la PTAR Granada (2021).

6. CAUDALES

Ahora que tienes una descripción breve de una PTAR, nosotros te hablaremos del *caudal* (*stream*, en inglés). *Caudal* significa flujo de agua que ingresa a las PTAR con ayuda de un interceptor (Fig 2). Este *caudal* tiene variaciones antes de ingresar a las PTAR. Estas variaciones dependen de la ubicación geográfica y el clima, la población, industrialización, los días, las noches, las horas y los usos del agua. Los usos son residenciales, industriales, comerciales e institucionales. Aunque te hablaremos de varias definiciones para distinguir estas variaciones de *caudal*. Y las definiciones te ayudarán a diseñar y operar apropiadamente estas PTAR.



PTAR Nariño

Fig 2. Ingreso del agua a una PTAR.

He aquí varias definiciones que usaremos para estos *caudales*.

6.1 Caudal de agua residual doméstica

El *caudal* de agua residual doméstica es el flujo de agua derivado del consumo per cápita. Este *caudal* incluye las residencias, industrias, comercio e instituciones. Qasim & Zhu (2018) dicen que el promedio de este *caudal* varía entre 60 y 130%. Esta variación depende del uso del agua de las comunidades. Nosotros usamos este *caudal* de agua residual doméstica (*wastewater flow*, en inglés) para saber una porción del flujo que ingresará a estas PTAR.

6.2 Caudal medio diario

El *caudal* medio diario es el promedio de flujo de agua que ingresa a una PTAR en un día. Este *caudal* acontece a las 24 horas de un día usual en verano. Qasim & Zhu (2018) usan este *caudal* medio (*daily average flow*, en inglés) de cuatro maneras. La primera, para evaluar el tamaño de las tecnologías de la PTAR. La segunda, estimar cargas orgánicas, sólidos y lodos. La tercera, estimar las dosis de químicos. La cuarta, estimar los costos de los sistemas de bombeo y las tecnologías de tratamiento.

6.3 Caudal máximo horario

El *caudal* máximo es el flujo de agua máximo en un día lluvioso de invierno después o durante lluvias (Fig 3). También es el flujo de agua máximo en la hora de mayor caudal en un día. Este *caudal* aumenta con las lluvias porque infiltran la red de alcantarillado y los interceptores que transportan el agua residual a las PTAR. Qasim & Zhu (2018) usan este *caudal* máximo horario (*maximum hourly flow*, en inglés) para diseñar varias tecnologías. La primera, las rejillas y los desarenadores. La segunda, los sistemas de bombeo. La tercera, canales que conectan estas tecnologías de estas PTAR. La cuarta, para estimar tiempos de retención de estas tecnologías. Qasim & Zhu (2018) también usan este *caudal* para diseñar interceptores, medidores de flujo y la hidráulica de estructuras de ingreso y salida del agua de estas PTAR.



Fig 3. Ingreso de caudal con lluvias a una PTAR.

6.4 Caudal medio

Qasim & Zhu (2018) dicen que este *caudal* medio es el flujo de agua de diseño (*design flow*, en inglés) de estas PTAR. Este *caudal* acontece al final del período de diseño de estas PTAR. Este período está entre 10 y 20 años después de su construcción. Aunque el RAS dice que está a los 25 años. RAS significa reglamento técnico de agua potable y saneamiento básico. Nosotros usamos este *caudal* medio para diseñar varias tecnologías en esta guía. La primera, sedimentadores primarios. La segunda, reactores UASB. La tercera, reactores PBR. Describiremos estas tecnologías más abajo.

6.5 Caudal mínimo diario

El *caudal* mínimo es el flujo de agua más bajo en un día usual en verano. Este *caudal* mínimo causa la sedimentación de varios sólidos en tuberías y canales. Qasim & Zhu (2018) usan este *caudal* mínimo (*minimum flow*, en inglés) para el diseño del tamaño de medidores de flujo, sistemas de bombeo y estimar las dosis de químicos.

Existe una combinación de varios reportes para estimar estos *caudales* que ingresan a una PTAR. He aquí varios de los reportes que nosotros usamos para diseñar varias PTAR de Antioquia:

1. Crecimiento del número de suscriptores del acueducto.

2. Censos poblacionales.
3. Censos de vivienda.
4. Esquemas de ordenamiento territorial.
5. Plan maestro de acueducto y alcantarillado.
6. Densidades actuales y futuras (licencias de construcción).

Los suscriptores del acueducto son uno de los reportes más precisos para estimar *caudales* de agua residual doméstica (Fig 4). Aunque varios ingenieros usan los censos poblacionales para estimar estos *caudales*.



Fig 4. Aguas residuales que ingresan a una PTAR.



Lugar: PTAR San Vicente Ferrer. sistema de bombeo después de las rejillas, desarenador y canaleta Parshall (2020).

7. ESTIMAR CAUDALES

Ahora que tienes una descripción breve de estos *caudales*, nosotros te indicaremos como estimar estos *caudales*. He aquí un ejemplo para estimar varios *caudales* que ingresarán a una futura PTAR de una población.

Estimar el *caudal* de aguas residuales domésticas, medio diario, medio, máximo horario, y mínimo diario. También estimar la carga orgánica y concentración de la DBO₅ en el agua residual.

Para estimar estos *caudales* tienes un reporte del ordenamiento territorial de esta población. Este reporte dice que esta población tiene 5.000 habitantes y un consumo per cápita de 120 L/ hab·día. Este reporte también dice que esta población tiene alcantarillado combinado. Además esta población tiene varios suelos de expansión. Estos suelos son residencial de 5 (ha) hectáreas, industrial de 1 (ha), comercial de 1 (ha) e institucional de 1 (ha). Para estimar estos *caudales* también necesitas los aportes por infiltración de 0,1 L/s-ha, conexiones erradas de 0,2 L/s-ha, institucional y comercial de 0,5 L/s-ha e industrial de 1,5 L/s-ha (Empresas Públicas de Medellín. E. S. P., [2013](#)).

He aquí los coeficientes para estimar *caudales* (Tabla 1).

Tabla 1. Coeficientes para estimar caudales.

Intervalo de caudales (L/s)	Coeficiente máximo horario	Coeficiente máximo diario	Coeficiente máximo mensual
0-10	4	3	1,7
Los coeficientes máximos horario, diario y mensual para caudales entre 10 L/s y 90 L/s se interpolarán linealmente			
90	2,9	2,1	1,5
Los coeficientes máximos horario, diario y mensual para caudales entre 90 L/s y 700 L/s se interpolarán linealmente			
Mayor a 700	2	1,5	1,2

Sugerido por El Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (2017). Resolución 0330 de 2017.

El Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (2017) usa un coeficiente de retorno de 0,85 y un aporte de DBO_5 de 50 gr/hab.día para estimar la carga orgánica. Este coeficiente es el porcentaje de agua que llega a la red de alcantarillado de la población. Y está entre el 60 y 85 % de este consumo per cápita.

Estimar el Q_{ARD}

Población * dotación * coeficiente de retorno

$$5.000 \text{ hab} * 120 \frac{\text{L}}{\text{hab} \cdot \text{día}} * 0,85 = 510.000 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

Ahora dividir por 86.400 seg que tiene un día

$$\frac{510.000 \frac{\text{L}}{\text{día}}}{86.400 \frac{\text{día}}{\text{seg}}} = 5,9 \approx 6 \frac{\text{L}}{\text{s}} \text{ caudal de agua residual doméstica.}$$

Estimar los caudales según los usos del suelo y aportes

Aportes * hectáreas (ha)

Infiltración:

$$(Q_{\text{INF}}) = 0,1 * 5 = 0,5 \text{ L/s}$$

Conexiones erradas:

$$(Q_{\text{CE}}) = 0,2 * 5 = 1,0 \text{ L/s}$$

Institucionales:

$$(Q_{\text{IN}}) = 0,5 * 1,0 = 0,5 \text{ L/s}$$

Comerciales:

$$(Q_{\text{C}}) = 0,5 * 1,0 = 0,5 \text{ L/s}$$

Industriales:

$$(Q_I) = 1,5 * 1,0 = 1,5 \text{ L/s}$$

Estas aguas industriales ingresarán las PTAR en Antioquia (42.7).

Estimar el caudal medio diario (QMD) de aguas residuales que ingresarán a esta PTAR

$$QMD = Q_D + Q_I + Q_C + Q_{IN}$$

$$QMD = 6 \frac{\text{L}}{\text{s}} + 1,5 \frac{\text{L}}{\text{s}} + 0,5 \frac{\text{L}}{\text{s}} + 0,5 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$QMD = 8,5 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Estimar el caudal máximo horario (QMH)

$$QMH =$$

$$(\text{factor de mayoración} * Q_D) + Q_I + Q_C + Q_{IN} + Q_{INF} + Q_{CE}$$

$$Q_{MH} = \text{factor} * 6 \frac{L}{s} + 1,5 \frac{L}{s} + 0,5 \frac{L}{s} + 0,5 \frac{L}{s} + 0,5 \frac{L}{s} + 1,0 \frac{L}{s}$$

El caudal medio diario es de 8,5 L/s y está entre el intervalo de 0 L/s y 10 L/s. Entonces el factor de mayoración es de 4. Nos guiamos por la resolución 0330 de 2017 para usar este factor.

$$\begin{aligned} Q_{MH} &= \left(\text{factor} * 6 \frac{L}{s} \right) + 1,5 \frac{L}{s} + 0,5 \frac{L}{s} + 0,5 \frac{L}{s} + 0,5 \frac{L}{s} + 1,0 \frac{L}{s} \\ &= 28 \frac{L}{s} \end{aligned}$$

Nosotros usamos las estaciones pluviométricas del IDEAM para estimar las aguas lluvias. Estas aguas lluvias están en un intervalo entre 100 y 150 L/s. Este intervalo es el caudal combinado que llega a la PTAR y depende de varias variables.

Estimación del caudal medio (Q_{medio})

$$Q_{\text{medio}} = (Q_D + Q_I + Q_C + Q_{IN} + Q_{INF} + Q_{CE})$$

$$Q_{\text{medio}} = 6 \frac{L}{s} + 1,5 \frac{L}{s} + 0,5 \frac{L}{s} + 0,5 \frac{L}{s} + 0,5 \frac{L}{s} + 1 \frac{L}{s}$$

$$Q_{\text{medio}} = 10 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Estimar el caudal mínimo (Qmínimo)

$$Q_{\text{minimo diario}} = (Q_D + Q_I + Q_C + Q_{IN})$$

$$Q_{\text{minimo diario}} = 6 \frac{\text{L}}{\text{s}} + 1,5 \frac{\text{L}}{\text{s}} + 0,5 \frac{\text{L}}{\text{s}} + 0,5 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{minimo diario}} = 8,5 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Estimar la carga orgánica de aguas residuales domésticas

Población * aporte por persona de agua residual doméstica.

$$5.000 \text{ hab} * 50 \frac{\text{gr}}{\text{hab} * \text{día}}$$

$$50 \text{ gr} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} = 0,05 \text{ kg}$$

$$5.000 \text{ hab} * 0,05 \frac{\text{kg}}{\text{hab} * \text{día}} = 250 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \text{ DBO}_5$$

Estimar la concentración de DBO₅ en el agua residual

$$\frac{L}{Q} = \frac{250 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{510.000 \frac{\text{L}}{\text{día}}} = 4,9 * 10^{-4}$$

$$1 \text{ kg} \rightarrow 1.000.000 \text{ mg}$$

$$\frac{L}{Q} = \frac{250 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{510.000 \frac{\text{L}}{\text{día}}} = 490 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ DBO}_5$$

Note que a esta PTAR ingresará una concentración de 490 mg/L de DBO₅. Esta concentración es alta, pero a esta PTAR también ingresarán aguas lluvias. Y estas lluvias diluyen las concentraciones de DBO₅ en el agua residual. La resolución 0330 de 2017 habla del aporte de esta DBO₅ por habitante al día.



Lugar: tecnologías preliminares de la PTAR Sonsón (2018).

Página en blanco

2

Rejas

Objetivos principales

- Ubicar las *rejas*.
- Describir las *Rejas*.
- Diseñar las *rejas*.
- Operar las *rejas*.



Lugar: rejas de la PTAR Sonsón (2018).

8. UBICACIÓN DE LAS REJAS

Ahora que tienes un ejemplo para estimar estos caudales, nosotros te hablaremos de las *rejās* (*bars*, en inglés). Estas *rejās* son la primera tecnología y operación física unitaria usada en estas PTAR (Fig 5). Ubicamos estas *rejās* después del vertedero lateral y antes del *desarenador*. Para ubicar estas *rejās* necesitamos la geometría del canal de entrada para conectar con las *rejās*. Esta conexión tiene un ángulo de 30°.

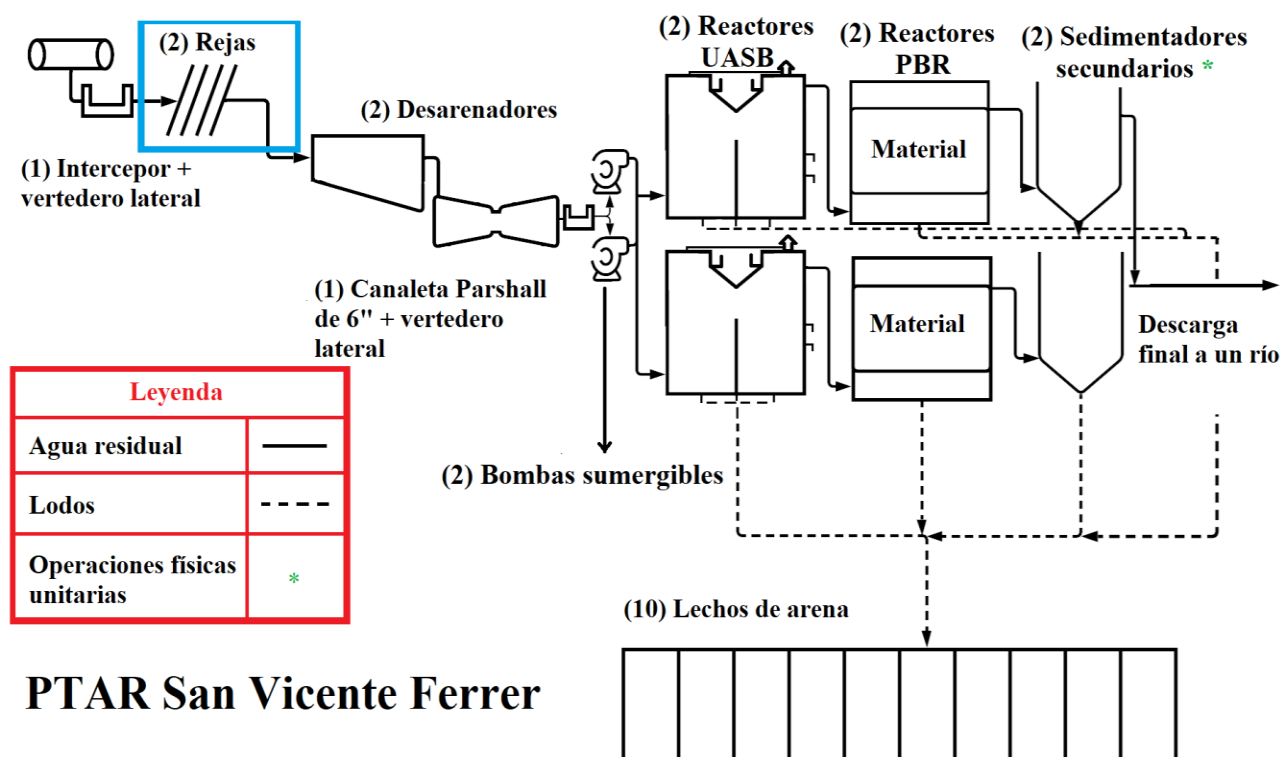


Fig 5. Ubicación de las rejās en una PTAR.

9. DESCRIPCIÓN DE LAS REJAS

Ahora que ubicas estas *rejás*, nosotros te describiremos el objetivo de estas *rejás*. Este objetivo es eliminar sólidos gruesos del agua residual para prevenir el mal funcionamiento de válvulas, canales, bombes y tuberías. Para alcanzar este objetivo necesitamos *rejás* apropiadas. Estas *rejás* tienen varios barrotes paralelos y aberturas iguales para eliminar sólidos (Fig 6). Porque estos sólidos disminuyen la eficiencia de eliminación de materia orgánica del tratamiento primario de estas PTAR (Water Environment Federation, 2008; Qasim & Zhu, 2018). Además obstruyen los accesorios de tuberías y equipos mecánicos. Es evidente que estas *rejás* son esenciales para todas estas PTAR.

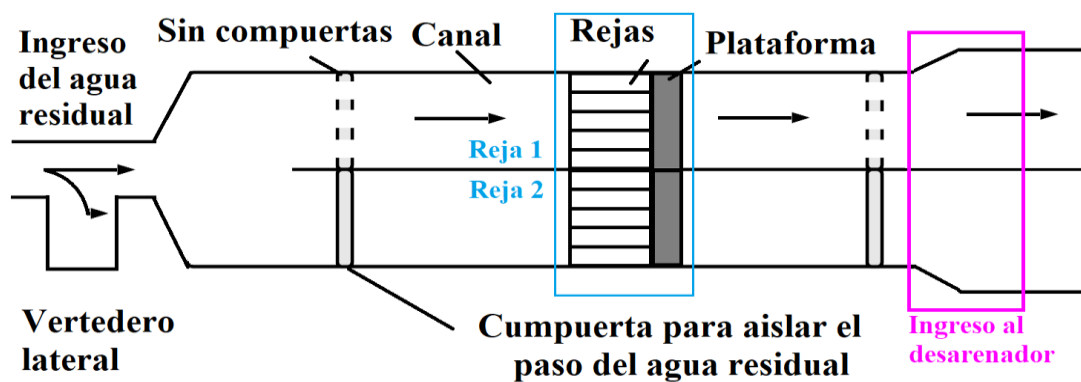


Fig 6. Esquema de las rejás.

Sugerido por Metcalf & Eddy (2014) y Qasim & Zhu (2018).

Encontramos que varias PTAR en Antioquia usan dos *rejas* en paralelo para eliminar sólidos gruesos y medios previo al tratamiento primario. Estas *rejas* tienen inclinaciones de **45** a **60°** con la horizontal (Comisión Nacional del Agua, 2010). Además son idénticas y de limpieza manual. Idénticas significa que son iguales (Fig 7). Esto significa que el operario limpiará las *rejas*. Así que no hablaremos de las *rejas* de limpieza mecánica porque son tecnologías más avanzadas.



Fig 7. Reja de limpieza manual.

Astrid Lorena Ospina Macías autoriza el uso de esta foto.

Estas *rejas* tienen varias clasificaciones según la abertura entre los barrotes. Von Sperling & Chernicharo (2005) y El Ministerio de Vivienda

Ciudad y Territorio (2017) clasifican estas *rejas* en gruesas, medias y finas. Metcalf & Eddy (2014) clasifican estas *rejas* en gruesas o finas. Usamos las *rejas medias* para eliminar sólidos gruesos y medianos en las PTAR en Antioquia. Estas rejas medias son de 2 a 4 cm (20 a 40 mm).

He aquí un resumen de estas rejas clasificadas por varios autores (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de las rejas.

Uso	Clasificación de las rejas	Tamaño de la abertura entre barrotes (mm)	Sugerido por:
Tratamiento preliminar	Gruesas	25–75	(Qasim & Zhu, 2018)
		> 6	(Metcalf & Eddy, 2014)
		6–75	(Davis, 2020)
		> 10	(Von Sperling & Chernicharo, 2005)
	Media	3–6	(Qasim & Zhu, 2018)
		1–3	
		0,5–1	
		0,5–6	(Metcalf & Eddy, 2014)
		1,5–6	(Davis, 2020)
	Fina	< 0,5	(Qasim & Zhu, 2018)
			(Metcalf & Eddy, 2014)

Necesitamos conocer varios intervalos para diseñar estas rejas con barrotes. He aquí estos intervalos (Tabla 3).

Tabla 3. Intervalos usados para diseñar rejas de limpieza manual.

Rejas	Intervalos	Sugerido por:
Tamaño de los barrotes: Ancho (mm)	5–15	(Davis, 2020)
Alto (mm)	25–40	
Abertura entre barrotes (mm)	25–50	
Inclinación con respecto a la vertical (grados)	30–45°	

He aquí más intervalos usados para diseñar las rejas (Tabla 4).

Tabla 4. Diseño de rejas de limpieza manual.

Rejas	Intervalo	Unidades	Sugerido por
Velocidad a través de las rejas	0,3–0,6	m/s	(Comisión Nacional del Agua, 2010; Qasim & Zhu, 2018)
Tamaño de los barrotes Ancho	4–8	mm	(Qasim & Zhu, 2018)
Alto	25–50	mm	
Abertura entre barrotes	25–75	mm	
Inclinación con la horizontal	45–60°	grados	

Encontramos que estas PTAR en Antioquia usan *rejas* con varias aberturas entre barrotes entre **15 y 25 mm**. Estas aberturas son necesarias para eliminar sólidos gruesos y medianos. Así que ya sabes que abertura usarás para diseñar las futuras *rejas* de las PTAR. Aunque encontramos que

algunas *rejas* tienen dos *errores* usuales. El primero, la distribución desordenada de aberturas. Este *error* significa obstruir el paso del agua residual, aumentar el tirante de agua y la salida de esta agua por el vertedero sin eliminar sólidos gruesos. El segundo, ubicar refuerzos metálicos en la parte delantera de las *rejas* lo que dificulta el uso de rastrillos para limpiarlas. Para prevenir este primer *error* te describimos las *rejas* con un intervalo de aberturas y longitudes usadas en varias PTAR (Tabla 5). Para prevenir el segundo error, no ubiques refuerzos metálicos.

Tabla 5. Longitudes de las rejas.

Rejas	Longitud	Unidades
Ancho canal	0,8–1,2	m
Largo canal	2,0–2,5	m
Altura canal	0,7–1,0	m
Número de barrotes	30–50	–
Aberturas entre barrotes	15–25	mm
Grosor del barrote	4–6	mm
Longitud del barrote	0,9	m

Sugerimos que no uses barrotes redondos. Usa platinas para facilitar la limpieza manual y tener resistencia en los barrotes.

9.1 Velocidades del agua antes y a través de las rejas

Ya sabes el objetivo y la clasificación de estas *rejas*. Ahora hablaremos de las velocidades del agua antes y a través de estas *rejas*. Las velocidades son esenciales porque van a ayudarte a diseñar estas *rejas* con facilidad. Estas PTAR en Antioquia usan un canal de entrada con dos *rejas* de limpieza manual. Una de estas *rejas* funcionará y la otra no para alcanzar velocidades apropiadas del agua antes y a través de las *rejas*. Si usas las dos *rejas* al tiempo estas velocidades disminuyen y aumenta la sedimentación de sólidos en el canal previo a estas *rejas*. Una *reja* estará sucia si tiene varios sólidos que impiden el paso del agua (Fig 8). Una *reja* estará limpia si pasa el agua a través de ella con facilidad. El operario de la PTAR limpiará la *reja* sucia cuantas veces *esta* lo necesite.



Fig 8. Reja sucia.

En *rejas* sucias, el agua tiene un intervalo ideal de velocidades de ingreso. Este intervalo está entre **0,4** y **0,45 m/s** en el canal previo a estas *rejas*. Este intervalo previene la sedimentación de arenas, sólidos sedimentables y las fuertes turbulencias.

En *rejas* limpias, el agua tiene un intervalo diferente de velocidades. Este intervalo está entre **0,6** y **0,9 m/s** a través de la *reja*. Esta velocidad de **0,6 m/s** es para caudales de diseño medio. Esta velocidad de **0,9 m/s** es para caudales de diseño máximo (Metcalf & Eddy, 2014; Qasim & Zhu, 2018; Davis, 2020). Sugerimos no exceder estas velocidades.

Nosotros usamos estos intervalos de velocidades del agua a través de las *rejas* sucias y limpias por una razón. Esta razón es prevenir la sedimentación excesiva de sólidos, arenas y el movimiento de estos sólidos en la *reja* (Orozco, 2014).

Sugerimos estimar estas velocidades del agua con precisión por dos razones. La primera, prevenir el mal funcionamiento de las tecnologías siguientes a estas *rejas*. La segunda, prevenir que el operario limpie con frecuencia el canal previo a estas *rejas* por velocidades menores a los intervalos sugeridos.

El agua tiene un intervalo de velocidades horizontales en el canal previo a estas *rejas*. Estas velocidades son alcanzadas si la profundidad del agua en

este canal es proporcional al flujo de agua. Existe una combinación de varios vertederos para regular estas velocidades del agua en estas *rejas* y el desarenador. Estos vertederos son los proporcionales o sutro. Los vertederos rectangulares y triangulares no regulan estas velocidades. Otros son las canaletas Parshall. Estas canaletas son más precisas para regular estas velocidades del agua en las *rejas* y el *desarenador*. Además para medir el caudal de ingreso. Pero hablaremos de estas canaletas más adelante.

9.2 Pérdida hidráulica de las rejas

Ya sabes que estas *rejas* estarán limpias o sucias por sólidos gruesos y medianos. Sabes también que el agua tendrá varios intervalos de velocidades en el canal previo y a través de estas *rejas*. Ahora hablaremos de que estas *rejas* tendrán pérdidas hidráulicas porque los barrotes de las *rejas* retienen sólidos. Esta pérdida hidráulica a través de estas *rejas* está en función de la velocidad de ingreso y de la velocidad a través de los barrotes. Por lo tanto, nosotros usaremos la siguiente ecuación para estimar estas pérdidas hidráulicas:

$$h_L = \frac{1}{C} \left(\frac{V^2 - v^2}{2g} \right)$$

Donde:

h_L = pérdida hidráulica (m)

C = coeficiente de carga empírico 0,7 para rejas limpias o 0,6 para rejas sucias

V = velocidad del flujo a través de la abertura de las rejas (m/s)

u = velocidad de ingreso en el canal aguas arriba (m/s)

g = aceleración por la gravedad (m/s^2)

Usamos esta ecuación para estimar un intervalo de estas pérdidas en *rejas* sucias o limpias. Qasim & Zhu (2018) dicen que este intervalo en *rejas* sucias esta entre de **150** y **800 mm** y en rejas limpias es insignificante. Es evidente que en este intervalo en *rejas* sucias aumentan las pérdidas hidráulicas por estos sólidos. Pero existe una opción para prevenir el aumento de estas pérdidas. Esta opción es que los operarios limpien estas *rejas* con frecuencia. He aquí otro resumen para diseñar estas *rejas* de limpieza manual (Tabla 6).

Tabla 6. Rejas de limpieza manual.

Característica	Reja de limpieza manual	Sugerido por:
Ancho (mm)	5–15	(Comisión Nacional del Agua, 2010; Metcalf & Eddy, 2014)
Profundidad (mm)	25–38	
Abertura entre barrotes (mm)	25–50	
Inclinación con la vertical (grados)	30–45°	
Velocidad inicial del agua (m/s)	0,3–0,6	
Pérdida hidráulica permitida (mm)	150	

Una ecuación para estimar la pérdida hidráulica en estas *rejas* es la ecuación de Kirschmer. Usamos esta ecuación cuando conocemos la forma de los barrotes y la altura o la energía de velocidad del flujo entre los barrotes de las *rejas*. Y también para estimar pérdidas solo en *rejas* limpias.

He aquí la ecuación de Kirschmer.

$$h_L = \beta \left(\frac{W}{b} \right)^{\frac{4}{3}} h_v \sin \theta$$

Donde:

h_L = pérdida hidráulica (m)

$\beta = 2,42$ para barrotes rectangulares de cara recta

$\beta = 1,67$ para barrotes rectangulares con cara semicircular aguas arriba y abajo

$\beta = 1,83$ para barrotes rectangulares con cara semicircular aguas arriba

$\beta = 1,79$ para barrotes circulares

W = ancho máximo de la sección transversal de los barrotes (m)

b = abertura mínima entre los barrotes (m)

h_v = altura de velocidad inicial del flujo (m)

θ = ángulo de la reja horizontal



Lugar: reja de la PTAR Granada (2021).

10. DISEÑO DE LAS REJAS

Ahora que tienes una descripción breve de estas *rejas*, nosotros te indicaremos como diseñar las *rejas*. Qasim & Zhu (2018) sugieren usar el caudal máximo horario para diseñar estas *rejas*. Y nosotros estamos de acuerdo con Qasim & Zhu (2018) porque prevenimos que estos sólidos gruesos y medianos ingresen a estas PTAR y ríos. Aunque varios sólidos más pequeños que las aberturas de estas *rejas* ingresarán al tratamiento primario.

10.1 Reja para sólidos medianos

He aquí un ejemplo para diseñar estas *rejas* para eliminar sólidos medianos.

Una *reja* tendrá barrotes tipo platina de 1,00 cm. Esta *reja* tendrá una inclinación de 45° con la horizontal. Y tendrá aberturas entre barrotes de 1,80 cm (Fig 9). Por esta *reja* de limpieza manual pasará un caudal máximo de 190,00 L/s y la velocidad inicial del agua será de 0,37 m/s. Aunque el canal desarenador tendrá un tirante hidráulico (h) de 0,64 m, 0,80 m de ancho (W) y un borde libre (h_b) de 0,30 m. Este tirante hidráulico será la distancia entre la base del canal y la lámina de agua. Entonces estimar lo siguiente:

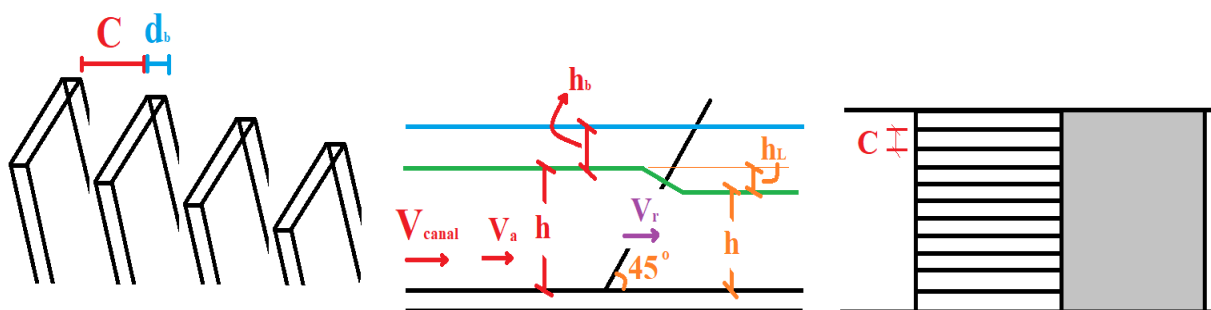


Fig 9. Reja.

Área del canal:

$$A = W * h$$

Donde:

A = área del canal (m²)

W = ancho del canal (m)

h = tirante hidráulico (m)

$$A = 0,80 \text{ (m)} * 0,64 \text{ (m)} = 0,51 \text{ m}^2$$

Velocidad antes de la reja:

$$V = \frac{Q}{A}$$

Donde:

V = velocidad antes de la reja (m/s)

Q = caudal (m³/s)

A = área del canal (m²)

$$V = \frac{0,19 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,51 \text{ m}^2} = 0,37 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Longitud de la reja:

$$L = \frac{h + h_b}{\text{sen } \theta}$$

Donde:

L = longitud de la reja (m)

h = tirante hidráulico (m)

h_b = borde libre (m)

θ = ángulo de inclinación ($^\circ$)

$$L = \frac{0,64 \text{ (m)} + 0,30 \text{ (m)}}{\text{sen } 45^\circ} = 1,33 \text{ (m)}$$

Número de barrotes:

$$C = \frac{W - n d_b}{n + 1} \rightarrow n = \frac{W - C}{C + d_b}$$

Donde:

C = abertura entre barrotes (m)

W = ancho del canal (m)

n = número de aberturas

$n - 1$ = número de barrotes

d_b = grosor del barrote (m)

$$n = \frac{0,80 \text{ (m)} - 0,018 \text{ (m)}}{0,018 \text{ (m)} + 0,01 \text{ (m)}} = 27,9 \approx 28 \text{ aberturas}$$

$$n - 1 = 27 \text{ barrotes}$$

Orden de los barrotes:

- Ancho del canal = 0,80 (m).
- 27 barrotes de 0,01 (m) de grosor = 0,27 (m).
- 28 aberturas de 0,018 (m) = 0,50 (m).
- $\Sigma = 0,77 \text{ (m)} < 0,80 \text{ (m)}$

Opciones para ordenar los barrotes:

- Asignar 1,0 cm a cada lado.
- Aumentar la abertura entre barrotes.

Note que si aumentamos la abertura entre barrotes de 0,018 a 0,019 (m) y con el número de barrotes (n-1) que es igual a 27, entonces el número de aberturas entre barrotes es igual a 28. Entonces tenemos:

- 27 barrotes de 0,01 (m) de grosor = 0,27 (m)
- 28 aberturas de 0,019 (m) = 0,53 (m)
- $\Sigma = 0,8 \text{ m}$ (se asignan 5 mm de cada lado).

Pérdida hidráulica (Kischmer):

Usaremos esta ecuación solo para estimar las pérdidas para rejas limpias.

$$h_L = \beta \left(\frac{d_b}{C} \right) h_v \sin \theta$$

Donde:

h_L = pérdida hidráulica (m)

$\beta = 2,42$ para barrotes rectangulares de cara recta

d_b = grosor del barrote (m)

C = abertura entre barrotes (m)

h_v = altura de la velocidad de flujo inicial (m)

θ = ángulo de la reja horizontal

$$h_L = \frac{V_a^2}{2g} = \frac{\left(0,37 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 6,97 * 10^{-3} \text{ (m)}$$

Donde:

h_v = altura de velocidad del flujo inicial (m)

V_a = velocidad inicial de 0,37 m/s (0,30 m/s – 0,60 m/s)

g = gravedad (9,81 m/s²)

$$h_L = 2,42 * \left(\frac{0,01 \text{ (m)}}{0,019 \text{ (m)}} \right)^{\frac{4}{3}} * (6,97 * 10^{-3} \text{ m}) * \text{sen } 45^\circ = 0,005 \text{ (m)}$$

$$= 5 \text{ mm}$$

Velocidad a través de la reja:

$$A_r = n d_b h = 28 (0,01 \text{ m}) * (0,64 \text{ m}) = 0,18 \text{ m}^2$$

$$V_r = \frac{Q}{A - A_r} = \frac{0,19 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,51 \text{ m}^2 - 0,18 \text{ m}^2} = 0,57 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

10.2 Pérdidas para rejas sucias

He aquí un ejemplo para estimar las pérdidas a través de las *rejas* sucias.

Estimar las pérdidas a través de la reja cuando está sucia al 50 % por acumulación de sólidos gruesos. La velocidad de ingreso del flujo en el canal aguas arriba de la reja es 0,6 (m/s). La velocidad del flujo a través de la abertura de la reja limpia es 0,9 (m/s). El área con aberturas entre barrotes para el flujo a través de la reja limpia es 0,19 m². El coeficiente de carga empírico para rejas limpias es 0,7.

Entonces usaremos la siguiente ecuación:

$$h_L = \frac{1}{C} \left(\frac{V^2 - v^2}{2g} \right)$$

Donde:

h_L = pérdida hidráulica (m)

C = coeficiente de carga empírico 0,7 para rejas limpias o 0,6 para rejas sucias

V = velocidad del flujo a través de la abertura de las rejas (m/s)

v = velocidad de ingreso en el canal aguas arriba (m/s)

g = aceleración por la gravedad (m/s²)

$$h_L = \frac{1}{0,7} \left(\frac{(0,9 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 - (0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * (9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})} \right) = 0,033 \text{ m}$$

Estimar las pérdidas a través de la reja cuando está sucia al 50 % y la velocidad del flujo es el doble.

La velocidad del flujo a través de la abertura de la reja sucia.

$$v_s = 0,9 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 2 = 1,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Asumir un coeficiente de carga empírico para la reja sucia de 0,6. Entonces la pérdida será:

$$h_L = \frac{1}{0,6} \left(\frac{(1,8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 - (0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * (9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})} \right) = 0,24 \text{ m}$$

Medimos el nivel del agua antes y después de la reja para estimar la pérdida.



Lugar: rejas de la PTAR San Francisco (2021).

11. OPERACIÓN DE LAS REJAS

Ahora que tienes un diseño de estas *rejas*, nosotros te indicaremos la operación de estas *rejas*. Las PTAR en Antioquia usan dos *rejas* en paralelo. Entonces una de estas *rejas* funcionará todos los días. Ahora sí. Esta operación es fácil para los operarios de estas PTAR. Porque esta operación significa limpiar esta *reja* **tres veces al día** en verano y según la necesidad en invierno (Fig 10). Entonces estos operarios limpiarán esta *reja* según la pérdida hidráulica para que el agua residual ingrese con facilidad (Water Environment Federation, 2008).



Fig 10. Operarios limpiando la reja.

11.1 Extraer sólidos gruesos y medianos

Estos operarios limpiarán esta *reja* y extraerán estos sólidos para disposición final. Esta disposición significa llevar a relleno sanitario. Para limpiar esta *reja* estos operarios usarán varios utensilios. Estos utensilios son rastrillos, cepillos, baldes, balanza, lentes de protección, overoles, botas y guantes. He aquí un ejemplo para limpiar esta *reja*.

