

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Realización de una guía modular de sistemas de tratamiento de aguas residuales
domésticas de bajo costo para la región Occidente de Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Pedro Augusto Godoy Mollinedo para optar al
grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2020

**Realización de una guía modular de sistemas de tratamiento de aguas residuales
domésticas de bajo costo para la región Occidente de Guatemala**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería

**Realización de una guía modular de sistemas de tratamiento de aguas residuales
domésticas de bajo costo para la región Occidente de Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Pedro Augusto Godoy Mollinedo para optar al
grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

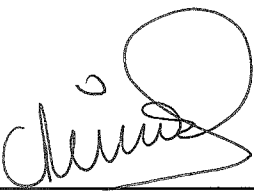
Guatemala,

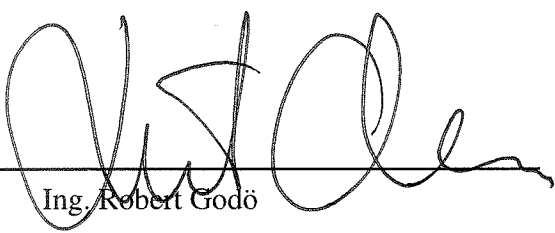
2020

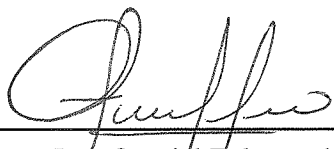
Vo.Bo.:

(f) 
Inga. Clara María Recinos

Tribunal Examinador:

(f) 
Inga. Clara María Recinos

(f) 
Ing. Robert Godó

(f) 
Ing. Otoniel Echeverría

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de diciembre de 2020.

Prefacio

La preocupación por la conservación del medio ambiente aumenta cada día y los daños también, esto es una preocupación a nivel mundial ya que se está deteriorando el único lugar donde el ser humano puede vivir actualmente. Entre las preocupaciones más grandes en el mundo está la falta de saneamiento y con ella la búsqueda del tratamiento de las aguas residuales, ya que se ha comprobado que causa daños tanto al ambiente como a la salud de la población.

En Guatemala, el tratamiento de las aguas residuales es mínimo y con el paso de los años los cuerpos de agua se han ido deteriorando cada vez más, por ello todas las entidades y personas deben de poner de su parte para detener estos graves daños y poder ir restaurando los cuerpos de agua.

El país cuenta con el recurso legal para ir disminuyendo estos daños y poder mejorar la calidad del agua en ríos, lagos, lagunas, etc. el cual es el Acuerdo Gubernativo 236-2006 conocido como Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos. La problemática actual es que no se está cumpliendo con lo establecido en el Acuerdo y son pocos los casos donde se está sancionando a las entidades o personas que no lo cumplen.

Se plantea esta guía como aporte a las entidades para que puedan implementar sistemas de tratamiento factibles para la realidad guatemalteca dando una base donde se definen plantas de tratamiento de aguas residuales previamente diseñados para que puedan cumplir con la normativa y reducir el impacto ambiental que se está causando en la actualidad.

Índice

Prefacio	viii
Lista de cuadros	x
Lista de figuras	xii
Resumen	1
I Introducción	1
II Antecedentes	3
III Justificación	5
IV Objetivos	7
A Objetivo general	7
B Objetivos específicos	7
V Metodología	9
A Descripción	9
B Examen crítico	10
VI Marco teórico	11
A Saneamiento	11
1 Definición	11
2 Consecuencias por falta de saneamiento	11
3 Saneamiento a nivel mundial	12
4 Situación actual en Guatemala en agua y saneamiento	13
B Normativa guatemalteca para el tratamiento de aguas residuales	15
1 Acuerdo Gubernativo 236-2006	16
2 Acuerdo Gubernativo 58-2019	20
C Aguas residuales	22
1 Definición	22
2 Parámetros de calidad del agua	25
3 Parámetros de las aguas residuales domésticas	29
D Sistemas de tratamiento preliminar	31
1 Descripción	31
2 Canal Parshall	32
E Sistemas de tratamiento primario	34
1 Sedimentador primario	35
2 Tanque Imhoff	35
F Sistemas de tratamiento secundario	36
1 Introducción	36
2 Lagunas de estabilización	37
3 Disposición en tierra	40
4 Humedales artificiales	42
5 Reactores anaerobios	43

6	Sistemas de lodos activados	46
7	Reactores de biopelículas aerobias	47
G	Sistemas de tratamiento terciario	49
H	Histograma	50
I	Economía de escala	51
J	Análisis por medio de una matriz de decisión	52
K	Análisis de sensibilidad	53
VII	Marco experimental	55
A	Determinación de la cantidad de grupos	55
B	Determinación de caudales de diseño	59
C	Determinación de parámetros físicos, químicos y biológicos del agua residual	62
D	Criterios iniciales para el diseño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales	64
E	Selección de los Sistemas de Tratamiento a diseñar y comparar	65
F	Determinación del costo de construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento	71
G	Análisis comparativo entre las distintas opciones para cada grupo	72
H	Matriz de decisión del grupo 1	74
I	Matriz de decisión del grupo 2	75
J	Matriz de decisión del grupo 3	76
K	Matriz de decisión del grupo 4	77
L	Análisis de sensibilidad	77
M	Elaboración de la guía	84
N	Discusión de resultados	87
VIII	Conclusiones	91
IX	Recomendaciones	93
X	Glosario	95
XI	Bibliografía	97
XII	Anexos	100
A	Guía de implementación de sistemas de tratamiento en los departamentos de Totonicapán, Quiché, Sololá, Huehuetenango, San Marcos, Quetzaltenango	100
B	Memorias de cálculo de los sistemas de tratamiento para cada grupo	100

Lista de cuadros

1	Avances de los ODM a partir del año base y brecha por cubrir.	14
2	Cambio en la cobertura nacional de saneamiento.	15
3	Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores.	17
4	Límites máximos permisibles para entes generadores nuevos	18
5	Límites máximos permisibles de descargas a cuerpos receptores para aguas residuales municipales y de urbanizaciones no conectadas al alcantarillado público.	19
6	Parámetros y límites máximos permisibles para reúso	20
7	Límites máximos permisibles de descargas a cuerpos receptores para aguas residuales municipales	21
8	Caudales típicos en residenciales de E.E.U.U.	23
9	Rangos típicos por equipo o instalación en E.E.U.U.	23
10	Distribución típica del uso del agua en una residencia de E.E.U.U.	23
11	Caudales en áreas comerciales de E.E.U.U.	24
12	Caudales en lugares institucionales de E.E.U.U.	25
13	Parámetros generales de las aguas residuales domésticas en países en vías de desarrollo.	30
14	Rango de caudales de operaciones en canales Parshall.	33
15	Número de intervalos para realizar un histograma.	51
16	Matriz de decisión.	53
17	Distribución de grupos con 15 intervalos.	56
18	Distribución de grupos con 50 intervalos.	57
19	Grupos definidos.	58
20	Proyección esperada de personas conectadas al sistema de tratamiento.	59
21	Cálculo de caudales de diseño.	61
22	Caudales de diseño.	61
23	Grupos finales para la guía.	62
24	Parámetros del agua residual doméstica a tratar.	63
25	Parámetros del agua residual doméstica a los que se busca llegar.	64
26	Límites buscados y porcentajes de reducción necesarios en el efluente.	65
27	Temperaturas promedio máximas y mínimas de la región seleccionada.	67
28	Áreas requeridas por cada opción.	68
29	Resultados de reducciones del grupo 1.	68
30	Resultados de reducciones del grupo 2.	69
31	Resultados de reducciones del grupo 3.	69
32	Resultados de reducciones del grupo 4.	70
33	Costo estimado de construcción de cada sistema de tratamiento diseñado.	71
34	Costo estimado de operación y mantenimiento de cada sistema de tratamiento diseñado.	72
35	Matriz de decisión realizada para el grupo 1.	74
36	Matriz de decisión realizada para el grupo 2.	75
37	Matriz de decisión realizada para el grupo 3.	76
38	Matriz de decisión realizada para el grupo 4.	77
39	Cuadro de análisis de sensibilidad para la opción de lagunas de estabilización del grupo 1.	78
40	Guía de implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales para la Región Occidente de Guatemala.	85

Lista de figuras

1	Tipos de servicios sanitarios en departamentos de interés.	5
2	Tipos de servicios sanitarios utilizados en Guatemala.	14
3	Gasto real en WASH.	15
4	Distribución de los sólidos en un drenaje ordinario.	28
5	Ejemplo de desarenador.	32
6	Partes del medidor Parshall en planta.	33
7	Partes del medidor Parshall en sección.	33
8	Tanque de sedimentación primario circular.	34
9	Tanque Imhoff.	35
10	Diagrama simplificado del metabolismo bacterial.	37
11	Equilibrio entre bacterias y algas.	38
12	Diagrama de flujo típico de una laguna facultativa.	39
13	Diagrama de flujo típico del sistema de infiltración subsuperficial.	42
14	Diagrama de flujo típico del sistema de flujo superficial.	42
15	Esquema de funcionamiento de un humedal.	43
16	Diagrama de flujo típico del sistema de un tanque séptico seguido por un filtro anaerobio.	44
17	Esquema de un reactor anaerobio de flujo ascendente.	45
18	Esquema de un sistema de lodos activados.	46
19	Esquema de filtro percolador.	48
20	Vista microscópica de la biopelícula en un filtro percolador.	48
21	Economía de escala en servicios de alcantarillado.	52
22	Histograma con 15 intervalos.	56
23	Histograma con 50 intervalos.	58
24	Ecuación de caudal de diseño.	60
25	Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción de lagunas de estabilización del grupo 1.	79
26	Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del filtro percolador del grupo 1.	80
27	Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del RAFA + flujo superficial del grupo 1.	80
28	Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción de lagunas de estabilización del grupo 2.	80
29	Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del filtro percolador del grupo 2.	81
30	Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del RAFA + flujo superficial del grupo 2.	81
31	Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción de lagunas de estabilización del grupo 3.	81
32	Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del filtro percolador del grupo 3.	82
33	Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del RAFA + flujo superficial del grupo 3.	82
34	Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción de lagunas de estabilización del grupo 4.	82
35	Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del filtro percolador del grupo 4.	83
36	Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del RAFA + flujo superficial del grupo 4.	83
37	Parámetros de calidad del agua residual en la región Occidente de Guatemala.	91

Resumen

En Guatemala se tratan aproximadamente 75 millones de metros cúbicos de agua residual de los 1,660 millones que se generan anualmente (Instituto de Fomento Municipal, 2018), esta gran diferencia ha provocado que el 90 % de los cuerpos de agua en el país estén contaminados (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, 2013). Esta situación debe mejorar lo antes posible para evitar que esto siga sucediendo y todos los cuerpos de agua del país lleguen a estados deplorables donde aún se dañe aún más el medio ambiente y la salud de la población.

El fin de este trabajo es brindar más herramientas y recursos para facilitar la aplicación de sistemas de tratamiento en el área rural, llevando a cabo una búsqueda de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas que reduzcan los parámetros físicos, químicos y biológicos del agua con el fin de cumplir el Acuerdo Gubernativo 236-2006 y si las condiciones del lugar son favorables poder reutilizarla en el sector agrícola.

Se busca que estos sistemas sean factibles para su implementación en departamentos de la región Occidente del país, específicamente los departamentos de Totonicapán, Quiché, Sololá, Huehuetenango, San Marcos, y Quetzaltenango, los cuales actualmente cuentan con un mínimo tratamiento de las aguas residuales.

Como primera parte del trabajo se analiza la situación actual en dichos departamentos con respecto al saneamiento y tratamiento de aguas residuales domésticas, los escasos sistemas de saneamiento que existen en estas áreas y cómo esto afecta, no solo a la población, sino a todo el ecosistema.

Luego se seleccionaron los sistemas más adecuados para implementar en la región definida, donde posteriormente se compararon sus características en eficiencias de remoción, costo de construcción, operación y mantenimiento y el área requerida para cada sistema. Se pudo encontrar a lo largo del trabajo que determinar qué sistema es mejor que otro es relativo y depende de las condiciones específicas de cada proyecto. Además, depende de qué aspectos se consideren más importantes, ya que esto tiene gran influencia en la selección de un sistema para un determinado proyecto.

Por último, se realizó una guía con el resumen de los sistemas más adecuados para los grupos de personas y los planos esquemáticos de cada uno para que las entidades tengan ya un recurso base para implementar estas plantas de tratamiento en cualquiera de los departamentos mencionados anteriormente.

I. Introducción

Como trabajo de graduación, se buscó dar una herramienta a las entidades en Guatemala para buscar una solución al problema de la falta de aguas residuales en el país.

Primero como base, a nivel mundial las condiciones de saneamiento actuales ocasionan aproximadamente 280,000 muertes al año (Organización Mundial de la Salud, 2019). Esto se debe a que cada vez más se están contaminando los cuerpos de agua que se utilizan como fuentes de abastecimiento del recurso más importante del ser humano, el agua. Por ello es necesario tomar acciones importantes para disminuir la contaminación del agua y poderla consumir de forma sostenible asegurando su calidad en el futuro.

En Guatemala el 90 % del agua está contaminada, los ríos, lagos, y cuerpos de agua ya no tienen la misma calidad que solían tener antes, una de las razones es que mayoría de agua residual que se genera no tiene ningún tipo de tratamiento antes de ser descargada (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, 2013). La falta de tratamiento afecta la calidad del agua y por lo tanto la biodiversidad que tiene relación con ella. Es vital que se implementen sistemas de tratamiento para las aguas residuales para disminuir y corregir los daños que se están haciendo al agua, porque si no se corrigen este recurso será más difícil de obtenerlo y afectará de gran forma todo el ecosistema.

