



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

PRE-DISEÑO Y ELABORACIÓN DE PLANOS DE UNA PLANTA PILOTO DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS CON
TECNOLOGÍA DE LODOS ACTIVADOS

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos
para optar por el título de Ingeniera Ambiental en Prevención y Remedación

Profesor Guía

MBA, MSc. Santiago Daniel Piedra Burgos

Autora

Gabriela Eunice Gortaire López

Año

2015

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los trabajos de titulación”.

Santiago Daniel Piedra Burgos

MBA, MSc.

CI: 1715384150

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”.

Gabriela Eunice Gortaire López

CI: 172312483-8

AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero agradecer a Dios, por haberme dado la posibilidad de culminar mi Tesis y de guiarme a cada paso; a mis padres Eunice López y Ángel Gortaire, que gracias a su esfuerzo, hoy puedo lograr una meta más en mi vida, y a su apoyo incondicional; a mi hermano Andrés Gortaire, por estar a mi lado; a mi abuelita Gloria Guerra, por estar para mí siempre y por sus consejos; a mis amigos Gabriela Ayala y José Samaniego que estuvieron conmigo y me ayudaron en este proceso; a mi director de Tesis Santiago Piedra, por ayudarme y aportar con sus valiosos conocimientos, a la Ingeniera Paola Posligua y al Decano Tomas Villón, por su ayuda.

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a toda mi familia, quienes han estado siempre en mis caídas y logros, y con quienes he compartido los momentos más especiales de mi vida.

A mis abuelitos, Dolores Benavides y Gonzalo López, que ya no están presentes pero se encuentran en mis recuerdos y en mi corazón.

A mis amigos, por sacarme sonrisas hasta en los peores momentos.

RESUMEN

Para un Ingeniero Ambiental, el conocimiento acerca del funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales es de suma importancia, ya sea en la identificación de variables involucradas en el dimensionamiento de una planta, así como el funcionamiento de la misma.

El presente trabajo de titulación desarrolla el pre-diseño de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales domésticas con tecnología de lodos activados con sus respectivos planos, lo que llevó al uso de fórmulas experimentales y racionales para el cálculo de las diferentes variables que conforman el diseño de la planta como son el caudal de entrada, el volumen de los tanques, área, evaluación de la producción de lodos, definición de vertederos a usar, diámetros, espaciamientos, velocidades, entre otros.

Además, se presenta una recopilación bibliográfica de los valores típicos tomados para ciertos parámetros dentro del diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales de tamaño real, que sirvieron de base para dimensionar la planta piloto.

Al finalizar este trabajo de titulación se logró pre-diseñar una planta piloto de tratamientos de aguas residuales domésticas, que puede llegar a concretarse con su construcción; para servir como base de enseñanza teórico-práctica a futuros estudiantes.

ABSTRACT

For an environmental engineer, the knowledge about the operation of treatment plants wastewater is very important, whether in the identification of variables involved in the design of a plant, and its operation.

This thesis develops the pre-design of a pilot wastewater treatment plant with activated sludge technology with their respective planes, which led to the use of experimental and rational formulas for calculating the different variables use into the pre-design of the pilot plant, such as the inflow, the volume of the tanks, area, sludge production, diameters, spacings, speeds, among others.

In addition, it contains a compilation of bibliography of the typical values of certain parameters taken into the design of a wastewater treatment plant in real size, which served as base for sizing the pilot plant presented.

In conclusion, this thesis achieved the pre-design of a pilot wastewater treatment plant that can specify with its construction; to serve as the basis of theoretical and practical training to future students.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1.1. Conceptos fundamentales.....	5
1.2. Agua residual doméstica	5
1.3. Componentes del agua residual doméstica	5
1.4. Caracterización de los componentes orgánicos de las aguas residuales.....	6
1.4.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅).....	6
1.4.2 Demanda química de oxígeno (DQO).....	6
1.5. Caracterización de componentes inorgánicos de las aguas residuales.....	6
1.5.1 Nitrógeno y fósforo.....	6
1.6. Caracterización de componentes sólidos de las aguas residuales	6
1.7. Caracterización de componentes microbiológicos de las aguas residuales.....	7
1.8 Marco legal aplicable	7
1.9. Sistema de tratamiento seleccionado	10
1.9.1 Tratamiento preliminar	10
1.9.2 Tratamiento primario	11
1.9.3 Tratamiento secundario	13
1.9.4 Tanque sedimentador secundario.....	14
1.9.5 Recirculación de lodos.....	14
1.10 Definición de variables a calcular	15
1.10.1 Pre tratamiento	15
1.10.1.1 Diseño de rejillas.....	15
1.10.1.1.1 Velocidad del agua	16
1.10.1.1.2 Profundidad del canal.....	16
1.10.1.1.3 Pérdida de carga	17
1.10.2 Tanque sedimentador primario	18
1.10.2.1 Volumen del reactor.....	18
1.10.2.2 Profundidad del reactor	18

1.10.2.3	Área del reactor	18
1.9.2.4	Área mínima requerida para la clarificación.....	18
1.10.2.5	Ancho del reactor	19
1.9.2.6	Largo del reactor	19
1.10.2.7	Carga superficial.....	19
1.10.2.8	Velocidad horizontal	20
1.10.2.9	Tiempo de detención hidráulica.....	20
1.10.3	Tratamiento secundario	21
1.10.3.1	Volumen del tanque aireador.....	21
1.10.3.2	Profundidad del reactor	21
1.9.3.3	Área del reactor	21
1.10.3.4	Ancho del reactor	22
1.10.3.5	Largo del reactor	22
1.10.3.6	Cantidad teórica de oxígeno	22
1.10.3.7	Tiempo de detención hidráulica.....	23
1.10.3.8	Carga superficial.....	23
1.10.3.9	Eficiencia del tratamiento.....	24
1.10.4	Tanque sedimentador secundario.....	24
1.10.4.1	Volumen del reactor.....	24
1.10.4.2	Profundidad del reactor	25
1.10.4.3	Área del reactor	25
1.10.4.4	Área mínima requerida para la clarificación.....	25
1.9.4.5	Ancho del reactor	25
1.10.4.6	Largo del reactor	26
1.10.4.7	Carga superficial.....	26
1.10.4.8	Tiempo de detención hidráulica.....	27
1.10.4.9	Velocidad horizontal	27
1.9.5	Diseño Hidráulico.....	27
1.10.5.1	Diseño de vertederos.....	27
1.10.5.1.1	Caudal.....	28
1.10.5.1.2	Ancho	28
1.10.5.1.3	Longitud.....	29

1.10.5.1.4 Sección transversal del canal de aproximación.....	29
1.10.5.1.5 Velocidad de aproximación	29
2. METODOLOGÍA.....	30
2.1 Diseño Sanitario.....	30
2.1.1 Diseño de las rejillas	30
2.1.2 Caudal	30
2.1.3 Tanque sedimentador primario	30
2.1.4 Tanque biológico.....	33
2.1.5 Tanque de sedimentación secundaria	35
2.2 Diseño Hidráulico	36
2.2.1 Diseño de vertederos.....	36
2.3 Cálculo de precios unitarios	37
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	39
3.1 Pre-diseño del tanque sedimentador primario	39
3.2 Pre-diseño del tanque biológico	40
3.3 Pre-diseño del tanque sedimentador secundario	43
3.4 Pre-diseño de los vertederos triangulares.....	44
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	46
4.1. Conclusiones.....	46
4.2. Recomendaciones	48
REFERENCIAS.....	49
ANEXOS	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes del agua residual doméstica.	5
Figura 2. Rejillas de limpieza manual.....	11
Figura 3. Esquema gráfico de la forma del tanque de sedimentación primario.	11
Figura 4. Diagrama de proceso de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).....	15
Figura 5. Partes de un vertedero triangular.....	28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de calidad de fuentes de agua que para consumo humano y doméstico, según el Acuerdo Ministerial No.028.....	8
Tabla 2. Consideraciones de diseño de tanques primarios.....	12
Tabla 3. Valores de variables de diseño para lodos activados.....	13
Tabla 4. Parámetro de diseño para rejillas.....	16
Tabla 5. Consideraciones de diseño para carga superficial.....	20
Tabla 6. Consideraciones de diseño para carga superficial.....	23
Tabla 7. Consideraciones de diseño para carga superficial.....	26
Tabla 8. Aportes per cápita para aguas residuales domésticas.....	32
Tabla 9. Aportes per cápita para los diferentes componentes del agua residual doméstica.....	33

INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales domésticas o servidas son aquellas que resultan del uso doméstico, es decir se generan del lavado de platos, preparación de alimentos, uso del inodoro, regadera y lavamanos, entre otros, y son desechadas a la red de alcantarillado.

Los principales componentes de las aguas servidas son partículas de sedimentos, heces, papel, químicos, residuos vegetales, entre otros, pero lo que las hace peligrosas, es su alto contenido de microorganismos patógenos, por lo que su tratamiento es de suma importancia, y por la naturaleza orgánica de las aguas residuales domésticas son fácilmente degradables (Torres, Foresti, Vazoller, 2000, pp.1).

El principal propósito del tratamiento de las aguas residuales mediante plantas de tratamiento, es la remoción parcial de los contaminantes para cumplir con las normas nacionales o internacionales y para esto existen varias tecnologías que se pueden aplicar como son: coagulación-floculación, lodos activados, filtros percoladores, lagunas de estabilización, lagunas aireadas.

En países desarrollados como en Norteamérica y Europa más del 70 % de las aguas residuales sí son tratadas, según un estudio de la ONU (El Universal, 2013). Las principales tecnologías usadas por estos países son los reactores anaerobios, lagunas de estabilización, lodos activados, entre otros.

Según el Banco Mundial, tres cuartas partes de las aguas del alcantarillado de las ciudades de Latinoamérica no reciben tratamiento, aparte de esto todavía existen dudas de cómo operar correctamente las plantas de tratamiento (Banco Mundial, 2013).

En el Ecuador, las aguas residuales domésticas no reciben tratamiento a través de una planta de tratamiento, con excepción de la ciudad de Cuenca; contaminando ecosistemas y generando enfermedades gastrointestinales especialmente en sectores marginales, por lo que es muy importante la construcción de plantas de tratamiento y conocer su correcto funcionamiento.

ANTECEDENTES

“Las civilizaciones más antiguas, al asentarse junto a fuentes de agua, han dejado antecedentes grabados en los que se puede conocer que ya existía el tratamiento para el consumo humano y para la higiene” (Teorema Ambiental, 2006, pp. 1).

Las formas más usuales de purificación del agua antiguamente, eran hirviéndola sobre el fuego, calentándola al sol o sumergiendo una pieza de hierro caliente dentro de la misma. Otro de los métodos más frecuentes era el filtrar el agua hervida a través de arena o grava para luego dejarla enfriar (Condorchem Envitech, 2015, pp.1).

Existen actualmente varios tratamientos para las aguas residuales domésticas. Uno de los primeros intentos al tratar las aguas residuales, fue la utilización de ecosistemas de pantanos, bosques o humedales, ya que las plantas acuáticas extraían contaminantes a través de sus raíces.

La fosa séptica es otra opción para depurar el agua residual, ésta cuenta con 3 cámaras: una de sedimentación, otra con condiciones anaerobias y otra de clarificación. Tenemos las plantas de tratamiento, que probablemente son las más utilizadas por el volumen de agua que pueden tratar; cuentan con un tratamiento primario, donde se remueve material sedimentable por medios físicos o mecánicos, tratamiento secundario o biológico, y tratamiento terciario que complementa los anteriores (Díaz, Alvarado y Camacho, 2012, pp. 81-83).

Una de las tecnologías más usadas en las plantas de tratamientos es la de lodos activados. La tecnología de lodos activados, se deriva de la formación de una masa de bacterias y otros organismos pequeños que consumen la materia orgánica en las aguas residuales, convirtiéndose en dióxido de carbono, nuevas células bacterianas y otros subproductos. Las investigaciones durante la década de 1920, demostraron que la adición de oxígeno a las aguas residuales produjo un crecimiento rápido y acelerado de las bacterias (EPA, 2015, pp. 2).