- Ubicarse en la plataforma de una *reja* que funcione.
- Extraer de esta *reja* todos los sólidos con un rastrillo.
- Dejar estos sólidos en la bandeja con orificios para que escurran por varios minutos.
- Limpiar la lama adherida al canal de esta *reja* con un cepillo y extraer estos sólidos sedimentados (42.1).
- Pesar estos sólidos extraídos en una balanza (Fig 11).
- Cuantificar estos sólidos extraídos (42.2).
- Guardar estos sólidos extraídos en un recipiente para disposición final.

Sí el carro recolector no transita con frecuencia por la PTAR. Guardar estos sólidos temporalmente en el lecho de secado y aplicar cal para prevenir olores putrefactos.



Fig 11. Sólidos extraídos de la reja.

Astrid Lorena Ospina Macías autoriza el uso de estas fotos.



Lugar: rejas de la PTAR El Carmen de Viboral (2018).

Página en blanco

3

Canal desarenador

Objetivos principales

- Ubicar el *desarenador*.
- Describir el *desarenador*.
- Diseñar el *desarenador*.
- Operar el *desarenador*.



Lugar: desarenadores de la PTAR Sonsón (2018).

12. UBICACIÓN DEL DESARENADOR

Ahora que sabes la manera como operar estas *rejás*, nosotros te hablaremos del canal *desarenador* (*grit channels*, en inglés). Este *desarenador* es la segunda tecnología y operación física unitaria usada en una PTAR (Fig 12). Ubicamos este *desarenador* en dos lugares. El primero, después de las rejás y antes de los sistemas de bombeo para prevenir el deterioro de estos sistemas. El segundo, entre las rejás y la *canaleta* Parshall o el vertedero usado para regular las velocidades del agua y medir el caudal. Para ubicar este *desarenador* usamos el ancho del canal y la geometría de los preliminares. Aunque La Comisión Nacional del Agua (2010) ubica este *desarenador* entre 0,15 y 0,3 m antes de la canaleta. Y usa un ángulo de 30°.

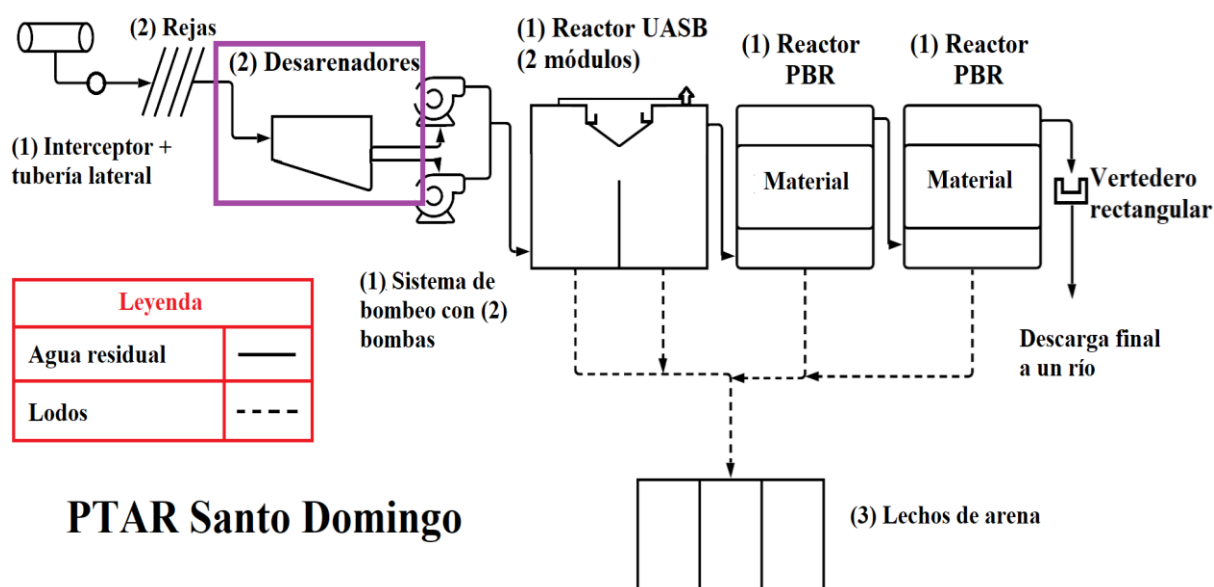


Fig 12. Ubicación de los desarenadores en una PTAR.

13. DESCRIPCIÓN DEL DESARENADOR

Ahora que ubicas este *desarenador*, nosotros te describiremos el objetivo de este *desarenador*. Este objetivo es eliminar arenas del agua residual para prevenir el mal funcionamiento de válvulas, sistemas de bombeo y tecnologías primarias (Qasim & Zhu, 2018). Para alcanzar este objetivo necesitamos *desarenadores* apropiados. Estos *desarenadores* tienen un control de velocidades del agua. Porque estas arenas (*grit*, en inglés) sedimentan en varias tecnologías, canales, tuberías y accesorios de varias PTAR.

Esta sedimentación de arenas tiene dos efectos en estas tecnologías. La primera, aumenta las pérdidas hidráulicas. La segunda, disminuye la eficiencia de eliminación de materia orgánica. Es evidente que estos *desarenadores* son esenciales para varias tecnologías como tanques sépticos, sedimentadores y reactores anaerobios.

Estas arenas son un material inerte, denso y abrasivo. Estas arenas incluyen también rocas, aluvión, varios trozos de vidrio, de hueso y cascaras de huevo. Estas *arenas* son un material inorgánico y más pesadas que la materia orgánica en el agua residual. Estas arenas tienen un peso específico entre 1,5 y 2,7 (Water Environment Federation, 2005; Qasim & Zhu, 2018). Además estas arenas tienen un tamaño entre 0,050 y 1,0 mm

y una gravedad específica de 2,65 (Metcalf & Eddy, 2014). Mientras que la materia orgánica tiene una gravedad específica de 1,02.

Existen varios *desarenadores* para eliminar estas arenas. Estos *desarenadores* son de flujo horizontal, aireados, de vórtice, y rectangulares de nivel constante. Por ejemplo, Qasim & Zhu (2018) clasifican estos *desarenadores* de flujo horizontal en flujo variable y flujo constante. Para elegir estos *desarenadores* consideramos el costo y la ubicación del *desarenador*, la topografía del lugar, los equipos apropiados para la PTAR y la pérdida hidráulica.

Encontramos que las PTAR de Antioquia usan *desarenadores* de flujo horizontal (*horizontal-flow grit channels*, en inglés). Estos *desarenadores* son de flujo controlado por canaletas o vertederos (*velocity-controlled grit channels*, en inglés). También *estos* son rectangulares e idénticos (Fig 13). Estos *desarenadores* son económicos y simples de construir. Y los operarios limpian estos *desarenadores* con facilidad. Así que no hablaremos de los *desarenadores* aireados, de vórtice y de nivel constante porque son tecnologías más avanzadas.



Fig 13. Desarenador de flujo horizontal.

Estos *desarenadores* tienen varias partes que son las siguientes: de ingreso, de sedimentación y de salida. También tienen un control de velocidades del agua que son vertederos o canaletas (Fig 14). En estos *desarenadores*, varios ingenieros aumentan la anchura de la parte de ingreso. Aunque en estos *desarenadores* sedimenta también materia orgánica por velocidades bajas del agua residual. Pero el operario limpiará con más frecuencia estos *desarenadores*. Para prevenir la sedimentación de materia orgánica en el desarenador estas velocidades serán mayores a 0,3 m/s.

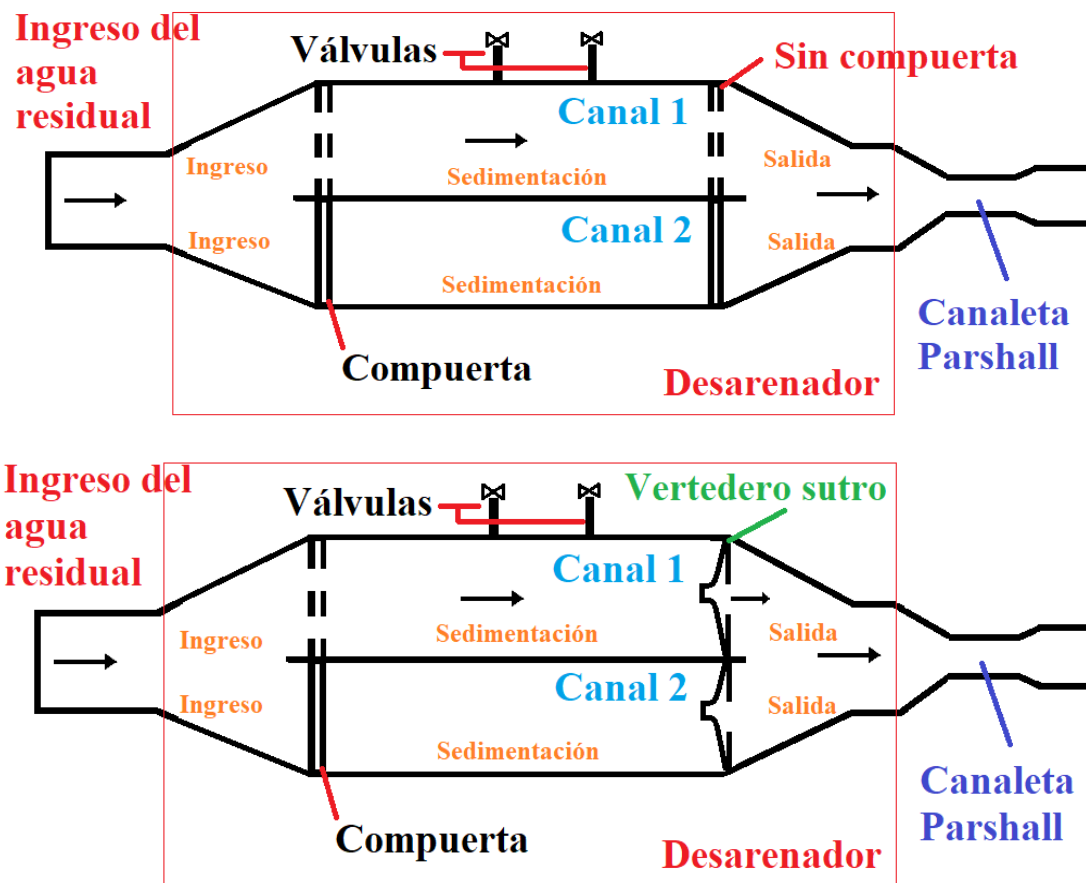


Fig 14. Esquema del desarenador.

Sugerido por Metcalf & Eddy (2014) y Qasim & Zhu (2018).

Aunque encontramos también que varias PTAR usan *desarenadores* que tienen tres errores usuales. El primero, falta de anchura en la parte de ingreso. Esto significa que en las rejillas y estos *desarenadores* el agua pasa con la misma velocidad. Entonces en el canal de estas rejillas sedimentan arenas. El segundo, falta de válvulas en la parte de sedimentación (Fig 15).

El tercero, conexión inapropiada de tuberías para evacuar el agua hacia ríos y no hacia otra tecnología.



Fig 15. Rejas y desarenador.

Estos errores significan inapropiada velocidad del agua y problemas operacionales. Uno de estos problemas en estos *desarenadores* son la sedimentación de sólidos y materia orgánica. Para prevenir estos errores Qasim & Zhu (2018) dicen que estos *desarenadores* requieren una longitud apropiada del canal. Además requieren un vertedero sutro o canaleta Parshall para regular caudales. Nosotros sugerimos ubicar un vertedero sutro a la salida de cada *desarenador* para regular velocidades del agua residual.

Qasim & Zhu (2018) sugieren que en estos *desarenadores* de flujo horizontal, el agua residual tiene un intervalo de tiempos de retención

apropiado. Este intervalo está entre 45 y 90 segundos. Varios ingenieros usan un tiempo de **60 segundos** para cumplir con este intervalo.

Qasim & Zhu (2018) sugieren también que en estos *desarenadores* el agua residual tiene una velocidad apropiada. Esta velocidad es de **0,3 m/s**. Las canaletas y los vertederos regulan esta velocidad. He aquí más sugerencias para diseñar los *desarenadores* (Tabla 7).

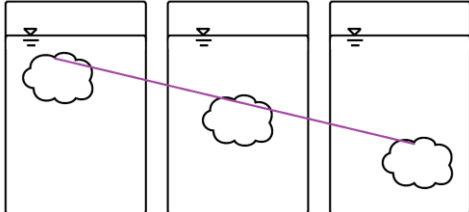
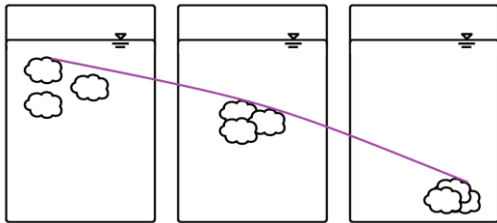
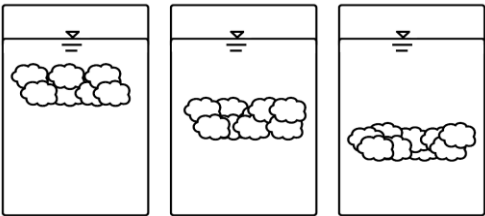
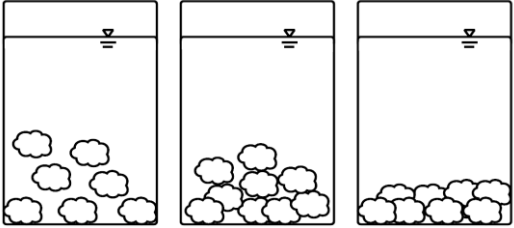
Tabla 7. Desarenadores de flujo horizontal.

Sugerencias en	Unidad	Intervalo	Apropiado
Tiempo de retención	s	45–90	60
Velocidad horizontal	m/s	0,25–0,4	0,3
Velocidad de sedimentación para eliminar estas arenas.			
0,21 mm	m/min*	1,0–1,3	1,2
0,15 mm	m/min*	0,6–0,9	0,75
Pérdida hidráulica. Porcentaje de la profundidad del canal	Porcentaje (%)	30–40	36**
Longitud para la turbulencia de entrada y salida	Porcentaje (%)	25–50	30
*Note que si la gravedad específica de estas arenas es menor a 2,65 usar menores velocidades.			
**Para canaletas Parshall.			

Sugerido por Metcalf & Eddy (2014) y Qasim & Zhu (2018).

He aquí una descripción breve de la sedimentación en el *desarenador*. Esta sedimentación es discreta (Tabla 8). También describiremos otros tipos de sedimentación.

Tabla 8. Sedimentación.

Sedimentación	Descripción	Descripción gráfica	Usos
Discreta o sedimentación tipo I	La <i>sedimentación</i> tipo I <u>acontece</u> en suspensiones de concentración baja. Las partículas sedimentan individualmente. Además mantienen su identidad. No hay interferencias significativas en la <i>sedimentación</i> de estas partículas. La velocidad es constante durante la <i>sedimentación</i> . Aplican la ecuación de Newton y la de Stokes según el tamaño de las partículas.		<i>Desarenadores</i>
Floculenta o sedimentación tipo II	La <i>sedimentación</i> tipo II <u>acontece</u> en suspensiones diluidas. Las partículas se unen. El tamaño de las partículas aumenta y la velocidad de <i>sedimentación</i> también.		Sedimentadores primarios Parte superior de sedimentadores secundarios
Interferida o sedimentación tipo III	La <i>sedimentación</i> tipo III <u>acontece</u> en suspensiones de concentración intermedia. Los sólidos sedimentan como una masa. Las partículas están en una posición fija con respecto a las demás. La parte superior de <i>sedimentación</i> desarrolla una interfaz sólido-líquido que deja una parte de agua clara en la parte superior, la cual aumenta gradualmente con la <i>sedimentación</i> . En la parte inferior se acumula un manto de lodos.		Parte de sedimentación del sedimentador secundario Parte superior de espesadores de lodos por gravedad
Compresión o sedimentación tipo IV	La <i>sedimentación</i> tipo IV <u>acontece</u> con alta concentración de sólidos que permanecen apoyados unos sobre otros. La <i>sedimentación</i> solo es posible por compresión ya que los sólidos se añaden en la parte superior. La compresión de los sólidos es lenta.		Parte inferior del sedimentador secundario Parte de sedimentación de espesadores de lodos por gravedad

Sugerido por Qasim & Zhu (2018).

13.1 Sedimentación discreta o tipo I

La sedimentación de *arenas* tiene una velocidad constante durante su caída en el agua. Esta velocidad depende del tamaño, la forma y la densidad de estas *arenas*. Depende también de la temperatura y viscosidad del agua. Nosotros usamos varias ecuaciones para estimar esta velocidad de sedimentación de estas *arenas* (Qasim & Zhu, 2018). Una de estas ecuaciones es la siguiente:

Ley de Stokes, $N_R < 1$, flujo laminar:

N_R = Numero de Reynolds.

$$V_s = \frac{g * (\rho_s - \rho_L) * d^2}{18 * \mu * \rho_L}$$

Donde:

V_s = velocidad de sedimentación (m/s)

μ = viscosidad cinemática del agua (m²/s)

ρ_s = densidad de la partícula (kg/m³)

ρ_L = densidad del líquido (kg/m³)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

d = diámetro de la partícula (m)

Note que si duplicamos el diámetro de la partícula, cuaduplicamos la velocidad de sedimentación. Partícula significa arenas.



Lugar: Desarenador de la PTAR Granada (2021).

14. DISEÑO DEL DESARENADOR

Ahora que tienes una descripción breve de estos *desarenadores*, nosotros te indicaremos como diseñar estos *desarenadores*. Qasim & Zhu (2018) sugieren usar el caudal máximo para diseñar estos *desarenadores*. Y nosotros estamos de acuerdo con Qasim & Zhu (2018) porque prevenimos que las arenas ingresen a las tecnologías primarias de estas PTAR. He aquí un ejemplo para diseñar *desarenadores* para eliminar arenas.

Diseñar un *desarenador* rectangular con control de velocidades. Por este *desarenador* pasa un caudal medio de $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ y un caudal mínimo que es $1/3$ de este caudal medio. Usar un factor de 3,0 para estimar el caudal máximo que es con el cual diseñas este *desarenador*. Y recuerda que usamos este factor para estimar el caudal máximo horario de una PTAR.

En este *desarenador*, el agua residual tendrá una velocidad horizontal de $0,33 \text{ m/s}$. Esta agua tendrá un tiempo de retención de 45 segundos. En este *desarenador*, las arenas tendrán una velocidad de sedimentación de $1,2 \text{ m/min}$. A esta velocidad, este *desarenador* eliminará varias partículas discretas de $0,18 \text{ mm}$ de diámetro. Este *desarenador* tendrá

dos canales idénticos con compuertas. Cada uno de estos canales está diseñado para el caudal máximo horario.

Ubicar un vertedero sutro al final de estos canales *desarenadores* para regular variaciones de estas velocidades del agua. Asumir que la cresta de este vertedero está estable en el punto de referencia del vertedero. La cresta es la parte más alta sobre la que vierte el agua para pasar a la otra tecnología. También asumir que la longitud de este vertedero es menor que la anchura del canal.

Estimar el caudal máximo y mínimo por canal *desarenador*

Caudal máximo:

$$3,0 * 0,06 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,18 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 180 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Caudal mínimo:

$$\frac{1}{3} * 0,06 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,02 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 20 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Estime la longitud teórica y ancho del *desarenador*

Tasa de rebose:

$$1,2 \frac{\text{m}}{\text{min}} * \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2} = 1,2 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{min}}$$

El Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (2017) sugiere una tasa de rebose entre 700 y 1.600 m³/m² ·d.

Área superficial:

$$A = \frac{0,18 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1,2 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{min}}} * \frac{60 \text{ s}}{\text{min}} = 9 \text{ m}^2$$

Tiempo de retención hidráulico

El intervalo de tiempo sugerido por los autores está entre 45 y 60 segundos. Elegimos 45 segundos (s).

Longitud teórica del *desarenador*

$$L = 0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 45 \text{ s} = 13,5 \text{ m}$$

Para turbulencias en la parte de ingreso y salida del agua en el desarenador asumir lo siguiente: 1,75 m para ensanchar la parte de entrada y 1,75 para estrechar la parte de salida. Entonces 10,0 m sería la longitud teórica del desarenador para sedimentar arenas.

Ancho del *desarenador*

$$W = \frac{9 \text{ m}^2}{10 \text{ m}} = 0,9 \text{ m}$$

Aproximar a un ancho de 1 m. 0,50 m para cada canal.

Estimar la altura del agua residual en el canal aguas arriba de este vertedero suto

Área transversal del *desarenador*

$$\frac{0,18 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,6 \text{ m}^2$$

Altura del agua en el *desarenador*

$$D = \frac{0,6 \text{ m}^2}{0,9 \text{ m}} = 0,67 \text{ m}$$

Este desarenador tendrá una altura mayor a 0,67 m para el borde libre.

El borde libre es la distancia desde la superficie del agua hasta la parte superior del canal. Este borde libre será de 0,33 m. Entonces la altura del desarenador será de 1,0 m.

Resumen de las longitudes de este *desarenador*

Las longitudes son las siguientes:

$$L = 13,5 \text{ m}$$

$$W = 0,9 \text{ m}$$

$$D = 1,0 \text{ m}$$

Diseño de la parte de ingreso

Ya sabes que este *desarenador* tiene una parte de ingreso. Esta parte tiene un canal que descarga el flujo de agua en este *desarenador*. Este flujo puede ingresar a cada uno de los dos canales del *desarenador* por igual. Recuerda que este *desarenador* tiene dos canales y varias compuertas. Entonces estas compuertas separarán cada uno de los canales del *desarenador*. El operario ubicará estas compuertas para separar uno de estos canales. Con esta separación, todo el caudal ingresará por un canal del *desarenador*. He aquí un esquema de la parte de ingreso de este *desarenador* ([Fig 16](#)).

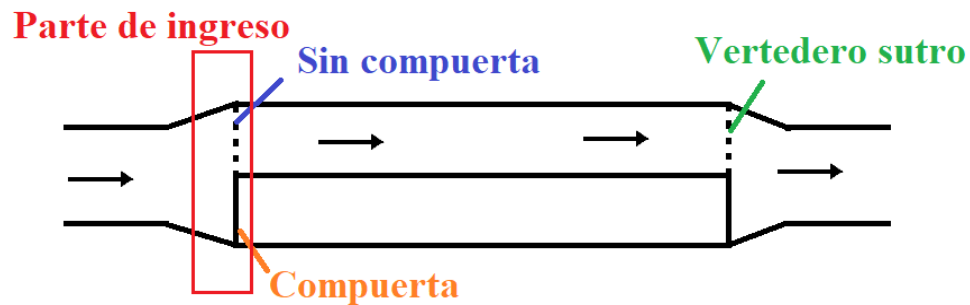


Fig 16. Desarenador con dos canales.

Diseño de la parte de salida

Ya sabes que este *desarenador* tiene una parte de salida. Esta parte tiene un vertedero sutro en cada canal para regular el caudal máximo. Este vertedero regulará velocidades del agua de 0,3 m/s en cada canal. Este caudal máximo pasará por cada uno de los canales de este *desarenador*.

Estimar la altura del agua sobre el vertedero sutro

La profundidad del agua (D) en el canal con caudal máximo es 0,67 m. Qasim & Zhu (2018) dicen que la cresta del vertedero está entre 1 y 3 cm del fondo del canal. Repetimos que la cresta es la parte más alta sobre la que vierte el agua. Aunque nosotros sugerimos que la cresta está a 5 cm (0,05 m) para descarga libre.

El agua tiene una altura máxima. Esta altura con caudal máximo es

$$H = (0,67 - 0,05)\text{m} = 0,62 \text{ m}$$

He aquí un esquema de la longitud del canal (Fig 17).

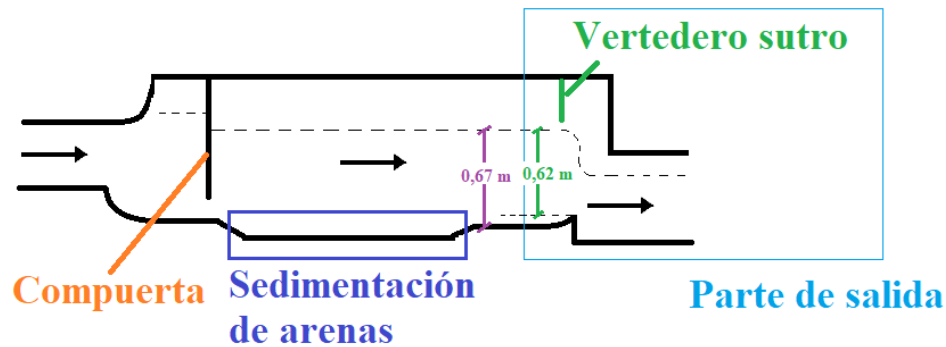


Fig 17. Longitud del canal desarenador.

Estimar el ancho de la abertura (L) del vertedero sutro para el caudal máximo. Asumir esta altura máxima del agua con este caudal máximo.

Usar la siguiente ecuación para estimar este ancho.

$$Q = 4,17LH^{\frac{3}{2}}$$

$$L = \frac{Q}{4,17H^{\frac{3}{2}}} = \frac{0,18 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{4,17 * (0,62 \text{ m})^{\frac{3}{2}}} = 0,09 \text{ m}$$

Asumir la forma apropiada de las aberturas del vertedero sutro. También comprobar las velocidades del agua residual en este *desarenador*. Para regular estas velocidades usar este factor $LH^{1/2}$ en la siguiente ecuación. Y usar la constante K de esta ecuación:

$$K = LH^{\frac{1}{2}} = 0,09 \text{ m} * (0,62 \text{ m})^{\frac{1}{2}} = 0,07 \text{ m}^{\frac{3}{2}}$$

He aquí las estimaciones del vertedero (Tabla 9).

Tabla 9. Estimaciones del vertedero.

Caudal y asunciones	Caudal (Q), m ³ /s	Altura del agua sobre el vertedero $y = \frac{Q}{4.17K}$, m	Ancho del vertedero, $x = Ky^{-\frac{1}{2}}$, m	Altura en el canal desarenador (D), m	Velocidad del agua en el canal desarenador $v = \frac{Q}{d \cdot W}$, m/s
Caudal máximo	0,18	0,62	0,09	0,67	0,30
Asumido*	0,15	0,51	0,10	0,56	0,30
Asumido*	0,12	0,41	0,11	0,44	0,30
Asumido**	0,09	0,31	0,13	0,33	0,30
Asumido*	0,07	0,24	0,14	0,26	0,30
Caudal medio	0,06	0,21	0,15	0,22	0,30
Asumido	0,04	0,14	0,19	0,15	0,30
Caudal mínimo	0,02	0,07	0,27	0,07	0,30
Asumido***	0,01	0,03	0,38	0,04	0,30

Asumimos:

* estos valores para dar forma al vertedero.

**** este es el caudal máximo cuando los dos canales están en funcionamiento 90 L/s. El desarenador tiene un caudal de diseño de 180 L/s.**

***** este caudal para determinar la longitud del vertedero de 0,38 m.**

Note que aunque este caudal varía significativamente, la velocidad en el canal es constante.

He aquí la forma de las aberturas del vertedero (Fig 18).

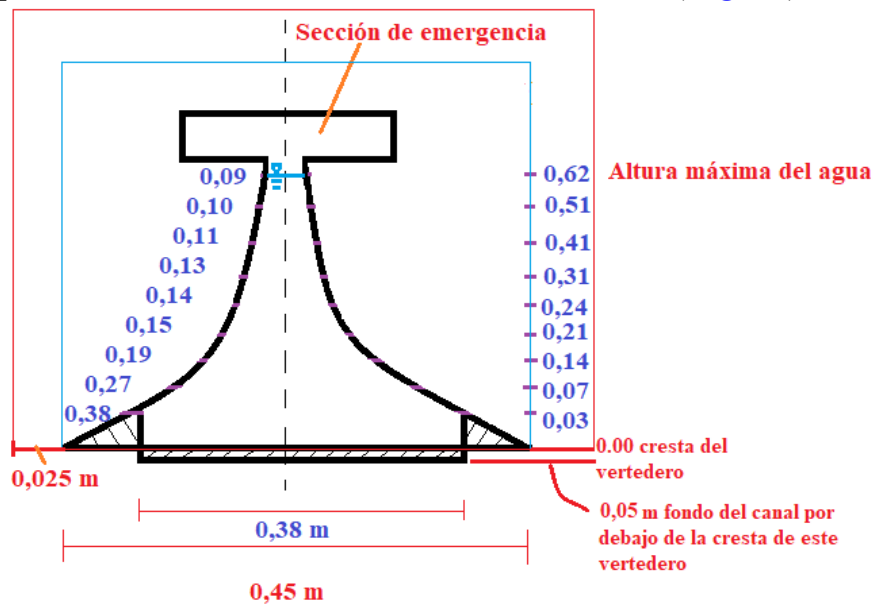


Fig 18. Aberturas del vertedero sutro.

He aquí un vertedero sutro (Fig 19).



Fig 19. Vertedero sutro de la PTAR Marinilla.

Sugerido por Qasim & Zhu (2018).



Lugar: desarenadores y vertederos sutro en la PTAR Marinilla (2020).

15. OPERACIÓN DEL DESARENADOR

Ahora que tienes un diseño de este *desarenador*, nosotros te indicaremos la operación de este *desarenador*. Pero recuerda que estas PTAR en Antioquia usan dos canales *desarenadores*. Entonces solo uno de estos canales funcionará diario. Ahora sí. Esta operación también es fácil para estos operarios de estas PTAR. Porque esta operación significa limpiar estos canales *desarenadores* **una vez a la semana** en verano y según la necesidad en invierno (Fig 20). Para limpiar estos *desarenadores* estos operarios usarán válvulas ubicadas en el fondo. Además estos operarios limpiarán este *desarenador* por dos razones. Primera, para prevenir el arrastre de arenas sedimentadas. Segunda, para prevenir olores putrefactos (Water Environment Federation, 2008).



Fig 20. Operarios limpiando el desarenador.

15.1 Extraer arenas

Estos operarios limpiarán este *desarenador* y extraerán estas *arenas* para disposición final. Para limpiar este *desarenador* estos operarios usarán varios utensilios. Estos utensilios son cepillos, baldes, pala, balanza, lentes de protección, overoles, botas y guantes. He aquí un ejemplo para limpiar este canal *desarenador*.

- Retirar las dos compuertas del canal *desarenador* aislado para ingresar agua residual.
- Ubicar en el otro canal *desarenador* las compuertas para limpiarlo.
- Abrir la válvula de este canal *desarenador* para evacuar el agua residual.
- Extraer de este canal *desarenador* todas las arenas con una pala ([Fig 21](#)).
- Limpiar la lama adherida a este canal *desarenador* con un cepillo.
- Pesar estas arenas extraídas en una balanza.
- Cuantificar estas arenas extraídas ([42.3](#)).
- Guardar estas arenas extraídas en un recipiente para disposición final.
- Llevar estas arenas extraídas a los lechos de secado cuando el carro recolector no transita con frecuencia por la PTAR.



Fig 21. Arenas y sólidos extraídos del desarenador.

Astrid Lorena Ospina Macías autoriza el uso de estas fotos.



Lugar: desarenadores de la PTAR Sonsón (2018).

Página en blanco

4

Canaleta Parshall

Objetivos principales

- Ubicar la *canaleta* Parshall.
- Describir la *canaleta* Parshall.
- Operar la *canaleta* Parshall.



Lugar: canaleta Parshall de la PTAR La Piñuela en Cocorná (2021).

16. UBICACIÓN DE LA CANALETA PARSHALL

Ahora que sabes la manera como operar este desarenador, nosotros te hablaremos de la *canaleta* Parshall (*Parshall flume*, en inglés). Ubicamos esta *canaleta* Parshall entre el desarenador y el tratamiento primario para regular las velocidades del agua en el tratamiento preliminar. Y que los operarios midan el caudal en una PTAR (Fig 22). Esta *canaleta* Parshall tiene una longitud corta para ubicarla con facilidad.

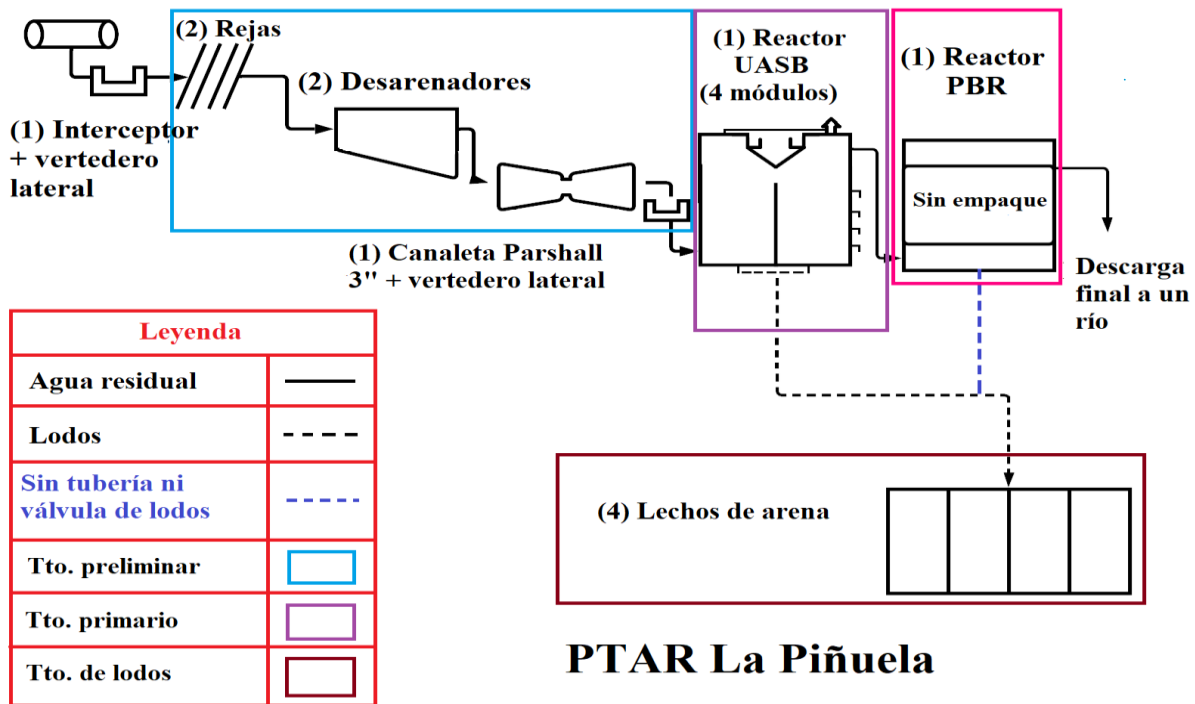


Fig 22. Ubicación de la canaleta Parshall en una PTAR.



Lugar: canaleta Parshall de la PTAR San Francisco (2021).

17. DESCRIPCIÓN DE LA CANALETA PARSHALL

Ahora que ubicas esta *canaleta* Parshall, nosotros te describiremos los objetivos de esta *canaleta*. Estos objetivos son dos. El primero, regular las velocidades del agua residual en estas tecnologías preliminares. El segundo, medir los caudales de una PTAR. Para alcanzar estos objetivos necesitamos elegir la *canaleta* Parshall apropiada. Para elegir estas *canaletas* es esencial saber el caudal máximo de la PTAR. Y para medir los caudales necesitamos a los operadores. También podríamos usar los vertederos sutro para regular las velocidades en los preliminares. Pero estos vertederos son menos precisos que las *canaletas*. Ya entiendes porque estimamos los caudales al principio de esta guía. Mira como conectamos los caudales, las rejillas, el desarenador y la *canaleta* Parshall.

Esta *canaleta* tiene tres partes diferentes ([Fig 23](#)). Estas partes son la de ingreso o convergente, central y de salida o divergente. La parte de ingreso tiene paredes planas, verticales y convergentes con fondo horizontal. La parte central tiene paredes planas, verticales y paralelas, de ancho (W) y con el fondo inclinado hacia aguas abajo. Esta parte central también tiene la garganta de la *canaleta* Parshall. La parte de salida tiene paredes planas verticales y divergentes, pero con el fondo de pendiente adversa (Marbello, [2005](#); Comisión Nacional del Agua, [2010](#)).