Para mejorar esta condición de contaminación de cuerpos de agua en Guatemala, se estableció el Acuerdo 236-2006 donde se especifican los límites máximos permisibles de descarga para cada entidad. En la reforma 58-2019 artículo 24 de este acuerdo, en el inciso b indica que cada municipio debe tratar las dos descargas más dañinas para el ambiente, pero esto sigue sin cumplirse y no se tiene información clara de qué municipios están cumpliendo con este acuerdo.

En la región Occidente del país el saneamiento es bajo y necesita atención inmediata, esta no es la única región del país con este problema, pero se busca enfocar este trabajo a esa región para generar un recurso más detallado tomando en cuenta el clima en esa área. Debido a esto se han seleccionado los departamentos de Totonicapán, Quiché, Sololá, Huehuetenango, San Marcos y Quetzaltenango. Esta solución trata acerca de elaborar una guía de plantas de tratamiento de aguas residuales para estas regiones

Esta guía es un recurso valioso para las entidades que buscan tratar el agua residual porque detalla algunos de los sistemas que pueden ser implementados en esta región. Además de brindar herramientas útiles para la planificación de una planta de tratamiento, porque brinda ciertos aspectos iniciales que se requieren como las eficiencias de remoción para ver si cumple con la normativa guatemalteca, el área necesaria por cada sistema para determinar si es factible su implementación en el lugar y un estimado del costo de construcción, operación y mantenimiento, los cuales son factores comúnmente importantes en la selección de una alternativa.

A lo largo del trabajo se pudo determinar que no existe un sistema de tratamiento de aguas residuales mejor que el otro, sino que cada uno tiene sus ventajas como también sus desventajas, por lo que dependiendo de las características del lugar específico y de la entidad que busque implementarlo habrá una distinta solución óptima.

II. Antecedentes

El Instituto de Fomento Municipal (INFOM) se generó por medio del Decreto No. 1132 del Organismo Legislativo con el objetivo de promover el progreso de los municipios brindando asistencia técnica y financiera a las municipalidades, en general desarrollar la economía de los municipios (Instituto de Fomento Municipal, 2018).

El INFOM desarrolló en el año 2018 la Guía Técnica para Implementar Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en Guatemala con el fin de brindar a las municipalidades un documento de apoyo donde puedan saber los tipos de Plantas de Tratamiento que se pueden aplicar a su municipio. Principalmente se divide por los tipos de tecnología para el tratamiento de aguas residuales, luego cuenta con el nivel de tratamiento del sistema, rango de población, área requerida para el sistema, ventajas y desventajas, eficiencia, costo estimado de estudio, construcción y de operación anual (Instituto de Fomento Municipal, 2018).

Esta Guía desarrollada por el INFOM sentó una base para que las entidades que busquen implementar los sistemas presentados puedan tener una idea de los requerimientos y beneficios de estos. Es necesaria la elaboración de más recursos como este, para proveer de herramientas y fomentar el tratamiento de las aguas residuales

En ella se han encontrado algunas deficiencias, principalmente que no detalla más información de cada tipo de tratamiento, dejando una incógnita de cómo funciona cada uno y sus requerimientos. Por otra parte, no especifica la eficiencia de la mayoría de los parámetros de calidad del agua, solo menciona los porcentajes de reducción de Sólidos Suspendidos, DBO5 y Patógenos, los cuales sí son importantes al momento de tratar aguas residuales, pero también se deben tener en cuenta otros parámetros importantes como el Nitrógeno y el Fósforo.

La guía propuesta en este trabajo hace énfasis en la región Occidente del país, ofreciendo un nivel más adecuado de los sistemas de tratamiento para esta área. También tiene el enfoque de presentar sistemas de tratamiento que logren cumplir y llegar a concentraciones aún menores que las permitidas en el Acuerdo Gubernativo 58-2019 y el Acuerdo 236-2006.

Por otra parte, se presentarán las memorias de cálculo y planos esquemáticos de cada sistema, para que cualquier persona pueda revisarlos y le sirvan de herramienta adicional para planificación, diseño específico y cualquier uso positivo que encuentre de este recurso.

III. Justificación

El agua es fundamental para el desarrollo socioeconómico de una región, está ligada con la salud del ser humano, la producción de alimentos, la preservación de los ecosistemas y la producción industrial. La importancia por este recurso vital para la actividad humana ha ido incrementando con los años conforme ha ido disminuyendo la disponibilidad de agua de buena calidad, por ello se debe de utilizar de forma controlada y disminuir su constante contaminación.

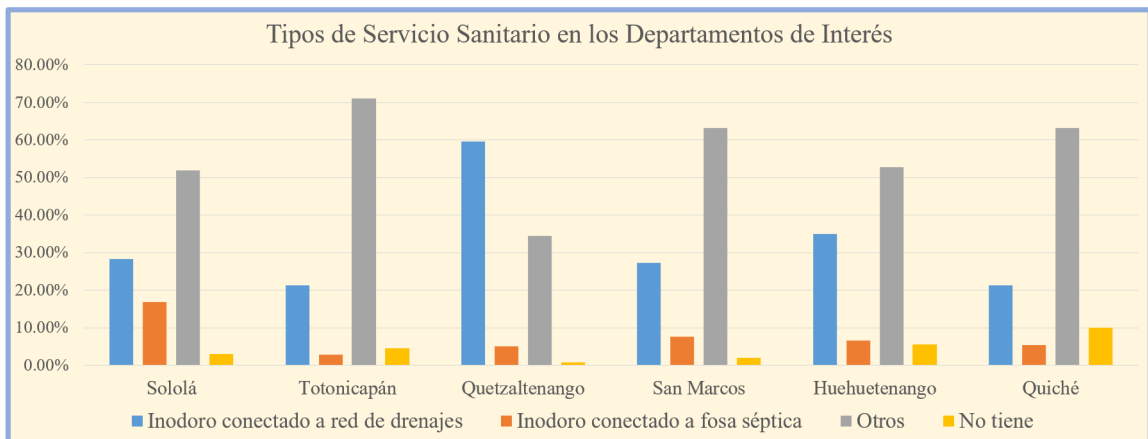
En la actualidad el país está teniendo varios problemas como consecuencia de la falta de tratamiento de aguas residuales, por ello el 90 % de los cuerpos de agua en Guatemala están contaminados (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, 2013) y es de vital importancia tomar acciones pertinentes para no dañar aún más el medio ambiente y la salud de la población.

Se considera que este trabajo puede ser una herramienta útil para disminuir el problema de saneamiento en el país, ya que actualmente solo un 5 % de las aguas residuales son tratadas (Instituto de Fomento Municipal, 2018) indicando que el resto de estas aguas son vertidas en el medio ambiente sin algún tipo de tratamiento.

Además, las municipalidades según el Acuerdo Gubernativo 236-2006 sobre el Tratamiento de Aguas Residuales y Disposición de Lodos son responsables por velar que cada municipio para el 2019 trate las aguas residuales de sus dos descargas principales (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2016).

En los departamentos de Totonicapán, Quiché, Sololá, Huehuetenango, San Marcos y Quetzaltenango un promedio del 33 % (Instituto Nacional de Estadística Guatemala, 2018) de la población está conectada a la red de drenajes como se puede ver en la Figura 1. Estas aguas necesitan ser tratadas previo a su descarga para disminuir la contaminación de la región. Estos departamentos se dedican principalmente a la agricultura (Ministerio de Economía, 2017), por lo que tratar el agua residual y reutilizarla para riego puede mejorar las condiciones de esas regiones, dándoles otra alternativa para regar sus plantaciones.

Figura 1. Tipos de servicios sanitarios en departamentos de interés.



Elaboración propia con datos de (Instituto Nacional de Estadística Guatemala, 2018)

Como se menciona anteriormente, esta guía busca fomentar la construcción de más plantas de tratamiento en el país mejorando las condiciones del ambiente, de la salud de las personas, así como también reducir los costos de la producción agrícola. Dejando de forma detallada las características de los sistemas de tratamiento, las entidades pueden guiarse a seleccionar la alternativa que se adapte mejor al lugar y condiciones donde se llevará a cabo.

Adicionalmente, la metodología utilizada se puede utilizar para las demás regiones del país, dando más recurso a la comunidad para impulsar este tipo de proyectos.

IV. Objetivos

A. Objetivo general

Desarrollar una guía dividida por distintos rangos de población, donde se propongan varios diseños de plantas de tratamiento de aguas residuales para que estas aguas se puedan reaprovechar en el sector agrícola. La guía será aplicable para los departamentos de Totonicapán, Quiché, Sololá, Huehuetenango, San Marcos, y Quetzaltenango.

B. Objetivos específicos

- Determinar, por medio de bibliografía, los parámetros de agua residual municipal que se asimilen a la realidad de la región definida.
- Diseñar plantas de tratamiento del agua residual municipal seleccionada a partir de los sistemas de tratamiento investigados.
- Determinar un estimado del costo de construcción y de mantenimiento de las plantas de tratamiento diseñadas.
- Reunir en una guía donde se presenten las distintas alternativas para cada grupo de personas, con sus características de eficiencia, costo de construcción, operación y mantenimiento y el área requerida por cada una.

V. Metodología

A. Descripción

Se busca realizar una guía de uso fácil donde se describan diseños de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas basados en la cantidad de habitantes en un lugar para los departamentos de Totonicapán, Quiché, Sololá, Huehuetenango, San Marcos, y Quetzaltenango ubicados en la región Occidente del país y que presentan características similares en cuanto a climas y condiciones de saneamiento.

Mediante bibliografía se recopilará la información de la situación actual en los departamentos mencionados en referencia al saneamiento y tratamiento de aguas residuales. Hay varios temas que se investigarán como por ejemplo si existe el tratamiento de aguas residuales en estos departamentos, el nivel de tratamiento de estas aguas, los procesos y sistemas de tratamiento aplicados, las normas y acuerdos que rigen la implementación de sistemas de tratamiento, los beneficios que trae a la comunidad implementar plantas de tratamiento.

Luego mediante bibliografía se determinará un tipo de agua residual municipal que represente características físicas, químicas y biológicas similares a la que generan las poblaciones en los departamentos seleccionados. Definiendo las concentraciones de los parámetros físicos, químicos y biológicos del agua residual doméstica que se necesitan tratar, se procederá a investigar qué tratamientos necesita, ya sea pretratamiento, tratamiento primario, secundario, terciario y/o disposición de lodos.

Se investigarán los sistemas de tratamiento más conocidos de aguas residuales que existen en el mundo que puedan tratar el tipo de agua residual mencionada anteriormente, así como sus beneficios, perjuicios, limitaciones, etc. que se puedan implementar en esa región del país, ya que por ser un área rural tienen ciertas limitaciones como la falta de energía, energía constante u otros aspectos.

Luego se agruparán las cantidades de habitantes para definir los caudales de diseño para cada grupo, y así luego diseñar preliminarmente por medio del cálculo varias plantas de tratamiento de aguas residuales para cada caudal y para las características del agua residual propuesta.

Con los sistemas de tratamiento propuestos se analizará la eficiencia de estos para mejorar los parámetros de calidad del agua, como son la DBO, DQO, fósforo, nitrógeno, sólidos suspendidos y coliformes totales para determinar si es conveniente el diseño o no.

Luego se estimará en base a factores los costos de construcción, operación y mantenimiento de cada sistema de tratamiento. Se menciona en el título de este trabajo que serán sistemas de bajo costo, esto se refiere a que en comparación con otros sistemas tendrán un costo menor.

Después, por medio de matrices de decisión, se colocaron las variables de eficiencia, costo, área requerida y generación de subproductos para poder analizar y comparar entre los sistemas sus características, esto con el fin de determinar cuál tiene una mayor puntuación, indicando que es mejor que las demás en ese grupo específico.

Por último, se unificarán en una guía todas las plantas de tratamiento propuestas donde se detalle la cantidad de personas para la que es aplicable, el nombre de los sistemas y etapas de tratamiento de la planta, el nivel de tratamiento, el costo de construcción de la misma, el costo de operación y

mantenimiento de la misma, el área requerida y los planos esquemáticos de la PTAR. Para que la persona o entidad que busque su aplicación pueda seleccionar la configuración más apropiada para la región donde se implementará.

B. Examen crítico

Es necesario conocer el estado del tratamiento de las aguas residuales en los departamentos seleccionados para lograr determinar si es necesario implementar una guía como la que se propone en este documento.

Además, se deben investigar sistemas de tratamiento que existan en otros países, para ampliar las diferentes soluciones y evitar tomar en cuenta solamente las que son conocidas en Guatemala, ya que existe la posibilidad que haya sistemas eficientes, aplicables y de bajo costo que se estén utilizando en países con condiciones similares a las de Guatemala. El término bajo costo se refiere a que tendrán un costo menor en comparación de otros sistemas de tratamiento.

Se deben de comparar las configuraciones propuestas para ver qué características tiene cada una que la hagan competitiva respecto a las demás. Por último, es importante presentar en la guía las características de cada configuración para que la entidad que busque implementarla sepa cuales son las ventajas y desventajas de cada una y así tomar una mejor decisión de cuál se adecúa a sus necesidades y capacidades.

VI. Marco teórico

Inicialmente para el desarrollo de este trabajo se debe presentar la situación actual a nivel mundial y luego específica de Guatemala con respecto al saneamiento, al cual pertenece el tratamiento de las aguas residuales.

A. Saneamiento

Se debe conocer qué es el saneamiento y el tratamiento de aguas residuales para plasmar la base de este trabajo e identificar la necesidad de fomentar la implementación de tratamientos de aguas residuales en todas las áreas donde ha intervenido el ser humano.

1. Definición. El saneamiento se define como el suministro de instalaciones y servicios que eliminan sin riesgo los principales desechos que genera el ser humano.

Detalladamente, es mantener buenas condiciones de higiene de un lugar debido a la implementación de sistemas de recolección de aguas residuales y de basura. Aplicando el saneamiento en un lugar, mejora las condiciones de salud de las personas, hogares y de las comunidades (Organización Mundial de la Salud, s.f.).