Como se puede observar, la utilización de tratamientos para las aguas residuales data de miles de años atrás, y ha ido avanzando en cuanto a tecnología hasta la actualidad en diferentes países, y en nuestro país en ciertas ciudades.

ALCANCE

El alcance de este proyecto es el pre-diseño y elaboración de planos de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales domésticas con tecnología de lodos activados que consta de tratamiento primario y tratamiento secundario. Se realizará el pre-dimensionamiento físico de los tanques que conforman la planta con sus respectivos parámetros, y dentro del diseño hidráulico, vertederos. Análisis de precios unitarios, y condiciones de borde del agua residual doméstica en una hoja de cálculo en Microsoft Excel. El agua tratada se comprobará con los límites máximos permisibles dentro del Acuerdo Ministerial N.-028 del Ministerio del Ambiente para alcantarillado.

JUSTIFICACIÓN

Por la peligrosidad que representan las aguas residuales para el medio ambiente y sus ecosistemas, ya sean industriales o domésticas, es necesaria la aplicación de una planta de tratamiento que logre la remoción total o en buena medida de estos residuos peligrosos para que cumplan con los límites permisibles antes de ser vertidas a un cuerpo de agua y no perjudiquen en lo absoluto al medio ambiente.

El propósito de pre-diseñar una planta piloto de tratamiento de aguas residuales domésticas es conseguir que el desarrollo teórico de la misma pudiese llegar a concretarse con su construcción; para servir como base de enseñanza teórico-práctica a futuros estudiantes en la identificación de variables involucradas en el dimensionamiento de una planta, así como el funcionamiento de la misma.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Pre-diseñar una planta piloto de tratamiento de aguas residuales con tecnología de lodos activados para fines educativos e investigativos

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las condiciones de borde del agua residual doméstica mediante la elaboración de una hoja de cálculo diseñada en Microsoft Excel
- Identificar las posibles restricciones del pre dimensionamiento a escala de una planta mediante revisión bibliográfica
- Realizar el pre dimensionamiento a escala de la planta de tratamiento de aguas residuales para un caudal determinado mediante procedimientos encontrados en la bibliografía
- Elaborar los planos de la planta de tratamiento de aguas residuales mediante computer aided desing (autocad)

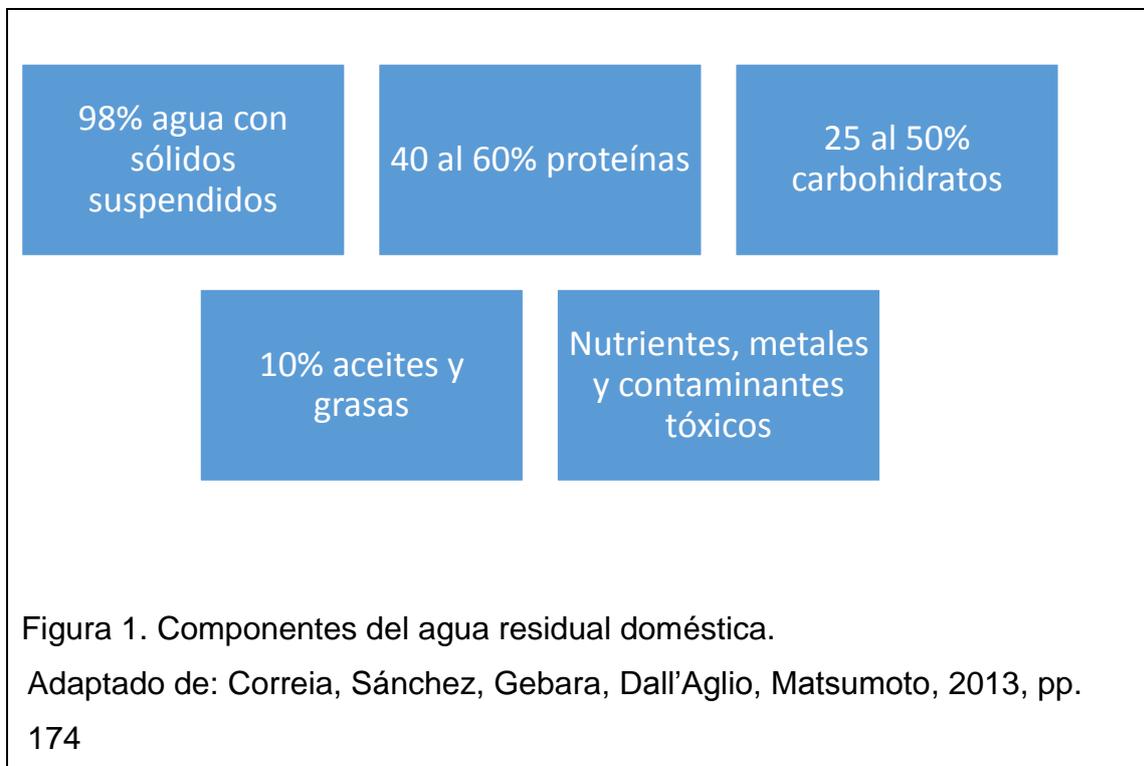
1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Conceptos fundamentales

1.2. Agua residual doméstica

Son aquellas que provienen del sistema de abastecimiento de una población, las cuales por diversas actividades y usos son alteradas. Como en Metcalf and Eddy (2014, pp. 184) se define así: “Las aguas residuales se pueden definir, considerando las fuentes de su generación, como la combinación de los desperdicios líquidos y los desperdicios acarreados por aguas que se remueven de residencias, instituciones y establecimientos comerciales e industriales junto con agua superficial, subterránea o de tormenta que puede estar presente”.

1.3. Componentes del agua residual doméstica



1.4. Caracterización de los componentes orgánicos de las aguas residuales

1.4.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

Se refiere al material degradable en un efluente. Se obtiene a los 5 días midiendo el oxígeno consumido por los microorganismos aerobios y se realiza normalmente después del tratamiento (Moreno García, 2006, pp.256).

1.4.2 Demanda química de oxígeno (DQO)

Es la cantidad de oxígeno requerido para oxidar materia orgánica mediante procesos químicos. Se mide en laboratorio oxidando la muestra en un medio ácido (Vidal, 2009, pp.146).

1.5. Caracterización de componentes inorgánicos de las aguas residuales

1.5.1 Nitrógeno y fósforo

Las principales formas en las que se encuentran el nitrógeno y el fósforo en las aguas residuales son: NO_2^- ; NO_3^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ , son conocidos como nutrientes y en ciertas circunstancias causan la eutrofización (Horan, 1991, pp. 12).

La presencia del fósforo se debe a las excretas humanas y al uso de detergentes. En las aguas residuales domésticas el valor típico que se encuentra es entre 6 y 20 mg/L en forma de fósforo total (Correia et al, 2013, pp. 174).

1.6. Caracterización de componentes sólidos de las aguas residuales

Los sólidos contenidos en las aguas residuales pueden clasificarse en orgánicos e inorgánicos.

Los sólidos inorgánicos están constituidos principalmente por nitrógeno, fósforo, cloruro, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos y otras sustancias tóxicas como arsénico, cadmio, cobre, mercurio entre otras.

Los sólidos orgánicos están formados principalmente por proteínas, ureas, aminas y aminoácidos, celulosa, grasas y jabones (Acosta, 2008, pp.63).

1.7. Caracterización de componentes microbiológicos de las aguas residuales

Una de las principales razones por las que se deben tratar las aguas residuales domésticas, es por su contenido de agentes patógenos como son: virus, bacterias, protozoos y nematodos, los cuales pueden causar daño a la salud humana.

1.8 Marco legal aplicable

La legislación ambiental vigente, establece diferentes niveles mínimos de tratamiento y calidad de las aguas residuales depuradas, en función de sus potenciales usos o disposición final. En el presente caso, la legislación ambiental específica aplicable corresponde a:

- CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR.
Publicada en el Registro Oficial N°449 del 20 de octubre del 2008.
 - Capítulo segundo: Biodiversidad y Recursos Naturales. Sección sexta: Agua.
 - Art. 411.- El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y

cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua.

La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua.

- Art. 412.- La autoridad a cargo de la gestión del agua será responsable de su planificación, regulación y control. Esta autoridad cooperará y se coordinará con la que tenga a su cargo la gestión ambiental para garantizar el manejo del agua con un enfoque ecosistémico.
- Acuerdo Ministerial No.028. Sustituyese el libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria.

El siguiente cuadro resume los límites de calidad establecidos por la normativa ambiental para el agua residual.

Tabla 1. Criterios de calidad de fuentes de agua que para consumo humano y doméstico, según el Acuerdo Ministerial No.028.

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y grasas	Sustancias solubles en hexano	Mg/l	70,0
Explosivos o inflamables	Sustancias	Mg/l	Cero
Alkil Mercurio		Mg/l	No detectable
Aluminio	Al	Mg/l	5,0
Arsénico total	As	Mg/l	0,1
Cadmio	Cd	Mg/l	0,02
Cianuro total	CN	Mg/l	1,0
Cinc	Zn	Mg/l	10,0

Cloro activo	Cl	Mg/l	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo	Mg/l	0,1
Cobalto total	Co	Mg/l	0,5
Cobre	Cu	Mg/l	1,0
Compuestos fenólicos	Expresado como Fenol	Mg/l	0,2
Compuestos organoclorados	Organoclorados totales	Mg/l	0,05
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁸	Mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	Mg/l	250,0
Demanda Química de Oxígeno	DQO	Mg/l	500,0
Dicloroetileno	Dicloroetileno	Mg/l	1,0
Fosforo Total	P	Mg/l	15,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	Mg/l	20,0
Hierro Total	Fe	Mg/l	25,0
Manganeso Total	Mn	Mg/l	10,0
Mercurio (total)	Hg	Mg/l	0,01
Niquel	Ni	Mg/l	2,0
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	Mg/l	60,0
Organofosforados	Especies Totales	Mg/l	0,1
Plata	Ag	Mg/l	0,5
Plomo	Pb	Mg/l	0,5
Potencial de Hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	Mg/l	0,5
Sólidos Sedimentables		Mg/l	20,0
Sólidos Suspendidos totales		Mg/l	220,0

Sólidos totales		Mg/l	1600,0
Sulfatos	So_4^{-2}	Mg/l	400,0
Sulfuros	S	Mg/l	1,0
Temperatura	C		Menor a 40,0
Tensoactivos	Sustancias Activas al azul de metileno	Mg/l	2,0
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	Mg/l	1,0
Tricloroetileno	Tricloroetileno	Mg/l	1,0

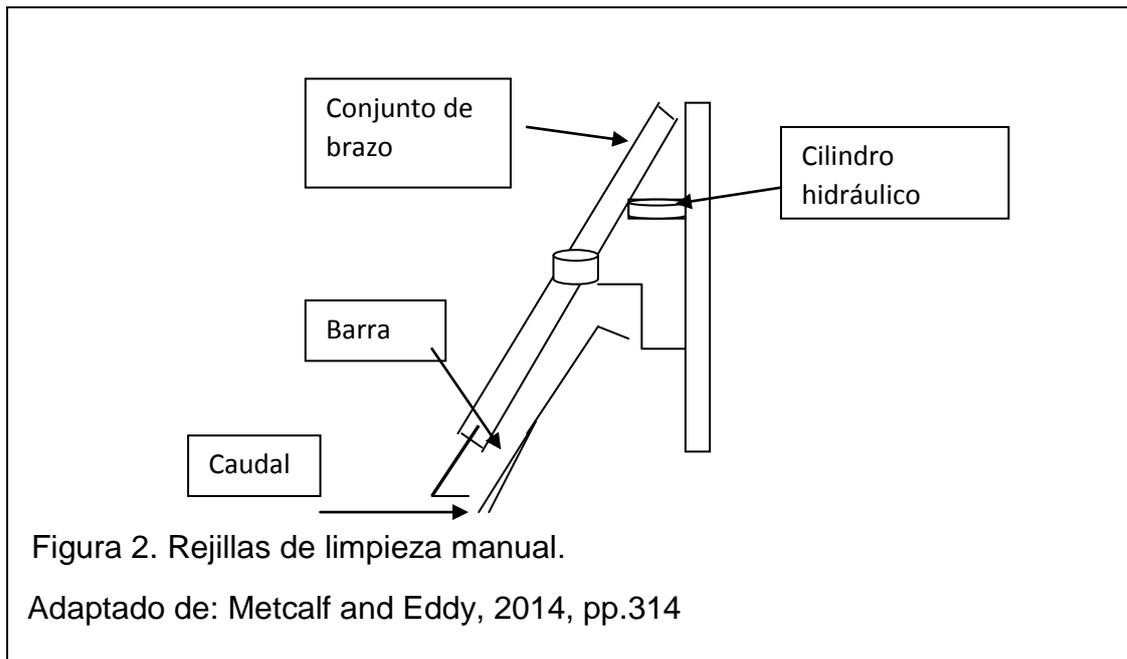
Explicación: Sustituyese el libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria.