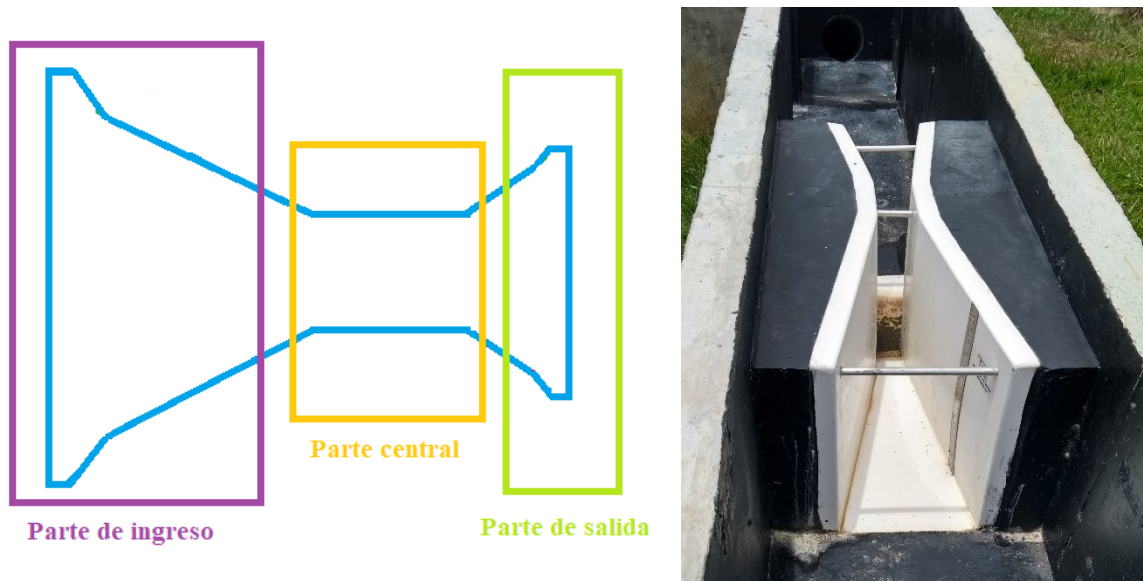


Fig 23. Partes de la canaleta Parshall.

Nosotros encontramos que varias PTAR en Antioquia usan *canaletas* Parshall de 3 o 6". Aunque encontramos que varias *canaletas* tienen dos errores usuales. Primero, ubicación inapropiada en la *canaleta* de la regla para medir la altura del agua residual. Segundo, elegir una *canaleta* más grande de la que la PTAR requiere. Estos errores disminuyen la precisión para estimar el caudal. Para prevenir estos errores ubicar en la *canaleta* la regla a **dos tercios de A** con precisión (Fig 24). También ubicar esta *canaleta* a **0,15** y **0,3 m** después del desarenador (Comisión Nacional del Agua, 2010). Sugerimos elegir las *canaletas* según el caudal **medio y máximo** de ingreso a la PTAR y la longitud del canal de ingreso y salida.

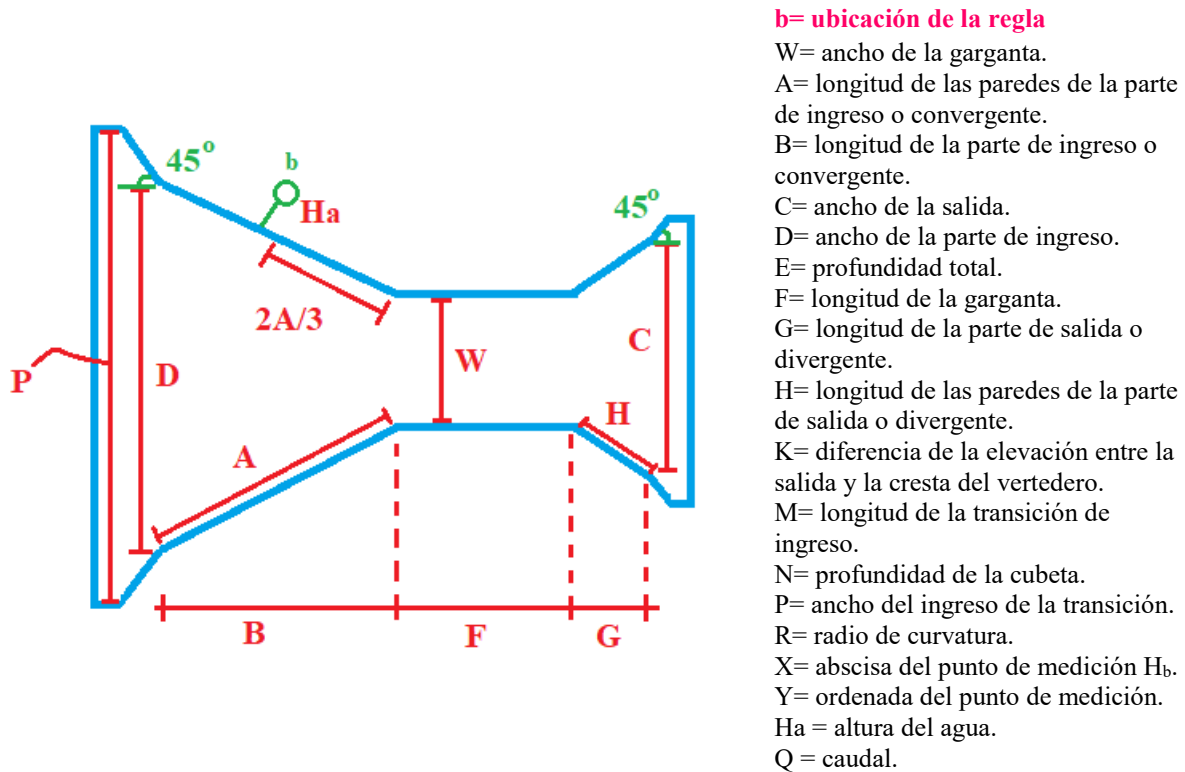


Fig 24. Vista de la canaleta Parshall.

He aquí la longitud de la canaleta Parshall (Fig 25).

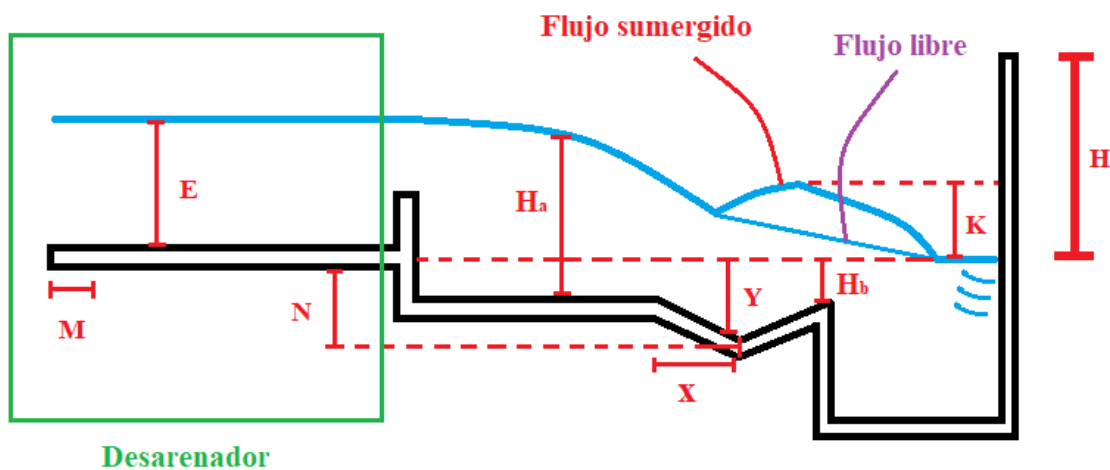


Fig 25. Longitudinal de la canaleta Parshall.

Sugerido por Azevedo Netto (1998) y Marbello (2005).

He aquí varios intervalos de caudales para elegir canaletas Parshall ([Tabla 10](#)).

Tabla 10. Intervalos de caudales.

Ancho de la garganta (W)		Intervalo de agua	
Pulgadas (in)	Centímetros (cm)	Mínimo (L/s)	Máximo (L/s)
3"	7,6	0,8	53,8
6"	15,2	1,4	110,4
9"	22,9	2,5	252,0

Sugerido por Azevedo Netto ([1998](#)) y Marbello ([2005](#)).

He aquí las dimensiones estandarizadas de varias canaletas Parshall según el ancho de la garganta ([Tabla 11](#)).

Tabla 11. Dimensiones estandarizadas.

W		A	B	C	D	E	F	G	K	N
Pulgadas	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
3"	7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	45,7	15,2	30,5	2,5	5,7
6"	15,2	61,0	61,0	39,4	40,3	61,0	30,5	61,0	7,6	11,4
9"	22,9	88,0	86,4	38,0	57,5	76,3	30,5	45,7	7,6	11,4

Sugerido por Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente ([2004](#)).

He aquí las ecuaciones de las *canaletas* Parshall de 3 y 6" para estimar caudales en estas PTAR ([Tabla 12](#)).

Tabla 12. Ecuaciones para canaletas de 3" y 6".

Ecuación para 3"	Ecuación para 6"	Sugerido por
$W = 7,6 \text{ cm}$, $Q = 0,1765 * H_a^{1,547}$	$W = 15,2 \text{ cm}$, $Q = 0,381 * H_a^{1,580}$	(Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004; Comisión Nacional del Agua, 2010).

Donde:

H_a = Altura del agua en $\frac{2}{3} A$, (m) (Fig 26).

Q = Caudal, ($\frac{m^3}{s}$)

W = ancho de la garganta, (m)



Fig 26. Altura del agua según la regla.

18. OPERACIÓN DE LA CANALETA PARSHALL

Ahora que tienes una descripción breve de esta *canaleta*, nosotros te indicaremos la operación de esta *canaleta*. Esta operación tiene dos significados para estos operarios. Primero, limpiar esta *canaleta* **una vez a la semana** en verano y según la necesidad en invierno. Estos operarios limpiarán las paredes de esta *canaleta* para prevenir olores putrefactos. Segundo, estimar el caudal de ingreso a la PTAR. Para estimar este caudal estos operarios medirán la altura del agua en la regla de la *canaleta* **cada hora** (Fig 27).



Fig 27. Operarios comprobando la altura del agua.

Estos operarios limpiarán esta canaleta para prevenir olores putrefactos. Para limpiar esta *canaleta* estos operarios usarán varios utensilios. Estos utensilios son cepillos, lentes de protección, overoles y guantes. Estos operarios también estimarán el caudal que ingresa a la PTAR. Para estimar este caudal estos operarios medirán la altura del agua según la regla de esta *canaleta* y luego usarán las ecuaciones para 3 o 6". Además estos operarios cuantificarán el caudal promedio diario (42.4). He aquí un ejemplo para estimar este caudal en una *canaleta* de 3".

18.1 Canaleta de 3"

Asumir una altura de 2 cm del agua según la regla

Entonces 2 cm equivale a 0,02 m

$$Q = 0,176 * H_a^{1,547}$$

Donde:

Q= caudal en (m³/s)

H_a= altura de la lámina de agua en (m)

$$Q = 0,176 * (0,02)^{1,547}$$

$$Q = 0,00042 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{1.000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = \mathbf{0,415 \text{ L/s}}$$

He aquí un ejemplo para mostrar varios caudales según la altura del agua en la regla de esta *canaleta* (Tabla 13).

Tabla 13. Altura del agua en la canaleta de 3”.

CAUDAL			
Altura del agua (cm)	Altura del agua (m)	Caudal (m³/s)	Caudal (L/s)
1,0	0,01	0,0001	0,14
1,5	0,02	0,0003	0,27
2,0	0,02	0,0004	0,42
2,5	0,03	0,0006	0,59
3,0	0,03	0,0008	0,78
3,5	0,04	0,0010	0,99
4,0	0,04	0,0012	1,21
4,5	0,05	0,0015	1,46
5,0	0,05	0,0017	1,71
5,5	0,06	0,0020	1,99
6,0	0,06	0,0023	2,27
6,5	0,07	0,0026	2,57
7,0	0,07	0,0029	2,88
7,5	0,08	0,0032	3,21
8,0	0,08	0,0035	3,55
8,5	0,09	0,0039	3,90
9,0	0,09	0,0043	4,26
9,5	0,10	0,0046	4,63
10,0	0,10	0,0050	5,01

CAUDAL			
Altura del agua (cm)	Altura del agua (m)	Caudal (m³/s)	Caudal (L/s)
10,5	0,11	0,0054	5,40
11,0	0,11	0,0058	5,80
11,5	0,12	0,0062	6,22
12,0	0,12	0,0066	6,64
12,5	0,13	0,0071	7,07
13,0	0,13	0,0075	7,52
13,5	0,14	0,0080	7,97
14,0	0,14	0,0084	8,43
14,5	0,15	0,0089	8,90
15,0	0,15	0,0094	9,38
15,5	0,16	0,0099	9,87
16,0	0,16	0,0104	10,36
16,5	0,17	0,0109	10,87
17,0	0,17	0,0114	11,38
17,5	0,18	0,0119	11,90
18,0	0,18	0,0124	12,44
18,5	0,19	0,0130	12,97
19,0	0,19	0,0135	13,52
19,5	0,20	0,0141	14,07
20,0	0,20	0,0146	14,64

CAUDAL			
Altura del agua (cm)	Altura del agua (m)	Caudal (m³/s)	Caudal (L/s)
20,5	0,21	0,0152	15,21
21,0	0,21	0,0158	15,78
21,5	0,22	0,0164	16,37
22,0	0,22	0,0170	16,96
22,5	0,23	0,0176	17,56
23,0	0,23	0,0182	18,17
23,5	0,24	0,0188	18,78
24,0	0,24	0,0194	19,41
24,5	0,25	0,0200	20,03
25,0	0,25	0,0207	20,67
25,5	0,26	0,0213	21,31
26,0	0,26	0,0220	21,96
26,5	0,27	0,0226	22,62
27,0	0,27	0,0233	23,28
27,5	0,28	0,0240	23,95
28,0	0,28	0,0246	24,63
28,5	0,29	0,0253	25,32
29,0	0,29	0,0260	26,01
29,5	0,30	0,0267	26,70
30,0	0,30	0,0274	27,41

CAUDAL			
Altura del agua (cm)	Altura del agua (m)	Caudal (m³/s)	Caudal (L/s)
30,5	0,31	0,0281	28,12
31,0	0,31	0,0288	28,83
31,5	0,32	0,0296	29,56
32,0	0,32	0,0303	30,28
32,5	0,33	0,0310	31,02
33,0	0,33	0,0318	31,76
33,5	0,34	0,0325	32,51
34,0	0,34	0,0333	33,26
34,5	0,35	0,0340	34,02
35,0	0,35	0,0348	34,79
35,5	0,36	0,0356	35,56
36,0	0,36	0,0363	36,34
36,5	0,37	0,0371	37,12
37,0	0,37	0,0379	37,91
37,5	0,38	0,0387	38,71
38,0	0,38	0,0395	39,51
38,5	0,39	0,0403	40,31
39,0	0,39	0,0411	41,13
39,5	0,40	0,0419	41,95
40,0	0,40	0,0428	42,77

18.2 Canaleta de 6"

He aquí un ejemplo para estimar este caudal en una *canaleta* de 6".

Asumir una altura de 30 cm del agua según la regla

Entonces 30 cm equivale a 0,3 m

$$W = 15,2 \text{ cm} , Q = 0,381 * H_a^{1,580}$$

Donde:

Q= caudal en (m³/s)

H_a= altura de la lámina de agua en (m)

$$Q = 0,381 * (0,3)^{1,580}$$

$$Q = 0,06 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{1.000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = \mathbf{56,9 \text{ L/s}}$$

He aquí un ejemplo para mostrar varios caudales según la altura del agua en la regla de esta *canaleta* ([Tabla 14](#)).

Tabla 14. Altura del agua en la canaleta de 6".

CAUDAL			
Altura del agua (cm)	Altura del agua (m)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (L/s)
1,0	0,01	0,0003	0,3
1,5	0,02	0,0005	0,5
2,0	0,02	0,0008	0,8
2,5	0,03	0,0011	1,1
3,0	0,03	0,0015	1,5
3,5	0,04	0,0019	1,9
4,0	0,04	0,0024	2,4
4,5	0,05	0,0028	2,8
5,0	0,05	0,0034	3,4
5,5	0,06	0,0039	3,9
6,0	0,06	0,0045	4,5
6,5	0,07	0,0051	5,1
7,0	0,07	0,0057	5,7
7,5	0,08	0,0064	6,4
8,0	0,08	0,0070	7,0
8,5	0,09	0,0078	7,8
9,0	0,09	0,0085	8,5
9,5	0,10	0,0092	9,2
10,0	0,10	0,0100	10,0

CAUDAL			
Altura del agua (cm)	Altura del agua (m)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (L/s)
10,5	0,11	0,0108	10,8
11,0	0,11	0,0116	11,6
11,5	0,12	0,0125	12,5
12,0	0,12	0,0134	13,4
12,5	0,13	0,0143	14,3
13,0	0,13	0,0152	15,2
13,5	0,14	0,0161	16,1
14,0	0,14	0,0171	17,1
14,5	0,15	0,0180	18,0
15,0	0,15	0,0190	19,0
15,5	0,16	0,0200	20,0
16,0	0,16	0,0211	21,1
16,5	0,17	0,0221	22,1
17,0	0,17	0,0232	23,2
17,5	0,18	0,0243	24,3
18,0	0,18	0,0254	25,4
18,5	0,19	0,0265	26,5
19,0	0,19	0,0276	27,6
19,5	0,20	0,0288	28,8
20,0	0,20	0,0300	30,0

CAUDAL			
Altura del agua (cm)	Altura del agua (m)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (L/s)
20,5	0,21	0,0312	31,2
21,0	0,21	0,0324	32,4
21,5	0,22	0,0336	33,6
22,0	0,22	0,0348	34,8
22,5	0,23	0,0361	36,1
23,0	0,23	0,0374	37,4
23,5	0,24	0,0387	38,7
24,0	0,24	0,0400	40,0
24,5	0,25	0,0413	41,3
25,0	0,25	0,0426	42,6
25,5	0,26	0,0440	44,0
26,0	0,26	0,0454	45,4
26,5	0,27	0,0467	46,7
27,0	0,27	0,0481	48,1
27,5	0,28	0,0496	49,6
28,0	0,28	0,0510	51,0
28,5	0,29	0,0524	52,4
29,0	0,29	0,0539	53,9
29,5	0,30	0,0554	55,4
30,0	0,30	0,0569	56,9

CAUDAL			
Altura del agua (cm)	Altura del agua (m)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (L/s)
30,5	0,31	0,0584	58,4
31,0	0,31	0,0599	59,9
31,5	0,32	0,0614	61,4
32,0	0,32	0,0630	63,0
32,5	0,33	0,0645	64,5
33,0	0,33	0,0661	66,1
33,5	0,34	0,0677	67,7
34,0	0,34	0,0693	69,3
34,5	0,35	0,0709	70,9
35,0	0,35	0,0725	72,5
35,5	0,36	0,0742	74,2
36,0	0,36	0,0758	75,8
36,5	0,37	0,0775	77,5
37,0	0,37	0,0792	79,2
37,5	0,38	0,0809	80,9
38,0	0,38	0,0826	82,6
38,5	0,39	0,0843	84,3
39,0	0,39	0,0861	86,1
39,5	0,40	0,0878	87,8
40,0	0,40	0,0896	89,6



Lugar: canaleta Parshall de la PTAR Granada (2020).

Página en blanco

5

Sedimentadores primarios

Objetivos principales

- Ubicar el *sedimentador* primario.
- Describir el *sedimentador* primario.
- Diseñar el *sedimentador* primario.
- Operar el *sedimentador* primario.



Lugar: sedimentador primario de la PTAR Granada (2021).

19. UBICACIÓN DEL SEDIMENTADOR

Ahora que sabes la manera como operar esta *canaleta* Parshall, nosotros te hablaremos del *sedimentador* primario (*primary sedimentation basin*, en inglés). Este *sedimentador* es una de las tecnologías y la tercera operación física unitaria usada en una PTAR (Fig 28). Ubicamos este *sedimentador* después del tratamiento preliminar y la *canaleta* Parshall, pero antes del tratamiento secundario.

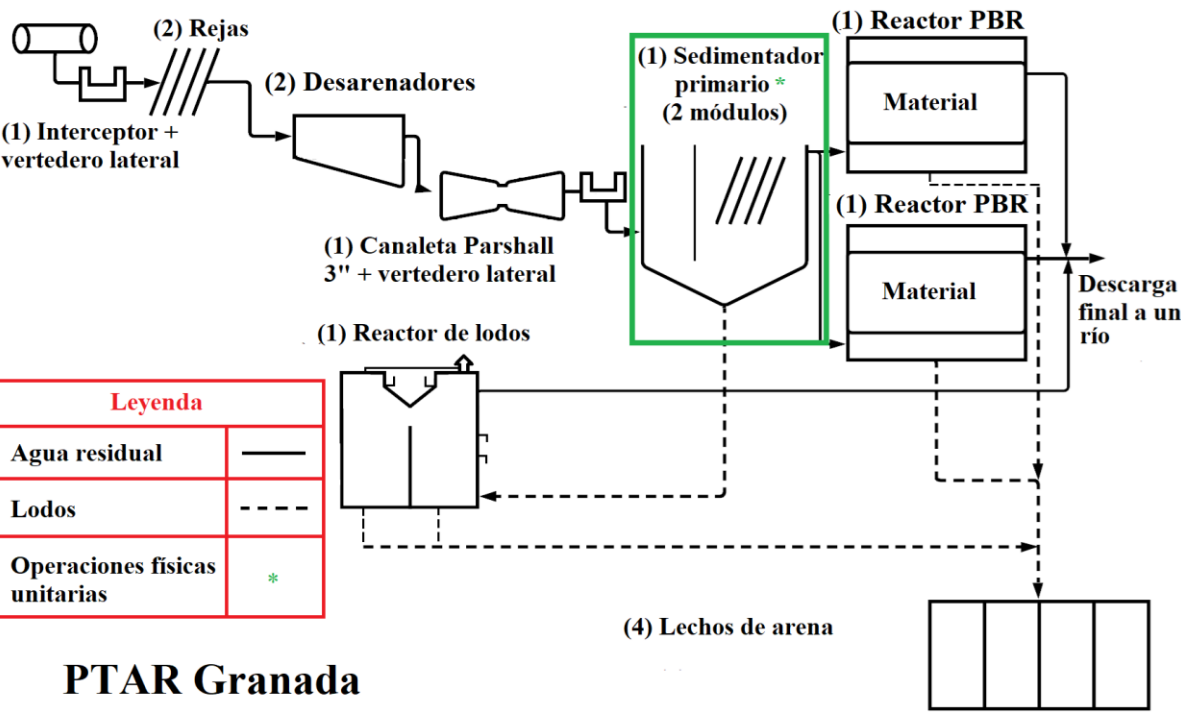


Fig 28. Ubicación del sedimentador primario en una PTAR.

20. DESCRIPCIÓN DEL SEDIMENTADOR PRIMARIO

Ahora que ubicas este *sedimentador*, nosotros te describiremos el objetivo de este *sedimentador* primario. Este objetivo es eliminar sólidos sedimentables orgánicos e inorgánicos (Qasim & Zhu, 2018). Para alcanzar este objetivo usamos tanques grandes y sin turbulencia. Tanque significa *sedimentador*. Y estos *sedimentadores* tienen un tamaño suficiente para almacenar agua y eliminar estos sólidos (Fig 29). La Comisión Nacional del Agua (2010) afirma que estos *sedimentadores* eliminan el 90 % de estos sólidos sedimentables. Metcalf & Eddy (2014) afirman que estos *sedimentares* tienen dos intervalos de eliminación principales. El primero, entre 50 y 70 % para sólidos suspendidos. El segundo, entre 25 y 40 % para materia orgánica.



Fig 29. Sedimentador primario.

Otros autores dicen que estos *sedimentadores* también eliminan una fracción de sólidos suspendidos sedimentables y flotantes. Estos sólidos sedimentables bajarán hasta el fondo de estos *sedimentadores* para extraerlos. El operario extrae estos sólidos de dos maneras. La primera, con válvulas y la gravedad. La segunda, con sistemas de bombeo. De estas dos maneras los reactores de lodos reciben estos sólidos de *sedimentadores* para degradarlos. Luego de esta degradación, nos referimos a estos sólidos como lodos.

Existe una conexión entre el *sedimentador* y el reactor de lodos. Esta conexión es esencial para este *sedimentador* por una razón principal. Esta razón es que este *sedimentador* no es un reactor. Entonces este *sedimentador* requiere del reactor para estabilizar sus sólidos sedimentados.

Estos *sedimentadores* tienen tres partes principales (Fig 30). Estas partes son de ingreso, de sedimentación y de salida. Esta parte de ingreso tiene tuberías para que el agua ascienda igual desde el fondo hasta arriba. Esta parte de sedimentación está en el centro y tiene elementos prefabricados para mejorar la sedimentación. Aunque esta sedimentación ocurre desde el fondo hasta arriba. Esta parte de salida tiene canaletas para evacuar el agua residual. Y estas canaletas tienen deflectores para prevenir que los sólidos flotantes salgan con el agua del *sedimentador*.

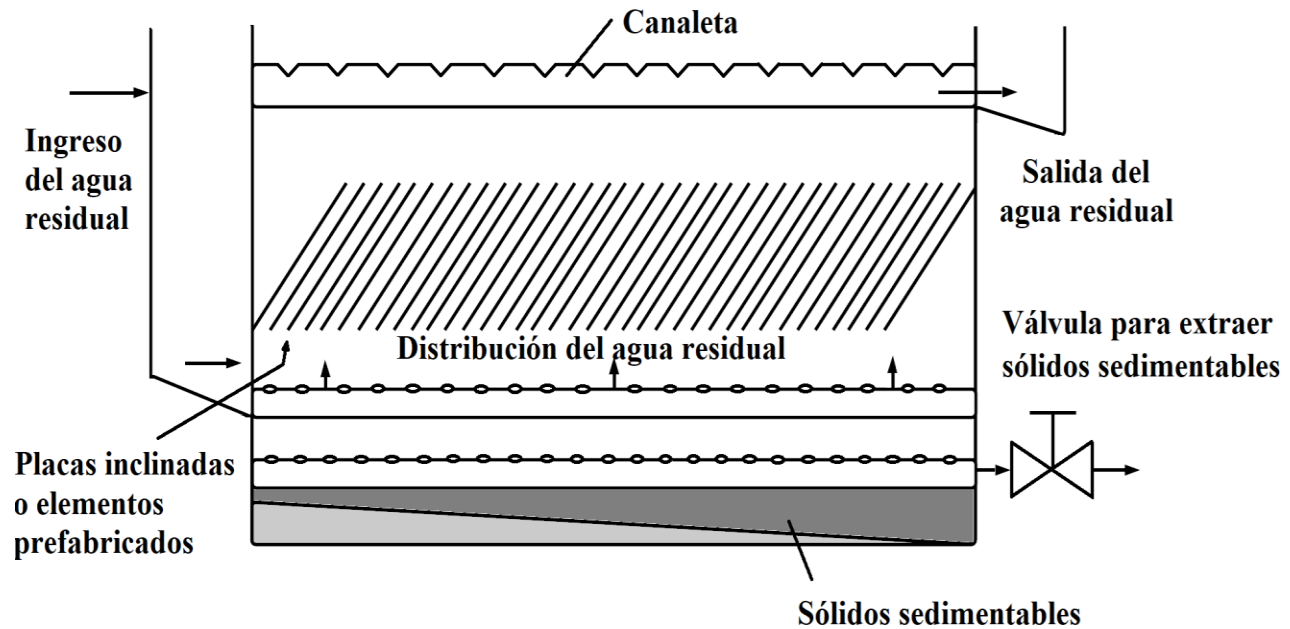


Fig 30. Esquema de un sedimentador primario con placas inclinadas.

Sugerido por Von Sperling & Chernicharo (2005), Metcalf & Eddy (2014) y Qasim & Zhu (2018).

Estos *sedimentadores* tienen dos maneras para eliminar estos sólidos flotantes, grasas y aceites. Estas maneras son mecánica o manual. La eliminación mecánica es avanzada y requiere de energía. La eliminación manual requiere de un operario para extraer estos sólidos, grasas y aceites con un cedazo. Nosotros encontramos que las PTAR en Antioquia usan estos *sedimentadores* que requieren de estos operarios para limpiarlos.

Metcalf & Eddy (2014) clasifican estos *sedimentadores* en *sedimentadores* de flujo horizontal, de contacto, de superficie inclinada, de doble bandeja, de patente. Para elegir estos *sedimentadores* Qasim &

Zhu (2018) comprueban el tamaño del sedimentador. Además Metcalf & Eddy (2014) y Qasim & Zhu (2018) revisan los reglamentos nacionales, la experiencia del diseñador, la operación apropiada, topografía y costo.

Nosotros encontramos que varias PTAR en Antioquia usan *sedimentadores* primarios de flujo horizontal. Estos *sedimentadores* son rectangulares (*rectangular sedimentation basins*, en inglés). Además tienen placas inclinadas o elementos prefabricados para mejorar la sedimentación de sólidos (Fig 31). Estas placas o elementos tienen un intervalo de inclinación entre 30 y 60° (Comisión Nacional del Agua, 2010). Y los operarios limpian los *sedimentadores* fácilmente.

Nosotros no hablaremos de *sedimentadores mejorados* (*enhanced sedimentation basin*, en inglés) porque son tecnologías más avanzadas y usan coagulantes y floculantes. Tampoco hablaremos de los sedimentadores circulares, de doble bandeja ni de patente.



Fig 31. Sedimentador primario y canaletas.

20.1 Tiempo de retención hidráulico

Los *sedimentadores* primarios tienen un intervalo de tiempos de retención hidráulicos. Este intervalo esta entre **1,5** y **2,5** horas (Metcalf & Eddy, 2014; Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2017; Davis, 2020). Aunque la Comisión Nacional del Agua (2010) afirma que estos *sedimentadores* tienen entre **1** y **3** horas. Qasim & Zhu (2018) dicen entre **1,5** y **3,5** horas. Pero un tiempo usual es de **2** horas. Nosotros usamos la siguiente ecuación para estimar estos tiempos de retención. Este tiempo de retención es la relación entre el volumen y el caudal.

$$T_r(h) = \frac{\text{Volumen (m}^3\text{)} \left(\frac{24 \text{ h}}{d}\right)}{\text{caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{d}\right)}$$

20.2 Carga superficial

La carga superficial es una relación entre el caudal y el área superficial del *sedimentador* (Von Sperling & Chernicharo, 2005; Comisión Nacional del Agua, 2010). Metcalf & Eddy (2014) y El Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (2017) afirman que esta carga superficial tiene un intervalo para estos *sedimentadores* en PTAR pequeñas. Este intervalo está entre **30** y **50 m³/m²·d** para caudal medio. Y entre **80 y 120 m³/m²·d** para caudal

pico. Qasim & Zhu (2018) dicen que este intervalo está entre **32 y 48 m³/m²·d** para caudal medio. Y entre **60 y 100 m³/m²·d** para caudal pico.

Metcalf & Eddy (2014) dicen que un tiempo de retención hidráulico menor a **3 horas** y una carga superficial menor significan mayor eficiencia en la eliminación de sólidos. Nosotros usamos la siguiente ecuación para estimar esta carga superficial.

$$CHS = \frac{\frac{m^3}{d}}{m^2} = \frac{\text{caudal} \left(\frac{m^3}{d} \right)}{\text{Área superficial del sedimentador (m}^2\text{)}}$$

20.3 Carga de sólidos

La carga de sólidos es una relación entre los sólidos suspendidos y el área superficial del *sedimentador*. La carga de sólidos nos muestra cuantos kilos de sólidos por metro cuadrado ingresan a este *sedimentador* al día (Von Sperling & Chernicharo, 2005; Comisión Nacional del Agua, 2010). Nosotros usamos la siguiente ecuación para estimar esta carga de sólidos.

$$CS = \frac{\left(\frac{kg}{d} \right)}{m^2} = \frac{\text{Sólidos en el sedimentador} \left(\frac{kg}{d} \right)}{\text{Área superficial del sedimentador (m}^2\text{)}}$$

20.4 Carga hidráulica sobre vertederos

La carga hidráulica sobre vertederos es una relación entre el caudal y la longitud del vertedero del *sedimentador* (Von Sperling & Chernicharo, 2005; Comisión Nacional del Agua, 2010). Von Sperling & Chernicharo (2005) también afirman que esta carga hidráulica tiene un intervalo para estos *sedimentadores* en PTAR pequeñas. Este intervalo está entre **5** y **10 m³/m·h**. Qasim & Zhu (2018) dicen lo siguiente: **10 m³/m·h** para caudales iguales a 44 L/s o menos. Y **15 m³/m·h** para caudales mayores a 44 L/s. Nosotros usamos la siguiente ecuación para estimar esta carga hidráulica sobre estos vertederos.

$$CVS = \frac{\left(\frac{m^3}{d}\right)}{m} = \frac{\text{caudal} \left(\frac{m^3}{d}\right)}{\text{Longitud del vertedero (m)}}$$

20.5 Tubería para extraer sólidos sedimentados

La Comisión Nacional del Agua (2010) dice que estos sedimentadores usan tuberías cortas. Cortas significa menor longitud. Estas tuberías son de **15 cm** de diámetro para extraer estos sólidos sedimentados. Estos sedimentadores con estas tuberías usan una velocidad del agua de **1,2 m/s** para prevenir que estos sólidos obstruyan la tubería. Otros autores se refieren a estas tuberías como múltiples.

20.6 Velocidad del agua en los canales de ingreso

La Comisión Nacional del Agua (2010) dice que estos sedimentadores tienen una velocidad del agua en los canales de ingreso mayor a **0,3 m/s** para un **50 %** del caudal de diseño.

20.7 Velocidad ascensional del agua

La Comisión Nacional del Agua (2010) dice que estos sedimentadores tienen un intervalo de velocidad ascensional del agua residual. Este intervalo esta entre **30 y 60 cm/min** para que varios sólidos sedimenten y otros floten. Para prevenir el ascenso de nuevo de estos sólidos sedimentados usar velocidades menores a **1,5 m/min**.

20.8 Eficiencia de eliminación de sólidos suspendidos

Nosotros usamos la siguiente ecuación para estimar la eficiencia de eliminación de sólidos suspendidos (SS) en el *sedimentador*. Usamos esta ecuación si el caudal de entrada y salida es igual.

$$n(\%) = \frac{\text{SS que ingresan } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) - \text{SS que salen } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)}{\text{SS que ingresan } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)} * 100$$

He aquí varias sugerencias para diseñar *sedimentadores* primarios convencionales (Tabla 15).

Tabla 15. Intervalos para diseñar sedimentadores convencionales rectangulares.

Longitud del sedimentador	Unidades	Intervalo	Apropiado
Altura	m	3–4,9	4,3
Longitud	m	15–90	24–40
Ancho	m	3–24	4,9–9,8
Velocidad ascensional del agua	m/min	0,6–1,2	0,9

Sugerido por Metcalf & Eddy (2014).

He aquí otras sugerencias para diseñar *sedimentadores* convencionales (Tabla 16).

Tabla 16. Intervalos para diseñar sedimentadores.

Longitudes del sedimentador	Unidades	Intervalo	Apropiado
Longitud	m	15–90	30–60
Ancho	m	6–24	6–9
Altura del agua	m	3–5	3,7–4
Relación longitud-ancho		1,5–15:1	4–5:1
Relación longitud-altura		5–25:1	10–18:1
Pendiente del fondo	Porcentaje (%)	6–15	8
Velocidad ascensional del agua	m/min	3–9	

Sugerido por Qasim & Zhu (2018).

He aquí más sugerencias para diseñar *sedimentadores* convencionales (Tabla 17).

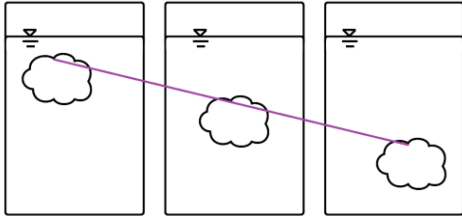
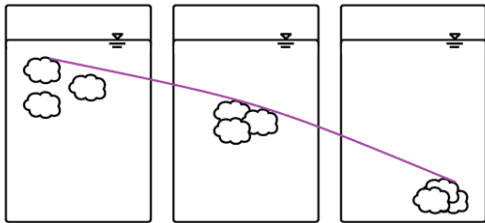
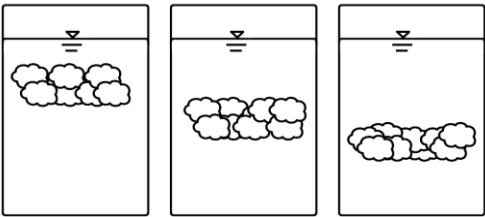
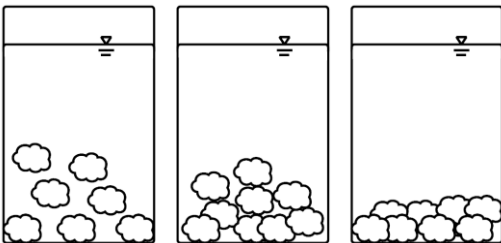
Tabla 17. Intervalos para diseñar sedimentadores.

Longitudes del sedimentador	Unidades	Intervalo	Apropiado/sugerencia
Longitud	m	30–110	30–60
Ancho	m	3–24	6
Altura del agua	m	2–5	4,3
Pendiente del fondo	Porcentaje (%)	1	
Distribución en el canal			
Velocidad del agua	m/s	0,3–0,75	Orificios o compuertas
Tiempo de retención hidráulico			
Caudal promedio	h	1,5–2,5	2,0

Sugerido por Davis (2020)

He aquí una descripción breve de la sedimentación en estos *sedimentadores* (Tabla 18). Qasim & Zhu (2018) y Davis (2020) dicen que en estos *sedimentadores* prevalece una sedimentación floculenta.

Tabla 18. Sedimentación.