2. Consecuencias por falta de saneamiento. La falta de tratamiento de aguas residuales antes de ser descargadas en cuerpos de agua genera varios problemas que afectan directa o indirectamente a las personas. Al descargar estas aguas residuales sin tratamiento a los cuerpos de agua se ocasionan daños al medio ambiente y a las personas que tienen alguna relación con ese cuerpo de agua.

a. Salud

En el mundo la falta de saneamiento causa 1.7 millones de muertes al año, donde el 50 % son niños, esto debido a que el agua por estar contaminada genera diarrea, infecciones y malnutrición. Aproximadamente el 90 % de estas muertes se da en países en vía de desarrollo por la ingesta de patógenos fecales (Organización de las Naciones Unidas, 2019)

Conforme incrementa la población, también aumenta la cantidad de aguas residuales que se produzcan, por lo tanto, es importante cambiar la falta de tratamiento de las aguas residuales para no afectar a más personas, ya que la salud pública depende de que las aguas residuales sean tratadas.

b. Ambiente

Los cuerpos de agua son el hogar de varias especies a nivel mundial y otras especies dependen de alguna forma de ella, es por ello que se debe velar por la conservación de este recurso.

A nivel mundial solo el 39 % del agua superficial cuenta con un nivel alto de calidad, el otro 61 % cuenta con mayores grados de contaminación llevándolos a niveles no adecuados. En Europa, solo el 7 % de las especies tiene una condición ambiental favorable, dejando al resto en condiciones adversas (Agencia Europea de Medio ambiente, 2018).

Si no se tratan las aguas residuales que provienen de ciudades, industrias, agricultura y toda la actividad humana el medio ambiente es el más afectado, ya que recibe todo esto en ríos, lagos,

mares, etc. afectando la vida natural (Rodríguez Pimentel, 2017).

Los cuerpos de agua tienen cierta capacidad de poder resistir estas descargas sin previo tratamiento y poder mejorarlas, pero al nivel que se está contaminando actualmente no es posible. Con esta situación estos cuerpos se han deteriorado, cambiando sus condiciones y apariencia, así como también la capacidad de sustentar vida acuática en ellos (Rodríguez Pimentel, 2017).

El tratamiento que debe darse a estas aguas depende de las condiciones del cuerpo de agua donde será su descarga, pero por lo general debe ser un grado alto de tratamiento para no alterar su calidad (Rodríguez Pimentel, 2017)

Las formas que tienen los cuerpos de agua para combatir la contaminación son la dilución y la capacidad de autopurificación. La dilución funciona disminuyendo la cantidad de tóxico en grandes cantidades de agua para que la concentración sea mínima. La autopurificación se da por los microorganismos y sustancias químicas que metabolizan y reaccionan con las sustancias contaminantes, degradándolas y haciéndolas desaparecer finalmente (Orozco Jaramillo, 2005).

Las sustancias que se descargan al agua pertenecen en general a dos categorías:

- Biodegradables: en este caso las sustancias se pueden descomponer por acción natural de microorganismos y reacciones químicas.

- No biodegradables: en este caso las sustancias no se pueden descomponer naturalmente.

La mayor parte de sustancias contaminantes en el mundo están constituidas por materia orgánica, producto del metabolismo del ser humano, animales e industrias (Orozco Jaramillo, 2005).

Todo compuesto orgánico tiene energía. Los organismos descomponedores como hongos y bacterias utilizan la energía de los desechos (Orozco Jaramillo, 2005).

Existe una gran cantidad de organismos que respiran oxígeno. El oxígeno sirve para extraer la energía contenida en los alimentos, gracias a la oxidación. Mientras más hidrógeno haya en relación con el oxígeno hay más energía disponible (Orozco Jaramillo, 2005).

Desafortunadamente el agua tiene muy poca capacidad de disolver oxígeno. Si la descarga de desperdicios es continua y abundante pronto habrá un gran número de estas bacterias aerobias y agotarán el oxígeno disponible en el agua, con graves consecuencias. Luego prosperan los microorganismos anaerobios, los cuales son de muy bajas exigencias energéticas, excretando como subproductos metano, gas sulfhídrico y otros gases que escapan a la atmósfera. El aspecto estético del agua se deteriora con colores oscuros, sustancias flotantes y olores nauseabundos, este ambiente es ideal para los microorganismos patógenos (Orozco Jaramillo, 2005).

La contaminación resulta del balance negativo entre el oxígeno que tiene una masa de agua, y la DBO causada por la descarga contaminante (Orozco Jaramillo, 2005).

3. Sanamiento a nivel mundial. El sanamiento es un problema a nivel mundial ya que únicamente el 39 % de la población lo lleva a cabo de forma segura y controlada. Además, para el 2015, 2300 millones de personas no tenían instalaciones básicas para llevar a cabo el sanamiento, donde 39 % de estas defeca en otros lugares que no son adecuados para su recolección (Organización Mundial de la Salud, 2019).

Anualmente en el mundo, ocurren un aproximado de 280,000 muertes por diarrea debido a la falta de saneamiento, esto sin considerar las otras enfermedades causadas por la falta de saneamiento a nivel mundial (Organización Mundial de la Salud, 2019).

En el 2010, las Naciones Unidas reconoce como un derecho humano el acceso al agua potable limpia y al saneamiento, debido a esto se han llevado a cabo planes para cumplir con este derecho. Entre ellos están los Objetivos de Desarrollo del Milenio donde el objetivo es reducir el 50 % de población sin acceso a instalaciones de saneamiento (Organización Mundial de la Salud, 2019).

En el mundo más del 80 % de las aguas residuales se descargan, principalmente en cuerpos de agua, sin previo tratamiento, generando niveles altos de contaminación y arriesgando la salud de la mayoría de la población. En los países en vías de desarrollo el porcentaje es aún mayor, llegando a 95 % (Organización de las Naciones Unidas, 2019).

Se puede ver que el saneamiento es un problema global y que necesita asistencia inmediata para mejorar la calidad de vida de la población. Luego de tener un acercamiento a nivel global con referencia al saneamiento se debe conocer cuál es la situación actual en Guatemala con respecto a este tema.

4. Situación actual en Guatemala en agua y saneamiento. Como el trabajo a realizar busca fomentar la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales en la región Occidente del país, se debe conocer el estado de saneamiento en el país.

El país cuenta con contaminación en más del 90 % de las aguas superficiales, esta contaminación se debe a heces fecales y otros desechos dañinos a la salud. La contaminación del agua afecta de gran forma la salud, generando enfermedades diarreicas e intestinales. Se ha encontrado que existe una gran influencia entre las enfermedades de este tipo con la nutrición. También se ha podido encontrar que la falta de servicios de agua potable y saneamiento afecta a la pobreza, salud y educación (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, 2013).

Entre la población de mayor preocupación se encuentran los niños, donde una de las principales causas de mortalidad son las enfermedades infecciosas y parasitarias, afectando a 66 niños de cada 100,000. Entre los departamentos con mayor tasa de mortalidad están Totonicapán, San Marcos, Chiquimula y Jalapa, Chimaltenango, Huehuetenango, Baja Verapaz y Alta Verapaz, donde su tasa está entre 92 y 207 por cada 100,000 (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, 2013).

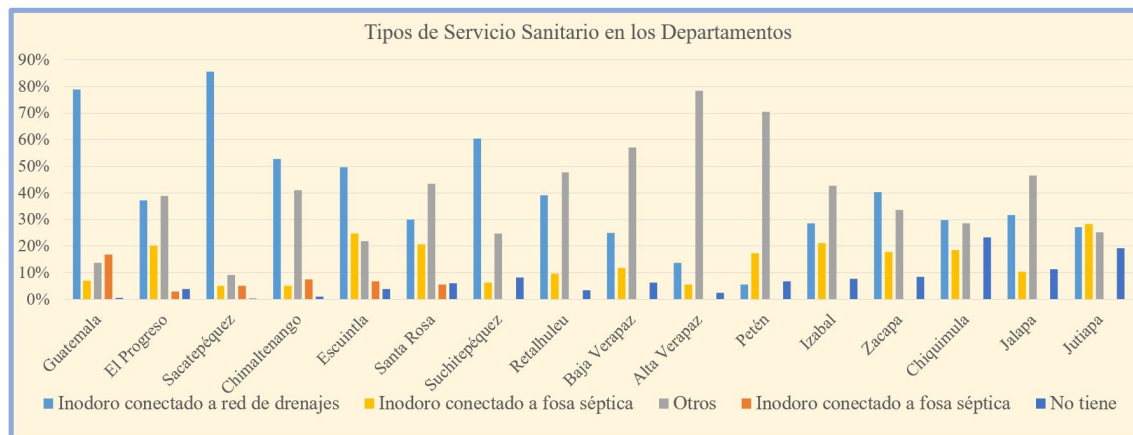
El daño a la salud por falta de saneamiento disminuye la capacidad de trabajo y con ello la posibilidad de generar ingresos en cada familia, esta es una de las razones por las que el tratamiento de aguas residuales juega un papel importante en la vida de las personas.

En el país solo se trata el 5 % de los 1,660 millones de metros cúbicos que se generan anualmente (Instituto de Fomento Municipal, 2018), esto significa que el país necesita gran atención a este problema para poder mejorar las condiciones de vida de toda la población, así como también del ambiente.

Esto también se debe a la falta de sistemas de recolección de aguas residuales, ya que la cobertura de redes de alcantarillado únicamente es del 38 %, dejando a un 62 % en déficit, donde las personas tendrán que buscar otra forma de eliminar sus excretas, donde el 38 % utiliza letrina o pozo ciego, 6 % utiliza una fosa séptica y el resto con otro tipo de recolección o al aire libre (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, 2013).

En la Figura 2 se detallan los tipos de servicios sanitarios utilizados en el país, para dar una mejor idea del contexto del país, y en la figura 1 se detallan los mismos, pero en los departamentos del área definida para este trabajo.

Figura 2. Tipos de servicios sanitarios utilizados en Guatemala.



Elaboración propia con datos de (Instituto Nacional de Estadística Guatemala, 2018).

A pesar de, se ha ido avanzando en la implementación de sistemas de abastecimiento de agua potable y de saneamiento en el país. En el Cuadro 1 se presentan estos avances con respecto a la meta planteada en los ODM. Cabe mencionar que las fuentes mejoradas de abastecimiento de agua potable se refiere a los sistemas donde se protege el agua apropiadamente de contaminación exterior. Los sistemas de saneamiento mejorados son las que impiden el contacto de los seres humanos con excretas (Organización Mundial de la Salud, 2012).

Cuadro 1
Avances de los ODM a partir del año base y brecha por cubrir.

Indicador	Unidad de Medida	Año Base 1990	Años			Meta	Brecha
			2002	2006	2011		
Proporción de la población con acceso a fuentes mejoradas de abastecimiento de agua potable	% de la población con acceso a fuentes mejoradas de agua potable	63.00	75.00	78.70	75.30	81.50	6.20
Proporción de la población con servicios de saneamiento mejorado	% de la población con acceso a servicios de saneamiento mejorados	32.00	47.00	55.00	56.00	66.00	10.00

(Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, 2013)

Los departamentos de Guatemala, Escuintla y Sacatepéquez son los únicos que han logrado cumplir la meta de los objetivos del Milenio. En el norte y el occidente del país el saneamiento sigue siendo mínimo por lo que necesitan especial atención para poder cambiar estas condiciones y lograr que lleguen a los Objetivos de Desarrollo del Milenio (Banco Mundial, 2017).

Existe una diferencia entre las áreas desarrolladas del país y las que no cuentan con un desarrollo a gran escala. En las áreas urbanas el tipo de saneamiento más utilizado es el inodoro con conexión al alcantarillado, en cambio en las áreas rurales se utilizan más las letrinas (Banco Mundial, 2017).

El Cuadro 2 muestra los porcentajes de cada tipo de saneamiento a nivel nacional y cómo han ido avanzando conforme a los años.

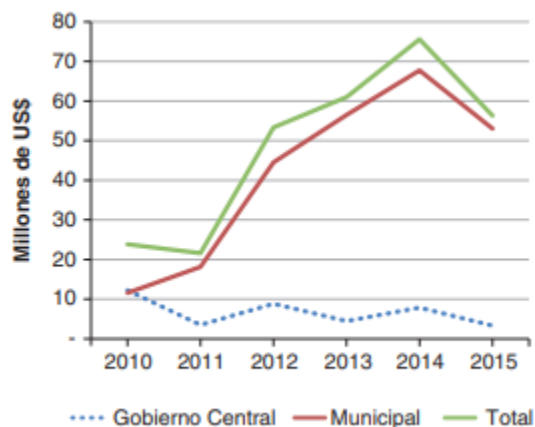
Cuadro 2
Cambio en la cobertura nacional de saneamiento.

Tipo de instalaciones sanitarias	2000	2006	2014
Acceso a saneamiento mejorado	39.0	48.0	53.0
Descarga en alcantarilla	26.0	35.0	38.0
Descarga en fosa séptica	3.0	7.0	8.0
Inodoro de arrastre hidráulico/inodoro de compostaje/ otros mejorados	10.0	7.0	7.0
Falta de acceso a saneamiento mejorado	61.0	52.0	47.0
Defecación al aire libre	14.0	10.0	5.0
Letrina/pozo ciego	47.0	42.0	41.0
Servicios de saneamiento compartidos	14.0	15.0	11.0
Servicios de saneamiento privados	86.0	85.0	89.0

(Banco Mundial, 2017)

En cuanto a la inversión que se realiza en Guatemala para mejorar la sanitización de agua se invirtieron aproximadamente \$178 millones por año del 2010 al 2015. Esta inversión se realiza por parte del Gobierno Central y de las Municipalidades, con la descentralización las municipalidades han ido tomando la mayor parte de esta inversión con el paso de los años como se puede ver en la Figura 5. Gracias a esta descentralización se ha incrementado en más de 600 % la inversión en el sector de sanitización de agua y salud (WASH por sus siglas en inglés). Incluso con ese incremento, el sector es de los que menor apoyo económico reciben en comparación con sectores como el de educación y salud, se estima que esta inversión no es suficiente para cumplir con los ODM (Banco Mundial, 2017)

Figura 3. Gasto real en WASH.