Tomado de: Acuerdo Ministerial No.028, 2015.

1.9. Sistema de tratamiento seleccionado

1.9.1 Tratamiento preliminar

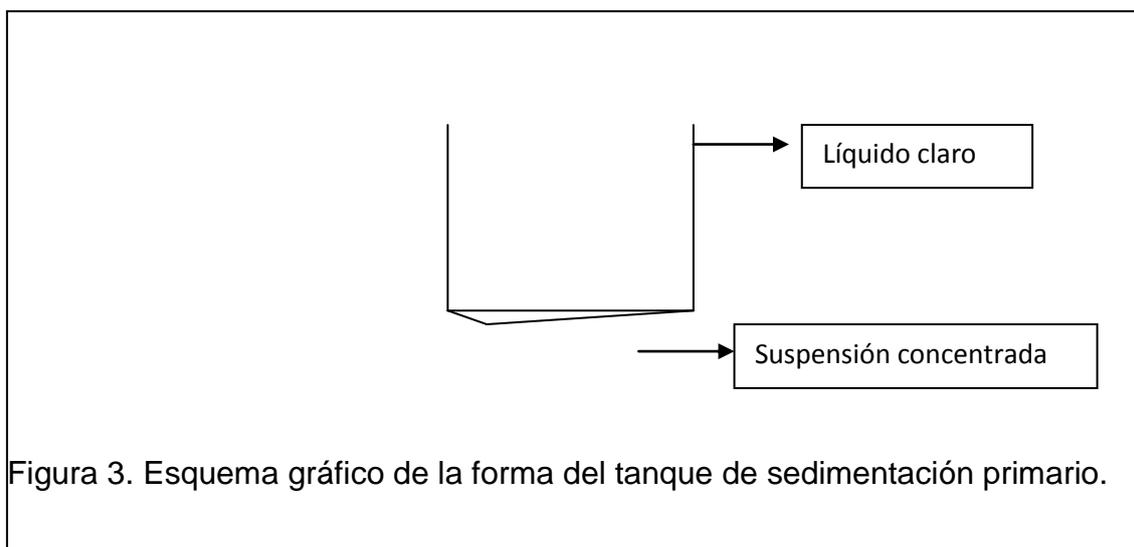
El tratamiento preliminar permite que ciertos materiales flotantes del agua residual doméstica como madera, papeles, materia fecal, etc. así como sólidos suspendidos sean retenidos, y también regula el caudal de agua que ingresa a la planta. Consiste en el paso del agua residual a través de cribas o coladores, los cuales están constituidos por barras paralelas soldadas (rejas), con una distancia considerable para lograr retener los sólidos y son comúnmente elaboradas de acero, igualmente la velocidad del agua residual siempre debe exceder 0.5 m/s para evitar la sedimentación de los sólidos (Sánchez, 2014, pp.14).



1.9.2 Tratamiento primario

En este paso del tratamiento del agua residual se tiene un tanque sedimentador primario, en el cual se va a lograr retener una cantidad considerable de sólidos suspendidos y material flotante contenidos en el agua residual.

El tanque en este tratamiento es de forma rectangular, el cual cuenta con cierto grado de pendiente al fondo del tanque para la correcta colección de los sólidos sedimentados.



Las consideraciones de diseño de estos tanques primarios de sedimentación se explican en el siguiente cuadro:

Tabla 2. Consideraciones de diseño de tanques primarios.

CARACTERÍSTICAS	INTERVALO	VALOR TÍPICO TOMADO	
Tiempo de retención, h	1.5-2.5	2	
Carga de superficie $m^3/m^2 \cdot día$			
A caudal medio	30-50	40	
A caudal punta	80-120	100	
Carga sobre vertedero $m^3/m \cdot día$	125-500	250	
PARÁMETRO	UNIDAD	INTERVALO	VALOR TÍPICO
RECTANGULAR			
Profundidad	M	3-4.9	4,3
Longitud	M	15-90	24-40
Ancho	M	3-24	4.9-9.8
Velocidad del barredor	m/s	0.6-1.2	0.9
CIRCULAR			
Profundidad	M	3-4.9	4.3
Diámetro	M	3-60	12-45
Pendiente de fondo	M	1/16-1/6	1/12
Velocidad del barredor	m/s	0.02-0.05	0.03

Explicación: Los valores presentados en las tablas dan referencia a una planta de tamaño real.

Adaptado de: Metcalf and Eddy, 2014, pp. 394

1.9.3 Tratamiento secundario

Este tratamiento tiene el propósito de disminuir la demanda biológica de oxígeno a las aguas residuales que contienen materia orgánica con microorganismos (Fraume, 2006, pp.309). El seleccionado en este proyecto es el de lodos activados aerobios.

Los lodos activados se derivan de la formación de una masa de bacterias (flóculos) y otros organismos pequeños que consumen la materia orgánica en las aguas residuales, convirtiéndose en dióxido de carbono, nuevas células bacterianas y otros subproductos. Los científicos durante la década de 1920, se dieron cuenta que con la adición de oxígeno, las bacterias crecieron rápidamente y aceleraron en los sistemas la eliminación de materia orgánica y contaminantes orgánicos (Environmental Protection Agency [EPA], 2015, pp.2).

Tabla 3. Valores de variables de diseño para lodos activados.

Tipo de proceso	θ_c	Y	X	So	S	Kd
Convencional	5-15	04-08	1.5-3	0.2-1.8	0.01	0.04-0.075
Reactor de mezcla completa	5-15	04-08	0.2-1.8	0.2-1.8	0.01	0.04-0.075
Aireación por etapas	5-15	04-08	0.2-1.8	0.2-1.8	0.01	0.04-0.075
Aireación modificada	0.2-0.5	04-08	0.2-1.8	0.2-1.8	0.01	0.04-0.075
Estabilización por contacto	5-15	04-08	0.2-1.8	0.2-1.8	0.01	0.04-0.075
Aireación extendida	20-30	04-08	0.2-1.8	0.2-1.8	0.01	0.04-0.075
Proceso Kraus	5-15	04-08	0.2-1.8	0.2-1.8	0.01	0.04-0.075
Alta aireación	5-10	04-08	0.2-1.8	0.2-1.8	0.01	0.04-0.075
Sistema con oxígeno puro	8-20	04-08	0.2-1.8	0.2-1.8	0.01	0.04-0.075

Tomado de: Kiely, 1998, pp.195.

Como se observa en la tabla se tiene diferentes tipos de aireación con sus respectivas variables de diseño, en este caso se usará el método convencional, en el cual el agua residual generalmente es aireada por medio de burbujas. La aplicación del aire es generalmente uniforme a lo largo del tanque (Orozco, 2005, pp.2).

1.9.4 Tanque sedimentador secundario

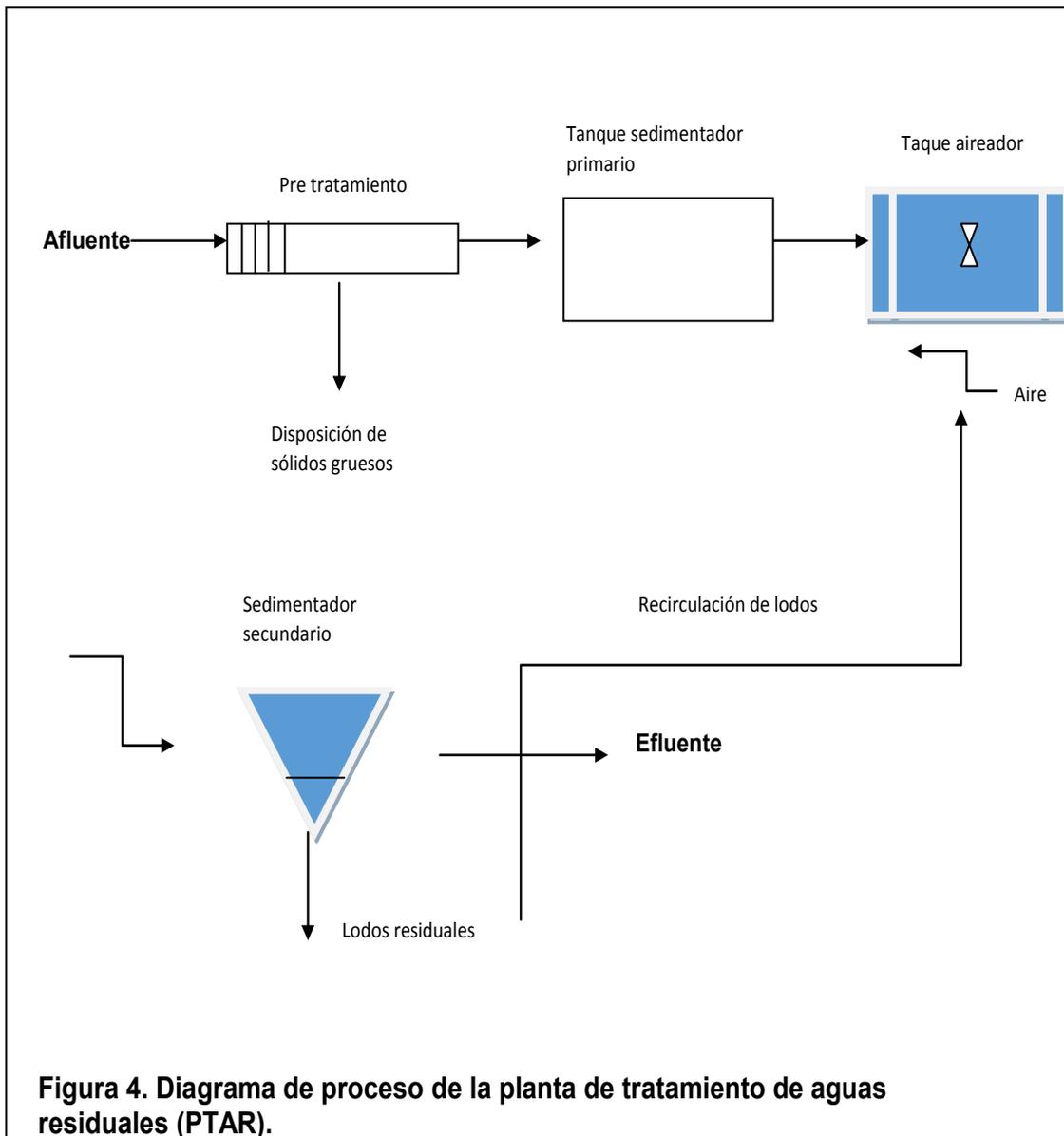
En este tanque los flóculos se asientan en condiciones inactivas, es normal que estos residuos de lodos sean reciclados de vuelta a la planta. El tanque sedimentador está constituido por 4 zonas:

- Zona de entrada del agua residual
- Zona de sedimentación
- Zona de salida del agua residual
- Zona de lodos (Sánchez, 2010, pp.10)

“Uno de los principales problemas en el tratamiento de aguas residuales es el relacionado con el tratamiento y disposición de lodos. En los tanques de sedimentación se producen grandes cantidades de volúmenes de lodos con grandes contenidos de agua; su deshidratación y disposición final pueden representar un alto porcentaje del costo del tratamiento de agua” (Navarrete, 2014).