Sedimentación	Descripción	Descripción gráfica	Usos
Discreta o sedimentación tipo I	La <i>sedimentación</i> tipo I <u>acontece</u> en suspensiones de concentración baja. Las partículas sedimentan individualmente. Además mantienen su identidad. No hay interferencias significativas en la <i>sedimentación</i> de las partículas. La velocidad es constante durante la <i>sedimentación</i> . Aplican la ecuación de Newton y la de Stokes según el tamaño de las partículas.		<i>Desarenadores</i>
Floculenta o sedimentación tipo II	La <i>sedimentación</i> tipo II <u>acontece</u> en suspensiones diluidas. Las partículas se unen. El tamaño de las partículas aumenta y la velocidad de <i>sedimentación</i> también.		Sedimentadores primarios Parte superior de sedimentadores secundarios
Interferida o sedimentación tipo III	La <i>sedimentación</i> tipo III <u>acontece</u> en suspensiones de concentración intermedia. Los sólidos sedimentan como una masa. Las partículas están en una posición fija con respecto a las demás. La parte superior de la masa de <i>sedimentación</i> desarrolla una interfaz sólido-líquido que deja una parte de agua clara en la parte superior, la cual aumenta gradualmente con la <i>sedimentación</i> . En la parte inferior se acumula un manto de lodos.		Parte de sedimentación del sedimentador secundario Parte superior de espesadores de lodos por gravedad
Compresión o sedimentación tipo IV	La <i>sedimentación</i> tipo IV <u>acontece</u> con alta concentración de sólidos que permanecen apoyados unos sobre otros. La <i>sedimentación</i> solo es posible por compresión ya que los sólidos se añaden en la parte superior. La compresión de los sólidos es lenta.		Parte inferior del sedimentador secundario Parte de sedimentación de espesadores de lodos por gravedad

Sugerido por Qasim & Zhu (2018).

20.9 Sedimentación floculenta o tipo II

En estos *sedimentadores* prevalece una sedimentación floculenta de sólidos. Estos sólidos se unen, aumentan su masa y sedimentan más rápido. Estos sólidos muestran una trayectoria curvilínea mientras sedimentan. Aunque no existen ecuaciones matemáticas para mostrar esta sedimentación con precisión. Porque esta sedimentación es aún difícil de modelar matemáticamente. Entonces usamos variables empíricas.

Usamos ecuaciones como el tiempo de retención hidráulico y la carga hidráulica superficial para diseñar estos *sedimentadores* primarios. Para comprobar estas ecuaciones experimentamos con columnas de sedimentación con ingreso de agua intermitente en el laboratorio o con PTAR existentes (Qasim & Zhu, 2018).

Von Sperling & Chernicharo (2005) afirman que la eficiencia de eliminación de esta sedimentación floculenta aumenta cuando aumenta la profundidad de este *sedimentador* y el tiempo de retención.



Lugar: sedimentador primario de la PTAR Marinilla (2020).

21. DISEÑO DEL SEDIMENTADOR PRIMARIO

Ahora que tienes una descripción breve de estos *sedimentadores*, nosotros te indicaremos como diseñar *sedimentadores* de flujo horizontal. Metcalf & Eddy (2014) y Qasim & Zhu (2018) sugieren usar el caudal medio para diseñar estos *sedimentadores*. Aunque El Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (2017) dice que necesitas el caudal máximo. Nosotros estamos de acuerdo con Metcalf & Eddy (2014) y Qasim & Zhu (2018) porque prevenimos que estos *sedimentadores* sean muy grandes. Nosotros te sugerimos diseñar la parte de ingreso y salida de estos *sedimentadores* con el caudal máximo. Y la estructura del *sedimentador* con el caudal medio.

Entonces, he aquí un ejemplo para diseñar este *sedimentador* para eliminar sólidos sedimentables.

Diseñar un *sedimentador* primario. Este *sedimentador* será rectangular. A este *sedimentador* ingresará un caudal medio de 10 L/s (864 m³/d). Para diseñar este *sedimentador* usa un coeficiente de Harmon (M) de 2,17. Este coeficiente es de mayoración. Usa también una carga superficial (H_a) de 45 m³/m² ·d, un tirante hidráulico (h) de 4,00 m y un borde libre de 0,50 m. Considera que el largo es 5 veces el ancho.

Caudal máximo ($Q_{\text{máx}}$)

$$Q_{\text{máx}} = MQ_m$$

Donde: $Q_{\text{máx}}$ =caudal máximo instantáneo (m^3/s) M = coeficiente de Harmon Q_m = caudal medio (m^3/s)

$$Q_{\text{máx}} = 2,17 * \left(10 \frac{\text{L}}{\text{s}}\right) = 21,7 \frac{\text{L}}{\text{s}} = 0,022 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Área superficial (m^2)

$$A_s = \frac{Q_m}{H_a}$$

Dónde: A_s = área superficial (m^2) Q_m = caudal medio (m^3/s) H_a = carga superficial ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$)

$$A_s = \frac{864 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{45 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}} = 19,2 \text{ m}^2$$

Ancho del tanque sedimentador (m)

$$L = 5W$$

$$A_s = LW$$

$$A_s = (5W)W = 5W^2$$

$$W = \sqrt{\frac{A_s}{5}}$$

Donde:

A_s = área superficial (m^2)

s = relación largo ancho =5

L = Largo del tanque sedimentador (m)

W = ancho del tanque sedimentador (m)

$$W = \sqrt{\frac{19,2 \text{ m}^2}{5}}$$

$$W = 2,0 \text{ (m)}$$

Largo del tanque sedimentador (m)

$$L = 5 * W$$

Donde:

L = longitud del tanque del sedimentador (m)

W = ancho del tanque del sedimentador (m)

$$L = 5 * (2,0 \text{ m}) = 10 \text{ (m)}$$

Volumen del sedimentador (m^3)

$$V = A_s h$$

Donde:

V = volumen (m^3)

A_s = área superficial (m^2)

h = tirante hidráulico (m)

$$V = 19,2 \text{ m}^2 * (4,00 \text{ m}) = 77 \text{ m}^3$$

Tiempo de retención hidráulico (s)

$$T_{RH} = \frac{V}{Q_m}$$

Donde:

T_{RH} = tiempo de retención hidráulico (s)

V = volumen (m^3)

Q_m = caudal medio (m^3/s)

$$T_{RH} = \frac{77 \text{ m}^3}{0,01 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 7.700 \text{ s} = 2,14 \text{ h}$$

Tubería para ingresar el agua residual (afluente)

Sugerimos leer el siguiente artículo para entender mejor las ideas sobre el ingreso del agua al sedimentador: A. L. Macías, D. C. Rodríguez, F. J. Molina, «Design of Influent Distribution System in Domestic Wastewater Treatment Units» TecnoLógicas, vol.25, nro.55, e2428, 2022. <https://doi.org/10.22430/22565337.2428>

Velocidad de arrastre (m/s) con la expresión de Camp-Shields

La velocidad de arrastre es la velocidad a partir de la cual las partículas del fondo del sedimentador se re-suspenden. Entonces la velocidad horizontal del agua será menor que la velocidad de arrastre para prevenir que las partículas sedimentadas se re-suspendan.

$$V_s = \left[8 \left(\frac{k (s - 1,0) g d}{f} \right) \right]^{0,5}$$

Donde:

V_s = velocidad de arrastre de las partículas (m/s)

k = constante en material unigranular 0,04

s = densidad relativa de las partículas, 1,3

g = gravedad, 9,81 (m/s²)

d = diámetro de las partículas (m), 0,0002 (m)

f = factor de fricción de Darcy-Weisbach, 0,02

$$V_s = \left[8 \left(\frac{0,04 (1,3 - 1,0) * \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) * (2 * 10^{-4} \text{ m})}{0,02} \right) \right]^{0,5}$$

$$= 0,097 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad horizontal a flujo máximo (m/s)

$$V_L = \frac{Q_{\text{máx}}}{A_t n}$$

Donde:

V_L = velocidad horizontal a flujo máximo (m/s)

$Q_{\text{máx}}$ = caudal máximo instantáneo (m^3/s)

A_t = área de la sección transversal (m^2)

n = número de tanques

$$A_t = h * W$$

Dónde:

A_t = área de la sección transversal (m^2)

h = tirante hidráulico (m)

W = ancho del tanque (m)

$$A_t = (4 \text{ m}) * (2 \text{ m}) = 8 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$V_L = \frac{1.901 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{(8 \text{ m}^2) * (1)} = 237 \frac{\text{m}}{\text{d}} = 0,002 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Note que la velocidad de arrastre para el tipo de partícula es mayor que la velocidad horizontal con caudal máximo, entonces el diseño del sedimentador rectangular es apropiado.



Lugar: Canal de rebose del sedimentador primario de la PTAR Granada (2021).

22. OPERACIÓN DEL SEDIMENTADOR PRIMARIO

Ahora que tienes un diseño del *sedimentador* de flujo horizontal, nosotros te indicaremos la operación de este *sedimentador*. Esta operación tiene cuatro significados para estos operarios. El primero, extraer del *sedimentador* los sólidos flotantes, grasas y aceites **todos los días** en verano y según la necesidad en invierno (Fig 32). El segundo, extraer del *sedimentador* los sólidos sedimentados. Para extraer estos sólidos los operarios usarán válvulas o sistemas de bombeo cada **tres horas**. El tercero, medir variables fisicoquímicas en el *sedimentador* **diariamente**. Estas variables son pH y temperatura. El cuarto, estimar sólidos sedimentables **diariamente**.



Fig 32. Operario limpiando el sedimentador.

22.1 Extraer sólidos flotantes

Estos operarios limpiarán este *sedimentador* y extraerán estos sólidos gruesos, flotantes, grasas y aceites para disposición final. Porque estos *sedimentadores* tienen todavía sólidos gruesos que las rejillas no eliminan. Para limpiar este *sedimentador* estos operarios usarán varios utensilios. Estos utensilios son cedazos, baldes, balanza, lentes de protección, overoles, botas y guantes. He aquí un ejemplo para limpiar este *sedimentador*.

- Ubicarse en las plataformas del *sedimentador*.
- Extraer de este *sedimentador* todos estos sólidos flotantes, grasas y aceites con un cedazo (Fig 33).
- Limpiar la lama adherida a la pared y a las canaletas de este *sedimentador* con un cepillo.
- Pesar estos sólidos flotantes, grasas y aceites extraídos en una balanza.
- Cuantificar estos sólidos extraídos (42.8).
- Guardar estos sólidos en un recipiente para disposición final.



Fig 33. Sólidos flotantes extraídos del sedimentador.

Astrid Lorena Ospina Macías autoriza el uso de estas fotos.

22.2 Extraer sólidos sedimentados

He aquí un ejemplo para extraer estos sólidos sedimentados del *sedimentador* (42.10).

- Abrir las válvulas de este *sedimentador* para extraer estos sólidos sedimentados (Fig 34). Estas válvulas son de apertura y cierre rápido para extraer los sólidos.
- Iniciar estos sistemas de bombeo de este *sedimentador* de manera intermitente para bombear los sólidos sedimentados al reactor de lodos.
- Ver que estos sólidos sedimentados ingresen al reactor de lodos (Fig 35).



Fig 34. Sólidos sedimentados extraídos del sedimentador.



Fig 35. Sistema de bombeo e ingreso de sólidos al reactor de lodos.

22.3 Medir pH y temperatura

He aquí un ejemplo para medir variables fisicoquímicas en este *sedimentador*.

- Coger una muestra de agua del canal de rebose de este *sedimentador* (Fig 36).
- En esta muestra cogida, introducir el electrodo de pH y el sensor de temperatura para medir pH y temperatura (42.5).



Fig 36. pH y temperatura.

Astrid Lorena Ospina Macías autoriza el uso de estas fotos.

22.4 Estimar sólidos sedimentables

He aquí un ejemplo para estimar los sólidos sedimentables en conos Imhoff.

- Coger una muestra de un litro de agua del canal de rebose de este *sedimentador* ([Fig 37](#)).
- Agitar esta muestra y adicionar al cono Imhoff.
- Esperar 45 minutos para que los sólidos sedimenten.
- Cuantificar el volumen de sólidos sedimentables en el fondo del cono en mL/L ([42.11](#)).
- Finalizados los 45 minutos, agitar suavemente la muestra cerca a los lados del cono con una varilla.
- Esperar 15 minutos de nuevo para que más sólidos sedimenten.
- Finalizados los 15 minutos, cuantificar el volumen de sólidos sedimentables en el fondo del cono en mL/L ([42.11](#)). Esta sería la cuantificación final.

Sugerido por American Public Health Association et al. ([2017](#)).



Fig 37. Sólidos sedimentables.

22.5 Variables fisicoquímicas

He aquí un resumen de los intervalos de varias variables fisicoquímicas para monitorear estos *sedimentadores* (Tabla 19).

Tabla 19. Variables fisicoquímicas en sedimentadores.

Sugerencia en	Unidades	Intervalo	Sugerido por
Temperatura	°C	10–21	(Qasim & Zhu, 2018)
Sólidos sedimentables	mL/L	5–20	
pH	Unidades de pH	6,7–8,0	(Von Sperling & Chernicharo, 2005)
Sólidos totales	mg/L	700–1.350	
Sólidos suspendidos	mg/L	200–450	
Sólidos suspendidos fijos	mg/L	40–100	
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	165–350	
Sólidos disueltos	mg/L	500–900	
Sólidos disueltos fijos	mg/L	300–550	
Sólidos disueltos totales	mg/L	200–350	
DQO	mg/L	450–800	
DBO	mg/L	250–400	
Alcalinidad (CaCO ₃)	mg/L	100–250	
(Aguas residuales) Grasas y aceites	mg/L	50–100	(Comisión Nacional del Agua, 2010)
(Aguas comerciales e industriales) Grasas y aceites	mg/L	>150	
(Aguas residuales) Grasas y aceites	mg/L	50–150	(Qasim & Zhu, 2018)



Lugar: Sedimentador de la PTAR Marinilla (2020).

Página en blanco

6

Reactores UASB

Objetivos principales

- Ubicar el *reactor UASB*.
- Describir el *Reactor UASB*.
- Describir el tratamiento anaerobio.
- Describir la digestión anaerobia.
- Diseñar el *reactor UASB*.
- Operar del *reactor UASB*.



Lugar: PTAR Sonsón (2018).

23. UBICACIÓN DEL REACTOR UASB

Ahora que sabes la manera como operar este *sedimentador* primario, nosotros te hablaremos del *reactor anaerobio UASB* (*upflow anaerobic sludge blanket*, en inglés). Este *reactor UASB* es el primer proceso biológico unitario usado en una *PTAR* (Fig 38). En el *reactor* ocurren la sedimentación de sólidos sedimentables y suspendidos, la transformación parcial de la materia orgánica y la producción biogás. Ubicamos este *reactor UASB* después del tratamiento preliminar y la *canaleta* Parshall, pero antes del tratamiento secundario. El *reactor UASB* y el *sedimentador* primario son tratamientos primarios.

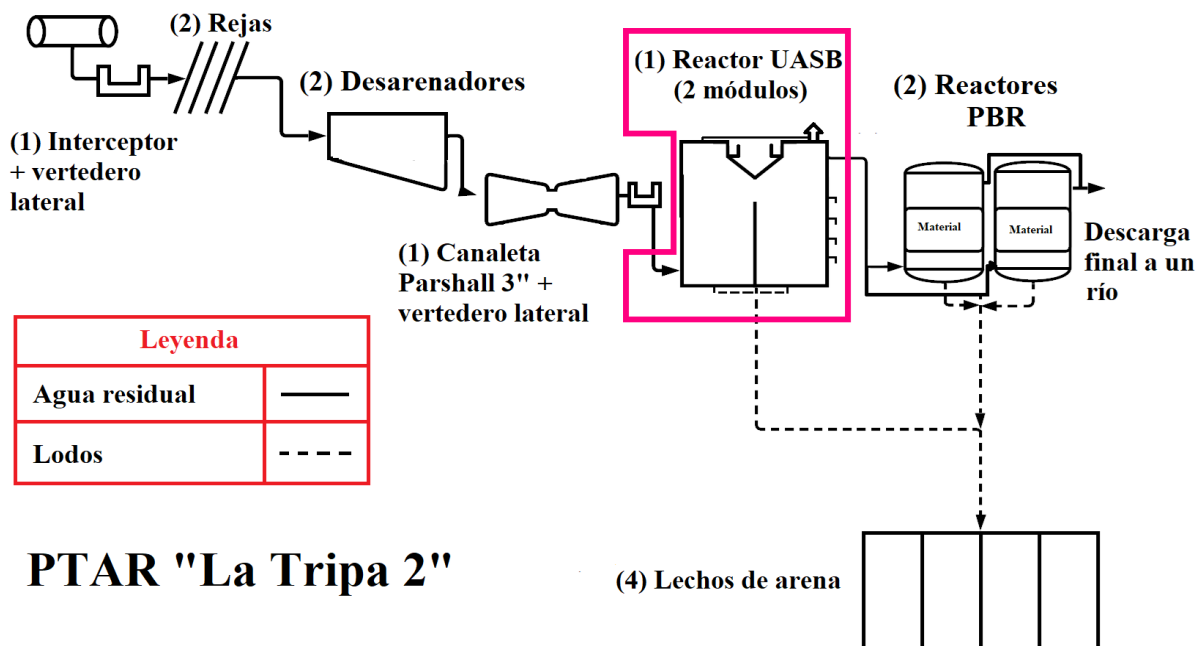


Fig 38. Ubicación del reactor UASB en una PTAR.

24. DESCRIPCIÓN DEL REACTOR UASB

Ahora que ubicas este *reactor anaerobio UASB*, nosotros te describiremos dos objetivos de este *reactor*. El primero, eliminar sólidos orgánicos, sólidos suspendidos y materia orgánica sin oxígeno que las tecnologías preliminares no eliminan. El segundo, transformar esta materia orgánica suspendida y disuelta de manera anaerobia. Para alcanzar estos objetivos usamos *reactores* grandes y sin turbulencia ([Fig 39](#)). Además necesitamos que estos *reactores* tengan tiempos de retención mayores a los de los sedimentadores primarios para eliminar materia orgánica. Von Sperling & Chernicharo ([2005](#)) afirman que estos *reactores* tienen eficiencias entre 65 y 75 % para eliminar materia orgánica.



Fig 39. Reactor UASB.

Estos *reactores UASB* tiene tres partes principales ([Fig 40](#)). La primera, biomasa desde el fondo hasta la mitad de este *reactor*. Esta biomasa es la parte más importante de este *reactor UASB*. Esta biomasa transforma materia orgánica compleja en simple mientras el agua residual sube por todo el *reactor*. La segunda, un sedimentador arriba de la biomasa. En este sedimentador sedimentan sólidos y bajan a la biomasa. El agua residual sale por la parte superior de este sedimentador. La tercera, una estructura en forma de campana para retener biogás en la parte más alta de este *reactor*. Este biogás es un subproducto del *reactor UASB*. Este biogás el operario lo quema con ayuda de un mechero.

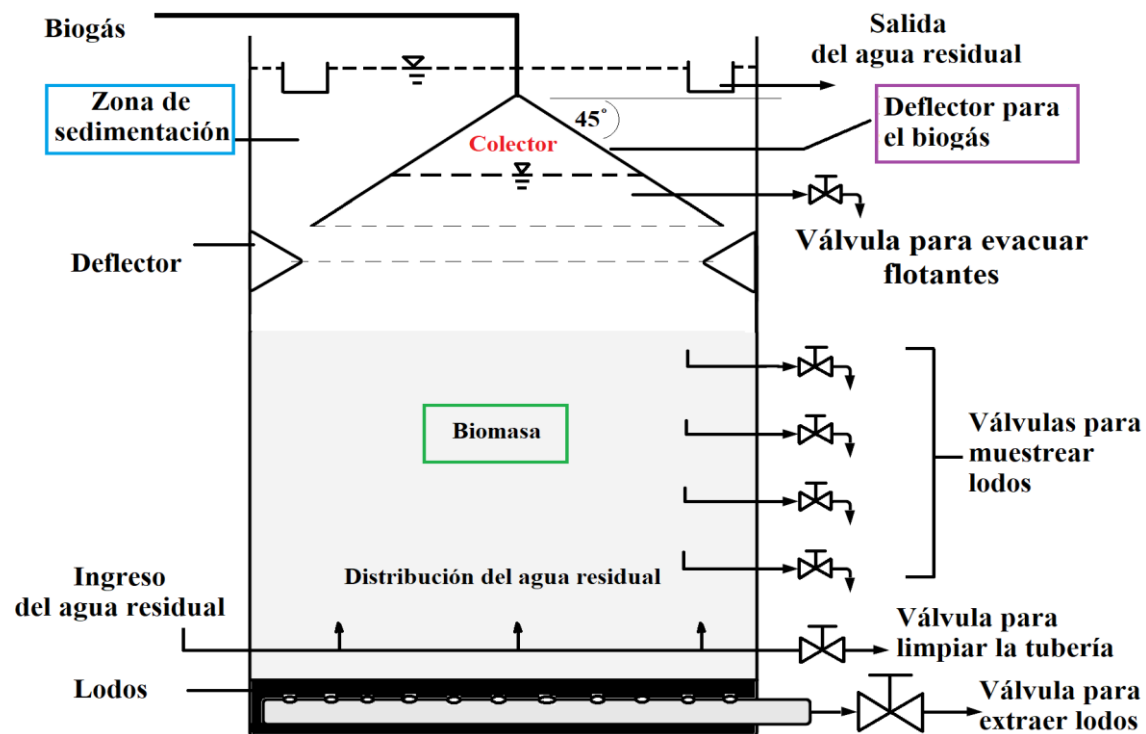


Fig 40. Esquema de un reactor UASB.

Sugerido por Von Sperling & Chernicharo ([2005](#)), Metcalf & Eddy ([2014](#)) y Qasim & Zhu ([2018](#)).

Qasim & Zhu (2018) describen que el agua residual asciende desde el fondo hasta arriba del *reactor UASB* a través de varios sólidos. Estos sólidos son sedimentables y suspendidos para crear la biomasa. Aunque varios autores se refieren a la biomasa como manto de lodos. Y esta biomasa también tiene flóculos biológicos. Estos flóculos tienen entre 1 y 3 mm de tamaño y son de color café oscuro. Es evidente que esta biomasa y estos flóculos son esenciales para este *reactor UASB*. Entonces el agua pasa a través de esta biomasa y allí varios sólidos orgánicos se degradan en biogás.

El biogás tiene CH_4 , CO_2 , N_2 , H_2 y H_2S . Este biogás circula en el interior del *reactor UASB*. Y tiene una velocidad ascendente que mantiene a estos flóculos en suspensión. Estos gránulos unidos al biogás ascienden y chocan con deflectores para este biogás. Cuando chocan estos gránulos caen de nuevo a esta biomasa. Este biogás va a una cámara. Estos deflectores previenen que el biogás salga del *reactor UASB*.

Nosotros encontramos que varias PTAR en Antioquia usan estos *reactores UASB*. Estos *reactores* son rectangulares y en concreto. Estos *reactores* tienen alturas menores a 5 m y volúmenes menores a 1.000 m^3 . Estos *reactores* también tienen tuberías para ingresar el agua, válvulas para muestrear esta biomasa y lodos (Fig 41) y canaletas para evacuar el agua residual. Estas canaletas tienen deflectores para prevenir que los sólidos flotantes salgan con el agua del *reactor UASB*.



Fig 41. Válvulas de muestreo del reactor UASB.

Aunque encontramos que estos *reactores* tienen 8 errores usuales. El primero, altura mayor a 6 m. Von Sperling & Chernicharo (2005) sugieren alturas entre 3 y 6 m porque existe una relación entre la velocidad ascensional, el tiempo de retención y la altura del reactor. Sugerimos alturas entre 4 y 5 para tiempos de retención entre 8 y 10 horas. Así prevenimos las alturas excesivas y disminuimos los costos de construcción. El segundo, tuberías de diámetro de 4 pulgadas que son muy pequeñas para ingresar el agua al interior de estos *reactores*. Sugerimos tuberías de 6 a 8 pulgadas. El tercero, orden inapropiado de estas tuberías

para ingresar el agua por toda la longitud del reactor. El cuarto, conexión inapropiada de estas tuberías a la salida del reactor lo que aumentará las fugas de agua residual. El quinto, tuberías para evacuar el efluente a diferentes alturas y en PVC en la parte de sedimentación. El clima deteriorará estas tuberías con facilidad. Entonces sugerimos canaletas en fibra de vidrio. El sexto, falta de barandillas para proteger los operarios. El séptimo, válvulas inapropiadas para extraer lodos y falta de válvulas de compuerta para extraer estos lodos. El octavo, fugas en la tubería de biogás. Para prevenir estos errores más adelante sugerimos un diseño de este *reactor UASB*.

Aunque estas PTAR en Antioquia usan estos *reactores UASB* por tres razones. La primera, eliminan sólidos orgánicos y transforman materia orgánica compleja en simple. La segunda, producen menos lodos que los sedimentadores primarios. La tercera, requieren menos área para los lechos de arena (Von Sperling & Chernicharo, [2005](#)). Más adelante te reportaremos la producción de lodos de estos reactores UASB y sedimentadores primarios.



Lugar: reactor UASB de la PTAR Abejorral (2019).

25. DESCRIPCIÓN DEL TRATAMIENTO ANAEROBIO

Ahora que tienes una descripción breve del *reactor UASB*, te hablaremos de varias tecnologías anaerobias. Las primeras tecnologías anaeróbicas fueron diseñadas entre 1800s y 1900s. Estas tecnologías transformaban la materia orgánica del agua residual. Aunque las aguas residuales no eran saludables para varias comunidades. Estas aguas tenían desechos sanitarios no tratados, estiércol animal y varias descargas de aguas residuales industriales (Metcalf & Eddy, [2014](#)).

El tratamiento anaerobio es uno de los métodos más antiguos para degradar las aguas residuales municipales. Lagunas anaerobias, pozos, tanques sépticos, tanques Imhoff y digestión de sólidos primarios son ejemplos de este tratamiento anaerobio. En las últimas décadas, el uso de estas tecnologías anaerobias aumentó significativamente. Una de estas tecnologías más usadas son los *reactores UASB* (Qasim & Zhu, [2018](#)). Estos *reactores UASB* pertenecen a las tecnologías de alta tasa. Estos reactores mejoran la reacción anaerobia con tiempos de retención hidráulicos bajos.

Noyola et al ([2012](#)) afirman que varias PTAR en Latinoamérica usan estos *reactores UASB* para eliminar sólidos y transformar materia orgánica. Estas PTAR están en Brasil, México, Colombia, Chile, Guatemala,

República Dominicana y Costa Rica. Las PTAR en Asia también usan estos *reactores*. Estas PTAR están en India (Lema & Suárez, 2017; Mainardis et al., 2020). Es evidente que estos *reactores UASB* son la tercera tecnología más usada en Latinoamérica.

Varias PTAR en Brasil también usan estos *reactores UASB*. Chernicharo et al (2015) y Chernicharo et al. (2018) notan que estas PTAR tienen más de 650 *reactores UASB*. Estas PTAR no sólo usan estos *reactores* sino que también tienen ingenieros para mejorar su diseño, instalación y operación. Aunque estas PTAR en Brasil también usan lagunas anaerobias y lodos activados.

Chernicharo et al (2018) afirman que varios ingenieros eligen estos *reactores UASB* por menor costo de capital y operacional. Aunque este costo lo comparan con sistemas aerobios. Esta comparación muestra un menor consumo energético y aprovechamiento de biogás para producir de energía.



Lugar: canaleta del reactor UASB de la PTAR Sonsón (2018).

26. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Ahora que tienes una descripción breve del tratamiento anaerobio, te describiremos la digestión anaerobia. Von Sperling & Chernicharo (2005) afirman que esta digestión acontece en un ecosistema donde varios grupos de microbios interactúan para transformar materia orgánica en productos finales. Estos productos son el metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, agua, amonio, y nuevas células de microbios.

Esta digestión anaerobia tiene tres fases primarias. La primera, hidrólisis. La segunda, acidogénesis y acetogénesis. La tercera, metanogénesis (Fig 42). Esta digestión también tiene varias fases secundarias. Estas fases son las reducciones de nitratos y sulfatos, con amonio o nitrógeno gaseoso, sulfuro de hidrógeno y sus subproductos (Von Sperling & Chernicharo, 2005; Henze et al., 2008; Metcalf & Eddy, 2014; Corrales et al., 2015; Qasim & Zhu, 2018; Akunna, 2019; Liu et al., 2019).

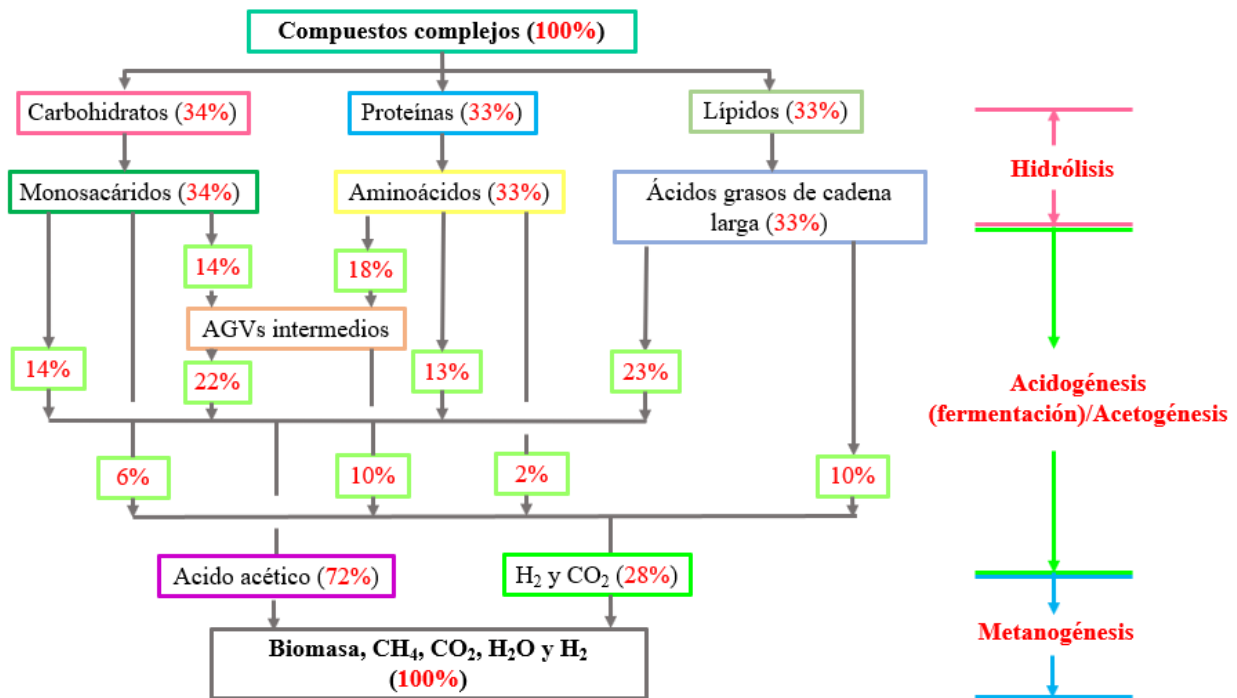


Fig 42. Esquema simplificado de la digestión anaerobia.

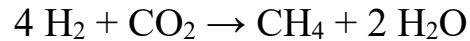
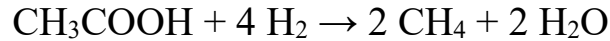
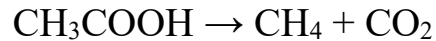
Sugerido por Qasim & Zhu (2018).

Aquí describimos estas tres fases primarias. La primera, la hidrólisis es la solubilización de compuestos complejos orgánicos solubles e insolubles en moléculas simples. Los compuestos son carbohidratos, proteínas y lípidos. Las moléculas son monosacáridos, aminoácidos y largas cadenas de ácidos grasos. Pero estas moléculas antes de la hidrólisis son polisacáridos, luego de la hidrólisis son monosacáridos. La hidrólisis acontece por la acción de exoenzimas excretadas por las bacterias fermentativas hidrolíticas. Estos compuestos son llevados dentro de la célula para metabolizarlos (Von Sperling & Chernicharo, 2005; Qasim & Zhu, 2018).

La segunda, la acidogénesis y acetogénesis. Las bacterias acetogénicas son responsables de la oxidación de los productos generados en la fase de acidogénesis. Estos productos son un grupo metabólico intermedio. Estos productos incluyen compuestos orgánicos volátiles y compuestos de bajo peso molecular. Estos compuestos son CO_2 y H_2 . Uno de estos productos intermedios primario es el ácido acético (CH_3COOH) al final de la fase. Los grupos de microbios responsables de la acidogénesis son facultativos. Estos microbios interactúan con los microbios acetogénicos o formadores de ácidos.

Aunque existe un cambio en el contenido orgánico. El 50 % de la materia orgánica biodegradable (DQO) es convertida a ácido propiónico y butírico. Estos ácidos son convertidos en ácido acético por bacterias acetogénicas. En esta fase baja el pH (Von Sperling & Chernicharo, [2005](#); Qasim & Zhu, [2018](#)).

La tercera, la metanogénesis es la fase final. En esta fase, los microbios convierten el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono en metano. Este grupo de microbios son anaerobios estrictos y metanógenicos. Esta conversión es compleja y produce una cadena de varias reacciones que disminuyen la velocidad. He aquí estas reacciones para convertir este CO_2 y H_2 a CH_4 (Von Sperling & Chernicharo, [2005](#); Qasim & Zhu, [2018](#); Daverey et al., [2019](#)).



Aunque varias variables fisicoquímicas tienen una conexión con esta digestión anaerobia. Estas variables son la temperatura, el pH, nutrientes, sólidos totales y volátiles, ácidos grasos volátiles, sulfuros, nitrógeno amoniacal, fosfatos totales, metales, sólidos flotantes y espumas (Comisión Nacional del Agua, 2015). Y esta conexión aumenta o disminuye la eficiencia de eliminación del *reactor UASB*.

Ahora que tienes una descripción breve de la digestión anaerobia, nosotros te hablaremos de nuevo de estos *reactores UASB*. He aquí varias sugerencias para diseñar estos *reactores*.

26.1 Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención hidráulico es el tiempo que el agua está dentro del reactor. Von Sperling & Chernicharo (2005) afirman que estos *reactores UASB* tienen un intervalo de tiempos de retención. Este intervalo esta entre **8 y 10 horas** para caudal promedio. He aquí la ecuación que usamos para estimar este tiempo.

$$T_r(h) = \frac{\text{Volumen (m}^3\text{)} \left(\frac{24 \text{ h}}{d}\right)}{\text{caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{d}\right)}$$

26.2 Carga orgánica volumétrica

La carga orgánica volumétrica es el producto del caudal por la concentración de materia orgánica dividido por el volumen útil de este reactor *UASB*. Von Sperling & Chernicharo (2005) afirman que estos reactores *UASB* tienen un intervalo de carga hidráulica volumétrica. Este intervalo está entre **2,5** y **3,5 kg DQO/m³·d** para aguas residuales domésticas. He aquí la ecuación que usamos para estimar esta carga orgánica.

$$\text{COV} \left(\frac{\text{kgDQO}}{\text{m}^3 \cdot d} \right) = \frac{\text{caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{d} \right) * \text{concentración de materia} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{\text{Volumen (m}^3\text{)}}$$

26.3 Velocidad ascensional

La velocidad ascensional es la relación entre el caudal y el área del reactor *UASB*. Von Sperling & Chernicharo (2005) afirman que estos reactores *UASB* tienen dos intervalos de velocidad ascensional. El primero, es menor a **1 m/h** para lodo floculento. El segundo, alcanza hasta **10 m/h** para

lodo granular. He aquí la ecuación que usamos para estimar esta velocidad ascensional.

$$\text{velocidad ascensional (v)} \left(\frac{\text{m}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right)}{\text{Área superficial del reactor (m}^2\text{)}}$$

26.4 Altura

Von Sperling & Chernicharo (2005) afirman que estos *reactores UASB* tienen alturas entre **3** y **6 m**. Nosotros sugerimos entre **4** y **5** m de altura para estos reactores.

26.5 Eficiencia de eliminación de materia orgánica

Von Sperling & Chernicharo (2005) sugieren dos ecuaciones para estimar esta eficiencia de eliminación de estos *reactores UASB*. La primera, para la DQO. La segunda, para la DBO. La DQO y la DBO son indicadores que usamos para saber la concentración de materia orgánica.

Para la DQO:

$$\text{Eficiencia (DQO)(\%)} = 100 * (1 - 0,68 * t^{-0,35})$$

Donde:

Eficiencia= porcentaje (%)

t= tiempo de retención hidráulico (h)

0,68= coeficiente empírico.

0,35= coeficiente empírico.

Para la DBO:

$$\text{Eficiencia (DBO)}(\%) = 100 * (1 - 0,70 * t^{-0,50})$$

Donde:

Eficiencia= porcentaje (%)

t= tiempo de retención hidráulico (h)

0,70= constante empírica.

0,50= constante empírica.