(Banco Mundial, 2017)

B. Normativa guatemalteca para el tratamiento de aguas residuales

Uno de los principales problemas con la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales es la falta de políticas, planes y programas nacionales (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, 2013).

Se puede ver el bajo interés del mejorar estas condiciones, ya que hay ciertas políticas, las cuales,

a pesar de ser pequeñas, responsabilizan a las entidades de cubrir estos servicios, entre ellas está el Artículo 253 de la Constitución Política de la República de Guatemala donde menciona que las municipalidades deben atender los servicios de agua potable y saneamiento (Asamblea Nacional Constituyente, 1985).

Además, en los Decretos No. 12-2002 y 56-202 donde se crea el Código Municipal menciona en el Capítulo 1 del Título V, que los municipios deben proveer abastecimiento domiciliario de agua potable debidamente clorada y servicio de alcantarillado (Congreso de la República de Guatemala, 2002a) (Congreso de la República de Guatemala, 2002b).

En el Artículo 93 del Código de Salud menciona que .^{El} Ministerio de Salud de manera conjunta con las instituciones del Sector, las Municipalidades y la comunidad organizada, promoverá la cobertura universal de la población a servicios para el agua, disposición final de excretas, la conducción y tratamiento de aguas residuales y se fomentarán acciones de educación sanitaria para el correcto uso de las mismas."(Congreso de la República de Guatemala, 1997).

También se generó el Decreto de la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente en 1986 donde indica que su objetivo principal es “velar por el mantenimiento del equilibrio ecológico y la calidad del medio ambiente.”(Congreso de la República de Guatemala, 1986)

Gracias a esta Ley se han dado ciertos pasos para lograr el objetivo de mejorar el medio ambiente, entre ellos está el Reglamento de Requisitos Mínimos y sus Límites Máximos Permisibles de Contaminación para la Descarga de Aguas Servidas (1989). Luego este Reglamento fue cambiado por el Reglamento de Descargas de Aguas Residuales a Cuerpos Receptores (2005). Por último, se generó el acuerdo gubernativo que está en vigencia el cual es el Acuerdo Gubernativo 236-2006 que dicta el Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos (Gobierno de Guatemala, 2006).

Ha habido una actualización de la normativa, siendo cada vez más específica, pero a pesar de ello la contaminación de los cuerpos de agua en el país sigue creciendo. Por otra parte, además de los daños ambientales causados a lo largo de estos años, está la falta de inversión desde que se propuso el Reglamento, esto da como consecuencia que los recursos económicos ahora tengan que ser mayores para poder aliviar este problema (Sigú, 2016).

Sigú (2016) menciona que algunos aspectos fueron mejorados, pero que otros indispensables en la protección ambiental fueron omitidos en las nuevas versiones del Reglamento.

1. Acuerdo Gubernativo 236-2006. Este Acuerdo Gubernativo se denomina como Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos"(Gobierno de Guatemala, 2006).

Tiene como objeto establecer criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reúso de aguas residuales, así como para la disposición de lodos. Lo anterior para que, a través del mejoramiento de las características de dichas aguas, se logre establecer un proceso continuo que permita:

- Proteger los cuerpos receptores de agua de los impactos provenientes de la actividad humana.
- Recuperar los cuerpos receptores de agua en proceso de eutrofización.
- Promover el desarrollo del recurso hídrico con visión de gestión integrada.

El reglamento indica que debe aplicarse a:

- Los entes generadores de aguas residuales.
- Las personas que descarguen sus aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público.
- Las personas que produzcan aguas residuales para reúso.
- Las personas que reúsen parcial o totalmente aguas residuales.
- Las personas responsables del manejo, tratamiento y disposición final de lodos.

Para los límites máximos permisibles de descargas residuales a cuerpos receptores para entes ya existentes se detalla la siguiente tabla:

Cuadro 3
Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores.

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

(Gobierno de Guatemala, 2006)

Luego para los entes generadores nuevos los límites máximos permisibles son los siguientes:

Cuadro 4
Límites máximos permisibles para entes generadores nuevos

Parámetros	Dimensionales	Límites máximos permisibles
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	20
Fósforo total	Miligramos por litro	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	$< 1 \times 10^4$
Arsénico	Miligramos por litro	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	1
Cobre	Miligramos por litro	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.01
Níquel	Miligramos por litro	2
Plomo	Miligramos por litro	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10
Color	Unidades platino cobalto	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

(Gobierno de Guatemala, 2006)

Por otra parte, se consideran distintos límites para las municipalidades y urbanizaciones no conectadas al alcantarillado público, los cuales son los siguientes:

Cuadro 5

Límites máximos permisibles de descargas a cuerpos receptores para aguas residuales municipales y de urbanizaciones no conectadas al alcantarillado público.

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro	Dos de mayo de dos mil veintinueve
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	100	50	10	10	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	700	250	100	100	100
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	300	275	200	100	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	150	150	70	20	20
Fósforo total	Miligramos por litro	50	40	20	10	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^7$	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	1	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	3	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.02	0.02	0.01	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	2	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	0.4	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1000	750	500	500

(Gobierno de Guatemala, 2006)

Siguiente a la descripción de los límites de aguas residuales para descarga ya sea en alcantarillado público o en cuerpos receptores, se detallan los parámetros de aguas para reúso. El cual se clasifica en las siguientes categorías (Gobierno de Guatemala, 2006):

- "Tipo I: Reúso para riego agrícola en general: uso de un efluente que debido a los nutrientes que posee se puede utilizar en el riego extensivo e intensivo, a manera de fertirriego, para recuperación y mejoramiento de suelos y como fertilizante en plantaciones de cultivos que, previamente a su consumo, requieren de un proceso industrial, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35. Se exceptúa de este reúso los cultivos considerados en el tipo II."
- "Tipo II: Reúso para cultivos comestibles: con restricciones en el riego de áreas con cultivos comestibles que se consumen crudos o precocidos, como hortalizas y frutas. Para el caso de coliformes fecales y demanda bioquímica de oxígeno, deberá cumplirse de conformidad

con los límites máximos permisibles del artículo 35. Adicionalmente, para otros parámetros, deberán cumplir los límites máximos permisibles presentados en el cuadro del artículo 21 del presente Reglamento, a excepción de sólidos en suspensión, nitrógeno total y fósforo total."

- "Tipo III: Reúso para acuicultura: uso de un efluente para la piscicultura y camaronicultura, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35."
- "Tipo IV: Reúso para pastos y otros cultivos: con restricciones en el riego de áreas de cultivos no alimenticios para el ser humano como pastos, forrajes, fibras, semillas y otros, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35."
- "Tipo V: Reúso recreativo: con restricciones en el aprovechamiento para fines recreativos en estanques artificiales donde el ser humano sólo puede tener contacto incidental, incluido el riego en áreas verdes, donde el público tenga contacto o no, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35."

Por lo tanto, el Acuerdo 236-2006 detalla los siguientes parámetros y límites máximos permisibles para reúso:

*Cuadro 6
Parámetros y límites máximos permisibles para reúso*

Tipo de reúso	Demanda bioquímica de oxígeno, miligramos por litro	Coliformes fecales, número más probable por cien mililitros
Tipo I	No aplica	No aplica
Tipo II	No aplica	$< 2 \times 10^2$
Tipo III	200	No aplica
Tipo IV	No aplica	$< 1 \times 10^3$
Tipo V	200	$< 1 \times 10^3$

(Gobierno de Guatemala, 2006)

2. Acuerdo Gubernativo 58-2019. Este Acuerdo Gubernativo es una Reforma al Acuerdo Gubernativo 236-2006 del 5 de mayo de 2006 (Gobierno de Guatemala, 2019).

Donde establece el Artículo 24 bis. Nombrado Límites Máximos Permisibles de Descargas a Cuerpos Receptores para Aguas Residuales Municipales. En este Artículo se indica que las municipalidades y/o empresas encargadas de aguas residuales del alcantarillado público, cumplirán con los límites máximos permisibles para descargar a cuerpos receptores de la forma siguiente:

Cuadro 7

Límites máximos permisibles de descargas a cuerpos receptores para aguas residuales municipales

		Fecha máxima de cumplimiento		
		Veintinueve (29) de Noviembre del año Dos Mil Diecinueve (2019)	Dos (2) de Mayo del año Dos Mil Veinticuatro (2024)	Dos (2) de Mayo del año Dos Mil Veintiocho (2028)
		Etapa		
Parámetros	Dimensionales	Uno	Dos	Tres
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/-7	TCR +/-7	TCR +/-7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	50	10	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Ausente	Ausente	Ausente
Demanda bioquímica de Oxígeno	Miligramos por litro	250	100	100
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	275	200	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	150	70	20
Fósforo total	Miligramos por litro	40	20	10
Potencial de Hidrogeno	Unidades de potencial de Hidrogeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien (100) mililitros	<1x10 ⁷	<1x10 ⁴	<1x10 ⁴
Arsénico	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10
Color	Unidades Platino Cobalto	1000	750	500

TCR= temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

(Gobierno de Guatemala, 2006)

Se puede ver que a pesar de que existen políticas a nivel nacional con el objetivo de disminuir la contaminación de los cuerpos de agua, pero no se están llevando a cabo correctamente y por lo tanto, sigue causando grandes problemas en la salud y el medio ambiente.

C. Aguas residuales

1. Definición. Luego de conocer el problema que vivimos debemos de conocer más acerca de las aguas residuales para poder proponer soluciones efectivas.

Según la RAE (2019) son las aguas procedentes de procesos productivos o del consumo humano. Con tratamiento pueden convertirse en aguas regeneradas susceptibles de reutilización si alcanzan los criterios de calidad adecuados para cada tipo de uso.

Entre el agua residual se conocen varios tipos, los cuales dependen de su origen, estos son (Espigares García & Pérez López, 2011):

- Aguas residuales domésticas: Estas son las generadas por el ser humano, principalmente por las heces y orina, aunque también son generadas por productos que utiliza como limpieza, aseo personal, entre otros.
- Aguas blancas: Estas se generan debido a la lluvia, derretimiento de la nieve o proveniente del riego o limpieza de lugares públicos. En ellas se encuentra arena, hojas u otros sólidos que también pueden llegar al sistema de recolección sanitaria.
- Aguas residuales industriales: Estas son producidas por la industria, las cuales pueden ser fábricas u otras industrias que producen contaminantes distintos y específicos de cada una.
- Aguas residuales agrícolas: Estas se generan por toda la actividad agrícola, como lo son los cultivos o ganadería. Estas también contienen diferentes tipos y cantidades de contaminantes ya que en ella se utilizan fertilizantes, pesticidas, etc. que contienen químicos distintos a los demás tipos de agua residual.

Aguas residuales domésticas

En una comunidad los principales productores de aguas residuales son las áreas residenciales y los distritos comerciales. Los otros productores pueden ser instituciones o áreas de recreación. Comúnmente se determinan los parámetros del agua por medio de registros históricos o por pruebas tomadas en el lugar o en comunidades similares (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

El historial del consumo de agua también se utiliza para estimar los caudales. Estos historiales son útiles en otras partes del mundo donde el riesgo es limitado y el 90 por ciento o más se convierte en agua residual. En los Estados Unidos alrededor de 60 y 90 por ciento del agua consumida por persona se convierte en agua residual. Los porcentajes más altos se dan en los Estados del norte durante el invierno y los porcentajes bajos se dan en regiones semiáridas del suroeste del país donde el riego es mayor (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

Para la mayoría de áreas residenciales los caudales de las aguas residuales se determinan en base a la población y al promedio del aporte de agua residual (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

Cuadro 8
Caudales típicos en residenciales de E.E.U.U.
Caudales típicos de áreas residenciales en Estados Unidos

Cantidad de personas por casa	Caudal (L/persona*día)	
	Rango	Típico
1	285-490	365
2	225-385	288
3	194-335	250
4	155-268	200
5	150-260	193
6	147-253	189
7	140-244	182
8	135-233	174

(Metcalf and Eddy Inc., 2003)

Los caudales también se pueden calcular dependiendo del equipo e instalaciones que tengan. a continuación, se presenta una tabla con los datos típicos que se tienen registrados en Estados Unidos (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

Cuadro 9
Rangos típicos por equipo o instalación en E.E.U.U.
Tasas típicas de uso de agua para equipo e instalaciones en los Estados Unidos

Equipo o instalación	Unidad	Rango
Lavadora de ropa automática		
Llenada por arriba	L/carga	130-216
Llenada por delante	L/carga	45-60
Lavadora de platos automática	L/carga	36-60
Bañera tipo tina	L/uso	114
Trituradora de comida	L/día	4-8
Bañera	L/min*uso	9-11
Inodoro con tanque alto	L/uso	6-13
Inodoro con tanque estandar	L/uso	15-23
Lavamanos	L/min*uso	8-11

(Metcalf and Eddy Inc., 2003)

Cuadro 10
Distribución típica del uso del agua en una residencia de E.E.U.U.
Distribución típica del uso del agua dentro de una residencia en los Estados Unidos

Uso	Porcentaje del total	
	Rango	Típico
Regadera	12-20	16.8
Bañera	1-3	1.7
Grifo	12-18	15.7
Grifo de Lavatrastos	1-2	1.4
Pila	12-28	21.8
Otros	0-9	2.2
Descarga de inodoro	23-31	26.7
Fuga	5-22	13.7
		100.0

(Metcalf and Eddy Inc., 2003)

Los caudales pueden variar dependiendo en la cantidad y la calidad de agua que se suministra, el precio del agua, el desarrollo económico y social del lugar y otras características de la comunidad (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

Caudales de área comerciales

Los caudales y características de las aguas residuales en las áreas comerciales pueden variar mucho dependiendo de su función o la actividad. Por esa amplia variedad se recomienda hacer el esfuerzo por obtener historiales del área u otras similares (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

Pero si no se consiguen historiales se pueden determinar los caudales conociendo la actividad que se va a llevar a cabo y la capacidad de personas que pueden habitar el lugar. A continuación, se presenta una tabla con los caudales típicos para fuentes comerciales en los Estados Unidos (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

Cuadro 11
Caudales en áreas comerciales de E.E.U.U.