1.9.5 Recirculación de lodos

Este proceso implica el uso de una bomba específica para la recirculación de los lodos depositados en el fondo del tanque de sedimentación secundaria, al tanque de aireación. La recirculación de lodos activados es un proceso muy común realizado en las plantas de tratamiento biológico, lo cual permite tener concentraciones altas de lodos activados y disminuir tiempos de residencia, tamaño de reactores y áreas de construcción (Martínez y Rodríguez, 2005, pp.156).



1.10 Definición de variables a calcular

1.10.1 Pre tratamiento

1.10.1.1 Diseño de rejas

Con el propósito de separar los sólidos gruesos del agua residual se realiza un pre tratamiento, mediante el uso de barras o rejas que normalmente se fabrican de acero soldadas a un marco transversal al canal. Pueden limpiarse manualmente o mecánicamente.

Tabla 4. Parámetro de diseño para rejas.

Concepto	Limpieza Manual	Limpieza Mecánica
Tamaño de la barra		
Anchura (cm)	0.6-1.5	0.6-1.5
Profundidad (cm)	2.5-7.5	2.5-7.5
Separación (cm)	2.5-5	1.6-7.5
Inclinación respecto a la vertical (°)	30-45	0-30
Velocidad de aproximación (m/s)	0.3-0.6	0.6-0.9
Pérdida de carga admisible (cm)	15	15

Tomado de: Crites y Tchobanoglous, 2000, pp.23.

1.10.1.1.1 Velocidad del agua

La velocidad que fluye a través de las rejillas se calcula con la ecuación básica:

$$V = Q \times A \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde:

Q: caudal de entrada en m³/s

A: área de espacios entre las barras m²

1.10.1.1.2 Profundidad del canal

La profundidad del canal se obtiene de acuerdo a la siguiente ecuación tomada de Horan (1991, pp.42):

$$W = \frac{Q}{V} \times \begin{array}{l} 2. \text{ (por 12mm espacios)} \\ 1.67 \text{ (por 18mm espacios)} \\ 1.5 \text{ (por 24mm espacios)} \end{array} \quad (\text{Ecuación 2})$$

En donde:

W: ancho del canal en metros,

Q: velocidad de flujo en m³/s,

V: velocidad a través de las barras en m/s, y

D: profundidad del flujo en metros

1.10.1.1.3 Pérdida de carga

El paso a través de las barras, resulta en una pérdida de carga, la cual está dada por la siguiente ecuación tomada de Horan (1991, pp.42):

$$HL = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + \frac{0.5 V_2^2}{2g} \quad (\text{Ecuación 3})$$

En donde:

HL: pérdida de carga en metros,

V₁: velocidad entre barras (m/s),

V₂: velocidad en canal de acceso (m/s), y

g: aceleración de acuerdo a la gravedad (m/s)

Área entre las barras:

$$A = \frac{Q}{V_{RL}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

En donde:

A: área libre entre las barras (m²),

Q: caudal,

V_{RL}: velocidad de aproximación (m/s)

Número de barras:

$$N^\circ = \frac{b - a}{a + t} \quad (\text{Ecuación 5})$$

b= ancho del canal (m),

a= separación de barras (m), y

t = espesor máximo de las barras (m).

1.10.2 Tanque sedimentador primario

1.10.2.1 Volumen del reactor

$$V = l \times a \times h \quad (\text{Ecuación 6})$$

En donde:

L: largo del reactor (m),

A: ancho del reactor (m), y

H: altura del reactor (m).

1.10.2.2 Profundidad del reactor

Este valor se toma de valores típicos usados dentro del diseño de una planta de tratamiento.

1.10.2.3 Área del reactor

En base a la carga superficial se tiene:

$$A = \frac{Q}{C_s} \quad (\text{Ecuación 7})$$

En donde:

A= área (m²),

Q= caudal a tratar en el sedimentador primario (m³/s), y

C_s= carga superficial (m³/m²*día).

1.9.2.4 Área mínima requerida para la clarificación

Se calcula a partir de la expresión:

$$A_c = \frac{Q}{V_s} \quad (\text{Ecuación 8})$$

En donde:

Q= Caudal (m³/s),

Vs= Velocidad de sedimentación por zonas (m/s)

1.10.2.5 Ancho del reactor

$$a = \sqrt{\frac{A}{2}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

En donde:

A: ancho del tanque sedimentador

A: área del tanque sedimentador

1.9.2.6 Largo del reactor

El largo del tanque viene definido por la fórmula:

$$L = \frac{v}{a \times h} \quad (\text{Ecuación 10})$$

En donde:

v: volumen,

a: ancho, y

h: profundidad

1.10.2.7 Carga superficial

Esta variable ayuda a calcular el área superficial del sedimentador. Depende del tipo de suspensión que haya que separarse. Los valores vienen dados por la siguiente tabla:

Tabla 5. Consideraciones de diseño para carga superficial.

CARACTERÍSTICAS	INTERVALO	VALOR TÍPICO TOMADO
Tiempo de retención, h	1.5-2.5	2
Carga de superficie m ³ /m ² *día		
A caudal medio	30-50	40
A caudal punta	80-120	100
Carga sobre vertedero m ³ /m ² *día	125-500	250

Tomado de: Metcalf and Eddy, 2014, pp.394.

Explicación: Los valores presentados en las tablas dan referencia a una planta de tamaño real.

1.10.2.8 Velocidad horizontal

Normalmente no debe exceder 1 cm/s para lograr que la entrada y salida del flujo al tanque sea uniforme en toda la sección transversal (Sánchez, 2010, pp. 14-15).

1.10.2.9 Tiempo de detención hidráulica

Se entiende al tiempo de detención hidráulica como “el tiempo promedio en el que el fluido del caudal Q pasa a través del volumen V” (Pérez, 2000, pp.3). Se obtiene mediante la fórmula:

$$t = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ecuación 11})$$

En donde:

V: volumen del tanque en m³,

Q: caudal en m³/día

1.10.3 Tratamiento secundario

1.10.3.1 Volumen del tanque aireador

Se calcula con la fórmula de Metcalf and Eddy (2014):

$$V = \frac{\theta_c Q_0 Y (S_0 - S)}{X(1 + K_d \theta_c)} \quad (\text{Ecuación 12})$$

En donde:

θ_c : Período medio de residencia de las células,

Q_0 : Caudal del afluente residual a tratar,

Y : Fracción de sustrato convertida en biomasa,

S_0 : Concentración del afluente, como DBO_5 o DQO ,

S : Concentración del sustrato que sale del reactor aireador,

X : Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor,

K_d : Coeficiente de mortalidad endógeno.

1.10.3.2 Profundidad del reactor

Este valor se toma de valores típicos usados dentro del diseño de una planta de tratamiento.

1.9.3.3 Área del reactor

En base a la carga superficial se tiene:

$$A = \frac{Q}{C_s} \quad (\text{Ecuación 13})$$

En donde:

A = área (m^2),

Q= caudal a tratar en el sedimentador primario (m^3/s), y

Cs= carga superficial ($m^3/m^2 \cdot día$).

1.10.3.4 Ancho del reactor

$$a = \sqrt{\frac{A}{2}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

En donde:

a: ancho del tanque sedimentador

A: área del tanque sedimentador

1.10.3.5 Largo del reactor

El largo del tanque viene definido por la fórmula:

$$L = \frac{v}{a \times h} \quad (\text{Ecuación 15})$$

En donde:

v: volumen,

a: ancho, y

h: profundidad

1.10.3.6 Cantidad teórica de oxígeno

Representa la cantidad de oxígeno que debe suministrarse al sistema de lodos activados para la correcta eliminación de DBO_5 y alimentación de los microorganismos. Se lo obtiene mediante el valor típico per cápita de caudal, el cual es $0,20 m^3/hab \cdot día$ dividido para 86400 segundos, y el caudal ($0,0001 m^3/s$). Se dividió el valor per cápita de caudal para el caudal y así se adquiere el número de personas. Después de esto, se multiplica el valor per capita ($0,20 m^3/hab \cdot día$) por el DBO_5 de entrada asumido ($125,16 mgO_2/lit$), obteniendo así el valor de carga orgánico per cápita. Este último valor se lo multiplica por el número de habitantes y por el consumo específico de oxígeno que es $1,7 kgO_2/kgDBO$ conseguido mediante bibliografía, que nos dice “La necesidad de

oxígeno para la oxidación total de la DBO contenida en el fango primario variará de 1,7 a 1,9 kilogramos por kilogramo destruido” (Metcalf and Eddy, 2014, pp.886).

1.10.3.7 Tiempo de detención hidráulica

Se entiende al tiempo de detención hidráulica como “el tiempo promedio en el que el fluido del caudal Q pasa a través del volumen V” (Pérez, 2000, pp.13).

Se obtiene mediante la fórmula:

$$t = \frac{V}{Q} \quad \text{(Ecuación 16)}$$

En donde:

V: volumen del tanque en m³,

Q: caudal en m³/día

1.10.3.8 Carga superficial

Esta variable ayuda a calcular el área superficial del sedimentador. Depende del tipo de suspensión que haya que separarse. Los valores vienen dados por la siguiente tabla tomada de Metcalf and Eddy (2014, pp. 394):

Tabla 6. Consideraciones de diseño para carga superficial.

CARACTERÍSTICAS	INTERVALO	VALOR TÍPICO TOMADO
Tiempo de retención, h	1.5-2.5	2
Carga de superficie m ³ /m ² *día		
A caudal medio	30-50	40
A caudal punta	80-120	100
Carga sobre vertedero m ³ /m*día	125-500	250

Tomado de: Metcalf and Eddy, 2014, pp. 394

Explicación: Los valores presentados en las tablas dan referencia a una planta de tamaño real.

1.10.3.9 Eficiencia del tratamiento

Mediante la fórmula se tiene:

$$E = \frac{S_0 - S}{S} \times 100 \quad (\text{Ecuación 17})$$

En donde:

S_0 : Concentración del afluente, como DBO_5 o DQO,

S : Concentración del sustrato que sale del reactor aireador.

1.10.3.10 Cantidad de lodos a desechar cada día

Mediante la fórmula se tiene:

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + K_d \theta_c} \quad (\text{Ecuación 18})$$

En donde:

Y : Fracción de sustrato convertida en biomasa,

K_d : Coeficiente de mortalidad endógeno,

θ_c : Período medio de residencia de las células

1.10.4 Tanque sedimentador secundario

1.10.4.1 Volumen del reactor

$$V = l \times a \times h \quad (\text{Ecuación 19})$$

En donde:

l : largo del reactor (m),

a : ancho del reactor (m), y

h : altura del reactor (m).

1.10.4.2 Profundidad del reactor

Este valor se toma de valores típicos usados dentro del diseño de una planta de tratamiento.

1.10.4.3 Área del reactor

En base a la carga superficial se tiene:

$$A = \frac{Q}{C_s} \quad (\text{Ecuación 20})$$

En donde:

A= área (m²),

Q= caudal a tratar en el sedimentador primario (m³/s), y

Cs= carga superficial (m³/m²*día).

1.10.4.4 Área mínima requerida para la clarificación

Se calcula a partir de la expresión:

$$A = \frac{Q}{V_s} \quad (\text{Ecuación 21})$$

En donde:

Q= Caudal (m³/s),

Vs= Velocidad de sedimentación por zonas (m/s)

1.9.4.5 Ancho del reactor

$$a = \sqrt{\frac{A}{2}} \quad (\text{Ecuación 22})$$

En donde:

a: ancho del tanque sedimentador

A: área del tanque sedimentador

1.10.4.6 Largo del reactor

El largo del tanque viene definido por la fórmula:

$$L = \frac{v}{a \times h} \quad (\text{Ecuación 23})$$

En donde:

v: volumen,

a: ancho, y

h: profundidad

1.10.4.7 Carga superficial

Esta variable ayuda a calcular el área superficial del sedimentador. Depende del tipo de suspensión que haya que separarse. Los valores vienen dados por la siguiente tabla:

Tabla 7. Consideraciones de diseño para carga superficial.