26.6 Eficiencia de eliminación de materia orgánica

Nosotros usamos la siguiente ecuación para estimar la eficiencia de eliminación del *reactor* cuando es la última tecnología de la PTAR. Usamos esta ecuación si el caudal de entrada y salida es igual.

$$n(\%) = \frac{\text{DBO que ingresan } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) - \text{DBO que salen } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)}{\text{DBO que ingresan } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)} * 100$$

26.7 Tubería para ingresar el agua

Von Sperling & Chernicharo (2005) y La Comisión Nacional del Agua et al. (2015) dicen que la tubería en el fondo de este *reactor UASB* ingresa

igual el agua (Fig 43). Esta tubería está entre 10 y 20 cm del fondo. Y tiene varios tubos para cubrir un área superficial entre 1 y 2 m² de este reactor. El diámetro de estos tubos tiene un intervalo entre 75 y 100 mm para prevenir la obstrucción por sólidos. Estos tubos también tienen un intervalo de orificios entre 40 y 50 mm para facilitar que el agua alcance las velocidades apropiadas. Aunque varios autores sugieren orificios de 25 mm.



Fig 43. Tubería para ingresar el agua.

26.8 Materiales para construir el reactor

Von Sperling & Chernicharo (2005) y La Comisión Nacional del Agua et al. (2015) sugieren materiales resistentes a la corrosión para construir estos reactores UASB. Estos materiales son el hormigón, el acero y productos químicos para prevenir fugas. Aunque existen otros materiales resistentes a la corrosión como la fibra de vidrio, el acero inoxidable y el PVC para

estos *reactores UASB*. Nosotros sugerimos varias válvulas **de acero inoxidable** para muestrear y extraer los lodos. Para muestrear usar **válvulas de mariposa**. Para extraer usar **válvulas de compuerta** (Fig 44).



Fig 44. Válvulas de acero inoxidable.

He aquí más sugerencias para diseñar estos *reactores UASB* (Tabla 20).

Tabla 20. Intervalos para diseñar reactores UASB.

Reactor UASB	Unidades	Intervalo
Carga orgánica volumétrica	kg DQO ($\text{m}^3 \cdot \text{d}$)	5–20
Eficiencia de eliminación de DQO	Porcentaje (%)	80–95
Tiempo de retención de sólidos	d	>30
Tiempo de retención del agua	h	4–16
Contenido de lodo en la biomasa	kg SSV/ m^3	35–40
Velocidad ascensional		
Caudal promedio	$\text{m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{d}$	0,5–1,5
Caudal máximo	$\text{m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{d}$	2–6
Longitudes		
Altura del reactor	m	3–7
Altura de la cámara para biogás	m	2–3
Área de la cámara para biogás	Porcentaje (%) del área del reactor	80–85
Pendiente de la cámara para biogás	Grados con la horizontal (°)	45–60

Sugerido por Qasim & Zhu (2018).

He aquí sugerencias para diseñar estos *reactores UASB* (Tabla 21).

Tabla 21. Intervalos para diseñar reactores UASB.

Reactor UASB	Unidades	Intervalo
Carga orgánica volumétrica	kg DQO ($\text{m}^3 \cdot \text{d}$)	5–20
Tiempo de retención de sólidos	d	>30
Tiempo de retención del agua	h	4–8
Contenido de lodo en la biomasa	kg SSV/ m^3	35–40
Velocidad ascensional		
Caudal promedio	$\text{m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{d}$	0,8–1,0
Longitudes		
Altura del reactor	m	5–7
Altura de la cámara para biogás	m	1,5–2,0
Área de la cámara para biogás	Porcentaje (%) del área del reactor	15–20
Pendiente de la cámara para biogás	Grados con la horizontal (°)	45–60

Sugerido por Metcalf & Eddy (2014).

He aquí sugerencias para estimar el área de ingreso del agua a estos *reactores UASB* (Tabla 22).

Tabla 22. Área de ingreso del agua al reactor UASB.

Lodo	Carga orgánica (kg DQO/m ³ ·d)	Área de ingreso del agua por cada tubería (m ²)
Lodo denso y floculento (concentración > 40 kg SST/m ³)	<1,0	0,5–1,0
	1,0–2,0	1,0–2,0
	>2,0	2,0–3,0
Lodo medio floculento (concentración 20 a 40 kg SST/m ³)	<1,0–2,0	1,0–2,0
	>3,0	2,0–5,0
Lodo granular	<2,0	0,5–1,0
	2,0–4,0	0,5–2,0
	>4,0	>2,0

Sugerido por Von Sperling & Chernicharo (2005) y Comisión Nacional del Agua et al. (2015).

He aquí un resumen con sugerencias para diseñar estos *reactores UASB* (Tabla 23).

Tabla 23. Intervalos para diseñar reactores UASB.

Sugerencias en	Unidades	Intervalo	
		Q _{promedio}	Q _{máximo}
Carga hidráulica volumétrica	m ³ /m ³ ·d	<4,0	<6,0
Tiempo de retención hidráulico*	h	6,0–9,0	4,0–6,0
Velocidad ascendente del agua	m/h	0,5–0,7	<0,9–1,1
Velocidad del agua en la abertura para el sedimentador	m/h	<2,0–2,3	<4,0–4,2
Carga superficial del sedimentador	m/h	0,6–0,8	<1,2
Tiempo de retención hidráulico del agua en el sedimentador	h	1,5–2,0	>1,0
Sugerencia: * Temperatura del agua residual entre 20 y 26 °C.			

Sugerido por Von Sperling & Chernicharo (2005) y Comisión Nacional del Agua et al. (2015).

He aquí otro resumen con sugerencias para diseñar estos *reactores UASB* (Tabla 24).

Tabla 24. Intervalos para diseñar reactores UASB.

Sugerencia en		Unidades	Intervalos
Altura	Reactor	m	3,0–6,0
	Sedimentador	m	1,5–2,0
	Compartimento para la biomasa	m	2,5–3,5
Eliminación de DQO	Agua residual diluida	(%)	60–70
	Agua residual concentrada	(%)	80–90
Tubería para ingresar el agua residual	Diámetro del tubería	mm	75–100
	Diámetro de los orificios	mm	40–50
	Distancia entre la parte superior de la tubería y el agua en el sedimentador	m	0,2–0,3
	Distancia entre la tubería y el fondo del reactor	m	0,1–0,15
	Área de ingreso del agua por tubería	m ²	2,0–3,0
Cámara para biogás	Descarga mínima de biogás	m ³ /m ² ·h	1,0
	Descarga máxima de biogás	m ³ /m ² ·h	3,0–5,0
	Concentración de metano en el biogás	(%)	70–80
Sedimentador	Deflectores del biogás en relación con la abertura del sedimentador	m	0,1–0,15
	Pendiente mínima de las paredes	(°)	45
	Pendiente apropiada de las paredes	(°)	50–60
	Profundidad	m	1,5–2,0
Canaletas	Inmersión del deflector para retener sólidos flotantes	m	0,2–0,3
	Número de vertederos triangulares	unidades/m ² del reactor	1,0–2,0
Producción y muestreo de lodo	Producción de sólidos	kgSST/kgDQO	0,1–0,2
	Producción de sólidos (DQO)	kgDQO _{lodo} /kgDQO	0,11–0,23
	Exceso de sólidos en el lodo	%	2,0–5,0
	Densidad del lodo	kg/m ³	1.020–1.040
	Diámetro de las tuberías para extraer el lodo	mm	100–150
	Diámetro de las tuberías para muestrear el lodo	mm	25–50

Sugerido por Von Sperling & Chernicharo (2005), Lier et al. (2010), Metcalf & Eddy (2014) y Comisión Nacional del Agua et al. (2015).



Lugar: reactores UASB de la PTAR San Vicente Ferrer (2020).

27. DISEÑO DEL REACTOR UASB

Ahora que tienes una descripción breve de estos *reactores UASB*, nosotros te indicaremos como diseñar estos *reactores*. Von Sperling & Chernicharo (2005), Metcalf & Eddy (2014) y Qasim & Zhu (2018) sugieren usar el caudal medio para diseñar estos *reactores*. Nosotros estamos de acuerdo con ellos porque prevenimos que estos *reactores* sean muy grandes. He aquí un ejemplo para diseñar estos *reactores UASB* para eliminar materia orgánica suspendida y disuelta.

Diseñar un *reactor UASB*. Este *reactor* será rectangular. A este *reactor* ingresará un caudal medio de $864 \text{ m}^3/\text{d}$ y un caudal máximo de $1.000 \text{ m}^3/\text{d}$. A este *reactor* ingresará también una DQO de 492 g/m^3 y una DBO de 223 g/m^3 . Además este *reactor* tendrá lo siguiente. Temperatura del agua residual de $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Coeficiente de rendimiento de sólidos (Y) de $0,18 \text{ kg SST/kgSS DQO}$. Coeficiente de rendimiento de sólidos (Y_{obs}) de $0,21 \text{ kg DQO}_{\text{lodo}}/\text{kg DQO}$. Concentración esperada de la descarga del lodo (C) de 4% . Densidad del lodo (γ) de 1.021 kg/m^3 . Entonces:

Estimar la carga de DQO afluente promedio (L_0)

$$L_o = S_o * Q_{ip}$$

Donde:

$$S_o = 0,492 \text{ kg/m}^3$$

$$Q_{ip} = 864 \text{ m}^3/\text{d}$$

Sustituimos los valores en la ecuación anterior.

$$L_o = \left(0,492 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * \left(864 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)$$

$$L_o = 425 \text{ kg} \frac{\text{DQO}}{\text{d}}$$

Sugerir el tiempo de retención hidráulico (t)

Sugerimos un tiempo de 8 horas = 0,333 días.

Estimar el volumen total del *reactor* (V)

$$V = Q_{ip} * t$$

$$V = \left(864 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right) * (0,333 \text{ d})$$

$$V = 288 \text{ (m}^3\text{)}$$

Sugerir el número de módulos del *reactor* (N)

Sugerimos 2 módulos para el *reactor UASB*. N=2.

Von Sperling & Chernicharo (2005) sugieren *reactores UASB* pequeños para prevenir problemas de instalación y operación. Estos *reactores* están entre 400 y 500 m³. Nosotros estamos de acuerdo con ellos. Entonces nosotros sugerimos diseñar estos *reactores UASB* con alturas menores o iguales a 5 m. He aquí un ejemplo de un *reactor UASB* con una altura de más de 6 m (Fig 45).



Fig 45. Reactor UASB

Sugerimos dos cosas para la Fig 45. La primera, usar alturas menores a **5 m**. La segunda, accesos apropiados para abrir y cerrar válvulas. Note que esta figura no tiene acceso a las válvulas. Entonces el operario necesitará la instalación de escaleras.

Volumen de cada módulo del *reactor* (V_u)

$$V_u = \frac{V}{N}$$

Donde:

$$V = 288 \text{ m}^3$$

$$N = 2$$

Sustituimos en la ecuación anterior

$$V_u = \frac{288 \text{ m}^3}{2} = 144 \text{ m}^3$$

Sugerir la altura del *reactor*

$$H = 4 \text{ (m)}$$

Estimar el área de cada módulo del *reactor* (A)

$$A = \frac{V_u}{H}$$

Sustituimos los valores de V_u y H en la ecuación anterior, se tiene:

$$A = \frac{144 \text{ (m}^3\text{)}}{(4 \text{ m})} = 36 \text{ m}^2$$

El *reactor* es rectangular. Entonces el ancho (a) será de 4 m:

Donde: $A = l * a$

$$l = \frac{A}{a}$$

$$l = \frac{(36 \text{ m}^2)}{4 \text{ m}} = 9 \text{ (m)}$$

El largo (l) será de 9 m.

Comprobar el área y volumen del *reactor UASB*. También comprobar el tiempo de retención hidráulico del agua

Área total:

$$A_t = N * A$$

Sustituimos en la ecuación anterior. El número de módulos y el área estimada para cada módulo del *reactor UASB* es:

$$A_t = (2) * (36 \text{ m}^2)$$

$$A_t = 72 \text{ (m}^2\text{)}$$

Volumen total:

$$V_t = A_t * H$$

$$V_t = (72 \text{ m}^2) * (4 \text{ m})$$

$$V_t = 288 \text{ m}^3$$

Tiempo de retención hidráulico del agua:

$$t = \frac{V_t}{Q_{ip}}$$

$$t = \frac{288 \text{ m}^3}{864 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 0,333 \text{ d} = 8 \text{ horas}$$

Comprobar las cargas que ingresarán a este *reactor*

Carga hidráulica volumétrica (CHV):

$$\text{CHV} = \frac{Q_{ip}}{V}$$

$$\text{CHV} = \frac{864 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{288 \text{ m}^3} = 3 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$$

Carga orgánica volumétrica (COV):

$$\text{COV} = \frac{Q_{ip} * S_o}{V}$$

$$\text{COV} = \frac{864 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 0,492 \text{ kg} \frac{\text{DQO}}{\text{m}^3}}{288 \text{ m}^3} = 1,48 \text{ kg} \frac{\text{DQO}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$$

Comprobar las velocidades del agua ascendente

Para Q_{ip} :

$$v = \frac{Q_{ip}}{At}$$

$$v = \frac{864 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{72 \text{ m}^2} = 12 \frac{\text{m}}{\text{d}} = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

Para $Q_{\text{máx} \cdot \text{h}}$:

$$v = \frac{Q_{\text{máx} \cdot \text{h}}}{At}$$

$$v = \frac{1.000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{72 \text{ m}^2} = 13,9 \frac{\text{m}}{\text{d}} = 0,56 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

Tubería para ingresar el agua residual (afluente)

Estimar el número de puntos para ingresar el agua. El área de influencia será de $A_d = 2 \text{ m}^2$ por tubo. El lodo será floculento y una $\text{COV} < 1\text{-}2 \text{ kg DQO m}^3/\text{d}$. Usamos la siguiente ecuación para estimar el número de puntos:

$$N_d = \frac{At}{Ad}$$

$$N_d = \frac{72 \text{ m}^2}{2 \text{ m}^2} = 36 \text{ puntos para ingresar el agua}$$

El *reactor UASB* tendrá dos módulos. Cada módulo tendrá 18 puntos para ingresar el agua que viene de la tubería (múltiples) de distribución. Tenemos dos ideas para estos puntos. La primera, ubicaremos estos puntos de la siguiente manera:

- En el largo de cada módulo (9 m): 6 puntos.
- En el ancho de cada módulo (4 m): 3 puntos.

La segunda, a menor número de orificios y mayor diámetro de la tubería logramos una mejor distribución del agua al interior del reactor. Sugerimos leer el siguiente artículo para entender mejor las ideas sobre el ingreso del agua al reactor: A. L. Macías, D. C. Rodríguez, F. J. Molina, «Design of Influent Distribution System in Domestic Wastewater Treatment Units» *TecnoLógicas*, vol.25, nro.55, e2428, 2022. <https://doi.org/10.22430/22565337.2428>

He aquí un ejemplo para instalar estas tuberías ([Fig 46](#)).



Fig 46. Tubería que ingresa el agua.

Estimar eficiencias de eliminación para la DQO y DBO

Para la DQO:

$$E_{DQO} = 100 * (1 - 0,68 * t^{-0,35})$$

$$E_{DQO} = 100 * \left(1 - ((0,68) * (8^{-0,35}))\right) = 67 \%$$

Para la DBO:

$$E_{DBO} = 100 * (1 - 0,70 * t^{-0,50})$$

$$E_{DQO} = 100 * \left(1 - ((0,70) * (8^{-0,50}))\right) = 75 \%$$

Estimar las concentraciones de DQO y DBO en el agua residual a la salida del reactor UASB (efluente final)

$$C_{\text{efluente}} = S_o - \frac{(E * S_o)}{100}$$

$$C_{\text{efluente}} = 0,492 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - \frac{\left(67 * 0,492 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}{100} = 162 \frac{\text{mg DQO}}{\text{L}}$$

$$= 0,162 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3}$$

$$C_{\text{efluente}} = \left(0,223 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) - \left(\frac{\left(75 * 0,223 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}{100}\right) = 55 \frac{\text{mg DBO}}{\text{L}}$$

$$= 0,055 \frac{\text{kg DBO}}{\text{m}^3}$$

Producción teórica de metano

Para estimar la producción teórica de metano usamos la siguiente ecuación:

$$\text{DQO}_{\text{CH}_4} = Q_{\text{ip}} * [(S_o - C_{\text{efluente}}) - Y_{\text{obs}} * S_o]$$

Donde:

DQO_{CH_4} , producción teórica de metano (kg DQO/d)

S_o , concentración de DQO = 0,492 kg/m³

Q_{ip} , caudal medio = 864 m³/d

$C_{\text{efluente DQO}}$, concentración efluente DQO (kg DQO/m³)

Y_{obs} , coeficiente de rendimiento de sólidos = de 0,21 kg DQO_{lodo}/kg DQO

$$\begin{aligned} \text{DQO}_{\text{CH}_4} = & \\ 864 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * & \left[\left(0,492 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 0,162 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3} \right) - 0,21 \frac{\text{kg DQO}_{\text{lodo}}}{\text{kg DQO}} \right. \\ & \left. * 0,492 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3} \right] \end{aligned}$$

$$\text{DQO}_{\text{CH}_4} = 196 \frac{\text{kg DQO}}{\text{d}}$$

$$K(t) = \frac{P * K_{DQO}}{[R * (273 + T)]}$$

Donde:

P = 1 atm

$K_{DQO} = 64 \text{ g DQO/mol}$

$R = 0,08206 \text{ atm L/mol K}$

T = Temperatura

$$K(t) = \frac{1 \text{ atm} * 64 \frac{\text{g DQO}}{\text{mol}}}{\left[0,08206 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}} * (273 + 22 \text{ °C})\right]} = 2,7 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3}$$

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)}$$

$$Q_{CH_4} = \frac{196 \frac{\text{kg DQO}}{\text{d}}}{2,7 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3}} = 73 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

He aquí un quemador para quemar biogás ([Fig 47](#)).



Fig 47. Quemador de biogás.

Producción de biogás

Para estimar la producción de biogás usamos el porcentaje de metano en el biogás. El porcentaje de metano es del 70 %

$$Q_g = \frac{Q_{CH_4}}{0,70}$$

La cantidad de metano en el biogás producido es:

$$Q_g = \frac{73 \frac{m^3}{d}}{0,70} = 104 \frac{m^3}{d} = 4,32 \frac{m^3}{h}$$

Diseño de la cámara para biogás. Varios autores se refieren a esta cámara como campana.

Número de cámaras para biogás: 2. Una cámara para cada módulo del reactor *UASB* (Fig 48).



Fig 48. Cámara para biogás.

Longitud de cada cámara:

$$L_g = 9(\text{m})$$

Longitud total de la cámara:

$$L_t = 9 * (2) = 18 (\text{m})$$

Ancho de la cámara (A_g) :

$$A_g = 0,25 \text{ m}$$

Área total de la cámara (At_g):

$$At_g = L_t * A_g$$

$$At_g = 18 \text{ (m)} * 0,25 \text{ (m)} = 4,5 \text{ (m}^2\text{)}$$

Estimar la descarga del biogás en la cámara (K_g):

$$K_g = \frac{Q_g}{At_g}$$

$$K_g = \frac{\left(4,32 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)}{4,5 \text{ (m}^2\text{)}} = 0,96 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

Entonces, sugerimos las siguientes longitudes para cada cámara para biogás:

Longitud: 9 (m)

Ancho: 0,25 (m)

Diseño de las aberturas del sedimentador del *reactor*

Tendremos barreras para separar tres fases en cada módulo del *reactor UASB*, entonces:

El número de aberturas simples: 4. Dos para cada módulo, junto a las paredes.

Longitud de cada abertura (L_a):

$$L_a = 9 \text{ (m) largo del } \textit{reactor}$$

Longitud equivalente (L_t) :

$$L_t = 9 * (4) = 36 \text{ m}$$

Ancho de cada abertura A_a :

$$A_a = 0,45 \text{ m (sugerido)}$$

Área total de las aberturas (At_a) :

$$At_a = L_t * A_a$$

$$At_a = 36 \text{ (m)} * 0,45 \text{ (m)} = 16,2 \text{ m}^2$$

He aquí las aberturas de un sedimentador ([Fig 49](#)).



Fig 49. Aberturas del sedimentador.

Comprobar las velocidades del agua a través de las aberturas (v_{ab})

Para Q_{ip} :

$$v_{ab} = \frac{Q_{ip}}{At_a}$$

$$v_{ab} = \frac{864 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{16,2 \text{ m}^2} = 53,3 \frac{\text{m}}{\text{d}} = 2,2 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

Para $Q_{\text{máx} \cdot \text{h}}$:

$$v_{ab} = \frac{Q_{\text{máx} \cdot \text{h}}}{At_a}$$

$$v_{ab} = \frac{1.000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{16,2 \text{ m}^2} = 61,7 \frac{\text{m}}{\text{d}} = 2,6 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

La abertura del sedimentador tendrá las siguientes longitudes:

Abertura simple:

Longitud: 9 (m)

Ancho: 0,45 (m)

Diseño del sedimentador del *reactor UASB*

Número de sedimentadores: 2. Uno para cada módulo del *reactor*.

Longitud de cada sedimentador (L_s):

$L_s = 9 \text{ (m)}$. largo del *reactor UASB*.

Longitud total del sedimentador (L_{ts}):

$$L_{ts} = L_s N$$

$$L_{ts} = (9 \text{ m}) * 2 = 18 \text{ (m)}$$

Ancho de cada cámara para biogás (A_g):

$$A_g = 0,3 \text{ (m)} (0,25 + 0,05)$$

Note que 0.05 es el espesor de la pared.

Ancho de cada sedimentador (A_s):

$$A_s = 4 \text{ (m)}$$

Ancho efectivo de cada sedimentador (A_{es}):

$$A_{es} = 4 \text{ (m)} - 0,3 \text{ (m)} = 3,7 \text{ (m)}$$

Área total del sedimentador (A_{ts}):

$$At_s = Lt_s * Ae_s$$

$$At_s = 18(m) * 3,7(m) = 66,6 \text{ m}^2$$

Comprobar las cargas superficiales del sedimentador (v_s)

Para Q_{ip} :

$$v_s = \frac{Q_{ip}}{At_s}$$

$$v_s = \frac{864 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{66,6 \text{ m}^2} = 12,97 \frac{\text{m}}{\text{d}} = 0,54 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

Para $Q_{\text{máx} \cdot h}$:

$$v_s = \frac{Q_{\text{máx} \cdot h}}{At_s}$$

$$v_s = \frac{1.000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{66,6 \text{ m}^2} = 15 \frac{\text{m}}{\text{d}} = 0,62 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

Entonces, cada sedimentador tendrá las siguientes longitudes:

Longitud: 9 (m)

Ancho: 3,70 (m)

Para estimar el volumen del sedimentador consideramos lo siguiente:

- Altura de las paredes verticales del sedimentador.
- Altura de las paredes inclinadas del sedimentador.
- Tiempo de retención hidráulico en el sedimentador.

He aquí el sedimentador del *reactor* (Fig 50).



Fig 50. Sedimentador del reactor UASB.

Producción de lodo

Para estimar la producción de lodo (Pl) en el reactor UASB usamos las siguientes ecuaciones:

$$P_l = Y * DQO$$

Donde:

Pl : producción de lodo (kg SST/d)

Y : Coeficiente de rendimiento de sólidos de 0,18 kg SST/kgSS DQO

DQO : la carga de DQO afluente promedio (Lo)

$$P_l = \left(0,18 \frac{\text{kg SST}}{\text{kg DQO}}\right) * \left(425 \frac{\text{kg DQO}}{\text{d}}\right) = 76,59 \frac{\text{kg SST}}{\text{d}}$$

$$V_l = \frac{P_l}{\gamma * C}$$

Donde:

V_l : volumen de lodos (m³/d)

Pl : producción de lodo (kg SST/d)

γ : densidad del lodo de 1.021 kg/m³

C : concentración esperada de la descarga del lodo de 4%.

$$V_l = \frac{76,59 \frac{\text{kg SST}}{\text{d}}}{\left(1.021 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(\frac{4}{100}\right)\right)} = 1,9 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$



Lugar: Reactor UASB de la PTAR San Francisco (2021). Las canaletas del reactor UASB no son apropiadas porque no tienen deflectores para prevenir la salida de sólidos flotantes.

28. OPERACIÓN DEL REACTOR UASB

Ahora que tienes un diseño del *reactor UASB*, nosotros te indicaremos la operación de este *reactor*. Esta operación tiene cuatro significados para estos operarios. El primero, extraer de este *reactor* estos sólidos flotantes, grasas y aceites **diariamente** en verano y según la necesidad en invierno (Fig 51). El segundo, muestrear de este *reactor* lodos para saber cuando extraerlos. Para muestrear estos lodos estos operarios usarán válvulas ubicadas a diferentes alturas. Y para extraer estos lodos estos operarios usarán válvulas en el fondo o los sistemas de bombeo. El tercero, medir variables fisicoquímicas en este *reactor* **todos los días**. Estas variables son pH y temperatura. El cuarto, estimar los sólidos sedimentables y la alcalinidad de este *reactor UASB* **diariamente**.



Fig 51. Operario limpiando el reactor.

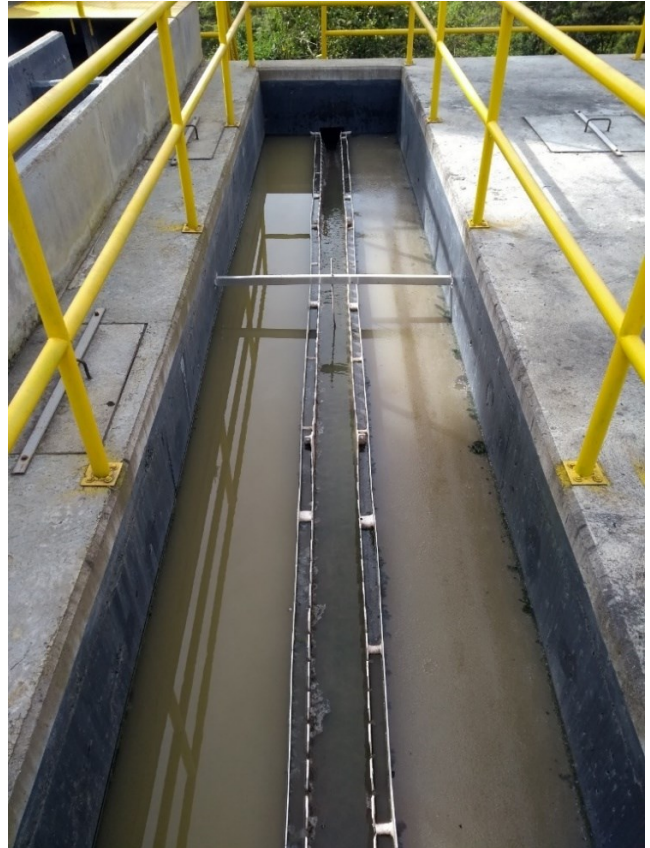
28.1 Extraer sólidos flotantes

Estos operarios limpiarán este *reactor UASB* y extraerán estos sólidos gruesos, flotantes, grasas y aceites para disposición final. Porque estos *reactores* tienen todavía sólidos gruesos que las rejas no eliminan. Aunque los sólidos llegan a *reactores* por dos razones. La primera, están en el afluente de la PTAR. La segunda, conforman los lodos anaerobios que flotan por el paso de biogás a través del *reactor*. Para limpiar este *reactor* estos operarios usarán varios utensilios. Estos utensilios son cedazos, baldes, balanza, lentes de protección, overoles, botas y guantes. He aquí un ejemplo para limpiar este *reactor*.

- Ubicarse en la plataforma del *reactor*.
- Extraer de este *reactor* todos estos sólidos flotantes, grasas y aceites con un cedazo.
- Limpiar la lama adherida a la pared de este *reactor* con un cepillo. No limpiar las canaletas de este *reactor* porque en *estas* están los microbios que transforman la materia orgánica (Fig 52).
- Pesar estos sólidos flotantes, grasas y aceites extraídos en una balanza.
- Cuantificar estos sólidos extraídos (42.9).
- Adicionar estos sólidos en los lechos de arena.



Grasas y aceites



Grasas y aceites

Fig 52. Sólidos flotantes extraídos del reactor UASB.

28.2 Muestrear lodos

Estos operarios usarán varios utensilios para muestrear estos lodos de este *reactor UASB*. Estos utensilios son baldes, jarras y beakers. He aquí un ejemplo para muestrear estos lodos.

- Usar las válvulas ubicadas a diferentes alturas para muestrear los lodos (42.17). Estas válvulas están ubicadas cada 0.5 m una de la otra. La Comisión Nacional del Agua (2016) sugiere muestrear en la tarde porque este lodo ocupa más lugar en el *reactor*.
- Coger una muestra del lodo por cada válvula de este *reactor UASB*.
- Adicionar 1.000 mL de cada muestra en un beaker (Fig 53).
- Medir pH y temperatura a estos lodos (42.18).
- Esperar 20 minutos para que los lodos de cada muestra sedimenten.
- Cuantificar los mL de estos lodos sedimentados en cada beaker.
- Extraer lodos de este *reactor UASB* si estos beakers tienen más de la mitad de estos lodos. No extraer todo el lodo de este *reactor UASB* para no deteriorar la eficiencia de eliminación.
- Estimar la eficiencia de eliminación de los sólidos suspendidos.



Fig 53. Lodo del reactor UASB.

Note que si estos lodos alcanzan **un tercio** de la altura útil de este *reactor UASB* extraer estos lodos. Von Sperling & Chernicharo (2005) dicen que estos *reactores* tienen un tiempo de retención de estos lodos. Este tiempo es mayor a 30 días para estabilizar los lodos eliminados del *reactor*.

Entonces los operarios usarán las válvulas para extraer estos lodos estabilizados e ingresarlos a los lechos de arena para deshidratarlos.

Nosotros pusimos en marcha varios *reactores UASB* en varias PTAR en Antioquia. Aprendimos que los operarios queman biogás del *reactor UASB* después de **10 meses** de operación más o menos (42.12). También aprendimos que los operarios extraen los lodos de estos *reactores UASB* por primera vez después de **12 meses** de operación. Después de estos meses los operarios extraen más lodos cada 2 meses para prevenir que salgan en el agua. También cuando los lodos alcanzan 1/3 de la altura útil del reactor. Para extraer los lodos estos operarios usan válvulas y tuberías que conectan con los lechos de arena. Y varias PTAR en Antioquia usan lechos de arena con un área superficial muy pequeña (Alzate et al., 2021) lo que dificulta la deshidratación de los lodos.

28.3 Extraer lodos

He aquí un ejemplo para extraer estos lodos del *reactor UASB*.

- Abrir estas válvulas de este *reactor* para extraer estos lodos (Fig 54).
- Iniciar estos sistemas de bombeo de este *reactor* para bombear estos lodos a los lechos de arena.
- Ver que estos lodos ingresen al lecho de arena (Fig 55).



Fig 54. Válvulas del reactor UASB.



Fig 55. Ingreso de lodos a los lechos.

28.4 Medir pH y temperatura

Estos operarios usarán varios utensilios para medir variables fisicoquímicas. Estos utensilios son jarras plásticas, beakers, un pH-metro. Estas variables son el pH, la temperatura. He aquí un ejemplo para medir estas variables en este *reactor UASB*.

- Coger una muestra de agua del canal de rebose de este *reactor* (Fig 56).
- En esta muestra cogida, meter un pH-metro para medir pH y temperatura (42.6).





Fig 56. Medición de pH, temperatura y sólidos sedimentables.

28.5 Estimar sólidos sedimentables

He aquí un ejemplo para estimar estos sólidos sedimentables del *reactor* en conos Imhoff.

- Coger una muestra de un litro de agua del canal de rebose de este *reactor UASB* (Fig 56).
- Agitar esta muestra y adicionar al cono Imhoff.
- Esperar 45 minutos para que los sólidos sedimenten.
- Cuantificar el volumen de sólidos sedimentables en el fondo del cono en mL/L (42.16).
- Finalizados los 45 minutos, agitar suavemente la muestra cerca a los lados del cono con una varilla.

- Esperar 15 minutos de nuevo para que más sólidos sedimenten.
- Finalizados los 15 minutos, cuantificar el volumen de sólidos sedimentables en el fondo del cono en mL/L (42.16).

Sugerido por American Public Health Association et al. (2017).

28.6 Estimar alcalinidad

Estos operarios usarán varios utensilios para estimar la alcalinidad. Estos utensilios son bureta, soporte para bureta, ácido sulfúrico, pH-metro y un beaker. He aquí un ejemplo para estimar esta alcalinidad del agua residual que sale del *reactor UASB*.

- Coger una muestra de agua del canal de rebose de este *reactor UASB* (Fig 57).
- Adicionar 50 ml de esta muestra de agua a un beaker.
- Medir el pH inicial de esta muestra (42.15).
- En una bureta agregar la solución titulante de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0,02N.
- Cuantificar el volumen inicial del ácido en la bureta.
- Agitar esta muestra lentamente.
- Adicionar este ácido gota a gota a esta muestra hasta llegar a un pH de 5,75
- Cuantificar el volumen de ácido gastado hasta este 5,75.

- Adicionar este ácido de nuevo hasta llegar a un pH de 4,3
- Cuantificar el volumen de ácido gastado hasta este 4,3.
- Estimar la alcalinidad total, intermedia, parcial y la relación AI/AT.



Fig 57. Alcalinidad.

Nosotros reportamos la alcalinidad en $\text{mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$. Para reportar esta alcalinidad decimos que un 1 meq es igual a $50 \text{ mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$. También usamos las siguientes ecuaciones:

$$\text{Alcalinidad total (AT)} = \frac{V_{\text{total}} * N \text{ H}_2\text{SO}_4 * 50.000}{V_{\text{muestra}}}$$

$$\text{Alcalinidad Parcial (AP)} = \frac{V_{\text{parcial}} * N \text{ H}_2\text{SO}_4 * 50.000}{V_{\text{muestra}}}$$

$$\text{Alcalinidad Intermedia (AI)} = \text{AT} - \text{AP}$$

$$\text{Relación } \frac{\text{AI}}{\text{AT}}$$

Dónde

V_{total} = volumen total de H_2SO_4 hasta un pH de 4,3

V_{parcial} = volumen total de H_2SO_4 hasta un pH de 5,75

$N \text{ H}_2\text{SO}_4$ = normalidad del ácido sulfúrico

La relación AI/AT es un indicador del *reactor UASB*. Si este indicador es mayor a 0,3 significa que existe el riesgo de acidificación del *reactor* debido a que la alcalinidad bicarbonato disminuye para neutralizar los ácidos grasos volátiles. Estos ácidos inactivarán las bacterias metanogénicas. Si este indicador es menor a 0,3 el reactor funcionará apropiadamente.

He aquí un ejemplo para estimar esta alcalinidad.

Estimar la alcalinidad total, parcial, intermedia y la relación AI/AT

$$\text{AT} = \frac{25 \text{ ml} * 0,02 \text{ N H}_2\text{SO}_4 * 50.000}{100 \text{ ml}} = \frac{25.000}{100} = 250$$

$$AP = \frac{11,5 \text{ ml} * 0,02 \text{ N H}_2\text{SO}_4 * 50.000}{100 \text{ ml}} = 112$$

$$AI = 250 - 112 = 138$$

$$\frac{AI}{AT} = \frac{138}{250} = 0,5$$

Una relación AI/AT de 0,5 indica un riesgo de acidificación.

Sugerido por Ripley et al. (1986), Von Sperling & Chernicharo (2005), Comisión Nacional del Agua (2016) y American Public Health Association et al. (2017).

28.7 Estabilizar el pH

He aquí un ejemplo para estabilizar el pH de un *reactor UASB*.

Estabilizar el pH del *reactor UASB* con bicarbonato de sodio según el caudal que ingresa a una PTAR.

Tenemos las siguientes alcalinidades parciales de entrada a la PTAR

$$150 \frac{\text{mg}}{\text{L}}, 170 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ y } 186 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Promedio de estas alcalinidades

$$170 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Alcanzar una alcalinidad bicarbonato de 500 mg/L

$$500 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 170 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 330 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Multiplicar por el caudal que ingresa a una PTAR

$$330 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \text{Caudal} \left(\frac{\text{L}}{\text{s}} \right)$$

$$330 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 5 \frac{\text{L}}{\text{s}} = 1.650 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$$

Convertir de mg/s a gr/s

$$= 1.650 \frac{\text{mg}}{\text{s}} * \frac{1 \text{ gr}}{1000 \text{ mg}} = 1,65 \frac{\text{gr}}{\text{s}}$$

Diluir el bicarbonato de sodio

$$\frac{20 \text{ gr de bicarbonato}}{100 \text{ ml de agua potable}} = \frac{200 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} = \frac{50 \text{ kg}}{250 \text{ L}}$$

Cuantificar los gramos de bicarbonato por segundo

$$50 \text{ kg} * \frac{1.000 \text{ gr}}{1 \text{ kg}} = 50.000 \text{ gr de bicarbonato}$$

Estimar el tiempo de dosificación del bicarbonato

$$\frac{50.000 \text{ gr}}{1,65 \frac{\text{gr}}{\text{s}}} = 30303.0303 \text{ seg}$$

$$30303.0303 \text{ seg} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 8,41 \text{ h}$$

Estimar el caudal de dosificación del bicarbonato

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$250 \text{ L} * \frac{1.000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 250.000 \text{ ml}$$

$$\frac{250.000 \text{ ml}}{8,41 \text{ h}} = 29726.51605 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$$

$$29726.51605 \frac{\text{ml}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 8,25 \frac{\text{ml}}{\text{seg}}$$

$$8,25 \frac{\text{ml}}{\text{seg}} * \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} = 495 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$$

He aquí un tanque para dosificar este bicarbonato ([Fig 58](#)).