Caudales típicos de áreas comerciales en Estados Unidos

Fuente	Unidad	Caudal (L/unidad*día)	
		Rango	Típico
Aeropuerto	Pasajero	11-19	15
Apartamentos	Cama	380-570	450
Estación de servicio automotriz	Vehículo	30-57	40
	Empleado	34-57	50
Bar	Asiento	45-95	80
	Empleado	38-60	50
Lugares de hospedaje	Persona	95-250	170
Centros de conferencias	Persona	40-60	30
Tienda por departamentos	Baño	1300-2300	1500
	Empleado	30-57	40
Hotel	Huésped	150-230	190
	Empleado	30-57	40
Edificio industrial (solo desperdicio sanitarios)	Empleado	57-130	75
Lavandería	Máquina	1500-2100	1700
	Cliente	170-210	190
Motel (con cocina)	Huésped	210-340	230
Motel (sin cocina)	Huésped	190-290	210
Oficinas	Empleado	26-60	50
Baños públicos	Usuario	11-19	15
Restaurantes			
Convencionales	Cliente	26-40	35
Con bar	Cliente	34-45	40
Centros comerciales	Empleado	26-50	40
	Unidad de estacionamiento	4-11	8
Teatros o cines	Asiento	8-15	10

(Metcalf and Eddy Inc., 2003)

Para las fuentes institucionales también se tienen registros típicos mostrados en la siguiente tabla. Siempre se recomienda tomar datos exactos del lugar esta tabla se utiliza si no se tienen registros, ya que los caudales y características del agua cambian dependiendo de la región, el clima y el lugar (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

Cuadro 12
Caudales en lugares institucionales de E.E.U.U.

Caudales típicos de fuentes institucionales en Estados Unidos

Fuente	Unidad	Caudal (L/unidad*día)	
		Rango	Típico
Salas de asambleas	Invitado	11-19	15
Hospitales	Cama	660-1500	1000
	Empleado	20-60	40
Instituciones distintas de hospitales	Cama	280-470	380
	Empleado	20-60	40
Prisiones	Preso	300-570	450
	Empleado	20-60	40
Colegio			
Con cafetería, gimnasio y duchas	Estudiante	60-120	100
Solo con cafetería	Estudiante	40-80	60
Colegio (con internado)	Estudiante	280-380	320

(Metcalf and Eddy Inc., 2003)

2. Parámetros de calidad del agua. Es importante conocer las características del agua residual que se busca tratar, para ello existen parámetros que se toman en cuenta para el diseño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Estos parámetros varían dependiendo de donde proviene el agua residual. A continuación, se presentan los parámetros generales de las aguas residuales en general.

Materia orgánica

La materia orgánica representa la parte más importante de la contaminación, es aquella que agota el oxígeno disuelto, en las masas de agua, ríos, lagos, bahías, etc. (Orozco Jaramillo, 2005).

En las aguas residuales, de descomposición típica, cerca del 70 % de los sólidos sedimentables totales y el 45-60 % de los sólidos fijos o filtrados son materia orgánica. La materia orgánica está compuesta de carbono, hidrógeno, oxígeno, elementos comunes a todos los compuestos orgánicos, junto con el nitrógeno en algunos casos. También están presentes a menudo otros compuestos como el fósforo, azufre y hierro. La materia orgánica en las aguas residuales se divide por conveniencia en diferentes grupos como sigue:

Proteínas

Componen del 40 al 60 % de las aguas residuales. Son el principal constituyente de los organismos animales. Las plantas también contienen proteínas pero en menor medida. Las proteínas son sustancias asociadas a los Aminoácidos, que se componen del grupo ácido, -COOH, y el grupo básico -NH₂. Siempre está presente el nitrógeno. La urea CO(NH₂)₂, y las proteínas son la principal fuente de nitrógeno de las aguas residuales, estas producen malos olores y graves daños al ambiente (Orozco Jaramillo, 2005).

a. Carbohidratos. Constituyen del 25 al 50 % de las aguas residuales. Proviene de la materia vegetal principalmente. Incluyen azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera. Los carbohidratos se componen de carbono, hidrógeno y oxígeno. Los almidones son más estables, pero pueden ser convertidos en azúcares por actividad microbiana (Orozco Jaramillo, 2005).

b. Aceites y grasas. Son compuestos de alcohol y glicerol. Los glicéridos de los ácidos grasos volátiles son los aceites, líquidos a temperaturas ordinarias. En las aguas residuales, las grasas y aceites provienen de la manteca y los aceites vegetales. Son elementos muy estables y difíciles de descomponer por las bacterias en las aguas residuales. Por lo tanto, deben ser removidos antes del tratamiento o traerán problemas en la descomposición de la materia orgánica (Orozco Jaramillo, 2005).

c. Surfactantes. Son moléculas grandes y ligeramente solubles en agua, son las que causan espuma. Conocidos como detergentes, se usan en limpieza. Pueden causar grandes problemas en la aireación de las aguas residuales. Anteriormente los detergentes se componían de Alkil-Benceno-Sulfonato (ABS) no biodegradables, pero hoy han sido mayormente cambiados por detergentes lineales, Lineal-Alkil-Sul-fonato (LAS) que son biodegradables (Orozco Jaramillo, 2005).

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es uno de los principales parámetros en el tratamiento de las aguas residuales. El oxígeno disuelto mide la cantidad de oxígeno gaseoso dentro del agua, cuando la concentración es muy baja significa que el agua está contaminada, esto sucede en el agua residual.

Además, la mayoría de los organismos dependen del oxígeno disuelto para mantener sus procesos metabólicos, para obtener energía y llevar a cabo su reproducción. Además, el oxígeno disuelto es el principal indicador del estado de contaminación de una masa de agua, pues la materia orgánica contenida en ella tiene como efecto directo el consumo del oxígeno disuelto. (Orozco Jaramillo, 2005).

El oxígeno es un gas poco soluble en el agua, no reacciona con ella, y su solubilidad depende de la presión parcial. Su concentración de saturación varía entre 7 mg/L a 35 C y 14.7 mg/L a 0 C a una atmósfera de presión. Los Sólidos Solubles también afectan la solubilidad del oxígeno (Orozco Jaramillo, 2005).

El oxígeno disuelto debe tener un máximo de 110 % de la concentración de saturación, ya que si las aguas están sobresaturadas de oxígeno los organismos acuáticos pueden sufrir la enfermedad de la "burbuja de gas". Estos casos pueden llegar a suceder si la producción de oxígeno de las algas en un momento del día es demasiado alta, sobresaturando de oxígeno el líquido (Orozco Jaramillo, 2005).

Frecuentemente se dan bajas concentraciones de oxígeno disuelto debido a la demanda de oxígeno causada por la materia orgánica presente (Orozco Jaramillo, 2005).

Encima de 7 mg/L de oxígeno disuelto existe una población diversificada de peces, con presencia de caracoles, insectos, etc. En general arriba de 5 mg/L es la concentración mínima necesaria para sustentar la vida de peces salmónidos. La mayoría de los peces pueden sobrevivir con 4 mg/L de oxígeno disuelto. Algunos como la mojarra o tilapia resisten concentraciones de hasta 3 mg/L (Orozco Jaramillo, 2005).

Concentraciones menores causarán la desaparición de la vida acuática superior. Por debajo de una concentración de 1 mg/L promedio medido en las masas de agua se encontrarán con seguridad zonas anaerobias y por consiguiente habrá presencia de malos olores. Cuando la concentración llega a 0 mg/L la descomposición anaerobia es generalizada, también la presencia de malos olores y la presencia de bacterias (Orozco Jaramillo, 2005).

Por ello es un parámetro muy útil para conocer el grado de contaminación del agua. Aunque medir el oxígeno disuelto es más difícil, por lo que su forma de medirlo indirectamente es la DBO, la cual se presenta a continuación.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Es la cantidad de oxígeno necesaria para descomponer la materia orgánica presente en el agua residual mediante la acción de bacterias en condiciones aerobias. La DBO es causada por la respiración de las bacterias y cesará al agotarse totalmente la materia orgánica. La DBO es causada por la materia orgánica arrojada a las masas y corrientes de agua, la cual se constituye en el alimento para las bacterias que se reproducirán rápidamente, estas bacterias en condiciones aerobias consumirán oxígeno causando la disminución del oxígeno disuelto. La DBO se efectúa a 5 días y a 20 C y se denota con el símbolo DBO₅. La DBO_u es la medida hasta el agotamiento total de la materia orgánica, lo que usualmente toma de 20 a 30 días. En las aguas residuales domésticas, la DBO₅ es casi igual a 0.70DBO_u (Orozco Jaramillo, 2005).

Dependiendo de la materia orgánica así será la DBO, la materia orgánica proteínica o nitrogenada causa una DBO nitrogenada. La materia orgánica de carbohidratos o carbonácea produce una DBO carbonácea o DBOC. Las grasas, aceites y las fibras son muy estables y no producen ninguna DBO en las aguas residuales. Compuestos como el H₂S también pueden producir demanda de oxígeno, DBOS (Orozco Jaramillo, 2005).

La DBO carbónica conforma la parte principal de la mayoría de las aguas residuales. Por ello la DBO carbónica se maneja en forma independiente de la DBO nitrogenada (Orozco Jaramillo, 2005).

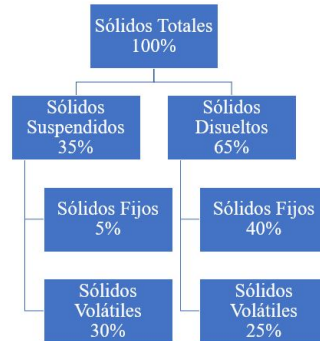
Demanda química de oxígeno (DQO) Es una manera de medir la materia orgánica indirectamente, a través de la demanda de oxígeno de los compuestos orgánicos, la DQO es un modo de medir la energía contenida en los compuestos. En lugar de descomponer la materia orgánica mediante el metabolismo bacteriano, que utiliza la respiración como medio para obtener el oxígeno, en la DQO se utiliza un fuerte agente oxidante en un medio ácido. El agente oxidante más utilizado es el dicromato de Potasio, en presencia del Sulfato de Plata como catalizador a alta temperatura (Orozco Jaramillo, 2005).

La DQO de un compuesto es generalmente mayor que la DBO debido a que muchos compuestos pueden ser oxidados químicamente no pueden serlo biológicamente, a través de biodegradación bacteriana. Los compuestos no biodegradables son a menudo sustancias moleculares artificiales de gran Peso Molecular. Con frecuencia para un agua residual determinada se puede correlacionar muy bien la DBO con la DQO lo que es un gran beneficio debido a que la DQO toma solo dos o tres horas para hacerlo mientras la DBO requiere cinco días. La relación DQO/DBO determina también la cantidad de materia orgánica no biodegradable presente en el aguas residuales (Orozco Jaramillo, 2005).

Sólidos

Los sólidos es otro parámetro de gran importancia en el tratamiento de aguas residuales. La materia orgánica a menudo está en forma de partículas en suspensión, por lo que es necesario diferenciar entre los Sólidos Suspendedos y los Sólidos Disueltos. Además, los sólidos pueden ser volátiles que indican procedencia orgánica, o pueden ser fijos que se presumen como sólidos inorgánicos. Otro tipo de sólido importante en las aguas residuales son los Sólidos Sedimentables y sirven para determinar la cantidad y asentabilidad de los lodos presentes en el aguas residuales o el Licor Mixto (Orozco Jaramillo, 2005).

Figura 4. Distribución de los sólidos en un drenaje ordinario.



(von Sperling & de Lemos, 2005)

pH

El potencial de hidrógeno es un parámetro importante para determinar la calidad del agua, así como también para el tratamiento de las aguas residuales. El rango de concentración para la existencia de vida biológica está entre 6 y 9. Si el agua residual contiene una alta concentración del ion hidrógeno será más difícil su tratamiento por medio biológicos. El rango para descarga de aguas residuales a cuerpos receptores se encuentra entre 6.5 y 8.5 (Metcalf and Eddy Inc., 2003)

Nitrógeno

El nitrógeno, así como también el fósforo, son esenciales para el crecimiento de microorganismos y animales, por ello se conocen como nutrientes. El nitrógeno es importante para sintetizar la proteína, lo que ayuda a evaluar si se puede tratar el agua residual por medio de un proceso biológico. Si en algún caso los niveles de nitrógeno fueran muy bajos, se necesitaría añadir más al agua residual para proceder a su tratamiento. En otros casos, excesivo nitrógeno puede causar mayor crecimiento de algas causando eutrofización (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

El nitrógeno puede provenir de compuestos de origen animal o vegetal, también de nitrato de sodio y nitrógeno de la atmósfera. Lo complicado de este compuesto es sus distintos estados en los que se puede encontrar, ya que tiene varios estados de oxidación. Las bacterias pueden hacer cambios positivos para el agua residual cambiando el estado del nitrógeno, así como también cambios negativos en ella, esto depende de si las condiciones son aerobias o anaerobias (Metcalf and Eddy Inc., 2003)

El nitrógeno total del agua residual comprende varias formas:

- Nitrógeno Kjeldahl (NTK)

- Amoníaco (NH₃) y Amonio (NH₄⁺)
- Nitritos y Nitratos

El nitrógeno es importante ya que en el reúso de aguas residuales es un factor importante para el crecimiento de plantaciones agrícolas, por lo que si se busca eliminar completamente se estaría disminuyendo la calidad del agua para el riego.