CARACTERÍSTICAS	INTERVALO	VALOR TÍPICO TOMADO
Tiempo de retención, h	1.5-2.5	2
Carga de superficie m ³ /m ² *día		
A caudal medio	30-50	40
A caudal punta	80-120	100
Carga sobre vertedero m ³ /m*día	125-500	250

Tomado de: Metcalf and Eddy, 2014, pp.394

Explicación: Los valores presentados en las tablas dan referencia a una planta de tamaño real.

1.10.4.8 Tiempo de detención hidráulica

Se entiende al tiempo de detención hidráulica como “el tiempo promedio en el que el fluido del caudal Q pasa a través del volumen V” (Pérez, 2000, pp.3).

Se obtiene mediante la fórmula:

$$t = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ecuación 24})$$

En donde:

V: volumen del tanque en m³,

Q: caudal en m³/día

1.10.4.9 Velocidad horizontal

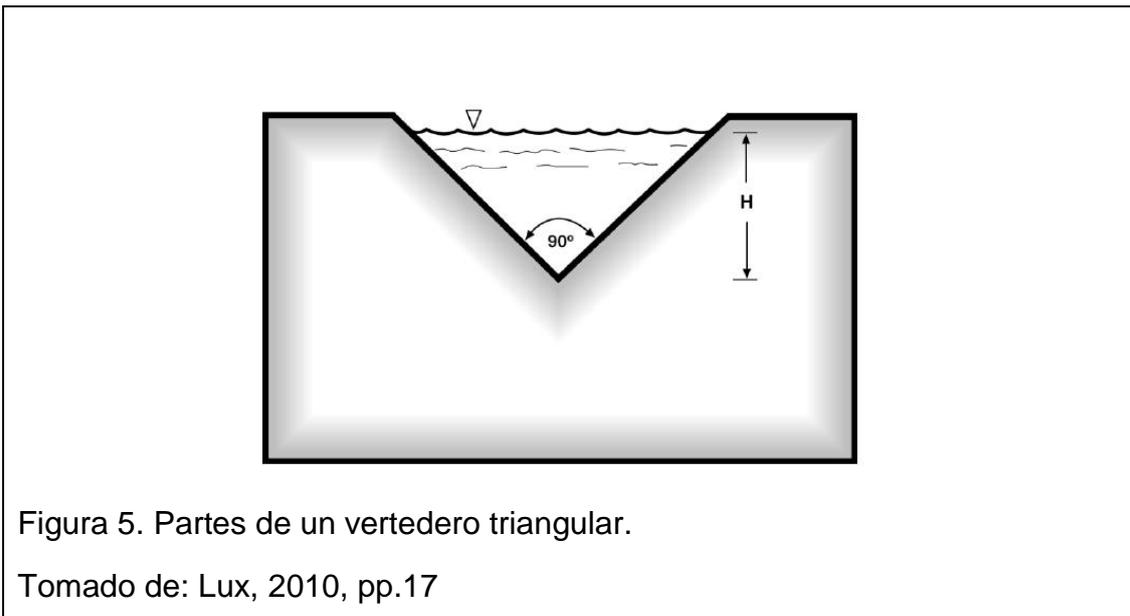
Normalmente no debe exceder 1 cm/s para lograr que la entrada y salida del flujo al tanque sea uniforme en toda la sección transversal (Sánchez, 2010, pp.14-15).

1.9.5 Diseño Hidráulico

1.10.5.1 Diseño de vertederos

Los vertederos son definidos como aberturas, por los cuales fluye un líquido (Portillo, 2012, pp.21-22). En la planta piloto de tratamiento a diseñar, se utilizarán vertederos para lograr el paso del agua residual de un tanque a otro. En este caso se utilizará 2 vertederos triangulares. Uno que dé paso al agua residual del tanque sedimentador primario al tanque biológico, y otro del tanque biológico al tanque sedimentador secundario.

El vertedero triangular es el más utilizado para descargas pequeñas, así como el que posee 90° en su vértice inferior (Portillo, 2012, pp.21-22).



1.10.5.1.1 Caudal

Se utiliza la fórmula de Thomson:

$$Q = 1,4 \times H^{5/2} \quad \text{(Ecuación 25)}$$

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan(\phi/2) H^{5/2}$$

En donde:

Q: caudal que fluye por el vertedero,

H: carga del vertedero,

ϕ : ángulo en vértice inferior.

1.10.5.1.2 Ancho

El ancho del canal de aproximación en un vertedero triangular necesita ser igual o mayor a 5 veces la carga sobre el vertedero (Rocha, 2007, pp.480).

$$B \geq 5H \quad \text{(Ecuación 26)}$$

1.10.5.1.3 Longitud

La longitud del vertedero se puede obtener mediante la fórmula:

$$L = \tan \frac{\theta}{2} \times 2H \quad (\text{Ecuación 27})$$

1.10.5.1.4 Sección transversal del canal de aproximación

$$A = B \times (H + P) \quad (\text{Rocha, 2007, pp.487}). \quad (\text{Ecuación 28})$$

En donde:

B: ancho del canal de aproximación,

H: carga sobre el vertedero, y

P: umbral.

1.10.5.1.5 Velocidad de aproximación

$$V_o = \frac{Q}{A} \quad (\text{Ecuación 29})$$

Nota: Si el umbral (P) es mucho mayor que la carga sobre el vertedero (H) ésta velocidad sería despreciable (Rocha, 2007, pp.487).

2. METODOLOGÍA

El pre-diseño de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales se lo realizó en el programa de Microsoft Office Excel, en el que se introdujo cada una de las fórmulas descritas en el marco teórico, donde se jugó con las variables y parámetros de diseño para obtener dimensiones lógicas de una planta piloto.

2.1 Diseño Sanitario

2.1.1 Diseño de las rejillas

Por ser una planta piloto, no se dimensionó rejillas ya que éstos valores llegarían a ser pequeños, por lo que son insignificantes.

2.1.2 Caudal

Se tomó un valor mínimo de 0,1 lt/s, el cual nos ayudó a obtener tamaño de tanques funcionales. Este valor es muy importante ya que forma parte de varias fórmulas, por lo que variar este valor nos ayudó a obtener dimensiones de la planta prudentes.

2.1.3 Tanque sedimentador primario

Según bibliografía un valor mínimo típico tomado para carga superficial en una planta de tratamiento es de 80 m³/m²*día (Metcalf and Eddy, 2014, pp.394), para nuestra planta piloto se asumió un valor de carga superficial de 40 m³/m²*día, es decir la mitad del valor mínimo. Con éste valor y el caudal se calculó el área del tanque, dividiendo el caudal para la carga superficial.

Una vez obtenido el valor de área del tanque se definió una relación largo-ancho, la cual en este caso es 1:2. El ancho del tanque se obtuvo con la fórmula ya explicada en el marco teórico:

$$a = \sqrt{\frac{A}{2}}$$

En la que se usó el valor del área ya obtenido, dividido para el valor de 2 (relación largo-ancho). Seguido de esto, se obtuvo el valor de largo, el cual se adquiere de la división del ancho del tanque para 2 (relación largo-ancho).

El valor de profundidad del tanque en el diseño de una planta se asume dentro de los valores recomendados por la bibliografía. Normalmente el valor mínimo para una planta de tratamiento es de 3 metros (Metcalf and Eddy, 2014, pp.394), pero a la planta piloto se le dió un valor de profundidad de 1 metro. Definido este valor, podemos calcular el volumen del tanque, el cual se obtuvo de la multiplicación del largo por ancho y por profundidad.

El tiempo de retención hidráulico fue el siguiente parámetro a calcular, el cual se consiguió dividiendo el volumen para el caudal. Este valor nos queda en segundos, por lo que se dividió para 60, con el fin de obtener este tiempo en minutos.

Finalmente se tomó un valor de DBO_5 y sólidos sedimentables de 125,16 mg/lit y 447 mg/lit respectivamente, para calcular su remoción mediante fórmulas en el tanque biológico. Estos valores se eligieron mediante las siguientes tablas del Código Ecuatoriano de la Construcción, Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes. Se definió una remoción teórica de sólidos suspendidos del 50%.

El valor de sólidos en suspensión, se eligió de la siguiente tabla presentada, valor que está en gramos/habitante*día, por esto se multiplicó por los 43 habitantes obtenidos para la planta piloto, seguido de esto se dividió para el caudal de la planta al día (8640 lit/día) obteniendo el valor de sólidos en gramos/lit, se multiplicó por 1000 para finalmente conseguir el valor en miligramos/litro.

Tabla 8. Aportes per cápita para aguas residuales domésticas.

PARÁMETRO	INTERVALO	VALOR SUGERIDO
DBO 5 días, 20°C, g/(Hab.d)	36-78	50
Sólidos en suspensión, g/(Hab.d)	60-115	90
NH ₃ -N como N, g/(Hab.d)	7.4-11	8.4
N Kjeldahl total como N, g/(Hab.d)	9.3-13.7	12.0
Coliformes totales, NMP/(Hab.d)	2×10^8 - 2×10^{11}	2×10^{11}
Salmonella Sp., #/(Hab.d)		10^8
Nematodos intestinales, #/(Hab.d)		4×10^{11}

Explicación: Código Ecuatoriano de la Construcción, normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes, 1992.

Adaptado de: INEN, 1992.

El valor de DBO₅, se eligió de la siguiente tabla presentada correspondiente a aguas grises ya que tomando como referencia la Universidad solo se tiene este tipo de componente del agua residual doméstica. Este valor está en gramos/habitante*día, por esto se multiplicó por los 43 habitantes obtenidos para la planta piloto, seguido de esto se dividió para el caudal de la planta al día (8640 lt/día) obteniendo el valor de sólidos en gramos/lt, se multiplicó por 1000 para finalmente conseguir el valor en miligramos/litro.

Tabla 9. Aportes per cápita para los diferentes componentes del agua residual doméstica.

COMPONENTE	DBO ₅		DQO		NH ₃ -N	
	g/(Hab.d)	%	g/(Hab.d)	%	g/(Hab.d)	%
Aguas grises	25,15	52	51,63	43	0,442	13,5
Lavadero de cocina	9,2	19	18,8	16	0,074	2,3
Baño	6,18	13	9,08	8	0,043	1,3
Lavabo de baño	1,86	4	3,25	2	0,009	0,3
Lavado de ropa	7,9	16	20,30	17	316	9,8
Excretas	23,54	48	67,78	57	2,78	86,5
Contribución total	48,69	100	119,41	100	3,22	100

Explicación: Código Ecuatoriano de la Construcción, normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes, 1992.

Adaptado de: INEN, 1992.

2.1.4 Tanque biológico

El caudal a entrar en este tanque es el mismo del tanque sedimentador primario, es decir 0,1 lt/s.

El volumen de este tanque se obtuvo de manera diferente que los tanques de sedimentación, ya que al ser un tanque de lodos activados se necesitó otros parámetros a considerar. Mediante la tabla 4, se obtuvo las variables para calcular el volumen del tanque mediante la fórmula:

$$V = \frac{\theta_c Q_0 y (S_0 - S)}{X(1 + K_d \theta_c)}$$

La tabla 4 da un rango de valores de acuerdo al método de aireación que se elija, al ser un método convencional se escogió los valores mínimos entre el

rango, con el fin de obtener un volumen adecuado para el tanque biológico de una planta piloto.

Primero se tomó un coeficiente de mortalidad endógeno de 0,04 días, la concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor fue de 1,5 kg/m³, la concentración del sustrato que sale del reactor aireador fue de 0,01 kg/m³, la fracción de sustrato convertido en biomasa fue de 0,4 mg/mg y el período medio de residencia de las células fue de 5 días.