Fig 58. Adición de bicarbonato de sodio.

28.8 Variables fisicoquímicas

He aquí un resumen de los intervalos de varias variables fisicoquímicas para monitorear estos *reactores UASB* ([Tabla 25](#)).

Tabla 25. Variables fisicoquímicas en reactores UASB.

Sugerencia en	Unidades	Intervalo	Sugerido por
Temperatura	°C	20–28	(Von Sperling & Chernicharo, 2005)
pH	Unidades de pH	6,8–7,2	
pH para bacterias metanogénicas	Unidades de pH	6,6–7,4	
Relación DBO/N	mg/L	20:1	(Comisión Nacional del Agua, 2016)
DBO/P	mg/L	100:1	
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	1.500–5.000	
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	2.000–4.000	(Metcalf & Eddy, 2014)
Relación AI/AT	mg/L CaCO ₃	≤0,3	(Ripley et al., 1986)
Ácidos grados volátiles (ácido acético)	mg/L	50–300	Comisión Nacional del Agua, 2016)
Sulfuros	mg/L	50–100	(Von Sperling & Chernicharo, 2005)
Amoniaco	mg/L	50–200	
Nitrógeno amoniacal	mg/L	<1.000	
Varios metales			
FeCl ₂	mg	1,0	(Comisión Nacional del Agua, 2016)
CoCl ₂	mg	0,1	
NiCl ₂	mg	0,1	
Cloruro de zinc	mg	0,1	



Lugar: reactor UASB de la PTAR Abejorral (2019).

Página en blanco

7

Reactor anaerobio PBR

Objetivos principales

- Ubicar el *reactor PBR*.
- Describir el *reactor PBR*.
- Diseñar el *reactor PBR*.
- Operar el *reactor PBR*.



Lugar: reactores UASB, reactores PBR y sedimentadores secundarios de la PTAR San Vicente Ferrer (2021).

29. UBICACIÓN DEL REACTOR PBR

Ahora que sabes la manera como operar este *reactor UASB*, nosotros te hablaremos de los *reactores anaerobios PBR* (*anaerobic packed-bed reactors*, en inglés). Aunque varios autores se refieren a estos *reactores* como «filtros anaerobios de flujo ascendente FAFA». Aquí nosotros usaremos las palabras *reactor PBR* para prevenir ambigüedades con la palabra filtro. Porque estos *reactores anaerobios* no son filtros. Estos *reactores PBR* son la tecnología más usada en las PTAR en Antioquia. También son uno de los procesos biológicos unitarios más usados en estas PTAR (Fig 59). Ubicamos estos *reactores PBR* después del tratamiento primario. Este *reactor PBR* es un tratamiento secundario.

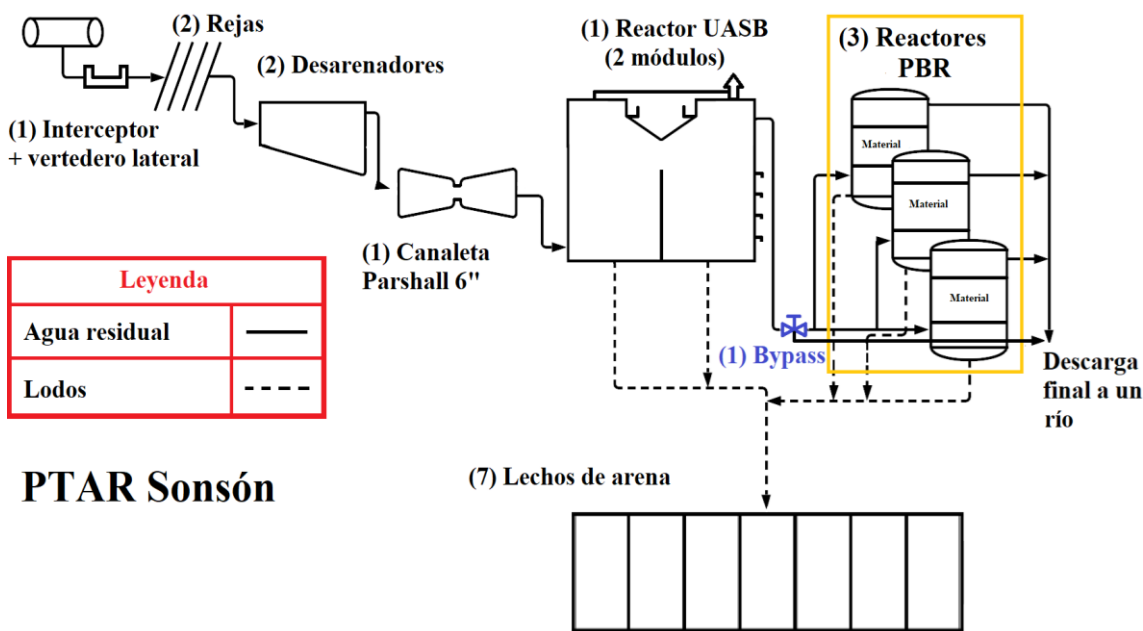


Fig 59. Ubicación de los reactores PBR en una PTAR.

30. DESCRIPCIÓN DEL REACTOR PBR

Ahora que ubicas este *reactor anaerobio PBR*, nosotros te describiremos el objetivo de este *reactor PBR*. Este objetivo es eliminar materia orgánica disuelta y suspendida de manera anaerobia que no elimina el tratamiento primario. Sí, que no elimina biológicamente estos reactores UASB. Para alcanzar este objetivo usamos *reactores PBR* grandes, sin turbulencia y con tiempos de retención de más de **4 horas**. Además necesitamos que estos *reactores* tengan velocidades bajas del agua para prevenir que varios sólidos salgan en el efluente (Fig 60).



Fig 60. Reactor PBR.

Von Sperling & Chernicharo (2005) afirman que estos *reactores PBR* tienen un intervalo de eficiencias de eliminación de materia orgánica. Este intervalo está entre 65 y 75 %. Aunque Qasim & Zhu (2018) afirman que tienen un intervalo entre 50 y 90 %. Estos *reactores* no eliminan nitrógeno ni fósforo adicional al que usan para sintetizar la biomasa. Biomasa significa materia orgánica originada en este proceso biológico.

Los *reactores PBR* son circulares o rectangulares. Nosotros encontramos que varias PTAR en Antioquia usan *reactores PBR* rectangulares y en concreto. Pero otras PTAR usan *reactores* circulares y en fibra de vidrio. Estos *reactores* tienen un material de soporte similar al de los procesos aerobios de biomasa adherida. Este material está sumergido en el agua residual y es el lugar apropiado para que los microbios crezcan. Allí estos microbios se adhieren al material para eliminar materia orgánica que ingresa al *reactor PBR*.

Los *reactores PBR* son de flujo ascendente o descendente. Los *reactores PBR* de flujo ascendente tienen una parte de sedimentación después del material de soporte, mientras que los de flujo descendente no. Y sí, las PTAR en Antioquia usan estos *reactores PBR* de flujo ascendente.

Los *reactores PBR* de flujo ascendente tienen tres partes principales para eliminar materia orgánica (Fig 61). La primera, ingreso distribuido del agua por el fondo de este *reactor*. En este fondo, estos reactores tienen

lodo, flóculos grandes y microbios. La segunda, material de soporte ubicado de abajo hacia arriba. En este material y sus aberturas crecen microbios. La tercera, salida del agua por arriba con canaletas o tuberías. Por estas canaletas sale el agua residual del *reactor PBR*.

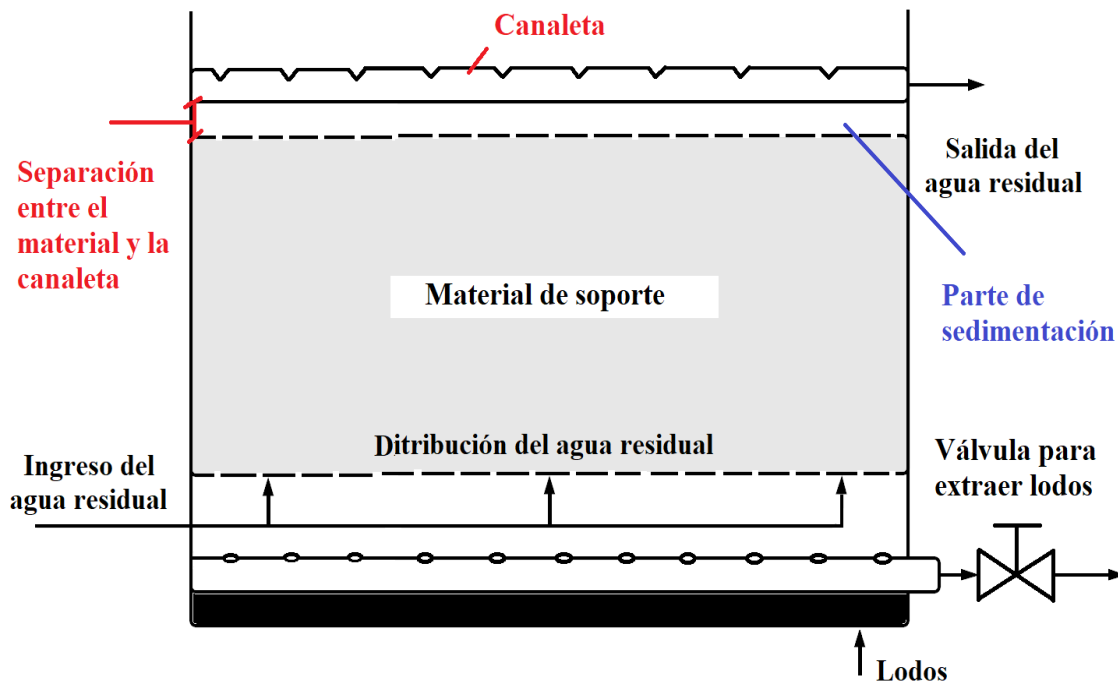


Fig 61. Esquema de un reactor PBR.

Sugerido por Von Sperling & Chernicharo (2005), Metcalf & Eddy (2014) y Qasim & Zhu (2018).

Nosotros encontramos que varias PTAR en Antioquia usan *reactores PBR* después de *reactores UASB*. Chernicharo (2006) dice que los *reactores PBR* son una opción para eliminar materia orgánica que los *reactores UASB* no eliminan. Pero encontramos que estos *reactores PBR* tienen tres errores de diseño usuales en Antioquia. El primero, un tiempo de retención

hidráulico **menor a 1 hora**. El segundo, la distribución desordenada del material de soporte (Fig 62). Desordenada significa que no existe la delimitación de la parte superior e inferior. Superior para mejorar la sedimentación. Inferior para sacar más fácil los lodos sin obstrucciones por este material. El tercero, falta del volumen apropiado de este material de soporte.



Fig 62. Material de soporte (rosetas) del reactor PBR.

Estos errores deterioran el diseño de los *reactores PBR* de dos maneras. La primera, encontramos que los ingenieros diseñan estos *reactores PBR* con bajos tiempos de retención hidráulica (Rendón et al., 2021). Estos ingenieros deberían diseñar los *reactores PBR* con mínimo **cuatro horas de tiempo de retención hidráulico** (Von Sperling & Chernicharo, 2005). La segunda, encontramos que los ingenieros diseñan estos *reactores PBR* con una distribución desordenada del material de soporte. Entonces estos

errores en los *reactores PBR* tienen dos efectos. El primero, aumentan las obstrucciones de este material. El segundo, disminuyen la eficiencia de eliminación por que varios sólidos salen de estos *reactores*.

Varias variables fisicoquímicas también tienen una conexión con esta eficiencia en la digestión anaerobia. Estas variables son la temperatura, el pH, nutrientes, sólidos totales y volátiles, ácidos grasos volátiles, sulfuros, nitrógeno amoniacal, fosfatos totales, metales, sólidos flotantes y espumas (Comisión Nacional del Agua, 2015). Y esta conexión aumenta o disminuye la eficiencia de eliminación del *reactor PBR*.

He aquí varias sugerencias para prevenir estos errores en los futuros *reactores PBR*.

30.1 Tiempo de retención hidráulico

Von Sperling & Chernicharo (2005) afirman que estos *reactores PBR* tienen un intervalo de tiempos de retención. Este intervalo esta entre **4 y 10 horas** para caudal promedio. He aquí la ecuación que usamos para estimar este tiempo.

$$T_r(h) = \frac{\text{Volumen (m}^3\text{)} \left(\frac{24 \text{ h}}{d}\right)}{\text{caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{d}\right)}$$

30.2 Carga orgánica volumétrica

Von Sperling & Chernicharo (2005) afirman que estos *reactores PBR* tienen un intervalo de carga hidráulica volumétrica. Este intervalo esta entre **0,25** y **0,75 kg DQO/m³·d**. He aquí la ecuación que usamos para estimar esta carga orgánica.

$$COV \left(\frac{\text{kgDQO}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}} \right) = \frac{\text{caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) * \text{concentración de materia} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{\text{Volumen} (\text{m}^3)}$$

30.3 Carga hidráulica superficial

La carga hidráulica superficial es el volumen de agua que ingresa diario por el área superficial del material de soporte. Von Sperling & Chernicharo (2005) afirman que estos *reactores PBR* tienen un intervalo de carga hidráulica superficial. Este intervalo esta entre **6** y **15 m³/m²·d**. Para estimar esta carga usamos la siguiente ecuación.

$$CHS \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \right) = \frac{\text{Caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right)}{\text{Área superficial del material de empaque} (\text{m}^2)}$$

30.4 Altura del material de soporte

Los objetivos del material de soporte son cinco. El primero, retener los sólidos dentro de este *reactor PBR*. El segundo, ser el soporte de los microbios para su crecimiento. El tercero, separar estos sólidos de los

gases. El cuarto, acumular estos sólidos y materia orgánica. El quinto, mejorar el contacto entre el agua y estos sólidos en estos *reactores*.

Von Sperling & Chernicharo (2005) y Chernicharo (2006) afirman que estos *reactores PBR* tienen alturas del material de soporte entre **0,8 y 3,0 m**. Aunque la altura apropiada y más usada es de **1,5 m**. La Comisión Nacional del Agua (2015) sugiere un esquema para prevenir un error principal en estos *reactores* (Fig 63). Este error es la cantidad excesiva del material de soporte desde el fondo hasta arriba.

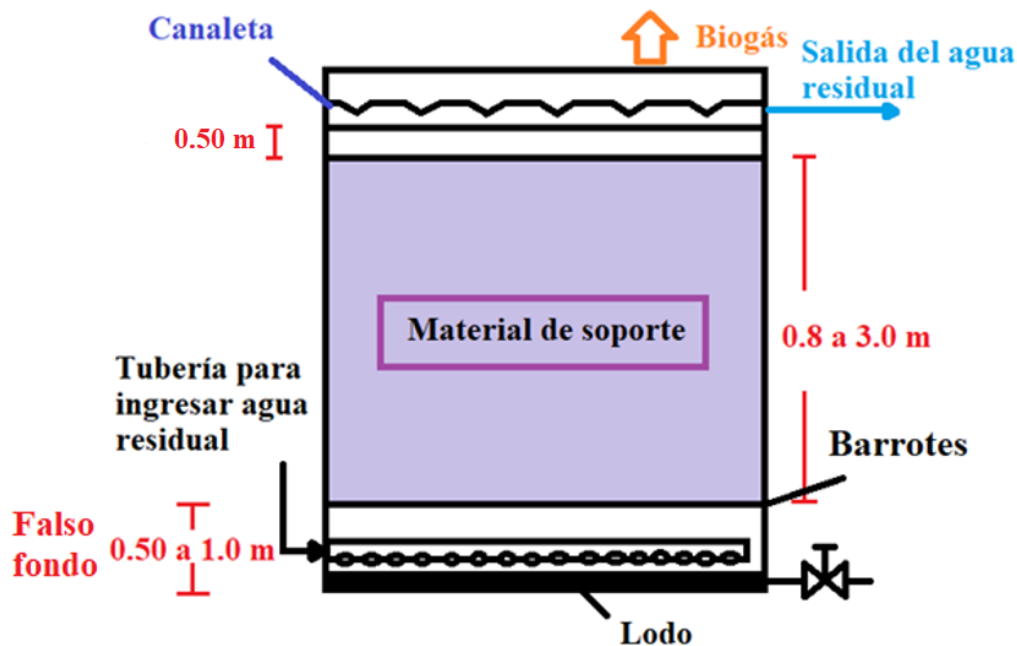


Fig 63. Esquema de la altura del material del reactor PBR.

Sugerido también por Von Sperling & Chernicharo (2005), Metcalf & Eddy (2014) y Qasim & Zhu (2018).

Nosotros sugerimos **3 opciones** para sostener el material de soporte en estos *reactores PBR*. **La primera**, instalar barrotes. Ubicamos barrotes entre 0,5 y 0,7 m por encima de la tubería para ingresar el agua. Los barrotes previenen que el material esté en el fondo del *reactor*. También delimitan una parte libre entre las tuberías de extracción de lodo, ingreso del agua y el material de soporte. Nos referimos a esta parte libre como falso fondo. Entonces previenes dos errores de diseño. El primero, la obstrucción del ingreso del agua. El segundo, la extracción de los sólidos adheridos al material de soporte. Estos sólidos son esenciales para eliminar materia orgánica porque en los sólidos están los microbios.

La segunda, ubicar mallas en la parte superior e inferior del *reactor PBR*. Las mallas bien ubicadas son útiles para lograr dos objetivos. El primero, delimitar el falso fondo. La segunda, prevenir la flotación del material de soporte. Así delimitamos también la parte de sedimentación. **La tercera**, ubicar placas con orificios en fibra de vidrio. Estas tres opciones son apropiadas para lograr estos objetivos para los *reactores*.

Los materiales de soporte para estos *reactores PBR* son polietileno, plástico, PVC, piedra y granito. Pero el material más usado es el **polietileno**. Un ejemplo de este polietileno son las rosetas.

30.5 Eficiencia de eliminación de materia orgánica

Van Haandel & Lettinga (1994) y Von Sperling & Chernicharo (2005) sugieren una ecuación para estimar esta eficiencia de eliminación de estos *reactores PBR*.

$$\text{Eficiencia (\%)} = 100 * (1 - 0,87 * t^{-0,5})$$

Donde:

Eficiencia del reactor= porcentaje (%)

t= tiempo de retención hidráulico (h)

0,87= coeficiente empírico del reactor PBR.

0,50= coeficiente empírico del material de soporte.

30.6 Eficiencia de eliminación de materia orgánica

Nosotros usamos la siguiente ecuación para estimar la eficiencia de eliminación del *reactor PBR* cuando es la última tecnología de la PTAR. Usamos esta ecuación si el caudal de ingreso es igual al de salida. Sí no, usar la ecuación con las cargas de DBO.

$$n(\%) = \frac{\text{DBO que ingresan } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) - \text{DBO que salen } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)}{\text{DBO que ingresan } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)} * 100$$

30.7 Tubería para ingresar el agua

Von Sperling & Chernicharo (2005) y La Comisión Nacional del Agua (2015) dicen que la tubería en el fondo de este *reactor PBR* ingresa igual el agua (Fig 64). Esta tubería tiene varios tubos para cubrir un área entre 2 y 4 m² de este *reactor PBR*. El diámetro de estos tubos tiene el mismo intervalo del reactor UASB entre 75 y 100 mm para prevenir la obstrucción por sólidos. Estos tubos también tienen un intervalo de orificios entre 40 y 50 mm para facilitar que el agua alcance las velocidades apropiadas. Nosotros decimos que esta tubería esta entre 50 y 70 cm del fondo de estos *reactores PBR*.

Aunque Qasim & Zhu (2018) dicen que estos *reactores PBR* tienen un porcentaje del falso fondo para instalar tuberías. Este porcentaje esta entre el 30 y 50 %. Creemos que estos porcentajes son exagerados. Entonces sugerimos que este porcentaje esté entre 20 y 25 %.



Fig 64. Tubería de lodos (fondo) rosetas y tubería para ingresar el agua.

30.8 Canaleta para evacuar el agua

Von Sperling & Chernicharo (2005) y La Comisión Nacional del Agua (2015) usan canaletas para evacuar el agua de estos *reactores PBR*. Estas canaletas están ubicadas a **30 y 50 cm por encima de este material de soporte** (Fig 65). Nosotros sugerimos ubicar estas canaletas a una altura de **50 cm** por encima de este material. Además estas canaletas tienen deflectores para prevenir que los sólidos flotantes salgan con el agua del *reactor PBR*. Aunque varias PTAR usan *reactores PBR* con tuberías para evacuar el agua.



Fig 65. Canaletas del reactor PBR.

30.9 Válvulas para muestrear el lodo

Von Sperling & Chernicharo (2005) sugieren ubicar varias válvulas de muestreo en estos *reactores PBR*. Primera, en el fondo para monitorear el lodo. Segunda, a diferentes alturas del material de soporte para monitorear el lodo adherido. Estas válvulas ayudan al operario a prevenir la obstrucción de este material. Aunque nosotros encontramos que estas PTAR en Antioquia usan reactores PBR sin válvulas para muestrear este lodo.

He aquí varias sugerencias para diseñar estos *reactores PBR* (Tabla 26).

Tabla 26. Intervalos usados para diseñar reactores PBR.

Sugerencias en	Intervalos		
	*Q medio (QMD)	Q máximo diario (QMD)	Q máximo horario (QMH)
Material de soporte	Piedra	Piedra	Piedra
Altura del material (metros)	0,8–3,0	0,8–3,0	0,8–3,0
Tiempo de retención hidráulico del agua (horas)	5–10	4–8	3–6
Carga hidráulica superficial ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$)	6–10	8–12	10–15
Carga orgánica volumétrica (kg DBO/ $\text{m}^3\cdot\text{d}$)	0,15–0,50	0,15–0,50	0,15–0,50
Carga orgánica en el material de soporte (kg DBO/$\text{m}^3\cdot\text{d}$)	0,25–0,75	0,25–0,75	0,25–0,75

Sugerido por Gonçalves et al. (2001), Von Sperling & Chernicharo (2005). Note que Q es el caudal.

He aquí más sugerencias para diseñar estos *reactores PBR* (Tabla 27).

Tabla 27. Intervalos para diseñar reactores PBR de flujo ascendente.

Sugerencia en	Reactor PBR de flujo ascendente	
	Unidades	Intervalo/descripción
Material de soporte	-	Plástico corrugado, anillos de polipropileno de alta densidad, rocas, bolas de plástico, pedazos de tubo.
Volumen de poros vacíos	Porcentaje (%)	40–95
Área superficial	m ² /m ³	85–200
Longitud del reactor PBR		
Altura	m	3–13
Diámetro o ancho	m	2–8
Carga orgánica volumétrica	DQO/m³·d	0,1–1,2 para DQO de 200 a 300 mg/L
Tiempo de retención de los sólidos	d	15–40
Concentración de sólidos	gr SSV/L	5–15
Tiempo de retención hidráulico del agua	h	20–96
Velocidad ascensional del agua	m ³ /m ² ·h	0,5–0,8

Sugerido por Qasim & Zhu (2018).



Lugar: reactor PBR de la PTAR Granada (2021). Este reactor no tiene la parte de sedimentación para clarificar el efluente por exceso de rosetas.

31. DISEÑO DEL REACTOR PBR

Ahora que tienes una descripción breve de estos *reactores PBR*, nosotros te indicaremos como diseñar estos *reactores*. Von Sperling & Chernicharo (2005) y La Comisión Nacional del Agua (2015) sugieren usar el caudal medio para diseñar estos *reactores*. Nosotros estamos de acuerdo con ellos porque prevenimos que estos *reactores PBR* sean muy grandes. He aquí un ejemplo para diseñar estos *reactores* para eliminar sólidos orgánicos, inorgánicos y materia orgánica.

Diseñar un *reactor PBR*. Este *reactor* está ubicado después de un reactor UASB. Este *reactor* será cuadrado. A este *reactor* ingresará un caudal medio de 864 m³/d, un caudal máximo diario de 1.000 m³/d y un caudal máximo horario de 1.100 m³/d. A este *reactor PBR* ingresará también una DBO de 100 mg/L. El *reactor* tendrá un tiempo de retención de **7 horas.**

Estimar del volumen del *reactor PBR*

$$V = Q (TRH)$$

$$Q = 864 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 36 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$V = 36 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * (7 \text{ h}) = 252 \text{ m}^3$$

Volumen de cada módulo del *reactor PBR*

Sugerimos dos módulos para este *reactor*

$$V = \frac{252 \text{ m}^3}{2} = 126 \text{ m}^3$$

Estimar la altura total del *reactor PBR*

Sugerimos una distancia libre en el fondo (falso fondo) de 0,8 m, una altura del material de soporte de 1,5 m y 0,8 m de borde libre. El reactor PBR tiene una altura total (H) dada por:

$$H = 0,8 \text{ (m)} + 1,5 \text{ (m)} + 0,8 \text{ (m)} = 3,1 \text{ (m)}$$

Estimar el área del *reactor PBR*

$$A = \frac{V}{H}$$

$$A = \frac{252 \text{ m}^3}{3,1 \text{ m}} = 81 \text{ m}^2$$

Estimar el volumen del material de soporte

$$V_{\text{ms}} = A * (\text{altura del material de soporte})$$

$$V_{\text{ms}} = 81 \text{ m}^2 * (1,5 \text{ m}) = 122 \text{ m}^3$$

Comprobar la carga hidráulica superficial

$$\text{CHS} = \frac{Q}{A}$$

Caudal medio:

$$\text{CHS}_{Q_{\text{med}}} = \frac{864 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{81 \text{ m}^2} = 10,6 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$$

Caudal máximo diario:

$$CHS_{Q_{\text{máxd}}} = \frac{1.000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{81 \text{ m}^2} = 12,3 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$$

Caudal máximo horario:

$$CHS_{Q_{\text{máxh}}} = \frac{1.100 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{81 \text{ m}^2} = 13,6 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$$

Comprobar la carga orgánica volumétrica

$$COV = \frac{Q S_0}{V}$$

$$COV_{\text{ms}} = \frac{Q S_0}{V_{\text{ms}}}$$

$$COV = \frac{864 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * \left(0,1 \frac{\text{kg DBO}}{\text{m}^3} \right)}{81 \text{ m}^3} = 1,0 \frac{\text{kg DBO}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$$

$$\text{COV}_{\text{mf}} = \frac{864 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * \left(0,1 \frac{\text{kg DBO}}{\text{m}^3}\right)}{122 \text{ m}^3} = 0,7 \frac{\text{kg DBO}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$$

Estimar las longitudes del *reactor PBR*

Sugerimos un *reactor PBR* cuadrado de 9 m de lado y un área de 81 m².

Tubería para ingresar el agua residual (afluente)

Sugerimos también leer el siguiente artículo para entender mejor las ideas sobre el ingreso del agua al reactor: A. L. Macías, D. C. Rodríguez, F. J. Molina, «Design of Influent Distribution System in Domestic Wastewater Treatment Units» TecnoLógicas, vol.25, nro.55, e2428, 2022. <https://doi.org/10.22430/22565337.2428>

Estimar la eficiencia de eliminación del *reactor PBR*

$$E = 100 [1 - 0,87 ((\text{TRH})^{-0,5})]$$

$$E = 100 [1 - 0,87 ((7)^{-0,5})] = 67 \%$$

Estimar la DBO del agua residual que sale del *reactor PBR*

$$\text{DBO}_{\text{efluente}} = S_0 - \frac{E S_0}{100}$$

$$\text{DBO}_{\text{efluente}} = 100 - \frac{67 * (100)}{100} = 33 \frac{\text{mgDBO}}{\text{L}}$$

Sugerido por Comisión Nacional del Agua ([2015](#)).



Lugar: Reactores PBR en fibra de vidrio y reactor UASB en concreto en la PTAR San Francisco (2021).

32. OPERACIÓN DEL REACTOR PBR

Ahora que tienes un diseño del *reactor PBR*, nosotros te indicaremos la operación de este *reactor*. Esta operación tiene cuatro significados para estos operarios. El primero, extraer de este *reactor* estos sólidos flotantes, grasas y aceites **diariamente** en verano y según la necesidad en invierno (Fig 66). Aunque esta extracción es posible para *reactores* con la parte superior al aire libre. Para *reactores* en fibra de vidrio, esta extracción es cada **mes**. El segundo, extraer de este *reactor* lodos. Para extraer estos lodos los operarios usarán válvulas ubicadas en el fondo o sistemas de bombeo. El tercero, medir variables fisicoquímicas en este *reactor* **diariamente**. Estas variables son pH y temperatura. El cuarto, estimar los sólidos sedimentables y la alcalinidad de este *reactor PBR* **todos los días**.



Fig 66. Operario limpiando el reactor.

Astrid Lorena Ospina Macías autoriza el uso de estas fotos.

32.1 Extraer sólidos flotantes

Estos operarios limpiarán este *reactor PBR* y extraerán estos sólidos flotantes para reactores de lodos o lechos de arena. Para limpiar este *reactor* estos operarios usarán varios utensilios. Estos utensilios son cedazos, baldes, balanza, lentes de protección, overoles, botas y guantes. He aquí un ejemplo para limpiar este *reactor*.

- Ubicarse en la plataforma del *reactor*.
- Extraer de este *reactor* todos estos sólidos flotantes con un cedazo.
- Limpiar la lama adherida a la pared de este *reactor* con un cepillo.
No limpiar las canaletas de este *reactor* porque en *estas* están los microbios que transforman la materia orgánica ([Fig 67](#)).
- Pesar estos sólidos extraídos en una balanza.
- Cuantificar estos sólidos extraídos ([42.14](#)).
- Adicionar estos sólidos en los reactores de lodos o lechos de arena.



Fig 67. Sólidos flotantes extraídos del reactor PBR.

32.2 Muestrear lodos

Varias PTAR en Antioquia usan estos *reactores PBR* sin válvulas de muestreo. Sin estas válvulas estos operarios no pueden muestrear estos lodos. Entonces estos operarios usarán dos reportes para saber cuando extraer estos lodos de estos *reactores*. Estos reportes son de los sólidos sedimentables y sólidos suspendidos. Aunque nosotros creemos que es esencial que los futuros *reactores PBR* tengan válvulas de muestreo para extraer estos lodos con precisión. He aquí un ejemplo para saber cuando extraer estos lodos de estos *reactores*.

- Estimar estos sólidos sedimentables y suspendidos de este *reactor PBR*.
- Estimar la eficiencia de eliminación de los sólidos suspendidos. Si no tienes estos reportes de estos sólidos extraer lodos de estos *reactores PBR* cada **4 meses**.

32.3 Extraer lodos

He aquí un ejemplo para extraer estos lodos del *reactor PBR*.

- Abrir estas válvulas de este *reactor* para extraer los lodos ([Fig 68](#)). Las válvulas son de apertura y cierre rápido.
- Iniciar estos sistemas de bombeo de este *reactor* para bombear estos lodos a los lechos de arena.

- Ver que estos lodos ingresen al lecho de arena (Fig 69).



Fig 68. Válvulas del reactor PBR.



Fig 69. Ingreso de lodos a los lechos.

32.4 Medir pH y temperatura

Estos operarios usarán varios utensilios para medir variables fisicoquímicas. Estos utensilios son jarras plásticas, beakers y un pH-metro. Estas variables son el pH, la temperatura. Para medir estas variables en este *reactor PBR* imitar el ejemplo del reactor UASB (42.5).

32.5 Estimar sólidos sedimentables

Para estimar estos sólidos sedimentables de este *reactor PBR* en conos Imhoff imitar el ejemplo del reactor UASB (42.16). Estimar estos sólidos en el efluente del *reactor*.

32.6 Estimar alcalinidad

Estos operarios usarán varios utensilios para estimar la alcalinidad. Estos utensilios son bureta, soporte para bureta, ácido sulfúrico, pH-metro y un beaker. Para estimar esta alcalinidad del agua residual que sale de este *reactor PBR* imitar el ejemplo del reactor UASB (42.15).

32.7 Variables fisicoquímicas

He aquí un resumen de los intervalos de varias variables fisicoquímicas para *reactores PBR* (Tabla 28).

Tabla 28. Variables fisicoquímicas en reactores PBR.

Sugerencia en	Unidades	Intervalo	Sugerido por
Temperatura	°C	10–20	(Metcalf & Eddy, 2014)
pH	Unidades de pH	6,8–7,2	(Von Sperling & Chernicharo, 2005)
pH para bacterias metanogénicas	Unidades de pH	6,6–7,4	
Relación DBO/N	mg/L	20:1	(Comisión Nacional del Agua, 2016)
DBO/P	mg/L	100:1	
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	1.500–5.000	
Relación AI/AT	mg/L CaCO ₃	≤0,3	(Ripley et al., 1986)
DQO	mg/L	375–12.000	Comisión Nacional del Agua, 2016)
Ácidos grados volátiles (ácido acético)	mg/L	50–300	
Sulfuros	mg/L	50–100	(Von Sperling & Chernicharo, 2005)
Amoniaco	mg/L	50–200	
Nitrógeno amoniacal	mg/L	<1.000	
Varios metales			
FeCl ₂	mg	1,0	(Comisión Nacional del Agua, 2016)
CoCl ₂	mg	0,1	
NiCl ₂	mg	0,1	
Cloruro de zinc	mg	0,1	



Lugar: reactores UASB, reactores PBR y sedimentadores secundarios de la PTAR San Vicente Ferrer (2021).

Página en blanco

8

Reactores anaerobios de lodos

Objetivos principales

- Ubicar el *reactor anaerobio* de lodos.
- Describir el *reactor anaerobio* de lodos.
- Diseñar el *reactor anaerobio* de lodos.
- Operar el *reactor anaerobio* de lodos.



Lugar: reactor anaerobio de lodos de la PTAR San Carlos (2019).

33. UBICACIÓN DEL REACTOR ANAEROBIO DE LODOS

Ahora que sabes la manera como operar este *reactor PBR*, nosotros te hablaremos de los *reactores anaerobios de lodos* (*anaerobic sludge digesters*, en inglés). Estos *reactores* son uno de los procesos biológicos unitarios usados en una *PTAR* (Fig 70). Estos *reactores* también son una tecnología para estabilizar los sólidos sedimentados del sedimentador primario. Ubicamos estos *reactores* próximos al sedimentador primario con placas inclinadas por dos razones. La primera, para reducir la longitud de tubería. La segunda, para prevenir que las bombas funcionen forzadas.

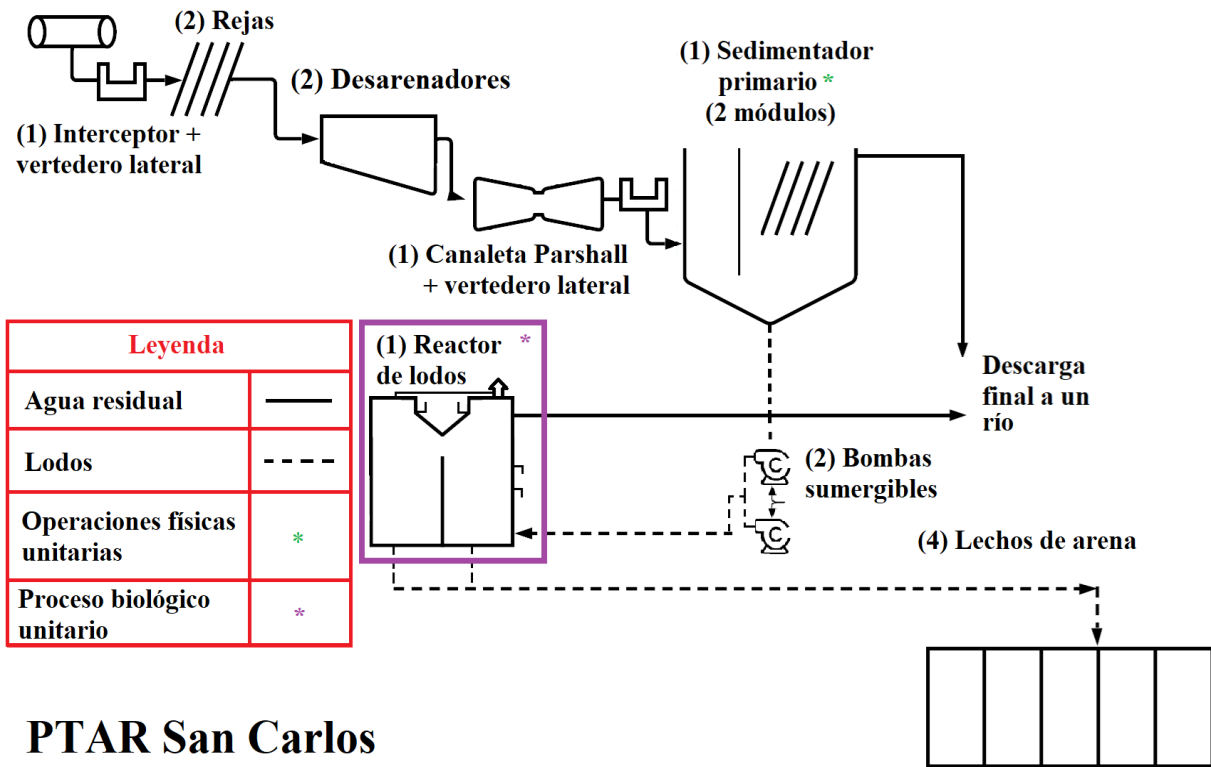


Fig 70. Ubicación del reactor de lodos en una PTAR.