Fósforo

Es un nutriente esencial para el crecimiento de algas y bacterias. Es determinante en el proceso de eutrofización pues algunas algas pueden suplir la ausencia de nitrógeno en el agua fijándolo de la atmósfera. En las aguas residuales domésticas el fósforo puede estar en concentraciones de 4 a 15 mg/L de modo que la descarga de aguas residuales también puede causar la eutrofización de lagos y bahías si no se remueve previamente (Orozco Jaramillo, 2005).

El fósforo total se puede dividir en los siguientes compuestos (Orozco Jaramillo, 2005):

- Ortofosfatos
- Polifosfatos
- Fósforo orgánico

Los ortofosfatos son la forma más perjudicial para producir eutrofización.

Azufre

El ion sulfato ocurre naturalmente en la mayoría de los suministros de agua y está presente en el agua residual también. El azufre es necesario en la síntesis de proteínas y es liberado después. El sulfuro se reduce biológicamente bajo condiciones anaerobias a sulfuro donde luego en combinación con hidrógeno se convierte en ácido sulfhídrico el cual es la causa de los malos olores en los sistemas de tratamiento (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

3. Parámetros de las aguas residuales domésticas. Las aguas residuales domésticas se conocen como ordinarias ya que a pesar de que pueden provenir de distintos lugares llevan varios parámetros similares entre ellos, como lo son la materia orgánica, los nutrientes, sólidos suspendidos y coliformes fecales.

A continuación, se presenta el cuadro de datos generales de aguas residuales domésticas en países en vías de desarrollo.

Cuadro 13

Parámetros generales de las aguas residuales domésticas en países en vías de desarrollo.

Parámetros de las Aguas Residuales Domésticas en los países en vías de desarrollo

Parámetro	Carga por persona (g/hab*dia)		Concentración (mg/L)	
	Rango	Típico	Rango	Típico
SÓLIDOS TOTALES	120-220	180	700-1350	1100
Suspendidos	35-70	60	200-450	350
Fijos	41821	10	40-100	80
Volátiles	25-60	50	165-350	320
Disueltos	85-150	120	500-900	700
Fijos	50-90	70	300-550	400
Volátiles	35-60	50	200-350	300
Sedimentables	-	-	10-20	15
MATERIA ORGÁNICA				
DBO5	40-60	50	250-400	300
DQO	80-120	100	450-800	600
DBOultima	60-90	75	350-600	450
NITRÓGENO TOTAL	6-10	8.00	35-60	45
Orgánico	2.5-4.0	3.50	15-25	20
Amonio	3.5-6.0	4.50	20-35	25
Nitrito	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Nitrato	0.0-0.3	≈ 0	0-2	≈ 0
FÓSFORO	0.7-2.5	1.00	4-15	7
Orgánico	0.7-1.0	0.30	1-6	2
Inorgánico	0.5-1.5	0.70	3-9	5
PH	-	-	6.7-8.0	7
ALCALINIDAD	20-40	30	100-250	200
METALES PESADOS	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
ORGÁNICOS TÓXICOS	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0

Elaboración propia con datos de (von Sperling & de Lemos, 2005)

Para el desarrollo de este trabajo es necesario conocer cómo funcionan los sistemas de tratamiento y cuáles son los más utilizados y conocidos, de esta forma poder diseñar cada uno y luego compararlos.

El tratamiento de las aguas residuales se divide en cuatro etapas y algunos sistemas pueden tener solo algunas etapas, esto depende de la calidad de agua buscada en el efluente. Las cuatro etapas que se tienen son el tratamiento preliminar, primario, secundario y terciario.

Las principales diferencias entre ellos son que el tratamiento preliminar busca acondicionar el agua residual para que las demás etapas puedan operar sin ningún inconveniente. Este proceso principalmente es físico.

Luego el tratamiento primario también es en su mayoría un tratamiento físico donde se remueven partículas suspendidas y sedimentables que permitan un mejor proceso secundario.

El tratamiento secundario es principalmente biológico donde se busca la mayor reducción de carga orgánica. Hay distintas unidades y sistemas que permiten esta reducción.

Por último, el tratamiento terciario tiene como objetivo eliminar los contaminantes que no se pudo remover en las primeras etapas, como pueden ser patógenos, nutrientes o metales pesados.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno con los sistemas más utilizados y conocidos a nivel mundial.

D. Sistemas de tratamiento preliminar

1. Descripción. El objetivo principal del tratamiento preliminar es preparar las aguas residuales para que no dañen las instalaciones de los sistemas posteriores, para que tengan un funcionamiento adecuado. También busca remover condiciones no deseadas (Rojas, 2002).

En general el tratamiento preliminar busca remover (Oakley & Salguero, 2011):

- Sólidos gruesos: Estos pueden ser papel, plástico, telas u otros desechos comunes que pueden ingresar al drenaje.
- Arena: Es común encontrar arena que ingresa por los tragantes o por los pozos de registro. Estos sólidos se clasifican como los que tienen una gravedad específica cercana a 2.5.
- Grasas y Aceites: Estos provienen principalmente de los desechos de las cocinas y pueden provocar problemas en los procesos de tratamiento. Por ello se remueven antes de cualquier proceso.

Esta fase de tratamiento se compone comúnmente por (Oakley & Salguero, 2011):

1. Trampa de grasas
2. Rejillas
3. Desarenador
4. Canal de medición de caudal

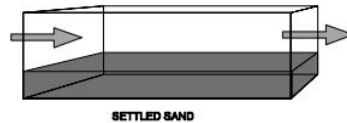
La trampa de grasas es un tanque que separa las grasas de las aguas residuales por medio de la diferencia de densidad de estos con respecto de la del agua. Las grasas son menos densas que el agua por lo que flotan a la parte superior del tanque y el agua fluye por debajo para seguir con su destino (Alvarado Granados & Ramos Villanueva, 2010).

Las rejillas buscan separar los sólidos gruesos del agua residual. Su funcionamiento es simple ya que consiste en barras separadas a cierta distancia donde el material grueso no puede pasar a través de estas. Este material se debe remover diariamente. Dependiendo de la distancia entre las barras será la cantidad de sólidos retenidos. Con aberturas entre 20 y 50 mm se pueden retener entre 0.008 y 0.038 m³/1000m³ (Oakley & Salguero, 2011).

Los desarenadores buscan remover los sólidos arenosos, los cuales pueden estar conformados por materiales inorgánicos como arena, ceniza y grava. La producción de estos sólidos es cambiante y depende de condiciones específicas de cada lugar. Estos sólidos pueden impedir la mezcla correcta

dentro de las unidades de tratamiento, además de poder causar mal olor y erosión a las paredes (Oakley & Salguero, 2011)

Figura 5. Ejemplo de desarenador.



(von Sperling & de Lemos, 2005)

Existen tres tipos generales de desarenadores: de flujo horizontal, aireados y tipo vórtice.

En este trabajo se describirá el desarenador de flujo horizontal porque es el más utilizado alrededor del mundo por su facilidad de funcionamiento y construcción, además de no requerir energía eléctrica para su funcionamiento, lo cual es positivo para su implementación en la región definida (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

Este funciona con una velocidad cercana a 0.3 m/s lo cual da tiempo suficiente para que las partículas de arena puedan sedimentar en el fondo del canal. La base de diseño de estos desarenadores es que en las condiciones más adversas, la partícula más pequeña de arena pueda sedimentar sin llegar al efluente. El largo del canal será controlado por la altura de este. La limpieza de estos sistemas se puede hacer con una pala para remover la arena acumulada en el fondo (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

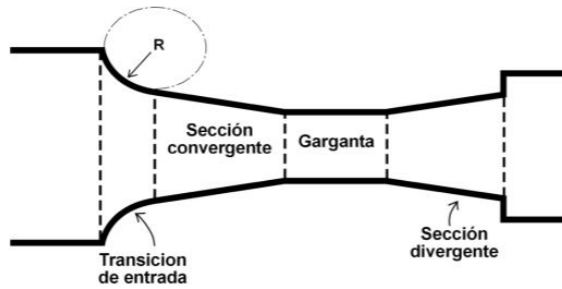
2. Canal Parshall. El canal parshall es un medidor de caudal abierto, este tipo de medidor fue planteado por Ralph L. Parshall, ingeniero del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. La versatilidad del canal parshall es que hay detallados varios con distintas dimensiones los cuales se miden por el ancho de garganta, el cual es el lugar donde se mide el tirante de agua para determinar el caudal que está pasando en ese instante (Lux Monroy, 2010).

Principalmente el Canal Parshall se utiliza en el tratamiento preliminar para regular el caudal de entrada a los sistemas posteriores, ya que las descargas no son continuas y esto puede afectar el funcionamiento. Esta es su función primordial, adicionalmente se puede medir el caudal que pasa a través de él, pero es una característica secundaria.

Este tipo de canales se puede construir con varios materiales, como los son concreto fundido en sitio o prefabricados, metal, fibra de vidrio, entre otros (Lux Monroy, 2010)

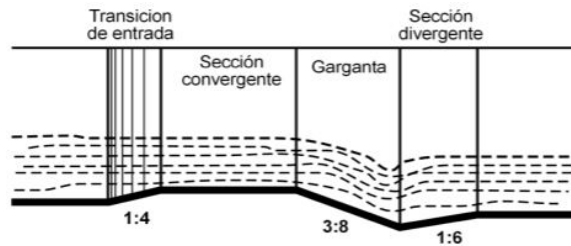
Las partes de un canal Parshall son las siguientes:

Figura 6. Partes del medidor Parshall en planta.



(Lux Monroy, 2010)

Figura 7. Partes del medidor Parshall en sección.



(Lux Monroy, 2010)

Para el diseño de los canales Parshall se puede utilizar ecuaciones ya planteadas, aunque por estar estandarizados ya se tienen tablas para seleccionar el canal necesario. Estas tablas se basan en el caudal mínimo y máximo que puede pasar a través del canal. Se debe buscar que los caudales de diseño estén dentro del rango del canal a seleccionar. A continuación, se presenta la tabla utilizada para su selección:

Cuadro 14
Rango de caudales de operaciones en canales Parshall.

Ancho de Garganta W		Caudal Q (l/s)	
pulg	cm	Mínimo	Máximo
3"	7.6	0.85	53.8
6"	15.2	1.52	110.4
9"	22.9	2.55	251.9
1'	30.5	3.11	455.6
1 ¹ / ₂ '	45.7	4.25	696.2
2'	61.0	11.89	936.7
3'	91.5	17.26	1426.3
4'	122.0	36.79	1921.5
5'	152.5	62.8	2422.0
6'	183.0	74.4	2929.0
7'	213.5	115.4	3440.0
8'	244.0	130.7	3950.0
10'	305.0	200.0	5660.0

(Lux Monroy, 2010)

Las ventajas de utilizar este tipo de medidor de caudal es su facilidad de construcción ya que todas las medidas ya están especificadas. Además, otras ventajas son:

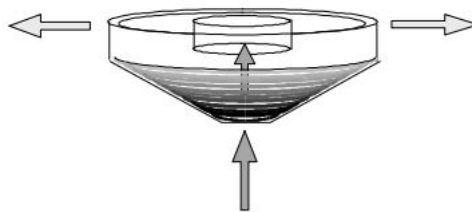
- La pérdida de carga es mínima.
- El paso del flujo es libre y por lo tanto no presenta problemas de obstrucción con elementos arrastrados por la corriente.
- Al ser la velocidad de la garganta mayor que la velocidad de aproximación, no existe la posibilidad que ocurran sedimentaciones que afecten las mediciones

E. Sistemas de tratamiento primario

El tratamiento primario busca remover los sólidos suspendidos sedimentables y sólidos flotantes. El agua residual luego de pasar por el tratamiento preliminar aún contiene sólidos suspendidos medianos o finos que se pueden remover parcialmente en unidades de sedimentación. Una parte significativa de estos sólidos sedimentables totales está compuesta de materia orgánica en suspensión. De esta forma, la remoción con procesos simples como la sedimentación implica una reducción de la carga de DBO introducida al tratamiento secundario, donde su remoción es más costosa (von Sperling & de Lemos, 2005).

Por ello se entiende que la función de los tanques de sedimentación primaria es remover los sólidos orgánicos pesados, lo que significa una reducción en la DBO. Estos tanques de sedimentación pueden ser circulares o rectangulares. El agua residual fluye lentamente a través de ellos permitiendo que los sólidos sedimentables totales con mayor densidad comparada con la del líquido sedimenten lentamente al fondo. La masa de estos sólidos acumulada en el fondo se llama Lodos Crudos Primarios, los cuales se pueden remover por un drenaje al fondo para tanques pequeños o con bombas para tanques grandes. La eficiencia del tratamiento primario en la remoción de sólidos sedimentables totales y como resultado la DBO mejora con la adición de coagulantes. A este proceso se le llama Tratamiento Primario Avanzado o Tratamiento Primario Mejorado Químicamente (CEPT por sus siglas en inglés) (von Sperling & de Lemos, 2005).

Figura 8. Tanque de sedimentación primario circular.



(von Sperling & de Lemos, 2005)

Los tanques sépticos también se pueden considerar una forma de tratamiento primario. Estos tanques sépticos y sus variantes, como los tanques Imhoff, son básicamente tanques de sedimentación donde sólidos sedimentables son removidos al fondo. Estos sólidos o lodos permanecen al fondo por un período largo de tiempo que es suficiente para su digestión. Esta estabilización ocurre en condiciones anaerobias (von Sperling & de Lemos, 2005).

1. Sedimentador primario. Los sedimentadores primarios buscan remover los sólidos sedimentables y reducir los sólidos suspendidos. Son tanques alargados donde por medio de gravedad se sedimentan los sólidos. Luego se deben de remover estos sólidos del fondo para que no se altere el funcionamiento. Es una unidad eficiente para la reducción de sólidos ya que puede reducir entre el 50 % al 70 % de los sólidos suspendidos totales, además también puede reducir entre un 25 % al 40 % de DBO. Esto mejora la calidad del agua previo al tratamiento secundario, mejorando el desempeño de estos (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

El tiempo de retención de estos tanques se encuentra entre 10 y 30 minutos y sus dimensiones dependen de la carga superficial. Los dos tipos más comunes de sedimentadores primarios son los rectangulares y los circulares, su funcionamiento es similar solo cambia su figura en planta (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

La ventaja de los sedimentadores rectangulares es que no se requiere la colocación de ningún equipo para su funcionamiento, esto lo hace una unidad factible para lugares sin servicios de energía eléctrica.