Según bibliografía un valor mínimo típico tomado para carga superficial en una planta de tratamiento es de 80 m³/m²*día (Metcalf and Eddy, 2014, pp.394), para nuestra planta piloto se asumió un valor de carga superficial de 40 m³/m²*día, es decir la mitad del valor mínimo. Con éste valor y el caudal se calculó el área del tanque, dividiendo el caudal para la carga superficial. Se dividió el volumen del tanque para el área, y se obtuvo un total de 8 tanques biológicos.

Una vez obtenido el valor de área del tanque se define una relación largo-ancho, la cual en este caso es 1:2. El ancho del tanque se obtuvo con la fórmula ya explicada en el marco teórico:

$$a = \sqrt{\frac{A}{2}}$$

En la que se usó el área ya obtenida dividido para 2 (relación largo-ancho). Seguido de esto, se obtuvo el valor de largo, el cual se adquirió de la división del ancho del tanque para 2 (relación largo-ancho).

El valor de profundidad del tanque en el diseño de una planta se asume dentro de los valores recomendados por la bibliografía. Normalmente el valor mínimo para una planta de tratamiento es de 3 metros (Metcalf and Eddy, 2014), pero a la planta piloto se le dió un valor de profundidad de 1 metro.

El tiempo de retención hidráulico fue el siguiente parámetro a calcular, el cual se consiguió dividiendo el volumen para el caudal. Este valor nos queda en segundos, por lo que se dividió para 60, con el fin de obtener este tiempo en minutos.

La cantidad teórica de oxígeno normalmente se obtiene teniendo un número de habitantes. Al ser una planta piloto no se cuenta con éste número, por lo que se lo obtuvo mediante el valor típico per cápita de caudal, el cual es $0,20 \text{ m}^3/\text{hab} \cdot \text{día}$ dividido para 86400 segundos, y el caudal ($0,0001 \text{ m}^3/\text{s}$). Se dividió el valor per cápita de caudal para el caudal y así se adquirió el número de personas.

Después de esto, se multiplica el valor per capita ($0,20 \text{ m}^3/\text{hab} \cdot \text{día}$) por el DBO_5 de entrada asumido ($125,16 \text{ mgO}_2/\text{lt}$), obteniendo así el valor de carga orgánico per cápita. Este último valor se lo multiplica por el número de habitantes y por el consumo específico de oxígeno que es $1,7 \text{ kgO}_2/\text{kgDBO}_5$ conseguido mediante bibliografía, que nos dice “La necesidad de oxígeno para la oxidación total de la DBO_5 contenida en el fango primario variará de 1,7 a 1,9 kilogramos por kilogramo destruido” (Metcalf and Eddy, 2014, pp.886).

En esta fase, se obtuvo la remoción teórica del DBO_5 , para conocer el valor que entraría en el tanque de sedimentación secundario, valores que se asumieron.

2.1.5 Tanque de sedimentación secundaria

El caudal a entrar en este tanque es el mismo del tanque sedimentador primario y biológico, es decir $0,1 \text{ lt/s}$.

Según bibliografía un valor mínimo típico tomado para carga superficial en una planta de tratamiento es de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$, para nuestra planta piloto se asumió un valor de carga superficial de $40 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$, es decir la mitad del valor mínimo. Con éste valor y el caudal se calculó el área del tanque, dividiendo el caudal para la carga superficial.

Una vez obtenido el valor de área del tanque se define una relación largo-ancho, la cual en este caso es 1:2. El ancho del tanque se obtuvo con la fórmula ya explicada en el marco teórico:

$$a = \sqrt{\frac{A}{2}}$$

En la que se usó el área ya obtenida, dividido para 2 (relación largo-ancho). Seguido de esto, se obtuvo el valor de largo, el cual se adquiere de la división del ancho del tanque para 2 (relación largo-ancho).

El valor de profundidad del tanque en el diseño de una planta se asume dentro de los valores recomendados por la bibliografía. Normalmente el valor mínimo para una planta de tratamiento es de 3 metros, pero este valor es grande para una planta piloto, por lo que se le dió un valor de profundidad de 1 metro, valor que es funcional para la respectiva sedimentación de los sólidos. Definido este valor, podemos calcular el volumen del tanque, el cual se obtuvo de la multiplicación del largo por ancho y por profundidad.

El tiempo de retención hidráulico fue el siguiente parámetro a calcular, el cual se consiguió dividiendo el volumen para el caudal. Este valor nos queda en segundos, por lo que se dividió para 60, con el fin de obtener este tiempo en minutos.

En esta fase se debe calcular la cantidad de lodos a recircular. Con la fórmula ya explicada en el marco teórico:

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + k_d \theta_c}$$

Los valores de las variables en la ecuación se obtuvieron de la tabla 4.

2.2 Diseño Hidráulico

2.2.1 Diseño de vertederos

El caudal a entrar en el vertedero es el mismo de entrada a los tanques, el cual es 0,1 lt/s; usando la fórmula de Thomson para obtener caudal, se despejó la

carga del vertedero (H), es decir se dividió el caudal para 1,4, esto elevado al cuadrado y raíz quinta de todo el resultado.

Una vez obtenido el valor de carga del vertedero se obtuvo la longitud, multiplicando la tangente de 45° por 2 veces la carga del vertedero.

El ancho del vertedero es 5 veces la carga del mismo, y el umbral 3 veces la carga del vertedero.

La sección transversal del canal de aproximación del vertedero se obtuvo de la multiplicación del ancho del vertedero por la suma de la carga del mismo más el umbral.

2.3 Cálculo de precios unitarios

El cálculo de precios unitarios se realizó separando equipos y herramientas, materiales, transporte y mano de obra. Se elaboró 2 rubros, uno que contiene corte de láminas, y el otro unión de láminas y montaje de la planta.

Dentro del rubro corte, el cual se hizo global, se tuvo equipos y herramientas, que corresponde a la cortadora láser para las láminas acrílicas. El costo por hora de corte es de 36 dólares, la máquina corta 15 metros por hora, por lo que el rendimiento se lo obtuvo dividiendo 1 para el valor de 15 metros. Se definió un total de 90 metros lineales de corte, por lo que se multiplicó estos 3 valores para obtener el costo total. Dentro de materiales se tiene láminas acrílicas para uso general de color cristal translúcido con un espesor de 5 milímetros y un tamaño de largo por ancho de 1,20 x 1,80 metros. El precio de cada lámina es de \$118,50, la cantidad total prevista de láminas que se usarían es de 20, por lo que se multiplicó éstos dos valores para obtener el precio total.

En cuanto al rubro unión de láminas y montaje de la planta, el cual se hizo por metro lineal. Se definió los materiales que se utilizarían, que corresponde a adhesivo de cianoacrilatos para unir las láminas, cada tubo de 5 ml. cuesta \$3, se asumió una cantidad total de producto por metro lineal que se usaría de 0,20, por lo que se multiplicó éstos dos valores para obtener el precio por metro lineal. Para solidificar la adhesión de las láminas se usaría silicona de relleno, cada tubo de 300 ml. tiene un costo de \$3,99, se asumió cantidad total de

producto por metro lineal que se usaría de 0,20, por lo que se multiplicó éstos dos valores para obtener el precio total. Dentro de mano de obra, se definió un trabajador con un rendimiento de un metro por hora, y un costo horario de 3,22 dólares. Se multiplicó estos 3 últimos valores, obteniendo así el costo por metro lineal. Finalmente, la suma de materiales y mano de obra se multiplicó por el total de 90 metros que corresponden al total de tanques.

Nota: Dentro de este análisis de precios unitarios no constan válvulas, conectores, mangueras, tuberías, dosificadores de caudal y bombas, ya que en este proyecto de titulación se elaboró un pre-diseño descrito en el alcance del mismo.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Pre-diseño del tanque sedimentador primario

Se definió un caudal de entrada de $0,0001 \text{ m}^3/\text{s}$ con una demanda biológica de 125 mg de O_2/lt y un valor total de sólidos sedimentables de $447 \text{ mg}/\text{lt}$.

Se obtuvo un tiempo de retención hidráulico de 36 minutos, es decir el tiempo en el que el agua residual permanecerá en el tanque primario. El valor de carga superficial que se asumió fue de $40 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$, el volumen del tanque que se obtuvo fue de $0,22 \text{ m}^3$, el área del tanque es de $0,22 \text{ m}^2$. Se definió una relación ancho-largo de 1:2 para obtener los valores de largo que fue de $0,66 \text{ m}$. y de ancho que fue de $0,33 \text{ m}$.

Se asumió un valor de profundidad del tanque de 1 m . y una pendiente en el fondo del mismo de 1% . La velocidad crítica de sedimentación fue de $0,00046 \text{ m}/\text{s}$ y se obtuvo un nuevo valor de sólidos suspendidos de $223,5 \text{ mg}/\text{l}$.

Los tanques de sedimentación primaria contribuyen de manera importante en el proceso de tratamiento del agua residual. El caudal de entrada asumido fue de $0,0001 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,1 \text{ lt}/\text{s}$), que corresponde a la décima parte del caudal que fluye a través de las llaves de la universidad, el cual fue tomado como referencia, para construir tanques funcionales, debido a que este valor es suficiente para una planta piloto de este tipo, y es importante, ya que forma parte de diversas fórmulas, por lo que variar este valor nos ayudó a obtener dimensiones de la planta prudentes.

Los valores elegidos de DBO_5 y sólidos suspendidos fueron los de mostrados en la tabla 10, ya que es una planta piloto con dimensiones más pequeñas que un PTAR de tamaño real, que con valores de concentración fuertes o medios no funcionaría con un porcentaje alto de eficiencia.

El tiempo de retención de la planta piloto fue de 36 minutos, normalmente en tanques de sedimentación de plantas de tamaño real el valor varía de 1.5 a 2.5 horas (Metcalf and Eddy, 2014, pp.394); comparado con el valor de la planta piloto, éste es casi la mitad del tiempo de una planta real debido a que los

valores de volumen y caudal son pequeños y la carga superficial es menor que la carga que tendría una planta real.

Para nuestra planta piloto se asumió un valor de carga superficial de $40 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$, es decir la mitad del valor mínimo recomendado según bibliografía ($80 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$) (Metcalf and Eddy, 2014, pp.394), ya que al ser una planta piloto necesita de poca carga, de otra manera el proceso de sedimentación de sólidos no tendría éxito (una carga de superficie adecuada depende del tipo de suspensión que se deba sedimentar).

Se definió una relación ancho-largo de 1:2, es decir el tanque es 2 veces más largo que ancho. En plantas reales, ésta relación recomendada por bibliografía es de 1:4 a 1:5 (Crittenden, Trussell, Hand, Howe, y Tchobanoglous, 2012, pp.689).

La profundidad de un tanque de sedimentación en el diseño de una PTAR se asume de acuerdo a la cantidad de sólidos a sedimentar, según bibliografía este valor va de 3 a 4,5 metros en una planta de tamaño real (Metcalf and Eddy, 2014, pp.394), pero este valor es grande para una planta piloto por la cantidad de sólidos sedimentables aproximados que en ésta van a ingresar, por lo que se le dió un valor de profundidad de 1 metro, valor que es funcional para la respectiva sedimentación de los sólidos.

Por último el valor recomendado de porcentaje de pendiente al fondo de un tanque de sedimentación para la recolección de sólidos es de 1% (Crittenden et al., 2012, pp.689), valor que se tomó para la planta piloto y es suficiente.

3.2 Pre-diseño del tanque biológico

El caudal a entrar es de $0,0001 \text{ m}^3$. Para obtener el volumen se asumió un coeficiente de mortalidad endógeno de 0,04 días, una concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor de $1,5 \text{ kg}/\text{m}^3$, una concentración del sustrato que sale del reactor aireador de $0,01 \text{ kg}/\text{m}^3$, la fracción de sustrato convertido en biomasa de 0,4 mg/mg, la concentración del afluente, como DBO_5 ó DQO de $0,2 \text{ kg}/\text{m}^3$, el período medio de residencia de las células de 5 días, obteniendo así un volumen del tanque de $1,8 \text{ m}^3$ con un área de $0,22 \text{ m}^2$, se

dividió estos dos valores y se obtuvo un total de 8 tanques biológicos, que deben ser construídos en paralelo para que el caudal sea repartido de manera uniforme a los tanques. El tiempo de retención hidráulico es de 5 horas.