34. DESCRIPCIÓN DEL REACTOR ANAEROBIO DE LODOS

Ahora que ubicas este *reactor anaerobio de lodos*, nosotros te describiremos el objetivo de este *reactor*. Este objetivo es estabilizar sólidos sedimentados del sedimentador primario sin oxígeno. Para alcanzar este objetivo usamos *reactores* de una fase o de varias fases. Pero hablaremos de estas fases más adelante. Estos *reactores* son parecidos a los reactores UASB, aunque son más pequeños ([Fig 71](#)). Y este *reactor* recibe los sólidos del sedimentador para transformarlos en CH_4 y CO_2 y más microbios. Este *reactor* también tiene dos intervalos de disminución de sólidos. El primero, está entre 30 y 40 % de sólidos totales. El segundo, está entre 40 y 60 % de sólidos volátiles (Von Sperling & Chernicharo, [2005](#)). Los *reactores anaerobios* disminuyen la materia orgánica biodegradable y mejoran la deshidratación del lodo.



Fig 71. Reactor de lodos.

Los *reactores* estabilizan los lodos para prevenir olores putrefactos. Para estabilizar estos lodos existen tres métodos. El primero, biológicos que son aerobios o anaerobios. El segundo, químicos que usan cloro y cal. El tercero, físicos que usan temperatura. Para elegir uno de estos métodos consideramos la última tecnología usada para los lodos, los costos, y la topografía del lugar. El método más usado es el biológico anaerobio.

La Comisión Nacional del Agua (2019) clasifica estos *reactores anaerobios de lodos* en una fase o varias fases. Los *reactores* de una fase tienen un tanque. Este tanque recibe concentraciones medias a altas de sólidos. *Estos* son de baja tasa y su forma es cilíndrica. Y no tienen calentamiento. Los *reactores* de varias fases tienen dos tanques en serie. El primer tanque tiene calentadores y agitadores. En este primer tanque ocurre la fermentación. El segundo tanque no tiene calentadores. Y en este segundo tanque ocurre la separación de sólidos y líquido.

Qasim & Zhu (2018) clasifican estos *reactores* de varias fases por la digestión. Estos *reactores* funcionan con un pH de 7,0 y la misma temperatura. Esta temperatura es mesofílica o termofílica. Aunque este primer *reactor* tiene un tiempo de retención de estos sólidos mayor que el del segundo *reactor*.

Nosotros encontramos que varias PTAR en Antioquia usan estos *reactores anaerobios de lodos*. El uso de estos *reactores* está conectado con el uso de sedimentadores. Estos *reactores* son rectangulares. Y tienen tres partes principales (Fig 72). La primera, de ingreso de lodos en el fondo. Esta primera parte requiere de tuberías para ingresar distribuidos los lodos. La segunda, de digestión anaerobia activa desde el fondo hasta la mitad de estos *reactores*. Esta segunda parte tiene válvulas afuera de estos *reactores* para muestrear lodos. La tercera, de salida de sólidos flotantes a través de canaletas.

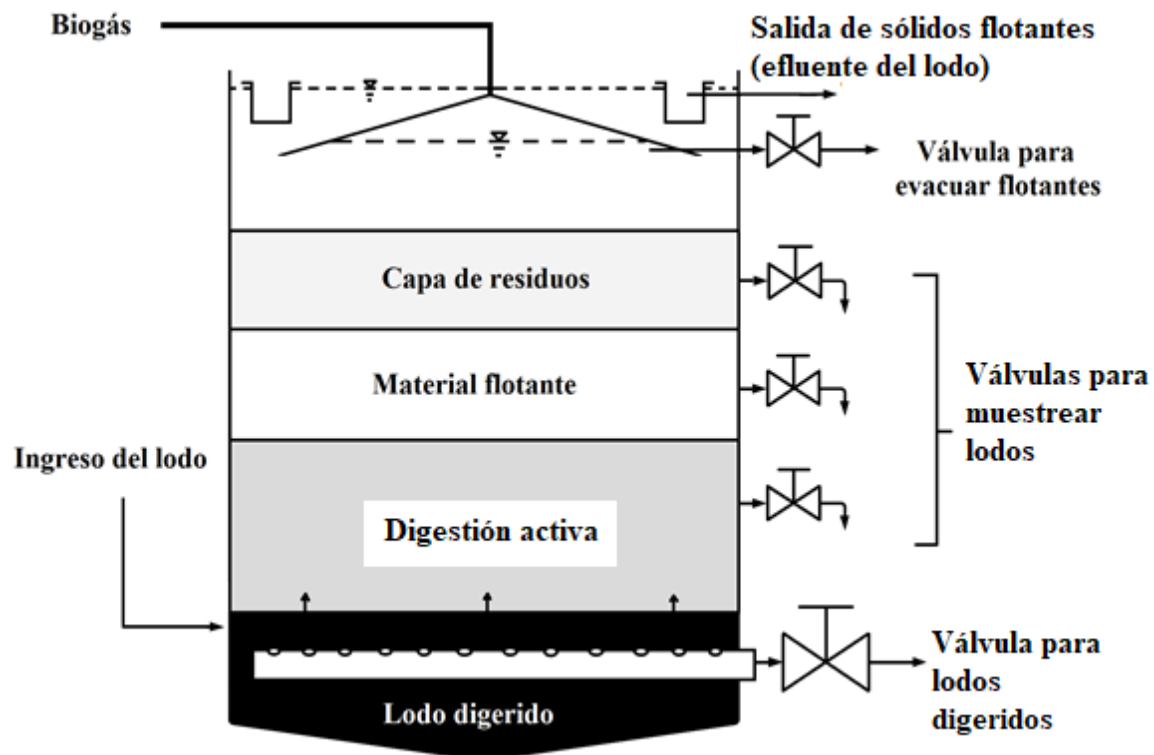


Fig 72. Esquema de un reactor anaerobio de lodos.

Sugerido por Qasim & Zhu (2018).

Nosotros encontramos que los *reactores anaerobios de lodos* tienen dos errores usuales en Antioquia. El primero, tuberías pequeñas para ingresar los lodos por el fondo. El segundo, evacuación excesiva de sólidos flotantes a ríos cuando los operadores no sacan los lodos frecuentemente. Estos errores tienen dos efectos. El primero, obstruyen el paso de los lodos. El segundo, disminuyen la eficiencia de eliminación porque varios sólidos salen de estos *reactores*.

Aunque varias variables fisicoquímicas también tienen una conexión con esta eficiencia en la digestión anaerobia. Estas variables son la temperatura, el pH, nutrientes, sólidos totales y volátiles, ácidos grasos volátiles, sulfuros, nitrógeno amoniacal, fosfatos totales, metales, sólidos flotantes y espumas (Comisión Nacional del Agua, 2015). Y esta conexión aumenta o disminuye la eficiencia de eliminación del *reactor anaerobio de lodos*.

He aquí varias sugerencias para diseñar estos *reactores*.

34.1 Tiempo de retención hidráulico de los sólidos

Von Sperling & Chernicharo (2005) afirman que estos *reactores de lodos* tienen un intervalo de tiempos de retención. Este intervalo esta entre **18 y 15 días**. He aquí la ecuación que usamos para estimar este tiempo.

$$T_r(h) = \frac{\text{Volumen (m}^3\text{)} \left(\frac{24 \text{ h}}{d}\right)}{\text{caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{d}\right)}$$

He aquí varias sugerencias de tiempos de retención hidráulico para diseñar estos *reactores de lodos* (Tabla 29).

Tabla 29. Intervalos usados para diseñar reactores de lodos.

Temperatura (°C)	Tiempo de retención mínimo (d)	Tiempo de retención para disminuir sólidos (d)
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

Sugerido por Metcalf & Eddy (2014).

34.2 Tasa de carga de los sólidos volátiles para reactores de una fase

La Comisión Nacional del Agua (2019) dice que la tasa de carga de sólidos es la relación entre la masa de sólidos volátiles adicionada cada día y el volumen de este *reactor de lodos*. Estos *reactores* tienen un intervalo de carga de sólidos volátiles. Este intervalo está entre **1,9** y **3,2 kg SSV/m³·d**.

34.3 Disminución de sólidos volátiles

Qasim & Zhu (2018), Metcalf & Eddy (2014) y La Comisión Nacional del Agua (2019) usan la siguiente ecuación empírica para estimar la disminución de sólidos volátiles de estos *reactores de lodos*.

$$V_d = 13,7 \ln (T_r) + 18,9$$

Donde:

V_d = disminución de sólidos volátiles (%)

T_r = tiempo de retención hidráulico de los sólidos (d)

Metcalf & Eddy (2014) estiman el porcentaje de disminución de estos sólidos volátiles de estos *reactores de lodos* con el tiempo de estabilización (Tabla 30).

Tabla 30. Disminución de sólidos

Tiempo de estabilización (días)	Disminución de sólidos volátiles (%)
30	50–65
20	50–60
15	45–50

Sugerido por Metcalf & Eddy (2014).

34.4 Producción de biogás

Von Sperling & Chernicharo (2005) afirman que estos *reactores de lodos* tienen una producción de biogás de **0,8 m³/kg SV** que equivale a **25 L/hab·d.**

34.5 Cantidad calorífica de los lodos del agua residual

Von Sperling & Chernicharo (2005) afirman que los lodos del agua residual que ingresa a estos *reactores* tienen un intervalo para producir calor. Este intervalo está entre **11 y 23 MJ/kg ST**. Para los lodos estabilizados de manera anaerobia este intervalo está entre **6 y 13 MJ/kg ST**.

He aquí más sugerencias para diseñar estos reactores de lodos ([Tabla 31](#)).

Tabla 31. Intervalos usados para diseñar reactores de lodos.

Sugerencias en	Unidades	Intervalos
Tiempo de retención	(θ_c) , d	18–25
Carga orgánica volumétrica	kg SV/m ³ ·d	0,8–1,6
Carga volumétrica de sólidos totales	kg SST /m ³ ·d	1,0–2,0
Concentración de sólidos en el afluente del lodo crudo	porcentaje (%)	3–8
Fracción de sólidos volátiles en el lodo crudo	porcentaje (%)	70–80
Eficiencia de disminución de sólidos totales	porcentaje (%) ST	30–35
Eficiencia de disminución de sólidos volátiles	porcentaje (%) SV	40–55
Producción de biogás	m ³ /kg SV disminuidos	0,8–1,1
Cantidad calorífica del biogás	MJ/m ³	23,3
Producción de lodo estabilizado	g ST hab·d	38–50
Producción de biogás	L hab·d	20–30
Cantidad de calentamiento del lodo crudo	MJ/kg ST	15–25
Cantidad de calentamiento del lodo estabilizado	MJ/kg ST	8–15

Sugerido por Von Sperling & Chernicharo ([2005](#)).



Lugar: reactor de lodos de la PTAR Granada (2021).

35. DISEÑO DEL REACTOR DE LODOS

Ahora que tienes una descripción breve de estos *reactores de lodos*, nosotros te indicaremos como diseñar *estos reactores*. Von Sperling & Chernicharo (2005) sugieren usar el caudal de lodos del sedimentador primario para diseñar estos *reactores*. He aquí un ejemplo para diseñar estos *reactores* para estabilizar lodos.

Diseñar un *reactor anaerobio* para estabilizar una combinación de lodo primario y secundario con un caudal de lodo de $Q = 15 \text{ m}^3/\text{d}$. La carga de lodo de este *reactor* es de 500 kg ST/d . Además este lodo del *reactor* tiene una relación de SV/ST de 0.77.

Estimar el volumen del *reactor*

Carga orgánica volumétrica (COV)

$$1,4 \frac{\text{kg SV}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$$

Volumen para el biogás en el *reactor* de lodos

15 % del volumen necesario para estabilizar

Estimar la carga de sólidos volátiles (CSV)

$$\text{CVS} = \text{carga del lodo} * \text{la relación } \frac{\text{SV}}{\text{ST}}$$

$$\text{CVS} = 500 \frac{\text{kg ST}}{\text{d}} * 0,77 \frac{\text{kg SV}}{\text{kg ST}} = 385 \frac{\text{kg SV}}{\text{d}}$$

Estimar la relación entre CSV y COV para estimar el volumen del reactor anaerobio de lodos

$$V_{\text{reactor}} = \frac{\text{CSV}}{\text{COV}}$$

$$V_{\text{reactor}} = \frac{385 \frac{\text{kg SV}}{\text{d}}}{1,4 \frac{\text{kg SV}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}} = 275 \text{ m}^3$$

Para estimar el volumen total de este *reactor* incluimos también el volumen para la cámara de biogás. Entonces:

$$V_t = V_{\text{reactor}} * (\% \text{ de volumen para el biogás})$$

$$V_t = 275 \text{ m}^3 * 0,15 = 42 \text{ m}^3$$

Volumen total del *reactor*

$$V_t = 275 \text{ m}^3 + 42 \text{ m}^3 = 317 \text{ m}^3$$

Estimar el tiempo de retención hidráulico (TRH) del *reactor*

$$\text{TRH} = \frac{V}{Q}$$

$$\text{TRH} = \theta_c = \frac{275 \text{ m}^3}{15 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 18 \text{ d}$$

Von Sperling & Chernicharo (2005) sugieren usar cargas altas de sólidos volátiles en estos *reactores* para reducir el TRH a menos de 25 días. Si usas cargas altas previenes costos de construcción altos.

Estimar la concentración de SV, SF y ST en el agua que ingresa (afluente) y sale (efluente) del lodo de este *reactor*

Carga de lodo combinado:

$$500 \frac{\text{kg ST}}{\text{d}}$$

Para estimar los sólidos volátiles (SV) usamos la siguiente ecuación:

$$SV_{af} = \frac{SV}{ST} * ST_{af}$$

$$SV_{af} = 0,77 \frac{\text{kg SV}}{\text{kg ST}} * 500 \frac{\text{kg ST}}{\text{d}} = 385 \frac{\text{kg SV}}{\text{d}}$$

Para estimar los sólidos fijos (SF) usamos la siguiente ecuación:

$$SF_{af} = \left(1 - \frac{SV}{ST}\right) * ST_{af}$$

$$SF_{af} = \left(1 - 0,77 \frac{\text{kg SV}}{\text{kg ST}}\right) * 500 \frac{\text{kg ST}}{\text{d}} = 115 \frac{\text{kg SF}}{\text{d}}$$

Los SF no cambian, pero los SV son disminuidos parcialmente en la estabilización. Entonces:

La cantidad de SF en el efluente del *reactor* es:

$$SF_{af} = SF_{ef} = 115 \frac{\text{kg SF}}{\text{d}}$$

La cantidad de SV en el efluente del *reactor* es:

$$SV_{ef} = (1 - \text{eficiencia de eliminación de SV}) * (SV_{af})$$

$$SV_{ef} = (1 - 0,50) * \left(385 \frac{\text{kg SV}}{\text{d}} \right) = 193 \frac{\text{kg SV}}{\text{d}}$$

La cantidad de sólidos totales (ST) en el efluente del *reactor* es:

$$ST_{ef} = (SF_{ef}) + (SV_{ef})$$

$$ST_{ef} = 115 \frac{\text{kg SF}}{\text{d}} + 193 \frac{\text{kg SV}}{\text{d}} = 308 \frac{\text{kg ST}}{\text{d}}$$

Asumir que el caudal del efluente es el mismo que el del afluente

$$Q_{af} = Q_{ef} = 15 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

La concentración de ST en el efluente del *reactor* es:

$$\text{Concentración (ST)} = \frac{\text{carga de ST}}{Q}$$

$$\text{Concentración (ST)} = \frac{\left(308 \frac{\text{kg ST}}{\text{d}}\right) * \left(1.000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}\right)}{15 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 20.533 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Concentración (ST)} = 20.533 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 2,5\%$$

Producción de biogás

Balance de calor en el reactor

- La cantidad calorífico del lodo crudo es:

$$23 \frac{\text{MJ}}{\text{kg ST}}$$

- La cantidad calorífica del lodo estabilizado es:

$$13 \frac{\text{MJ}}{\text{kg ST}}$$

- La producción de biogás es:

$$0,8 \frac{\text{m}^3 \text{ de biogás}}{\text{kg SV disminuidos}}$$

- La cantidad calorífica del biogás es:

$$23,3 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

- Producción específica de biogás:

$$0,8 \frac{\text{m}^3 \text{ de biogás}}{\text{kg SSV disminuidos}}$$

$$V_{\text{biogás}} = (\text{SV}_{\text{disminuidos}}) * (\text{producción de biogás})$$

$$V_{\text{biogás}} = \left(193 \frac{\text{kg SV}}{\text{d}} \right) * \left(0,8 \frac{\text{m}^3}{\text{kg SV}} \right) = 154 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Note que la estimación del biogás producido debe ser con los sólidos volátiles disminuidos y no con los sólidos volátiles del efluente. Para este ejercicio los números son iguales porque la eficiencia es del 50 %. Pero si la eficiencia es diferente el número cambia.

Cantidad calorífica del lodo crudo que ingresa al reactor:

$$\text{Calorífica}_{\text{Lc}} = (\text{carga del lodo}) * (\text{Cantidad calorífica}_{\text{Lc}})$$

$$\text{Calorífico}_{\text{Lc}} = \left(500 \frac{\text{kg ST}}{\text{d}} \right) * \left(23 \frac{\text{MJ}}{\text{kg ST}} \right) = 11.500 \frac{\text{MJ}}{\text{d}}$$

Cantidad calorífica del biogás:

$$\text{Calorífica}_{\text{biogás}} = (V_{\text{biogás}}) * (\text{Cantidad calorífica}_{\text{biogás}})$$

$$= \left(154 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) * \left(23,3 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \right) = 3.588 \frac{\text{MJ}}{\text{d}}$$

Cantidad calorífica del lodo estabilizado:

$$\text{Cantidad calorífica}_{Le} = (ST_{ef}) * (\text{Cantidad calorífico}_{Le})$$

$$= \left(308 \frac{\text{kg ST}}{\text{d}} \right) \times \left(13 \frac{\text{MJ}}{\text{kg ST}} \right) = 4.004 \frac{\text{MJ}}{\text{d}}$$

Note que este número 4.004 MJ/d muestra la energía remanente en el lodo luego de estabilizar.

Sugerido por Von Sperling & Chernicharo (2005) y La Comisión Nacional del Agua (2019).



Lugar: sedimentador primario, reactor anaerobio de lodos y lechos de arena de la PTAR San Carlos (2019).

36. OPERACIÓN DEL REACTOR ANAEROBIO DE LODOS

Ahora que tienes un diseño del *reactor de lodos*, nosotros te indicaremos la operación de este *reactor*. Esta operación tiene cuatro significados para estos operarios. El primero, extraer de este *reactor* estos sólidos flotantes, grasas y aceites **todos los días** en verano y según la necesidad en invierno (Fig 73). El segundo, muestrear de este *reactor* lodos para saber cuando extraerlos. Para muestrear los lodos estos operarios usarán válvulas ubicadas a diferentes alturas. Y para extraer estos lodos los operarios usarán válvulas en el fondo o los sistemas de bombeo. El tercero, medir variables fisicoquímicas en este *reactor* **todos los días**. Estas variables son pH y temperatura. El cuarto, estimar los sólidos sedimentables y la alcalinidad de este *reactor* **diariamente**.



Fig 73. Operario limpiando el reactor de lodos.

Astrid Lorena Ospina Macías autoriza el uso de estas fotos.

36.1 Extraer sólidos flotantes

Los operarios limpiarán este *reactor* y extraerán estos sólidos gruesos, flotantes, grasas y aceites para disposición final. Porque los *reactores* tienen todavía sólidos gruesos que las rejillas y el sedimentador no eliminan. Para limpiar este *reactor* estos operarios usarán varios utensilios. Estos utensilios son cedazos, baldes, balanza, lentes de protección, overoles, botas y guantes. He aquí un ejemplo para limpiar este *reactor*.

- Ubicarse en la plataforma del *reactor*.
- Extraer de este *reactor* todos estos sólidos flotantes, grasas y aceites con un cedazo.
- Limpiar la lama adherida a la pared de este *reactor* con un cepillo. No limpiar las canaletas de este *reactor* porque en estas canaletas están los microbios que transforman la materia orgánica (Fig 74).
- Pesar estos sólidos flotantes, grasas y aceites extraídos en una balanza.
- Cuantificar estos sólidos extraídos (42.19).
- Adicionar estos sólidos en los lechos de arena.



Fig 74. Sólidos flotantes extraídos del reactor.

36.2 Muestrear lodos

Estos operarios usarán varios utensilios para muestrear estos lodos de este *reactor*. Estos utensilios son baldes, jarras y beakers. He aquí un ejemplo para muestrear estos lodos.

- Usar las válvulas ubicadas a diferentes alturas para muestrear estos lodos (42.22). La Comisión Nacional del Agua (2016) sugiere muestrear en la tarde porque este lodo ocupa más lugar de este *reactor*.
- Coger una muestra del lodo por cada válvula de este *reactor*.
- Adicionar 1.000 mL de cada muestra en un beaker (Fig 75).
- Medir pH y temperatura a estos lodos (42.23).
- Esperar 20 minutos para que los lodos de cada muestra sedimenten.
- Cuantificar los mL de estos lodos sedimentados en cada beaker.
- Extraer lodos de este *reactor* si estos beakers tienen más de la mitad de estos lodos. No extraer todo el lodo de este *reactor* para no deteriorar la eficiencia de eliminación.
- Estimar la eficiencia de eliminación de los sólidos suspendidos.



Fig 75. Lodo del reactor.

Astrid Lorena Ospina Macías autoriza el uso de estas fotos.

Note que si estos lodos alcanzan **la mitad** de la altura útil de este *reactor* extraer estos lodos. Von Sperling & Chernicharo (2005) dicen que estos *reactores* tienen un tiempo de retención de estos lodos. Este tiempo es de 30 días para estabilizar los lodos eliminados del *reactor*.

Nosotros pusimos en marcha varios *reactores anaerobios de lodos* en varias PTAR en Antioquia. Aprendimos que los operarios queman biogás del *reactor* con más frecuencia que los reactores UASB (42.20). También aprendimos que los operarios extraen los lodos de *reactores* **cada quince días** para prevenir que los lodos salgan a través de las canaletas. Para extraer estos lodos estos operarios usan válvulas y tuberías que conectan con los lechos de arena. Y varias PTAR en Antioquia usan lechos de arena con un área superficial muy pequeña (Alzate et al., 2021). Entonces dificultan la deshidratación de los lodos.

36.3 Extraer lodos

Para extraer estos lodos digeridos del *reactor* imitar el ejemplo del reactor UASB. Usar las válvulas de apertura y cierre rápido.

36.4 Medir pH y temperatura

Estos operarios usarán varios utensilios para medir variables fisicoquímicas. Estos utensilios son jarras plásticas, beakers y un pH-

metro. Estas variables son el pH, la temperatura. Para medir estas variables en este *reactor* imitar el ejemplo del reactor UASB (42.23).

36.5 Estimar sólidos sedimentables

Para estimar estos sólidos sedimentables de este *reactor* en conos Imhoff imitar el ejemplo del reactor UASB (42.24).

36.6 Estimar alcalinidad

Estos operarios usarán varios utensilios para estimar la alcalinidad. Estos utensilios son bureta, soporte para bureta, ácido sulfúrico, pH-metro y un beaker. Para estimar esta alcalinidad del agua residual que sale de este *reactor* imitar el ejemplo del reactor UASB (42.15).

36.7 Variables fisicoquímicas

He aquí un resumen de variables fisicoquímicas medidas en los sólidos flotantes de reactores anaerobios de lodos (Tabla 32). Estos sólidos saldrán en el efluente si no extraemos los lodos con frecuencia.

Tabla 32. Variables fisicoquímicas medidas en sólidos flotantes.

Sugerencia en	Unidades	intervalo
SST	mg/L	2.000–15.000
DBO ₅	mg/L	500–10.000
DQO	mg/L	1.500–30.000
Nitrógeno amoniacal N	mg/L	400–1.000
Fósforo total P	mg/L	300–1.000

Sugerido por Qasim & Zhu (2018).

He aquí un resumen de los intervalos de varias variables fisicoquímicas para *reactores anaerobios de lodos* (Tabla 33).

Tabla 33. Variables fisicoquímicas en reactores de lodos.

Sugerencia en	Unidades	Intervalo	Sugerido por
Temperatura termofílica	°C	30–38	(Von Sperling & Chernicharo, 2005)
pH	Unidades de pH	7,0–7,2	
pH para bacterias metanogénicas	Unidades de pH	6,6–7,4	
Potencial redox (ORP) a pH de 7.	mV	-265	
Potencial redox (ORP)	mV	-200	(Liu et al., 2019)
Anaerobio: fermentación (ORP)	mV	-200 a -50	(Water Environment Federation, 2008; Liu et al., 2019).
Anóxico: desnitrificación (ORP)	mV	-50 a +50	(Water Environment Federation, 2008)
Aerobio: DBO Carbonácea	mV	+50 a 225	
Aerobio: Nitrificación	mV	+100 a 325	
DQO/N	mg/L	<70	(Comisión Nacional del Agua, 2019)
DQO/P	mg/L	<350	
DBO/N	mg/L	20:1	
DBO/P	mg/L	100:1	
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	1.500–5.000	(Ripley et al., 1986)
Relación AI/AT	mg/L CaCO ₃	≤0,3	
Ácidos grados volátiles (ácido acético)	mg/L	50–300	(Comisión Nacional del Agua, 2019; Davis, 2020)
Sulfuros	mg/L	50–100	(Von Sperling & Chernicharo, 2005)
Amoniaco	mg/L	50–200	
Nitrógeno amoniacal	mg/L	<1.000	



Lugar: reactor de lodos de la PTAR Marinilla (2020).

Página en blanco

9

Lechos de arena

Objetivos principales

- Ubicar los *lechos de arena*.
- Describir los *lechos de arena*.
- Diseñar los *lechos de arena*.
- Operar los *lechos de arena*.



Lugar: lechos de arena de la PTAR San Vicente Ferrer (2021).

37. UBICACIÓN DE LOS LECHOS DE ARENA

Ahora que sabes la manera como operar este *reactor de lodos*, nosotros te hablaremos de los *lechos de arena* (*sand beds*, en inglés). Estos *lechos* son una de las operaciones físicas unitarias usadas en estas PTAR (Fig 76). Y estos *lechos* son la tecnología más usada para deshidratar estos lodos de varias tecnologías. Estas tecnologías son reactores UASB, reactores PBR y reactores de lodos. Ubicamos estos *lechos* en un lugar apropiado para conectar fácil todas las tuberías de lodos de estas tecnologías en las PTAR. Estos *lechos* son la última operación física unitaria usada en estas PTAR.

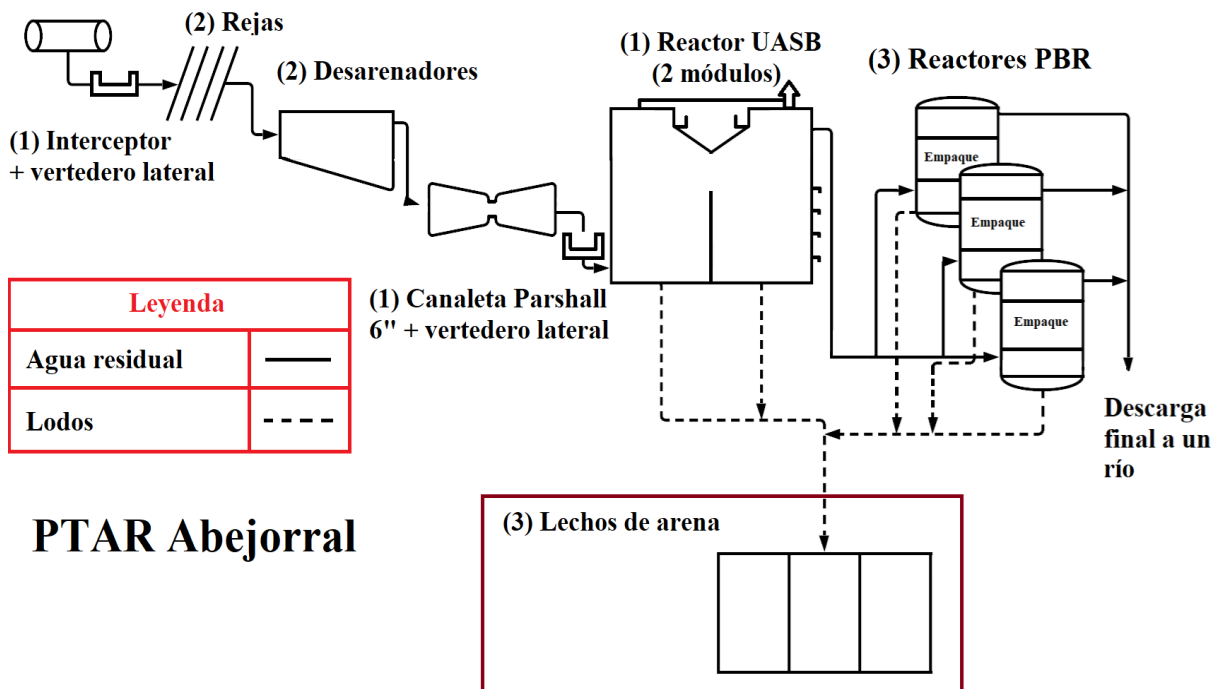


Fig 76. Ubicación de los lechos de arena en una PTAR.

38. DESCRIPCIÓN DE LOS LECHOS DE ARENA

Ahora que ubicas estos *lechos de arena*, nosotros te describiremos el objetivo de estos *lechos*. Este objetivo es secar estos lodos de las tecnologías usadas en estas PTAR. Para alcanzar este objetivo usamos compartimentos cuadrados o rectangulares en lugares al aire libre para secar estos lodos (Fig 77). Compartimentos significa *lechos*. Y secar es extraer el agua de los lodos.



Fig 77. Lechos de arena.

La Environmental Protection Agency (1979) y Davis (2020) dicen que estos *lechos* de arena son la tecnología más usada para secar estos lodos

en Estados Unidos de América. Estos *lechos* son usados en pequeñas PTAR porque son fáciles de limpiar. En 1979, 77 % de las PTAR en Estados Unidos de América usaron *lechos* de arena.

Metcalf & Eddy (2014) y Qasim & Zhu (2018) clasifican estos *lechos* en *lechos* de arena, de pavimento, de medio artificial y vacíos. Aquí solo hablaremos de los *lechos* de arena. Los *lechos* de arena son cuadrados o rectangulares. Tienen entre cuatro y cinco capas de grava y arena. También tienen una tubería perforada en el fondo de la primera capa de grava. Estas capas varían según el tamaño y la cantidad de grava y arena desde el fondo hasta arriba del *lecho* (Fig 78).

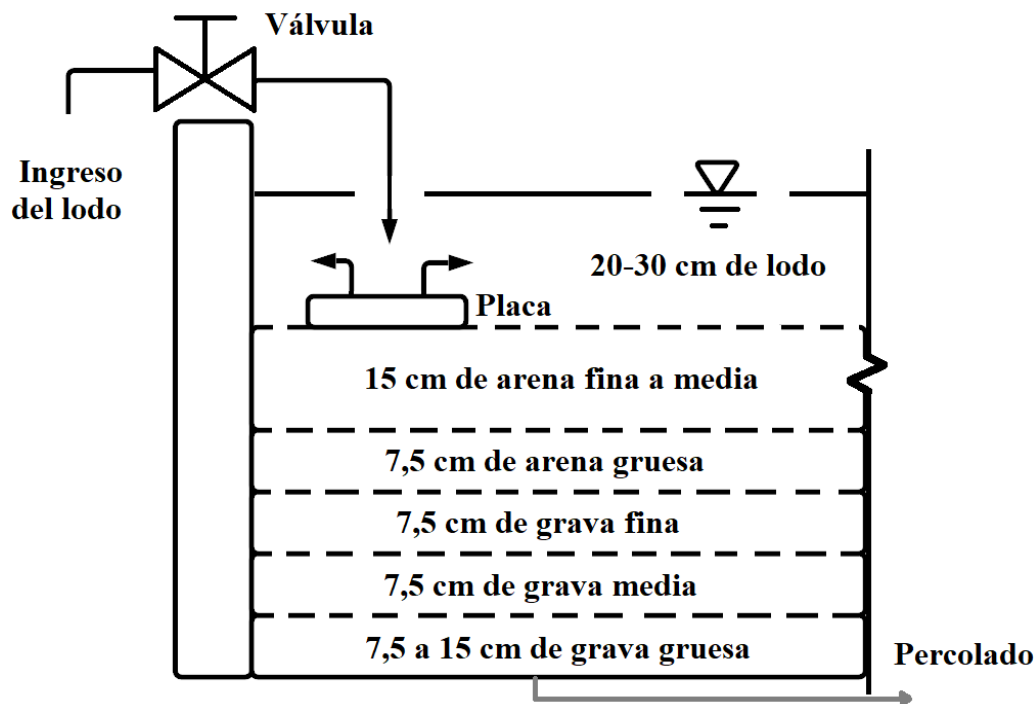


Fig 78. Ubicación de las capas de arena en el lecho.

Sugerido por Qasim & Zhu (2018).

Aunque nosotros encontramos que varias PTAR en Antioquia usan *lechos* de arena. Varios de estos lechos tienen 4,0 m de ancho, 4,0 m de largo y 1,50 m de altura (Fig 79). Estos lechos tienen un error de diseño usual. Este error es que son muy pequeños debido a la producción de lodo de la PTAR (Alzate et al., 2021). Los *lechos* pequeños interrumpen la extracción intermitente de estos lodos de reactores UASB, reactores PBR y reactores de lodos. Es evidente estas PTAR no tienen un estándar para diseñar estos lechos. He aquí varias sugerencias para prevenir este error en los futuros *lechos* de arena.



Fig 79. Lecho con lodos de un reactor UASB.

Qasim & Zhu (2018) sugiere que:

- Las capas de arena tienen entre **20 y 45 cm** de profundidad, un coeficiente de uniformidad ≤ 4 y un tamaño efectivo entre **0,3 y 0,75 mm**.
- El tamaño de las capas de grava tiene entre **20 y 30 cm** de profundidad y soporta la arena.
- Las tuberías perforadas tienen entre **150 y 200 mm** de diámetro y espaciadas entre **2,5 a 6,0 m** del centro del *lecho*.
- Cada capa del *lecho* estará inundada por lodo con una profundidad entre **20 y 30 cm** para secar del lodo entre **10 y 20 días**. El agua percolada retornará a la entrada de la PTAR.
- El agua percolada del *lecho* tiene una DBO₅ de **40 mg/L** y una DQO de **350 mg/L** para lodo anaerobio digerido.
- El fondo del *lecho* de arena tiene un espesor de **0,3 m**, una permeabilidad **$<1 \times 10^7$ cm/s** y una pendiente mínima de **1 %** hacia el desagüe. Este *lecho* requiere de una capa de hormigón impermeable. Y de un nivel freático a menos de **1,2 m** del fondo.
- El muro exterior de este *lecho* tiene una altura apropiada. Esta altura tiene una distancia vertical desde el fondo hasta el borde libre de este *lecho*. Este borde libre esta entre **0,3 y 0,9 m** por encima de la capa de arena o del nivel del suelo, lo que sea más alto.

- La capa lodos aumentará sobre la capa de arena. Entonces, el operario extraerá manualmente los lodos secos con una pala. Esta capa de lodo tiene entre **20 y 30 %** de sólidos, y la tasa de captura de sólidos es mayor al **90 %**.
- La capa de lodos inicial tendrá olores ofensivos.
- Este *lecho* de grava y arena tiene cubierta.
- La tasa de carga de sólidos secos está entre **50 y 125 kg/m²·año** para *lechos* de arena sin cubierta y entre **60 y 200 kg/m²·año** para *lechos* con cubierta.
- El área de estos *lechos* de arena usada per cápita está entre **0,14 y 0,23 m²** para lechos sin cubierta y entre **0,09 y 0,2 m²** para lechos con cubierta.

He aquí la producción de lodos de varias tecnologías para diseñar estos lechos ([Tabla 34](#)).

Tabla 34. Producción de lodos en varias tecnologías de tratamiento.

Nivel de tratamiento	Tecnología	Producción de lodos		
		gSS/hab·d	Lodo digerido por un proceso anaerobio gSS/hab·d	Volumen de lodo (L/hab·d)
Tratamiento primario	Sedimentador primario	35–45	25–28	0,6–2,2
	Tanque séptico	20–30	–	0,3–1,0
	Reactor UASB	12–18	–	0,2–0,6
Tratamiento secundario	Laguna anaerobia	20–45	–	0,1–0,3
	Laguna facultativa	6–10	–	0,05–0,15
	Reactor PBR	7–9	–	0,2–1,8
	Filtro percolador	8–14	–	0,2–0,5
	Sedimentador secundario (del filtro percolador)	20–30	–	0,8–3,0
	Sedimentador secundario (de lodos activados convencional)	25–35	16–22	2,5–6,0

Sugerido por Von Sperling & Chernicharo ([2005](#)). Note que hab: habitante.



Lugar: lecho de arena de la PTAR Sonsón (2019).