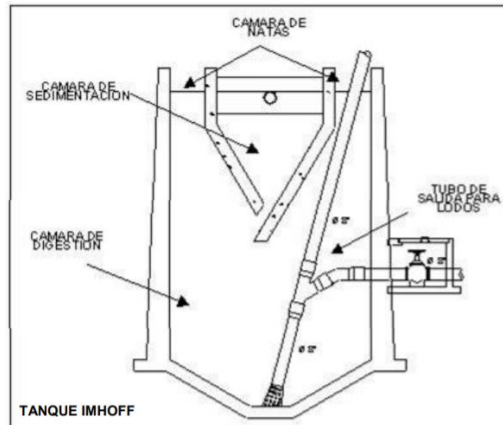
2. Tanque Imhoff. El objetivo del tanque Imhoff busca remover los sólidos sedimentables totales del agua residual. Se recomienda su uso para comunidades de hasta cinco mil habitantes (OPS-CEPIS, 2005).

El tanque consiste en dos cámaras, una dentro de otra, donde la pequeña recibe el afluente y hace que los sólidos sedimenten al fondo donde hay otra apertura que conecta con la cámara más grande. En el tanque de mayor tamaño ocurre la digestión de los sólidos que van llegando para mejorar la calidad del agua (OPS-CEPIS, 2005).

En la superficie del tanque se encuentra el área de ventilación y acumulación de natas. Entre la cámara de sedimentación y la de digestión se encuentran paredes inclinadas donde permiten el paso de los sólidos, pero no los gases producidos en la digestión, evitando afecta la sedimentación (OPS-CEPIS, 2005).

En el fondo de la cámara de digestión se deja una conexión o salida para poder remover constantemente los sólidos acumulados y que ya no tienen la misma capacidad de trata el agua (OPS-CEPIS, 2005).

Figura 9. Tanque Imhoff.



(OPS-CEPIS, 2005)

La principal desventaja del tanque Imhoff es que el efluente aún contiene una gran carga orgánica y microbiológica por lo que se necesita algún tratamiento posterior a estos (OPS-CEPIS, 2005).

Estos son las principales unidades de tratamiento primario, se puede ver que en su mayoría son tanques de algún tipo por lo que para el tratamiento de grandes cantidades de aguas residuales sus dimensiones serán grandes.

F. Sistemas de tratamiento secundario

1. Introducción. El tratamiento secundario se considera que es el más importante para mejorar las aguas residuales domésticas ya que contienen grandes cantidades de materia orgánica que necesita ser removida.

La materia orgánica está presente en las siguientes formas (von Sperling & de Lemos, 2005):

- Materia Orgánica Disuelta (soluble o DBO filtrada) que no es removida por operaciones físicas, como la sedimentación primaria.
- Materia Orgánica en Suspensión (Suspendida o DBO particulada), la cual es removida en gran parte en el tratamiento primario, pero los sólidos finos con menos sedimentación permanentes en el líquido.

Los procesos de tratamiento secundario se utilizan para acelerar los mecanismos de descomposición que ocurren naturalmente en los cuerpos receptores. De esta forma, la descomposición de los contaminantes orgánicos degradables se logra bajo condiciones controladas y en intervalos de tiempo menores que en los sistemas naturales (von Sperling & de Lemos, 2005).

Como se mencionó anteriormente la esencia del tratamiento secundario en aguas residuales ordinarias es la implementación de la etapa biológica donde una gran variedad de microorganismos toma parte en este proceso, así como bacterias, protozoos, hongos y demás. La base de todo el proceso biológico es el contacto efectivo entre esos organismos y la materia orgánica del agua residual con el objetivo de ser el alimento para estos microorganismos. Los microorganismos convierten la materia orgánica en dióxido de carbono, agua y materia celular (crecimiento y reproducción de los microorganismos) en condiciones anaerobias. Cuando se tienen condiciones aerobias, estos microorganismos producen agua, oxígeno y materia celular principalmente.

Esta descomposición biológica de la materia orgánica requiere presencia de oxígeno como componente fundamental del proceso aeróbico, además del mantenimiento de otras condiciones ambientales favorables como temperatura, pH, tiempo de contacto, etc. (von Sperling & de Lemos, 2005).

En el proceso anaerobio para la descomposición de la materia orgánica se requiere carga orgánica y ausencia de oxígeno para llevarse a cabo, aunque el proceso es más lento en esta situación.

Figura 10. Diagrama simplificado del metabolismo bacterial.



Elaboración propia a partir de (von Sperling & de Lemos, 2005)

El tratamiento secundario generalmente incluye unidades de tratamiento preliminar, pero puede o no contener unidades de tratamiento primario. Existe una gran variedad de procesos de tratamientos secundarios y los más comunes son:

- Lagunas de estabilización
- Sistemas de disposición en tierra
- Reactores anaerobios
- Sistemas de lodos activados
- Reactores aerobios con biopelículas

En este trabajo se describirán los sistemas de tratamiento secundario que no necesitan energía eléctrica, dado a que las condiciones del área rural de Occidente no cuentan con un servicio adecuado para poder instalar equipos que requieran de una alimentación constante (Ministerio de Energía y Minas, 2020).

El tratamiento por medio de lagunas de estabilización es recomendado para la región de América Latina ya que son más sencillas de diseñar, construir, operar y mantener, ante otros procesos de tratamiento (Oakley & Salguero, 2011).

En comparación con otros sistemas de tratamiento más avanzados, las lagunas de estabilización tienen un costo menor, ya que no se necesitan equipos con tecnología avanzada, sino que se pueden conseguir a nivel local (Oakley & Salguero, 2011).

Esta alternativa puede ser de gran utilidad ya que se busca que los sistemas de tratamiento a implementar en la guía sean de bajo costo en comparación con otros sistemas.

2. Lagunas de estabilización. Existen las siguientes variantes de las lagunas de estabilización:

- Lagunas facultativas
- Lagunas anaerobias
- Lagunas facultativas aireadas

- Laguna aireada con mezcla completa
- Lagunas de alta tasa
- Lagunas de maduración

La mayoría de las lagunas no requiere de equipos ni sistemas completos, sino por su gran cantidad de área pueden tratar el agua sin necesidad de ellos. Los sistemas de lagunas facultativas aireadas, aireadas con mezcla completa y de alta tasa buscan tratar en menor tiempo el agua residual, requiriendo menor área, pero sí necesitan instalación de equipos eléctricos para acelerar el proceso, esto no es conveniente para el enfoque de este trabajo (von Sperling & de Lemos, 2005).

Lagunas facultativas

Las lagunas de estabilización son unidades especialmente diseñadas y construidas con el propósito del tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, su construcción es simple y está basada en excavación, relleno y en la generación de terraplenes.

Cuando las lagunas facultativas reciben el agua residual cruda también son llamadas lagunas primarias. Entre los sistemas de lagunas de estabilización, el proceso de las lagunas facultativas es el más simple, dependiendo únicamente de fenómenos naturales. El afluente entra continuamente en un extremo y sale por el otro extremo, en este tiempo que puede tardar varios días, una serie de eventos contribuyen a la purificación del agua residual (von Sperling & de Lemos, 2005).

Parte de la materia orgánica en suspensión (DBO particulada) tiende a sedimentar, constituyendo el lodo del fondo. Este lodo pasa a un proceso de descomposición por microorganismos anaerobios y es convertido en dióxido de carbono, metano y otros componentes. La fracción inerte o no biodegradable permanece en esta capa del fondo (von Sperling & de Lemos, 2005).

La materia orgánica disuelta (DBO soluble) en conjunto con la materia orgánica fina suspendida (DBO particulada fina) no sedimenta y permanece dispersa en la masa de líquido. La descomposición es por medio de bacterias facultativas que tienen la capacidad de sobrevivir en presencia o ausencia de oxígeno libre, con presencia de nitrato, de allí el nombre de facultativas (von Sperling & de Lemos, 2005).

Estas bacterias usan la materia orgánica como fuente de energía, la cual es liberada por medio de respiración. La presencia de oxígeno es necesaria para la respiración aerobia y es suministrada al medio a través de la fotosíntesis llevada a cabo por las algas. Existe un equilibrio entre el consumo y la producción de oxígeno y dióxido de carbono (von Sperling & de Lemos, 2005).

Figura 11. Equilibrio entre bacterias y algas.

Bacterias → Respiración:

- Consumo de oxígeno
- Producción de dióxido de carbono

Algas → Fotosíntesis:

- Producción de oxígeno
- Consumo de dióxido de carbono

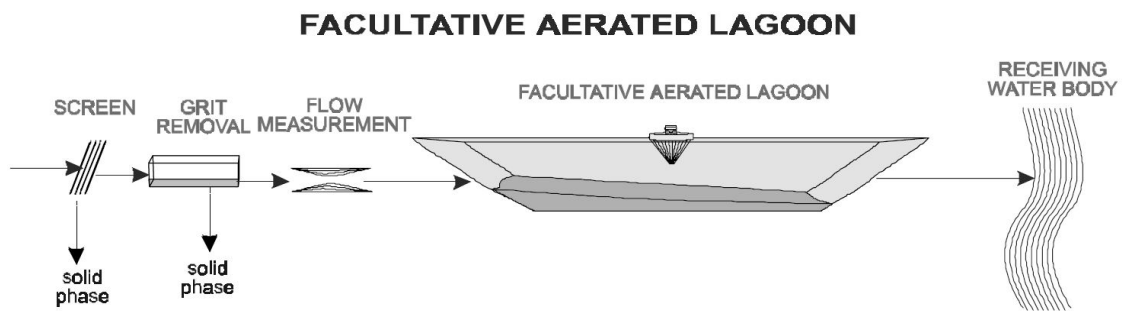
Elaboración propia a partir de (von Sperling & de Lemos, 2005)

Se necesita una fuente de energía de luz, en este caso es el sol y es necesaria para que ocurra la fotosíntesis. Por esta razón, ubicaciones con alta radiación solar y baja nubosidad son favorables para la implementación de lagunas facultativas.

La fotosíntesis ocurre muy cercana a la superficie del agua ya que depende de la energía solar. Las profundidades de lagunas típicas están entre 1.5 y 2 m. En las regiones más profundas de la laguna la penetración de la luz es baja, esto causa predominancia de consumo de oxígeno (respiración) sobre la producción (fotosíntesis), con la posibilidad de la ausencia de oxígeno disuelto a cierta profundidad. Además, la fotosíntesis ocurre únicamente durante el día y durante la noche la ausencia de oxígeno puede prevalecer. Debido a esto, es esencial que las bacterias principales responsables de la estabilización de materia orgánica sean facultativas, de esta forma pueden sobrevivir y proliferarse en presencia o ausencia de oxígeno (von Sperling & de Lemos, 2005).

El proceso de lagunas facultativas es natural, por lo que no requiere equipo. Por esta razón, la estabilización de materia orgánica ocurre a tasas menores, implicando mayores tiempos de retención hidráulica (generalmente mayores de 20 días). Para ser efectivas, la fotosíntesis necesita una gran exposición superficial para aprovechar la mayor energía solar por las algas. Como resultado, el área total requerida por las lagunas facultativas es la mayor en todos los procesos de tratamiento de aguas residuales. Por otra parte, como el proceso es totalmente natural, está asociado a alta simplicidad de operación, que es un factor fundamental importancia en países en vías de desarrollo (von Sperling & de Lemos, 2005).

Figura 12. Diagrama de flujo típico de una laguna facultativa.



(von Sperling & de Lemos, 2005)

Una de las ventajas de este sistema es que logra reducir entre 75 % y 85 % de la DBO, lo que lo hace una unidad muy eficaz, pero requiere otra unidad posterior para eliminar patógenos, ya que no llega a reducir la cantidad necesaria para que el agua sea segura (von Sperling & de Lemos, 2005).

Lagunas anaerobias

Las lagunas anaerobias son otra alternativa para el tratamiento de las aguas residuales, es importante tener condiciones anaerobias para que su funcionamiento sea adecuado. Para generar estas condiciones se deben aplicar grandes cargas de DBO en el volumen de la laguna, esto causa que el consumo de oxígeno sea mayor a la producción. Este sistema es muy utilizado para tratar aguas residuales domésticas (von Sperling & de Lemos, 2005)

El tratamiento en condiciones anaerobias es más lento, ya que el crecimiento de las bacterias anaeróbicas toma más tiempo. La temperatura tiene bastante influencia en la reproducción de estas

bacterias. Esto hace que los países con climas cálidos tengan condiciones favorables para este tipo de sistemas (von Sperling & de Lemos, 2005).

Las lagunas anaerobias tienen grandes profundidades, de 3 a 5 metros, este es un factor importante ya que reduce el ingreso de oxígeno al volumen de agua, esto también es una ventaja ya que requieren menor área que otro tipo de lagunas (von Sperling & de Lemos, 2005).

Otra ventaja de estos sistemas de tratamiento es que no necesitan ningún equipo especial y en la mayoría de casos no tienen consumo de energía. Estas lagunas tienen una reducción de DBO5 de 50 % a 70 %, aunque por lo general necesitan algún tratamiento posterior para terminar de remover el restante de la materia orgánica. Debido a esto es muy común combinarlo con las lagunas facultativas, donde estas requieren menor área ya que la mayoría de la carga orgánica ya fue tratada en la laguna anaerobia (von Sperling & de Lemos, 2005).

Lagunas de maduración

Las lagunas de maduración buscan purificar el efluente de cualquier sistema de lagunas de estabilización mencionados anteriormente o incluso de cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales. Su objetivo principal es remover los organismos patógenos, estas lagunas son una alternativa económica para la desinfección del efluente en comparación con otros métodos convencionales (von Sperling & de Lemos, 2005).