El volumen obtenido fue mayor en comparación con los tanques sedimentadores, debido a los diferentes parámetros que se necesitan al calcular este volumen, por lo tanto se debe dividir para el área con el fin de obtener la cantidad de tanques a necesitar, que fue un total de 8 tanques.

La ecuación utilizada para la obtención del volumen del tanque biológico junto con los parámetros, originalmente se evaluó para diferentes valores de volúmenes de un tanque biológico, tomando los rangos de valores en la tabla 4 como parámetros de diseño, para así determinar el caudal de efluente necesario para cada caso y obtener el volumen óptimo (Metcalf and Eddy, 2014, pp.394). Aclarado esto, los valores usados como parámetros de diseño dentro de la fórmula obtenidos de la tabla fueron los mínimos de entre los rangos por el valor de caudal bajo.

La planta está aplicada a volúmenes de agua residual inferiores a plantas de tratamiento residuales standard, lo que fue una restricción al momento de pre diseñar la planta piloto.

El número de habitantes supuestos para la planta piloto fue de 43 personas y la velocidad de carga orgánica per capita fue de 22 gO₂/hab.día, ayudándonos a obtener la cantidad teórica de oxígeno, que nos dió un valor de 1,8 kg O₂/día.

La demanda biológica de oxígeno y el total de sólidos en suspensión fue de 125,16 mg de O₂/lt y 223,5 mg/lt respectivamente. Los valores de DBO₅ Y sólidos en suspensión vienen dados en g/hab.d, por lo que el proceso para llegar a obtener los valores con los que entraría el agua residual a la planta piloto, es decir se dividió para el caudal diario, es por el hecho de que carga es igual a caudal por concentración ($L = Q * C$).

Se asumió una remoción teórica de DBO₅ del 25% obteniendo así un nuevo valor de DBO₅ de 31,29 mgO₂/lt, y una remoción teórica de sólidos sedimentables del 40%, consiguiendo un nuevo valor de sólidos sedimentables

de 89,4 mg/lit, valores que cumplen con el acuerdo ministerial 028 para descargas al sistema de alcantarillado.

El valor de carga superficial que se asumió fue de $40 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$. Se definió una relación ancho-largo de 1:2 para obtener los valores de largo que fue de 0,66 m. y de ancho que fue de 0,33 m. Se asumió un valor de profundidad del tanque de 1 m.

Se definió una relación ancho-largo de 1:2, es decir el tanque es 2 veces más largo que ancho. En plantas reales, ésta relación recomendada por bibliografía es de 1:4 a 1:5 (Crittenden et al., 2012, pp.689).

Para obtener la cantidad teórica de oxígeno que se necesitó proveer al tanque, fue necesaria la obtención de un número supuesto de habitantes, ya que se requería de la velocidad de carga orgánica per cápita, es decir los gramos de DBO_5 por habitante al día y el consumo específico de oxígeno, que significa los kilogramos de oxígeno consumido por kilogramo de DBO_5 , el cual se asumió el valor mínimo según bibliografía, por ser un valor de DBO_5 débil para la planta piloto.

Según bibliografía, un tanque de lodos activados que funciona de manera eficiente deberá eliminar sólidos suspendidos en un 50 al 65% y la DBO_5 de 25 al 40%, en base a experiencias de funcionamiento (Metcalf and Eddy, 2014, pp.394). Se asumió el porcentaje mínimo de remoción.

Para nuestra planta piloto se asumió un valor de carga superficial de $40 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$, es decir la mitad del valor mínimo recomendado según bibliografía ($80 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$) (Metcalf and Eddy, 2014, pp.394), ya que al ser una planta piloto necesita de poca carga, de otra manera el proceso de sedimentación de sólidos no tendría éxito (una carga de superficie adecuada depende del tipo de suspensión que se deba sedimentar).

La profundidad de un tanque de sedimentación en el diseño de una PTAR se asume de acuerdo a la cantidad de sólidos a sedimentar, según bibliografía este valor va de 3 a 4,5 metros en una planta de tamaño real (Metcalf and Eddy, 2014, pp.394), pero este valor es grande para una planta piloto por la

cantidad de sólidos sedimentables aproximados que en ésta van a ingresar, por lo que se le dió un valor de profundidad de 1 metro, valor que es funcional para la respectiva sedimentación de los sólidos.

3.3 Pre-diseño del tanque sedimentador secundario

El caudal a entrar es de $0,001 \text{ m}^3$ con una DBO_5 de $31,29 \text{ gO}_2/\text{lt}$ y un total de sólidos sedimentables de $178,8 \text{ mg/lt}$. Se obtuvo la cantidad de lodos a recircular de $0,33 \text{ mg/día}$.

Se obtuvo un tiempo de retención hidráulico de 36 minutos, es decir el tiempo en el que el agua residual permanecerá en el tanque primario. El valor de carga superficial que se asumió fue de $40 \text{ m}^3/\text{m}^2$ por día, el volumen del tanque que se obtuvo fue de $0,22 \text{ m}^3$, el área del tanque es de $0,22 \text{ m}^2$. Se definió una relación ancho-largo de 1:2 para obtener los valores de largo que fue de $0,66 \text{ m}$. y de ancho que fue de $0,33 \text{ m}$.

Se asumió un valor de profundidad del tanque de 1 m . y una pendiente en el fondo del mismo de 1% .

El tanque sedimentador secundario nos ayuda principalmente a sedimentar residuos de lodos activados que atraviesan del tanque biológico, por lo tanto, a diferencia del tanque sedimentador primario, se calculó en teoría la cantidad de lodos a recircular al tanque biológico para ser nuevamente utilizados.

Los valores de DBO_5 y sólidos sedimentables que ingresan a este tanque son los nuevos valores obtenidos de la remoción del tanque biológico, los cuales fueron calculados mediante un porcentaje de remoción teórica, y son valores que ya no representan una contaminación significativa para el medio ambiente y que cumplen con los parámetros permitidos según la Ley.

El tiempo de retención de la planta piloto fue de 36 minutos, normalmente en tanques de sedimentación de plantas de tamaño real el valor varía de 1.5 a 2.5 horas (Metcalf and Eddy, 2014); comparado con el valor de la planta piloto, éste es menor debido a que los valores de volumen y caudal son pequeños.

Para nuestra planta piloto se asumió un valor de carga superficial de $40 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$, es decir la mitad del valor mínimo recomendado según bibliografía ($80 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$) (Metcalf and Eddy, 2014, pp.394), ya que al ser una planta piloto necesita de poca carga, de otra manera el proceso de sedimentación de sólidos no tendría la misma eficiencia (una carga de superficie adecuada depende del tipo de suspensión que se deba sedimentar).

Se definió una relación ancho-largo de 1:2, es decir el tanque es 2 veces más largo que ancho. En plantas reales, ésta relación recomendada por bibliografía es de 1:4 a 1:5 (Crittenden et al., 2012, pp.689).

La profundidad de un tanque de sedimentación en el diseño de una PTAR se asume de acuerdo a la cantidad de sólidos a sedimentar, según bibliografía este valor va de de 3-4,5 metros en una planta de tamaño real (Metcalf and Eddy, 2014, pp.394), pero este valor es grande para una planta piloto por la cantidad de sólidos sedimentables aproximados que en ésta van a ingresar, por lo que se le dió un valor de profundidad de 1 metro, valor que es funcional para la respectiva sedimentación de los sólidos.

Por último el valor recomendado de porcentaje de pendiente al fondo de un tanque de sedimentación para la recolección de sólidos es de 1% (Crittenden et al., 2012, pp.689), valor que se tomó para la planta piloto.

3.4 Pre-diseño de los vertederos triangulares

El caudal a ingresar en los vertederos es de $0,0001 \text{ m}^3$. Se obtuvo un valor de carga de los vertederos de 0,02 metros, con una longitud de 0,04 metros, un umbral de 0,07 metros y un ancho de 0,11 metros. La sección transversal del canal de aproximación es de 0,01 metros.

Los vertederos nos están ayudando a lograr el paso del agua residual tratada de un tanque a otro, el caudal con que el agua entra a los vertederos es el mismo, es decir $0,0001 \text{ m}^3/\text{s}$. El valor obtenido de umbral es el correcto, ya que como nos indica la bibliografía, éste valor debe ser tres veces la carga del vertedero, al igual que el ancho es cinco veces mayor (Rocha, 2007, pp.480).

3.5 Costos unitarios

Dentro del rubro N.-1 se obtuvo un costo total de equipos y herramientas de \$215,04 y de materiales de \$2370, dando un total de \$2585,04. Dentro del rubro N.-2 se obtuvo un costo total por metro lineal de materiales de \$1,40, y mano de \$3,22, dando un total de \$415,62 por el total de metros.

Se obtuvo un monto total de inversión de \$3000,66.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se pre-diseñó y elaboró los planos de una planta piloto para el tratamiento de aguas domésticas con tecnología de lodos activados que consta de un tanque sedimentador primario, un tanque biológico, un tanque sedimentador secundario y 2 vertederos que tratará un caudal de $0,001 \text{ m}^3$.
- Por su asequible estructura y operación, la planta servirá como base de enseñanza teórico-práctica a futuros estudiantes en la identificación de variables involucradas en el dimensionamiento de una planta, así como el funcionamiento de la misma.
- El diseño de rejillas como pre-tratamiento en la planta piloto no fue relevante ya que los valores serían insignificantes, además de que el agua residual doméstica que entraría a la planta no contendría sólidos grandes.
- El dimensionamiento de los tanques que constituyen la planta piloto de tratamiento de aguas residuales fueron calculadas mediante una hoja de cálculo en Microsoft Office Excel, utilizando todas las fórmulas descritas en el marco teórico y asumiendo algunos valores según bibliografía, para determinar el tamaño físico de los tanques y otras características.
- Una de las restricciones identificadas en el pre dimensionamiento a escala de una PTAR es el cálculo mediante fórmulas de una escala inferior a la normal.
- Los valores definidos de carga superficial, DBO y SST en el agua residual doméstica son los establecidos para el tratamiento dentro de la

planta piloto con un rango de ± 20 máximo, por que sus dimensiones no están hechas para tratar cargas superficiales altas.

- Se pre diseñó un tanque sedimentador primario y secundario con una relación largo-ancho de 1:2, un largo de 0,66 metros, un ancho de 0,33 metros, una profundidad de 1 metro, un área de 0,22 m² un volumen de 0,22 m³ y un tiempo de retención de 36 minutos.
- Se pre diseñó 8 tanques biológicos con un área de 0,22 m² que tratarán un volumen de 1,8 m³, con una relación largo-ancho de 1:2, un largo de 0,66 metros, un ancho de 0,33 metros, una profundidad de 1 metro y un tiempo de retención de 5 horas.
- Se tomó los valores mínimos típicos según bibliografía de demanda biológica de oxígeno y de sólidos sedimentables encontrados en las aguas residuales domésticas (considerados como contaminación débil), porque al ser una planta piloto, no se podría manejar valores de contaminación altos, ya que su eficiencia no sería la misma.
- Según bibliografía (Metcalf and Eddy, 2014), un tanque de lodos activados que funciona de manera eficiente deberá eliminar sólidos suspendidos en un 50 al 65% y la DBO₅ de 25 al 40%.
- Se diseñó 2 vertederos triangulares para la planta piloto para el paso del agua residual del tanque sedimentador primario al biológico y de éste al tanque sedimentador secundario. El vertedero triangular es el más utilizado para descargas pequeñas, así como el que posee 90° en su vértice inferior.
- El valor total que costaría construir la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas piloto en teoría, es de 2800,32 dólares.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda que el agua residual doméstica que entre a la planta no contenga sólidos gruesos que normalmente se tratarían con rejillas.
- Los tanques biológicos deben ser colocados en paralelo para que la distribución del volumen del agua residual a tratar sea uniforme.
- Se recomienda tomar en cuenta el cálculo del volumen del tanque biológico en comparación con las dimensiones físicas, ya que ésta fórmula consta de parámetros diferentes a los tanques sedimentadores.
- Antes de ensayar con modelamiento de plantas piloto, se debe ejecutar un análisis dimensional, es decir analizar el tamaño físico de los tanques y tomar en cuenta las posibles restricciones que se tiene al dimensionar plantas piloto en comparación con plantas de tamaño real, lo cual permitirá percatarse de las variables más importantes.
- Es importante estudiar los procesos que suceden dentro de una planta de tratamiento de aguas piloto por separado, ya sea comportamiento hidráulico o sanitario, ya que el análisis dimensional permitirá replicar modelos a la escala que se quiera.
- Se recomienda, para aprendizaje teórico – práctico de futuros profesionales de la Ingeniería Ambiental, promover la construcción y el uso de plantas de tratamiento de aguas residuales piloto para garantizar una efectiva operación de PTAR de tamaño real.