39. DISEÑO DE LOS LECHOS DE ARENA

Ahora que tienes una descripción breve de estos *lechos de arena*, nosotros te indicaremos como diseñar *estos lechos*. Von Sperling & Chernicharo (2005) sugieren un método para diseñar los lechos. Este método usa la producción de lodos de varias tecnologías. Nosotros estamos de acuerdo con ellos porque prevenimos que estos *lechos* sean pequeños. Pero este método funciona para poblaciones menores a 30.000. Sí tienes una población mayor este método muestra áreas muy grandes para los lechos. He aquí un ejemplo para diseñar los *lechos* para secar los lodos.

39.1 Lechos de arena para sedimentadores y reactores PBR

He aquí un ejemplo para diseñar estos *lechos* de arena.

Una PTAR tiene dos tecnologías principales. La primera, un sedimentador primario y un reactor anaerobio de lodos. La segunda, un reactor PBR. Este sedimentador primario tiene una producción per cápita de «sólidos sedimentables porque aún no es lodo» entre 25 y 28 gr SS/ hab·día. Esta producción del sedimentador acontece después del reactor anaerobio de lodos que estabiliza los sólidos sedimentados de este sedimentador. Este reactor PBR tiene una producción de lodo entre

7 y 9 gr SS/ hab·día. Este sedimentador primario y este reactor PBR también tienen una producción volumétrica per cápita. Esta producción de este sedimentador está entre 0,6 y 2,2 L/ hab·día. Esta producción de este reactor PBR está entre 0,2 y 1,8 L/ hab·día.

Para estimar estas cargas elegir un número medio entre los intervalos de este sedimentador y este reactor PBR

Sedimentador:

$$\begin{aligned} \text{Carga de SS} = M_{s_1} &= 5.604 \text{ hab} * 26 \frac{\text{gr SS}}{\text{hab} \cdot \text{d}} = 145.704 \frac{\text{gr SS}}{\text{d}} \\ &= 146 \frac{\text{kg SS}}{\text{d}} \end{aligned}$$

Reactor PBR:

$$\begin{aligned} \text{Carga de SS} = M_{s_2} &= 5.604 \text{ hab} * 8 \frac{\text{gr SS}}{\text{hab} \cdot \text{d}} = 44.832 \frac{\text{gr SS}}{\text{d}} \\ &= 45 \frac{\text{kg SS}}{\text{d}} \end{aligned}$$

Para combinar estas cargas estimadas del sedimentador y el reactor PBR, repetimos que los sólidos del sedimentador son estabilizados en el reactor anaerobio de lodos. Entonces:

Estas cargas ingresarán al *lecho*.

$$M_{s_1} + M_{s_2} = 146 \frac{\text{kg SS}}{\text{d}} + 45 \frac{\text{kg SS}}{\text{d}} = 191 \frac{\text{kg SS}}{\text{d}}$$

Sedimentador:

$$\begin{aligned} \text{Caudal de lodos} = Q_{s_1} &= 5.604 \text{ hab} * 1,5 \frac{\text{L}}{\text{hab} \cdot \text{d}} = 8.406 \frac{\text{L}}{\text{d}} \\ &= 8,4 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \end{aligned}$$

Reactor PBR:

$$\begin{aligned} \text{Caudal de lodos} = Q_{s_2} &= 5.604 \text{ hab} * 1,0 \frac{\text{L}}{\text{hab} \cdot \text{d}} = 5.604 \frac{\text{L}}{\text{d}} \\ &= 5,6 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \end{aligned}$$

Ciclo operacional del *lecho*

Tiempo por ciclo = tiempo de secado + tiempo de limpieza.

$$T = T_d + T_c$$

Donde:

T_d = tiempo de secado (días)

T_c = tiempo de limpieza (días)

Asumir

$$T = 15 \text{ d} + 5 \text{ d} = 20 \text{ d}$$

Volumen de lodo seco por ciclo

$$V_s = Q_{s1 y 2} * T$$

Sedimentador:

$$V_{s1} = 8,4 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 20 \frac{\text{d}}{\text{ciclo}} = 168 \frac{\text{m}^3}{\text{ciclo}}$$

Reactor PBR:

$$V_{s2} = 5,6 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 20 \frac{\text{d}}{\text{ciclo}} = 112 \frac{\text{m}^3}{\text{ciclo}}$$

Área requerida para el *lecho*

$$A = \frac{[(M_{s_1} + M_{s_2}) \cdot T]}{SLR}$$

Donde:

A = área del lecho (m²)

SLR = carga nominal de sólidos (tomar 15 kg SST/m²)

$$A = \frac{[(M_{s_1} + M_{s_2}) \cdot T]}{SLR} = \frac{\left(191 \frac{\text{kg SS}}{\text{d}} * 20 \text{ d}\right)}{15 \frac{\text{kg SST}}{\text{m}^2}} = 254,6 \frac{\text{m}^2}{\text{ciclo}}$$

$$\approx 255 \frac{\text{m}^2}{\text{ciclo}}$$

El área per cápita requerida es:

$$\text{Área requerida} = \frac{255 \text{ m}^2}{5.604 \text{ hab}} = 0,045 \frac{\text{m}^2}{\text{hab}}$$

Longitudes de los compartimentos del *lecho* de arena

Sugerimos 16 compartimentos para estos *lechos* de esta PTAR. Las longitudes de estos compartimentos serán 4,0 m de ancho y 4,0 m de largo. 16,0 m² de sección por cada compartimento. 256 m² de área total.

Altura de la capa de lodo después de la carga en el *lecho*

Los sólidos sedimentados del sedimentador ingresarán al reactor anaerobio de lodos y luego a los *lechos*, entonces:

$$H_{s_1} = \frac{V_{s_1}}{A} = \frac{168 \frac{\text{m}^3}{\text{ciclo}}}{255 \frac{\text{m}^2}{\text{ciclo}}} = 0,6 \text{ m}$$

Los lodos del reactor PBR ingresará directo los *lechos*, entonces:

$$H_{s_2} = \frac{V_{s_2}}{A} = \frac{112 \frac{\text{m}^3}{\text{ciclo}}}{255 \frac{\text{m}^2}{\text{ciclo}}} = 0,4 \text{ m}$$

Estas alturas son diferentes. Entonces sugerimos sumar ambas alturas para diseñar la altura útil del *lecho*. Esta altura sería de 1 m. Pero no sugerimos llenar 1,0 m de altura de lodo si no 25 cm.



Lugar: lechos de arena de la PTAR Granada (2021).

39.2 Lechos de arena para reactores UASB

He aquí un ejemplo para diseñar estos lechos de arena.

Una PTAR tiene una tecnología principal. Esta tecnología es un reactor UASB. Este reactor UASB tiene una producción per cápita de lodo entre 12 y 18 gr SS/ hab·día. Este reactor UASB también tiene una producción volumétrica per cápita. Esta producción está entre 0,2 y 0,6 L/ hab·día.

Para estimar estas cargas elegir un número medio entre los intervalos de este reactor UASB

$$\text{Carga de SST} = M_s = 952 \text{ hab} * 15 \frac{\text{gr SS}}{\text{hab} \cdot \text{d}} = 14.280 \frac{\text{gr SS}}{\text{d}}$$

$$= 14,28 \frac{\text{kg SS}}{\text{d}}$$

$$\text{Caudal de lodos} = Q_s = 952 \text{ hab} * 0,4 \frac{\text{L}}{\text{hab} \cdot \text{d}} = 380,8 \frac{\text{L}}{\text{d}}$$

$$= 0,38 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Ciclo operacional

Tiempo por ciclo = tiempo de secado + tiempo de limpieza.

$$T = T_d + T_c$$

Donde:

T_d = tiempo de secado (días)

T_c = tiempo de limpieza (días)

Asumir

$$T = 15 \text{ d} + 5 \text{ d} = 20 \text{ d}$$

Volumen de lodo seco por ciclo

$$V_s = Q_s * T$$

$$V_s = 0,38 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 20 \frac{\text{d}}{\text{ciclo}} = 7,6 \frac{\text{m}^3}{\text{ciclo}}$$

Área requerida para el *lecho*

$$A = \frac{(M_s \cdot T)}{SLR}$$

Donde:

A = área del lecho (m²)

SLR = carga nominal de sólidos (tomar 15 kg SST/m²)

$$A = \frac{(M_s \cdot T)}{SLR} = \frac{\left(14,28 \frac{\text{kg SS}}{\text{d}} * 20 \text{ d}\right)}{15 \frac{\text{kg SST}}{\text{m}^2}} = 19,04 \frac{\text{m}^2}{\text{ciclo}} \approx \mathbf{19} \frac{\text{m}^2}{\text{ciclo}}$$

El área per cápita requerida es:

$$\text{Área requerida} = \frac{19 \text{ m}^2}{952 \text{ hab}} = 0,0199 \frac{\text{m}^2}{\text{hab}} \approx 0.020 \frac{\text{m}^2}{\text{hab}}$$

Longitudes de los compartimentos del *lecho* de arena

Sugerimos 5 compartimentos para estos *lechos* de esta PTAR. Las longitudes de estos compartimentos serán 2,0 m de ancho y 2,0 m de largo. 4,0 m² de sección por cada compartimento. 20 m² de área total.

Altura de la capa de lodo después de la carga en el *lecho*

$$H_s = \frac{V_s}{A} = \frac{7,6 \frac{\text{m}^3}{\text{ciclo}}}{19 \frac{\text{m}^2}{\text{ciclo}}} = 0,4 \text{ m}$$

Sugerimos usar esta altura de 0,4 m para diseñar la altura útil del *lecho*.

Pero no sugerimos llenar 0,4 m de altura de lodo si no 25 cm.

Sugerido por Von Sperling & Chernicharo (2005).



Lugar: lechos de arena de la PTAR La Piñuela en Cocorná (2021).

40. OPERACIÓN DE LOS LECHOS DE ARENA

Ahora que tienes un diseño de este *lecho* de arena, nosotros te indicaremos la operación de este *lecho*. Esta operación tiene cuatro significados para estos operarios. El primero, ingresar lodos de varias tecnologías de la PTAR a este *lecho*. Para ingresar lodos estos operarios usarán válvulas. El segundo, monitorear la altura de estos lodos en el *lecho* para saber cuando extraerlos. El tercero, adicionar cal a este *lecho* para prevenir olores putrefactos y moscos. El cuarto, extraer lodos secos (biosólidos) de este *lecho* **cada dos meses** en verano y según la necesidad en invierno (Fig 80). Para extraer lodos estos operarios usarán palas.



Fig 80. Operario ingresando lodos al lecho.

40.1 Extraer lodos

Estos operarios extraerán los lodos (biosólidos) de estos *lechos* para compostar. Para extraer estos lodos estos operarios usarán varios utensilios. Estos utensilios son palas, baldes, balanza, lentes de protección, overoles, botas y guantes. He aquí un ejemplo para extraer estos lodos.

- Ubicarse en el compartimento del *lecho*.
- Usar válvulas para ingresar lodos a este *lecho*.
- Medir la altura de la capa de lodos en este *lecho* (42.25).
- Monitorear la capa de lodos (42.26).
- Adicionar cal a estos lodos.
- Extraer estos lodos secos (42.27).
- Pesar estos lodos secos en una balanza.
- Adicionar arena al lecho cuando este lo requiera (42.28).
- Cuantificar estos lodos secos (Fig 81).
- Usar estos lodos secos para compostar.



Fig 81. Lechos de arena.



Lugar: lecho de arena de la PTAR Sonsón (2019).

41. TEXTOS CITADOS

- Akunna, Joseph C. (2019). *Anaerobic waste-wastewater treatment and biogas plants. A practical handbook*. CRC Press. <http://www.springer.com/series/11833>
- Alzate Leal, L. M., Rodríguez Loaiza, D. C., & Molina Pérez, F. J. (2021). *Evaluación del dimensionamiento de los lechos de secado en diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales del oriente antioqueño* (p. 69). Facultad de Ingeniería (Universidad de Antioquia).
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). <https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.216>
- Azevedo Netto, J. M. (1998). *Manual de Hidráulica* (Edgard Blu).
- Cassany, D. (1993). *La cocina de la escritura* (p. 255). ANAGRAMA. https://drive.google.com/file/d/1tz65D34aIYbkj_i14qy0MRGZVAdSc7BZ/view
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2004). Capítulo 2 Mezcladores. In *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Tomo I* (Vol. 2, pp. 47–88). <https://docplayer.es/22985176-Capitulo-2-mezcladores.html>
- Chernicharo, C. A. L. (2006). Post-treatment options for the anaerobic treatment of domestic wastewater. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 5(1), 73–92. <https://doi.org/10.1007/s11157-005-5683-5>
- Chernicharo, C. A. L., van Lier, J. B., Noyola, A., & Bressani Ribeiro, T. (2015). Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 14(4), 649–679. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9377-3>

- Chernicharo, C. A., Ribeiro, T. B., Garcia, G. B., Lermontov, A., Platzer, C. J., Possetti, G. R. C., & Rosseto, M. A. L. L. R. (2018). Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. *Revista DAE*, 5–19. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.028>
- Comisión Nacional del Agua. (2015). Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente. In *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (2010a). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Pretratamiento y tratamiento primario. Libro 26. In *Libro 26*. CONAGUA.
- Comisión Nacional del Agua. (2010b). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: pretratamiento y tratamiento Primario. In *Libro 46*. CONAGUA.
- Comisión Nacional del Agua. (2015). Manual de agua potable , alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: filtros anaerobios de flujo ascendente. In *Libro 29*. CONAGUA.
- Comisión Nacional del Agua. (2016). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: procesos anaerobios. In CONAGUA (Ed.), *Libro 49*. México Gobierno de la República, SEMARNAT, CONAGUA.
- Comisión Nacional del Agua. (2019). Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: tratamiento y disposición de lodos. In *Libro 32*. CONAGUA. <http://mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>
- Corrales, L., Antolinez, D., Bohórquez, J., & Corredero, A. (2015). Anaerobic bacteria: processes they perform and their contribution to life sustainability on the planet. *Nova*, 13(23), 55–81. <http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v13n24/v13n24a06.pdf>

- Davis, M. L. (2020). *Water and Wastewater Engineering. Design Principles and Practice* (Second). McGraw Hill Companies, Inc.
- de Lemos Chernicharo, C. A. (2007). Biological Wastewater Treatment Series. Volume Four. Anaerobic Reactors. In *Department of Sanitary and Environmental Engineering* (Vol. 4). IWA Publishing. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Empresas Públicas de Medellín. E. S. P. (2013). *Normas de diseño de PTAR y alcantarillado*. EPM.
- Goldberg, N. (1990). *Writing Down the Bones. Freeing the Writer Within*. Shambhala.
- Gonçalves, R. F., Chernicharo, C. A. L., Neto Andrade, C. ., & et al. (2001). *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por reatores com biofilme. Cap. 4. In: CHERNICHARO C.A.L. (coorde- nador). Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.* (p. 544). FINEP/PROSAB, Rio de Janeiro, Brasil (in Portuguese).
- Henze, M., van Loosdrecht, M. C. M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment, principles, Modelling and Design* (First). IWA Publishing.
- Langergraber, G., Pressl, A., Kretschmer, F., & Weissenbacher, N. (2018). Small wastewater treatment plants in Austria – Technologies, management and training of operators. *Ecological Engineering*, 120, 164–169. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.030>
- Lema, J. M., & Suarez, S. (2017). Innovative Wastewater Treatment & Resource Recovery Technologies: Impacts on Energy, Economy and Environment. In *Water Intelligence Online* (Vol. 16). <https://doi.org/10.2166/9781780407876>
- Lier, J. B. Van, Vashi, A., Lubbe, J. Van Der, & Heffernan, B. (2010). Anaerobic sewage treatment using UASB reactors : engineering and operational aspects. *Environmental Anaerobic Technology*, 5–31.
- Liu, Y., Gu, J., & Zhang, M. (2019). *A-B processes. Towards Energy Self-sufficient Municipal Wastewater Treatment*. IWA Publishing.
- Mainardis, M., Buttazzoni, M., & Goi, D. (2020). Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket

- (UASB) Technology for Energy Recovery: A Review on State-of-the-Art and Recent Technological Advances. *Bioengineering*, 7(2), 43. <https://doi.org/10.3390/bioengineering7020043>
- Marbello, R. (2005). Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica. Medidores en régimen crítico. In *Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas* (pp. 71–99). Universidad Nacional, Facultad de Minas.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery* (p. 2018). McGraw Hill Education.
- Metcalf, L., & Eddy, H. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery* (McGraw Hil).
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución número 0330 de 2017* (p. 182). [http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330 - 2017.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330-2017.pdf)
- Noyola, A., Padilla-Rivera, A., Morgan-Sagastume, J. M., Güereca, L. P., & Hernández-Padilla, F. (2012). Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America. *Clean - Soil, Air, Water*, 40(9), 926–932. <https://doi.org/10.1002/clen.201100707>
- Oppenheimer, D. M. (2005). Consequences of erudite vernacular utilized irrespective of necessity: Problems with using long words needlessly. *Applied Cognitive Psychology*, 20(2), 139–156. <https://doi.org/10.1002/acp.1178>
- Orozco Jaramillo, A. (2014). *Bioingeniería de aguas residuales: Teoría y diseño* (Segunda). ACODAL Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Qasim, R. S., & Zhu, G. (2018). *Wastewater treatment and reuse, theory and design examples: Volume 1: Principles and Basic Treatment* (Vol. 1). CRC Press Taylor and Francis group. <http://tylorandfrancis.com>
- Qasim, S. R., & Zhu, G. (2018). Wastewater treatment and reuse theory and design examples: Volume 2: Post-treatment, reuse, and disposal. In *Wastewater Treatment and Reuse*

Theory and Design Examples: Volume 2: Post-Treatment, Reuse, and Disposal.
<https://doi.org/10.1201/b22366>

- Rendón Arango, J. A., Rodríguez Loaiza, D. C., & Molina Pérez, F. J. (2021). *Evaluación del diseño de filtros anaerobios de flujo ascendente en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales* (p. 77). Facultad de Ingeniería (Universidad de Antioquia).
- Ripley, L. E., Boyle, W. C., & Converse, J. . (1986). Improved Alkalimetric Monitoring for Anaerobic Digestion of High-Strength Wastes. *Water Pollution Control Federation*, 58, 406–411.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1979). *Process Design Manual-Sludge Treatment and Disposal* (pp. 4-1-4–74, 6-2-6–127, 9-1-9–70, 14-1-14-3.). EPA.
- Van Haandel, Adrianus C. Lettinga, G. (1994). *Anaerobic sewage treatment : a practical guide for regions with a hot climate*. John Wiley & Sons, Inc.
<https://lib.ugent.be/catalog/rug01:000401352>
- Von Sperling, M., & Chernicharo, C. A. (2005). Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions. Volumen I. In *IWA Publishing: Vol. I* (p. 856). IWA Publishing.
<https://doi.org/10.5860/CHOICE.45-2633>
- Water Environment Federation. (2005). Clarifier Design. In *Water Environment Federation* (Second Edi). Water Environment Federation.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Water Environment Federation. (2008). *Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants. Volume I: Management and Support Systems. Manual of practice No. 11* (WEF Press (ed.); Sixth). <https://doi.org/10.1036/0071543678>
- Wells, W. A. (2004). Me write pretty one day: how to write a good scientific paper. *The Journal of Cell Biology*, 165(6), 757–758. <https://doi.org/10.1083/jcb.200403137>

10

Material suplementario

Objetivo principal

- Ordenar la operación de las PTAR.



Lugar: PTAR La Piñuela en Cocorná (2021).

42. FORMATOS PARA LOS OPERARIOS

42.1 Canal de entrada

FORMATO. VOLUMEN MATERIAL EXTRAÍDO (m³)				
CANAL DE ENTRADA				
MES:				
DÍA DE LIMPIEZA	HORA	VOLUMEN EXTRAÍDO (m³)	CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL	ANALISTA
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
OBSERVACIONES:				
REVISIÓN DE PLANILLA				
SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR _____				

42.2 Rejas

FORMATO. KILOGRAMOS DE MATERIAL EXTRAÍDO (kg)				
REJAS				
MES:				
DÍA DE LIMPIEZA	HORA	MATERIAL EXTRAÍDO (kg)	CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL	ANALISTA
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
			SÓLIDOS GRUESOS	
OBSERVACIONES:				
REVISIÓN DE PLANILLA SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR _____				

42.3 Desarenadores

[illegible]

42.4 Caudal de ingreso

[illegible]

42.5 Sedimentador y reactores PBR: pH y temperatura

FORMATO 4. CONTROL DE pH Y TEMPERATURA (Unidades de pH y °C)									
MES:									
TABLA DE DATOS									
DÍA	HORA	AFLUENTE PTAR		EFLUENTE SEDIMENTADOR		EFLUENTE PTAR (REACTORES PBR)			
		pH	T (°C)	pH	T (°C)	pH	T (°C)		
PROMEDIO MENSUAL (Unidades de pH y °C)	EFLUENTE PTAR						ANALISTA		
	pH			T (°C)					
	min	máx.	Promedio	min	máx.	Promedio			
			N/A						
OBSERVACIONES: Medir pH y temperatura cada una o dos horas. N/A: No Aplica									
REVISIÓN DE PLANILLA SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR _____									

42.6 Reactor UASB: pH y temperatura

FORMATO. CONTROL DE pH Y TEMPERATURA (Unidades de pH y °C)										
MES:										
TABLA DE DATOS										
DÍA	HORA	AFLUENTE PTAR		EFLUENTE REACTOR		EFLUENTE PTAR				
		pH	T (°C)	pH	T (°C)	pH	T (°C)			
PROMEDIO MENSUAL (Unidades de pH y °C)	EFLUENTE PTAR					ANALISTA				
	pH			T (°C)						
	min	máx.	Promedio	min	máx.	Promedio				
			N/A							
OBSERVACIONES: Medir pH y temperatura cada una o dos horas. N/A: No Aplica										
REVISIÓN DE PLANILLA SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR _____										

42.7 Descarga momentánea de aguas residuales industriales

FORMATO. CONTROL DE PH (Unidades de pH), TEMPERATURA (°C) Y SÓLIDOS SEDIMENTABLES DE AGUAS INDUSTRIALES (mL/L)										
MES:										
TABLA DE DATOS										
DÍA	HORA	AGUAS INDUSTRIALES*		SÓLIDOS SEDIMENTABLES (mL/L)		PRESENTA OLOR		COLOR DEL AGUA DE INGRESO	TIEMPO DE INGRESO DEL AGUA INDUSTRIAL (min)	ANALISTA
		pH	T (°C)	45 minutos de sedimentación	60 minutos de sedimentación	SI	NO			
OBSERVACIONES: *Coger la muestra de agua industrial del canal de entrada de la PTAR.										
REVISIÓN DE PLANILLA SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR _____										

42.8 Sedimentador: sólidos flotantes

FORMATO. LIMPIEZA DE SÓLIDOS FLOTANTES EN EL SEDIMENTADOR PRIMARIO								
MES:								
TABLA DE DATOS								
DÍA	HORA	SEDIMENTADOR PRIMARIO MÓDULO 1		SEDIMENTADOR PRIMARIO MÓDULO 2		TIPO DE MATERIAL FLOTANTE (MÓDULO 1)	TIPO DE MATERIAL FLOTANTE (MÓDULO 2)	ANALISTA
		SI	NO	SI	NO			
OBSERVACIONES:								
REVISIÓN DE PLANILLA								
SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR _____								

42.9 Reactor UASB: sólidos flotantes

FORMATO. LIMPIEZA DE SÓLIDOS FLOTANTE EN EL REACTOR UASB								
MES:								
TABLA DE DATOS								
DÍA	HORA	REACTOR UASB MÓDULO 1		REACTOR UASB MÓDULO 2		TIPO DE MATERIAL FLOTANTE (MÓDULO 1)	TIPO DE MATERIAL FLOTANTE (MÓDULO 2)	ANALISTA
		SI	NO	SI	NO			
OBSERVACIONES:								
REVISIÓN DE PLANILLA SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR _____								

42.10 Sedimentador: sólidos sedimentados

[illegible]

42.11 Sedimentador: sólidos sedimentables

FORMATO. MEDICIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES (mL/L)							
TABLA DE DATOS							
DÍA	HORA	PUNTO DE MUESTREO	SÓLIDOS SEDIMENTABLES (45 minutos de sedimentación)	SÓLIDOS SEDIMENTABLES (60 minutos de sedimentación)	ANALISTA		
		Afluente PTAR					
		Sedimentador (módulo 1)					
		Sedimentador (módulo 2)					
		Efluente PTAR					
		Afluente PTAR					
		Sedimentador (módulo 1)					
		Sedimentador (módulo 2)					
		Efluente PTAR					
		Afluente PTAR					
		Sedimentador (módulo 1)					
		Sedimentador (módulo 2)					
		Efluente PTAR					
		Afluente PTAR					
		Sedimentador (módulo 1)					
		Sedimentador (módulo 2)					
		Efluente PTAR					
		Afluente PTAR					
		Sedimentador (módulo 1)					
		Sedimentador (módulo 2)					
		Efluente PTAR					
		Afluente PTAR					
		Sedimentador (módulo 1)					
		Sedimentador (módulo 2)					
		Efluente PTAR					
		Afluente PTAR					
		Sedimentador (módulo 1)					
		Sedimentador (módulo 2)					
		Efluente PTAR					
		Afluente PTAR					
		Sedimentador (módulo 1)					
		Sedimentador (módulo 2)					
		Efluente PTAR					
		Afluente PTAR					
		Sedimentador (módulo 1)					
		Sedimentador (módulo 2)					
		Efluente PTAR					
		Afluente PTAR					
		Sedimentador (módulo 1)					
		Sedimentador (módulo 2)					
		Efluente PTAR					
OBSERVACIONES: Usar 1 litro de agua residual para medir los sólidos sedimentables.							
REVISIÓN DE PLANILLA:							
SUPERVISOR ENCARGADO PTAR_____							

42.12 Reactor UASB: biogás

FORMATO. QUEMA DE BIOGÁS (SUBPRODUCTO) DEL REACTOR UASB							
MES:							
TABLA DE DATOS							
DÍA	HORA	QUEMA DE BIOGÁS		DURACIÓN DE LA QUEMA DE BIOGÁS		OBSERVACIONES GENERALES	ANALISTA
		SI	NO	(min)	(horas)		
OBSERVACIONES:							
REVISIÓN DE PLANILLA							
SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR_____							

42.13 Reactor UASB: tuberías

[illegible]

42.14 Reactores PBR: sólidos flotantes

FORMATO 8. LIMPIEZA DE SÓLIDOS FLOTANTES EN LOS REACTORES PBR								
MES:								
TABLA DE DATOS								
DÍA	HORA	REACTOR PBR 1		REACTOR PBR 2		SÓLIDOS FLOTANTES (REACTOR PBR 1)	SÓLIDOS FLOTANTES (REACTOR PBR 2)	ANALISTA
		SI	NO	SI	NO			
OBSERVACIONES:								
REVISIÓN DE PLANILLA								
SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR _____								

42.15 Reactor UASB, PBR y reactor de lodos: alcalinidad

FORMATO 9. ALCALINIDAD DEL REACTOR UASB, REACTOR DE LODOS Y REACTOR PBR										
MES:										
TABLA DE DATOS										
Hora	Fecha de medición	Punto de muestreo	pH inicial	Volumen en ml de H ₂ SO ₄ gastado hasta pH 5,75	Volumen en ml de H ₂ SO ₄ gastado hasta pH 4,3	AT	AP	AI (AT – AP)	AI/AT	*Observaciones
		Afluente PTAR								
		Efluente reactor UASB								
		Efluente reactor PBR								
		Efluente reactor de lodos								
		Afluente PTAR								
		Efluente reactor UASB								
		Efluente reactor PBR								
		Efluente reactor de lodos								
		Afluente PTAR								
		Efluente reactor UASB								
		Efluente reactor PBR								
		Efluente reactor de lodos								
		Afluente PTAR								
		Efluente reactor UASB								
		Efluente reactor PBR								
		Efluente reactor de lodos								
		Afluente PTAR								
		Efluente reactor UASB								
		Efluente reactor PBR								
		Efluente reactor de lodos								
		Afluente PTAR								
		Efluente reactor UASB								
		Efluente reactor PBR								
		Efluente reactor de lodos								
		Afluente PTAR								
		Efluente reactor UASB								
		Efluente reactor PBR								
		Efluente reactor de lodos								
		Afluente PTAR								
		Efluente reactor UASB								
		Efluente reactor PBR								
		Efluente reactor de lodos								
		Afluente PTAR								
		Efluente reactor UASB								
		Efluente reactor PBR								
		Efluente reactor de lodos								

OBSERVACIONES

REVISIÓN DE PLANILLA
SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR

42.16 Reactor UASB y reactor PBR: sólidos sedimentables

FORMATO. MEDICIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES (mL/L)					
TABLA DE DATOS					
DÍA	HORA	PUNTO DE MUESTREO	SÓLIDOS SEDIMENTABLES (45 minutos de sedimentación)	SÓLIDOS SEDIMENTABLES (60 minutos de sedimentación)	ANALISTA
		Afluente PTAR			
		Reactor UASB			
		Reactor PBR			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor UASB			
		Reactor PBR			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor UASB			
		Reactor PBR			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor UASB			
		Reactor PBR			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor UASB			
		Reactor PBR			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor UASB			
		Reactor PBR			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor UASB			
		Reactor PBR			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor UASB			
		Reactor PBR			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor UASB			
		Reactor PBR			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor UASB			
		Reactor PBR			
		Efluente PTAR			

OBSERVACIONES: Usar 1 litro de agua residual para medir los sólidos sedimentables.

REVISIÓN DE PLANILLA:
SUPERVISOR ENCARGADO PTAR _____

42.17 Reactor UASB: muestreo de lodos

FORMATO. MUESTREO DE LODOS DEL REACTOR UASB (mL) Y TIEMPO DE SEDIMENTACIÓN (20 minutos)								
TABLA DE DATOS								
MES	DÍA	HORA	PUNTO DE MUESTREO (Válvulas de muestreo del reactor UASB)	RESULTADOS OBTENIDOS: ALTURA DEL LODO (mL)				ANALISTA
				Beaker 1 (válvula a 1.0 m)	Beaker 2 (válvula a 1.5 m)	Beaker 3 (válvula a 2.0 m)	Beaker 4 (válvula a 2.5 m)	
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					

OBSERVACIONES:

REVISIÓN DE PLANILLA:
 SUPERVISOR ENCARGADO PTAR_____

42.18 Reactor UASB: pH y temperatura de los lodos

FORMATO. MEDICIÓN DE PH Y TEMPERATURA EN LAS DIFERENTES ALTURAS DEL REACTOR UASB. TIEMPO DE SEDIMENTACIÓN (20 minutos)												
TABLA DE DATOS												
MES	DÍA	HORA	PUNTO DE MUESTREO (Válvulas de muestreo del reactor UASB)	RESULTADOS OBTENIDOS: pH (unidades de pH) y temperatura (°C) a las diferentes alturas del reactor UASB								ANALISTA
				Beaker 1 (válvula a 1.0 m)		Beaker 2 (válvula a 1.5 m)		Beaker 3 (válvula a 2.0 m)		Beaker 4 (válvula a 2.5 m)		
				pH	T(°C)	pH	T(°C)	pH	T(°C)	pH	T(°C)	
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
OBSERVACIONES:												
REVISIÓN DE PLANILLA: SUPERVISOR ENCARGADO PTAR_____.												

42.19 Reactor de lodos: sólidos flotantes

FORMATO. LIMPIEZA DE SÓLIDOS FLOTANTE DEL REACTOR DE LODOS								
MES:								
TABLA DE DATOS								
DÍA	HORA	REACTOR DE LODOS MÓDULO 1		REACTOR DE LODOS MÓDULO 2		SÓLIDOS FLOTANTES (MÓDULO 1)	SÓLIDOS FLOTANTES (MÓDULO 2)	ANALISTA
		SI	NO	SI	NO			
OBSERVACIONES:								
REVISIÓN DE PLANILLA								
SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR _____								

42.20 Reactor de lodos: biogás

[illegible]

42.21 Reactor de lodos: tuberías

[illegible]

42.22 Reactor de lodos: muestreo de lodos

FORMATO. MUESTREO DE LODOS DEL REACTOR (mL) Y TIEMPO DE SEDIMENTACIÓN (20 minutos)								
TABLA DE DATOS								
MES	DÍA	HORA	PUNTO DE MUESTREO (Válvulas de muestreo del reactor)	RESULTADOS OBTENIDOS: ALTURA DEL LODO (mL)				ANALISTA
				Beaker 1 (válvula a 1.0 m)	Beaker 2 (válvula a 1.5 m)	Beaker 3 (válvula a 2.0 m)	Beaker 4 (válvula a 2.5 m)	
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					
			Módulo 1					
			Módulo 2					

OBSERVACIONES:

REVISIÓN DE PLANILLA:
SUPERVISOR ENCARGADO PTAR_____.

42.23 Reactor de lodos: pH y temperatura

FORMATO. MEDICIÓN DE PH Y TEMPERATURA EN LAS DIFERENTES ALTURAS DEL REACTOR Y TIEMPO DE SEDIMENTACIÓN (20 minutos)												
TABLA DE DATOS												
MES	DÍA	HORA	PUNTO DE MUESTREO (Válvulas de muestreo del reactor)	RESULTADOS OBTENIDOS: pH (unidades de pH) y temperatura (°C) a las diferentes alturas del reactor.								ANALISTA
				Beaker 1 (válvula a 1.0 m)		Beaker 2 (válvula a 1.5 m)		Beaker 3 (válvula a 2.0 m)		Beaker 4 (válvula a 2.5 m)		
				pH	T(°C)	pH	T(°C)	pH	T(°C)	pH	T(°C)	
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
			Módulo 1									
			Módulo 2									
OBSERVACIONES:												
REVISIÓN DE PLANILLA: SUPERVISOR ENCARGADO PTAR_____.												

42.24 Reactor de lodos: sólidos sedimentables

FORMATO. MEDICIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES (mL/L)					
TABLA DE DATOS					
DÍA	HORA	PUNTO DE MUESTREO	SÓLIDOS SEDIMENTABLES (45 minutos de sedimentación)	SÓLIDOS SEDIMENTABLES (60 minutos de sedimentación)	ANALISTA
		Afluente PTAR			
		Reactor de lodos (módulo 1)			
		Reactor de lodos (módulo 2)			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor de lodos (módulo 1)			
		Reactor de lodos (módulo 2)			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor de lodos (módulo 1)			
		Reactor de lodos (módulo 2)			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor de lodos (módulo 1)			
		Reactor de lodos (módulo 2)			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor de lodos (módulo 1)			
		Reactor de lodos (módulo 2)			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor de lodos (módulo 1)			
		Reactor de lodos (módulo 2)			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor de lodos (módulo 1)			
		Reactor de lodos (módulo 2)			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor de lodos (módulo 1)			
		Reactor de lodos (módulo 2)			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor de lodos (módulo 1)			
		Reactor de lodos (módulo 2)			
		Efluente PTAR			
		Afluente PTAR			
		Reactor de lodos (módulo 1)			
		Reactor de lodos (módulo 2)			
		Efluente PTAR			

OBSERVACIONES: Usar 1 litro de agua residual para medir los sólidos sedimentables.

REVISIÓN DE PLANILLA:
SUPERVISOR ENCARGADO PTAR _____

42.25 Lechos de arena: ingreso de lodo

FORMATO 18. INGRESO DE LODO (cm)									
LECHOS DE ARENA									
MES:									
DÍA	HORA	COMPARTI MENTO	ALTURA DE LA TORTA DE LODO	PRESENTA OLOR		ADICIÓN DE CAL		OBSERVACIONES	ANALISTA
				SI	NO	SI	NO		
OBSERVACIONES:									
REVISIÓN DE PLANILLA									
SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR_____									

42.26 Lechos de arena: lodo

FORMATO 19. LODO EN CADA COMPARTIMENTO (cm)														
LECHOS DE ARENA														
*Medir la altura del lodo cada 2 horas hasta retirar														
MES:														
DÍA	HORA	ALTURA DE LODO EN CADA COMPARTIMENTO							PROLIFERACION DE MOSCOS		ESTADO DEL TIEMPO			ANALISTA
		1	2	3	4	5	6	7	SI	NO	Soleado	Nublado	Lluvias	
OBSERVACIONES:														
REVISIÓN DE PLANILLA														
SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR_____														

42.27 Lechos de arena: lodo seco

FORMATO 20. VOLUMEN LODO (BIOSÓLIDO) SECO DIGERIDO (m³)														
LECHOS DE ARENA														
MES:														
DÍA DE LA EXTRACCIÓN DEL LODO	HORA	COMPARTIMENTO									VOLUMEN EXTRAÍDO (m³)	CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL	ANALISTA	
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	CT					
OBSERVACIONES: C: Compartimento														
REVISIÓN DE PLANILLA														
SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR _____														

42.28 Lechos de arena: arena

FORMATO 21. VOLUMEN DE ARENA REPUESTA (m³)
LECHOS DE ARENA

MES												
DÍA DE REPOSICIÓN DE LA ARENA	HORA	COMPARTIMENTO								VOLUMEN REPUESTO	TIPO, ORIGEN DEL MATERIAL (ARENA)	ANALISTA
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C.7	CT			
OBSERVACIONES: C: Compartimento												
REVISIÓN DE PLANILLA												
SUPERVISOR ENCARGADO DE LA PTAR _____												



Lugar: PTAR Argelia (2020)