REFERENCIAS

- Acosta, R. (2008). Saneamiento ambiental e higiene de los alimentos. Córdoba, Argentina: Editorial Brujas.
- Cisneros, Z., Penso, D. (2012). Diseño de una Planta de tratamiento de Aguas Residuales para la urbanización “Mis Cariños”, Chaguaramas, estado Guárico, para ser vertidas en cauces naturales. Caracas, Venezuela: Universidad Nueva Esparta.
- Condorchem Envitech. (2015). Historia sobre el tratamiento del agua potable. Barcelona, España. Recuperado el 21 de Septiembre del 2015 de <http://blog.condorchem.com/historia-sobre-el-tratamiento-del-agua-potable/>
- Correia, G., Sánchez, I., Gebara, D., Dall’Aglío, M., Matsumoto, T. (2013). Remoción de fósforo de diferentes aguas residuales en reactores aeróbios de lecho fluidizado trifásico con circulación interna. Pasto, Colombia: Universidad de Nariño.
- Crites y Tchobanoglous. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Colombia: McGraw-Hill, Inc.
- Crittenden, J., Trussell, R., Hand, D., Howe, K., y Tchobanoglous, G. (2012). MWH’S Water Treatment: Principles and Design. (3.^a ed.). Hoboken, New Jersey: Jonh Wiley and Sons, Inc.
- Delgado, J., Rennola, L., Sharon, L. (2006). Diseño y construcción de una planta piloto para el tratamiento de aguas residuales por lodos activados y su puesta en marcha para tratar vinazas de una destilería. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes.
- Orozco, A. (2005). Bioingeniería de aguas residuales, teoría y diseño. Cali, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Díaz, E., Alvarado, A. y Camacho, K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. Toluca, México:

Universidad Autónoma del Estado de México.

El Banco Mundial. (2014). Un 70% de las aguas residuales de Latinoamérica vuelven a los ríos sin ser tratadas. Recuperado el 13 de Julio del 2014 de <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminados>.

El Universal. (2013). Aumenta uso de aguas residuales tratadas en el mundo. Recuperado el 13 de Julio de <http://www.eluniversal.com.mx/sociedad/2013/impreso/aumenta-uso-de-aguas-residuales-tratadas-en-el-mundo-8689.html>.

Fraume, N. (2006). Manual Abecedario Ecológico. Bogotá, Colombia: Editorial San Pablo.

Horan, N.J. (1991). Biological wastewater treatment systems: theory and operations. Chichester, Inglaterra: John Wiley and Sons Ltd.

Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), Código de Práctica Ecuatoriano (CPE). (1992). Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes. (1.^a ed.).

Kiely, G. (1998). Environmental Engineering. Londres: McGraw-Hill, Inc.

Lux, M. (2010). Medidores de flujo en canales abiertos. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

Martínez, S. y Rodríguez, M. (2005). Tratamiento de aguas residuales con MATLAB. México D.F.: Ediciones Reverté.

Metcalf & Eddy, Inc. (2014). Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse. Estados Unidos: McGraw-Hill, Inc.

Ministerio del Ambiente. (2015). Acuerdo Ministerial No.028. Sustituyese el libro VI del Texto Unificado de Legislación Ambiental.

Moreno García, B. (2006). Higiene e inspección de carnes-I-. España: Ediciones Díaz De Santos.

Navarrete, D. (2014). Tratamiento de lodos y su disposición final. Guayaquil, Ecuador: Universidad Agraria del Ecuador. Recuperado el 14 de Julio del 2015 de <http://www.slideshare.net/diosanavarrete/tratamiento-de-lodos-y-su-disposicion-final>.

- Pérez, J. (2000). Factores que afectan al tiempo de retención. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Recuperado el 23 de Noviembre del 2014 de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/007926/07926-33.pdf>.
- Pérez, J. (2000). Factores que afectan al tiempo de retención. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).
- Portillo, L. (2012). Calibración de Vertederos de pared delgada para plantas de tratamiento de aguas residuales. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Revista Técnico Ambiental "Teorema Ambiental". (2015). Antecedentes de la contaminación del agua. México, D.F. Recuperado el 6 de Julio del 2015 de <http://www.teorema.com.mx/agua/antecedentes-de-la-contaminacion-del-agua/>
- Reynolds, K. (2002). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica: Identificación del problema. Recuperado el 13 de Julio del 2014 de <http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/delalavesepoct02.pdf>
- Romero, J. (2002). Tratamiento de aguas residuales. Teoría y Principios de Diseño. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingenieros.
- Sánchez, G. (2014). Evaluación de los factores físicos químicos y bacteriológicos de la laguna de oxidación en Santa Lucia - Provincia del Guayas. Guayaquil, Ecuador: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Sánchez, J. (2010). Modelamiento de las condiciones hidráulicas de una planta compacta para el tratamiento de las aguas residuales domésticas. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Torres, P., Foresti, E., Vazoller, R. (2000). Composición y Uso de Agua Residual Doméstica en Reactores a escala de laboratorio. Recuperado el 6 de Julio del 2015 de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01179p04.pdf>.
- United States Environmental Protection Agency - EPA. (2015). Primer for Municipal Wastewater treatment system. Recuperado el 5 de Mayo del

2014

de

http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2005_08_19_primer.pdf

Vidal, R. (2009). Evaluación del Impacto Ambiental. España: Ministerio de Educación.

ANEXOS

Anexo 1. Hoja de cálculo de Excel tanque Sedimentador Primario

Tanque de sedimentación primario					
Parámetro	Abv.	Valor	Unidad	Conversiones	
Número supuesto de habitantes	# hab.	43	personas		
Caudal per capita	Qcap	0,2	m ³ /hab.día	2,31481E-06	m ³ /hab.seg
Caudal	Q	0,0001	m ³ /s	0,1	lt/s
viscosidad del fluido	μ	5			
diámetro de las partículas	d	0,002	m		
densidad de las partículas	ρ_s	1,3	kg/m ³		
densidad del fluido	ρ	1	kg/m ³		
Régimen		Turbulento			
Velocidad de sedimentación	$V_{S(\text{particula})}$	0,14	m/s		
	$V_{S(\text{resuspension})}$	0,000	m/s		
	$V_{S(\text{fluido})}$	0,000000	m/s		
	V_s	0,139560	m/s		
Demanda biológica de oxígeno	DBO	125,16	mg DBO/lt	0,12516	mg DBO/m ³
Sólidos en suspensión	SST	447	mg/lt	0,447	mg DBO/m ³
Tiempo de retención hidráulico	TRH	36,00	minutos		
Temperatura	T	20	°C		

Tamaño físico					
Carga superficial	Cs	40	m ³ /m ² /día		tabla -> (80-120)
Área superficial	As	0,22	m ²		
Volumen del tanque	V	0,22	m ³	216,0	lt
Área del tanque	A	0,22	m ²		
Relación ancho-largo		1 : 2			
Largo del tanque	l	0,66	m		
Ancho del tanque	b	0,33	m		
Profundidad del tanque	h	1	m		asume (3-4,5)
Pendiente	p	1	%		
Velocidad crítica de sedimentación	Vcs	0,00046	m/s		
		1,67	m/h		

Anexo 2. Hoja de Excel tanque Biológico

	Parámetro	Abv.	Valor	Unidad	Conversiones		Comentario
	Caudal	Q	0,0001	m ³ /s	0,1	lt/s	
	Coefficiente de mortalidad endógeno	Kd	0,04	días			tabla (0.04-0.075)
	Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor	X	1,5	kg/m ³			tabla (1.5-3)
	Concentración del sustrato que sale del reactor aireador	S	0,01	kg/m ³			tabla
	Fración de sustrato convertido en biomasa	Y	0,4	mg/mg			tabla (0.4-0.8)
	Período medio de residencia de las células	θc	5	días			tabla (5-15)
	Consumo específico de oxígeno	CEO	1,7	kgO ₂ /kgDBO			
	Velocidad de carga orgánica per capita	PE	22	gDBO/hab.día			
	Cantidad teórica de oxígeno	O ₂	1,6	kgO ₂ /día	0,07	kgO ₂ /h	
	Concentración del afluente, como DBO ó DQO	So	0,2	kg/m ³			tabla (0.2-1.8)
	Demanda biológica de oxígeno	DBO	110	mg DBO/lt	0,11	mg DBO/m ³	
	Sólidos sedimentables	SST	5	mg/lt	0,005	mg DBO/m ³	
	Saturación de O ₂		10,77				
	Factor de corrección de solubilidad de O ₂		0,72				
	Saturación de O ₂		7,75				

Tamaño físico						
Carga	Cs	40	m ³ /m ² /día			tabla -> (80-120)
Área superficial	As	0,216				
Volumen del tanque	V	1,8	m ³	1824,00	lt	Se necesitan 8 tanques
Área del tanque	A	0,22	m ²			
Relación ancho-largo	l :	2				
Largo del tanque	l	0,66	m			
Ancho del tanque	b	0,33	m			
Profundidad del tanque	h	1	m			
Resultados						
Remoción de DBO		25	%			teóricamente
Remoción de concentración de DBO		31,29	mg BOD/L	0,03129	mg DBO/m ³	
Remoción de sólidos sedimentables totales		40	%			teóricamente
Sólidos Sedimentados Totales		178,8	mg/lt	0,1788	mg DBO/m ³	

Anexo 3. Hoja de Excel tanque sedimentador secundario

	Parámetro	Abv.	Valor	Unidad	Conversiones	Comentario
	Caudal	Q	0,0001	m3/s	0,1	lt/s
	Demanda biológica de oxígeno	DBO	27,5	mg DBO/lt		
	Sólidos sedimentables	SST	2	mg/lt		
	Tiempo de retención hidráulico	TRH	36,00	minutos		
	Cantidad de lodos a recircular	Y	0,33	mg/día		$Y_{m} = \frac{Y}{1+k_d t}$
	Tamaño físico					
	Carga superficial	Cs	40	m3/m2/día		tabla -> (80-120)
	Área superficial	As	0,22	m2		
	Volumen del tanque	V	0,22	m3	216	lt
	Área del tanque	A	0,22	m2		
	Relación ancho-largo		1 : 2			
	Largo del tanque	l	0,66	m		
	Ancho del tanque	b	0,33	m		
	Profundidad del tanque	h	1	m		asume (3-4,5)
	Pendiente	p	1	‰		

Anexo 4. Hoja de Excel de vertederos

					vertederos				
Tanque de sedimentación primario					Tanque biológico				
Parámetro	Abv.	Valor	Unidad	Comentario	Parámetro	Abv.	Valor	Unidad	Comentario
Caudal	Q	0,0001	m3/s		Caudal	Q	0,0001	m3/s	
Carga del vertedero	H	0,02	metros		Carga del vertedero	H	0,02	metros	
Longitud	L	0,04	metros		Longitud	L	0,04	metros	
Umbral	P	0,07	metros	P > 3H	Umbral	P	0,07	metros	P > 3H
Ancho	B	0,11	metros	B > 5H	Ancho	B	0,11	metros	B > 5H
Sección transversal del canal de aproximación	A	0,01	metros		Sección transversal del canal de aproximación	A	0,01	metros	