El ambiente ideal para microorganismos patógenos es el tracto intestinal de los seres humanos, fuera de este ambiente tienden a perecer. Su desintegración se debe a la temperatura, radiación solar, pH, falta de insumos, organismos depredadores, entre otros. Las lagunas de maduración tienden a ser menos profundas, ya que es más importante el área superficial que la profundidad (von Sperling & de Lemos, 2005).

Las lagunas de maduración deben de llegar a altas eficiencias de remoción de coliformes, mayores a 99.9 % o 99.99 % para que el efluente pueda cumplir los estándares y/o para mantener el estado del cuerpo receptor (von Sperling & de Lemos, 2005).

En orden para maximizar la remoción de coliformes se puede utilizar la configuración más conocida y con buenos resultados: Tratamiento Preliminar - Laguna Anaerobia - Laguna Facultativa - Laguna de maduración - Cuerpo Receptor. También se puede utilizar una laguna simple con deflectores (von Sperling & de Lemos, 2005).

3. Disposición en tierra. Se basa en verter las aguas residuales en campos de tierra donde se puedan cultivar plantas con cualquier fin. Esta aplicación se utiliza en varios lugares alrededor del mundo. Este tipo de disposición se puede considerar como final ya que puede generar tratamiento primario, secundario y terciario. Se basa en que el agua filtre para recargar el manto freático, así como también que ocurra evapotranspiración, además provee a las plantas con agua y nutrientes (von Sperling & de Lemos, 2005).

En el suelo los contaminantes tienen cuatro posibles destinos:

- Retención en la matriz de suelo
- Retención por las plantas
- Aparición en el agua subterránea

- Colección por desagües subterráneos.

Esta aplicación tiene varios mecanismos para la remoción de los contaminantes, como lo son mecanismos físicos, químicos y biológicos. La capacidad de tratamiento del suelo depende de sus propiedades y de las condiciones climáticas. Las tasas de infiltración y tipos de vegetación son factores importantes para el uso del suelo como un medio de degradación de compuestos orgánicos (von Sperling & de Lemos, 2005). Los tipos más comunes de tratamiento por medio del suelo son:

Sistemas basados en medios de tierra:

- Sistemas de tasa baja
- Infiltración rápida
- Infiltración subsuperficial
- Flujo superficial

Sistemas basados en medio acuático:

- Humedales construidos

La selección del sistema de tratamiento depende de varios factores como la eficiencia, condiciones climáticas, profundidad, permeabilidad del suelo, etc. (von Sperling & de Lemos, 2005).

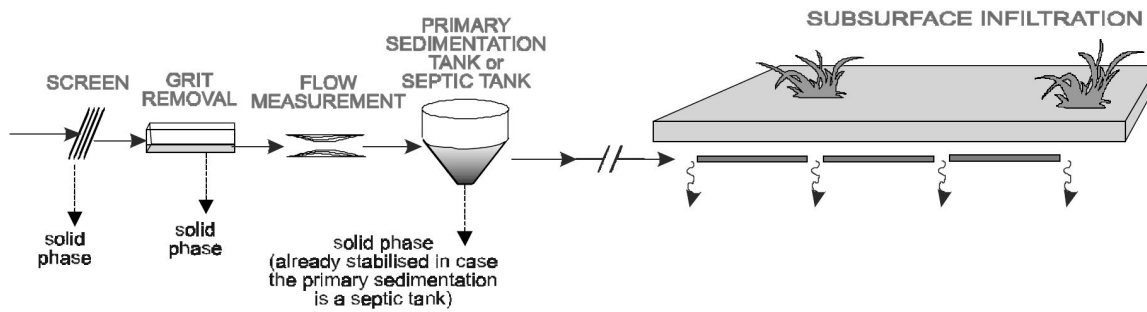
La desventaja de estos sistemas es que es más difícil evaluar si el efluente está cumpliendo con los límites permitidos, por lo que si no son aplicados de forma correcta pueden causar grandes daños al ambiente y a la salud de las personas (Georgia Department of Natural Resources, 2010).

Sistemas de baja tasa

Dependiendo del objetivo de diseño se pueden clasificar en dos tipos:

- Sistemas de infiltración lenta: donde su objetivo principal es el tratamiento de aguas residuales. La cantidad de agua residual aplicada no está controlada por los requerimientos de la cosecha. Para las aguas residuales municipales la carga está controlada por la carga de nitrógeno o la permeabilidad del suelo. Estos sistemas se diseñan para maximizar la cantidad de agua residual aplicada por unidad de área de terreno. Su configuración recomendada es: Tratamiento Preliminar - Tanque de Sedimentación Primaria o Tanque Séptico - Sistema de Infiltración Lenta (von Sperling & de Lemos, 2005).
- Sistemas de riego de cultivos: su principal objetivo es el reúso del agua para producción de cultivos y su objetivo adicional es el tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas son diseñados para aplicar suficiente agua residual para cumplir los requerimientos del cultivo y la eficiencia del sistema de distribución. La carga de nitrógeno debe revisarse para evitar el exceso de este nutriente (von Sperling & de Lemos, 2005).

Figura 13. Diagrama de flujo típico del sistema de infiltración subsuperficial.

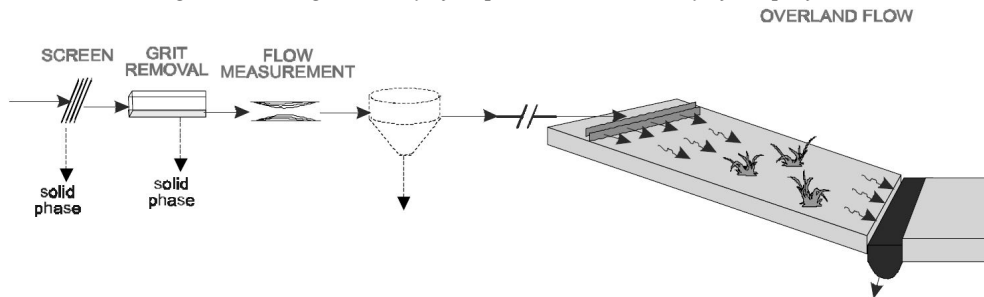


(von Sperling & de Lemos, 2005)

Sistema de flujo superficial

Los sistemas de flujo superficial consisten en la aplicación de agua residual sin tratamiento anterior o únicamente pretratada y se vierte en la parte alta de terrazas con pendiente donde hay plantas resistentes al agua. El agua residual fluye lentamente teniendo contacto con las raíces y el suelo donde las reacciones bioquímicas toman lugar. Ocurre baja evapotranspiración y el efluente final se recolecta en drenajes en el punto más bajo. La aplicación del agua es intermitente para que el suelo no se sature y no pueda seguir realizando el tratamiento (von Sperling & de Lemos, 2005).

Figura 14. Diagrama de flujo típico del sistema de flujo superficial.



(von Sperling & de Lemos, 2005)

Este sistema se distingue de los humedales ya que no requiere de impermeabilizar el fondo de estos, sino que se deja en contacto con la tierra para que una parte del agua pueda filtrar en la tierra y ser aprovechada por las plantas.

4. Humedales artificiales. El mecanismo detrás este sistema de tratamiento es que los humedales tienen sumideros que pueden disminuir las concentraciones altas de componentes orgánicos e inorgánicos. Los humedales tratan el agua por medio de sedimentación, absorción y metabolismo bacterial. Los humedales están vulnerables a cambios en la remoción de DBO, ya que la temperatura altera su funcionamiento, por lo tanto, no es constante a lo largo del año (Llagas & Guadalupe, 2006).

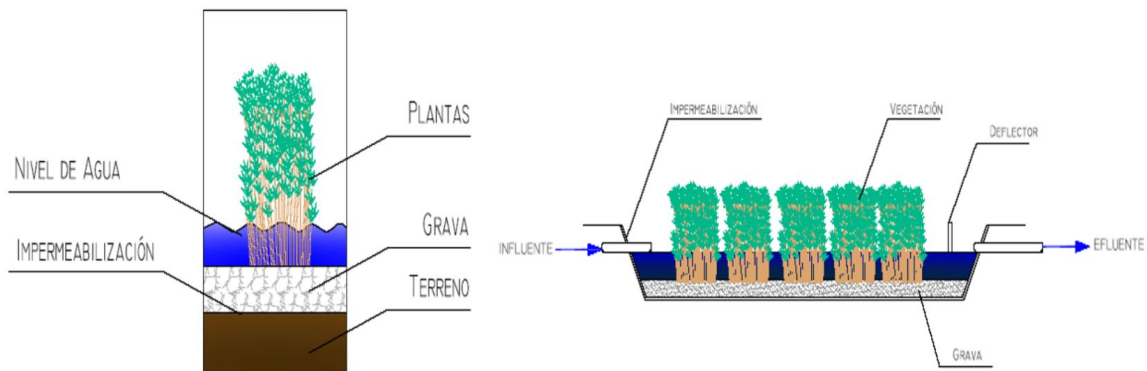
La sedimentación se da por el movimiento lento del agua y de tipo laminar, promoviendo la sedimentación de los sólidos sedimentables totales. La disminución de la carga orgánica se da debido a las plantas, así como también utilizan los nutrientes para su crecimiento. Las plantas también tienen capacidad de almacenar metales tóxicos (Llagas & Guadalupe, 2006).

Los factores que afectan la capacidad de remoción de contaminantes son la rapidez de crecimiento de las plantas y la concentración de estos en el tejido interno. Algo que también afecta al sistema son las plantas muertas u hojas que caen en el agua y vuelven a introducir los contaminantes que ya se habían removido (Llagas & Guadalupe, 2006).

Algo que contribuye a la remoción de materia orgánica son las bacterias del suelo, ya que estas necesitan el Carbono como su fuente de energía y liberándola como dióxido de carbono o metano, lo cual elimina los contaminantes del agua. El nitrato y amonio son removidos por el consumo de las bacterias como fuentes de nutrientes, estas bacterias producen que haya denitrificación en el sistema (Llagas & Guadalupe, 2006).

La ventaja de la aplicación de estos sistemas es que requieren mínima energía para su funcionamiento, además que representan un mejor costo en relación de otros sistemas. Estos sistemas tienen una mejor apariencia por tener vegetación y no cambiar de gran forma el paisaje del lugar (Llagas & Guadalupe, 2006). La desventaja de estos sistemas es que necesitan un previo tratamiento para no alterar la operación ya equilibrada de este (von Sperling & de Lemos, 2005).

Figura 15. Esquema de funcionamiento de un humedal.



(Salas, 2018)

5. Reactores anaerobios. Hay varios tipos de reactores anaerobios, en este caso se presentarán los dos más utilizados para aguas residuales domésticas:

- Filtro anaerobio.
- Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA).

Tanque séptico (Sistema de filtro anaerobio)

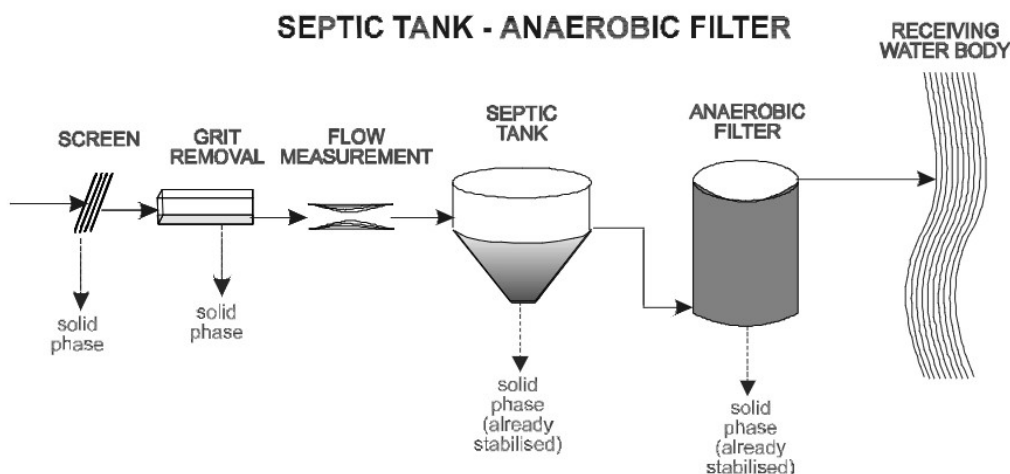
El sistema de tanques sépticos seguido por filtros anaerobios ha sido bastante utilizado en áreas rurales y pequeñas comunidades. Los tanques sépticos remueven la mayoría de los sólidos sedimentables totales, los cuales sedimentan y pasan a una digestión anaerobia en el fondo del tanque (von Sperling & de Lemos, 2005).

El tanque séptico puede ser de una cámara o de dos (Tanque Imhoff). En el tanque de una cámara no hay separación física entre las regiones de sedimentación de sólidos de las aguas residuales

crudas y la digestión de lodos. Las fosas sépticas de una cámara se pueden colocar en serie o solo una (von Sperling & de Lemos, 2005).

La remoción de DBO es limitada en los tanques sépticos porque son tanques de sedimentación donde no ocurren reacciones bioquímicas en la fase líquida. El efluente aún con una carga orgánica alta pasa al filtro anaerobio donde si se remueve mayor parte de la carga. El filtro es un reactor de biopelícula donde la biomasa crece adherida al medio de soporte que generalmente es piedra, parecido al filtro percolador, pero este funciona sin la presencia de oxígeno (von Sperling & de Lemos, 2005).

Figura 16. Diagrama de flujo típico del sistema de un tanque séptico seguido por un filtro anaerobio.



(von Sperling & de Lemos, 2005)

La eficiencia de un tanque séptico conectado a un filtro anaerobio es usualmente menor comparada con sistemas totalmente anaerobios, aunque en muchas situaciones es suficiente. Lo bueno de este sistema es que tiene una baja producción de lodos (von Sperling & de Lemos, 2005).

Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA)

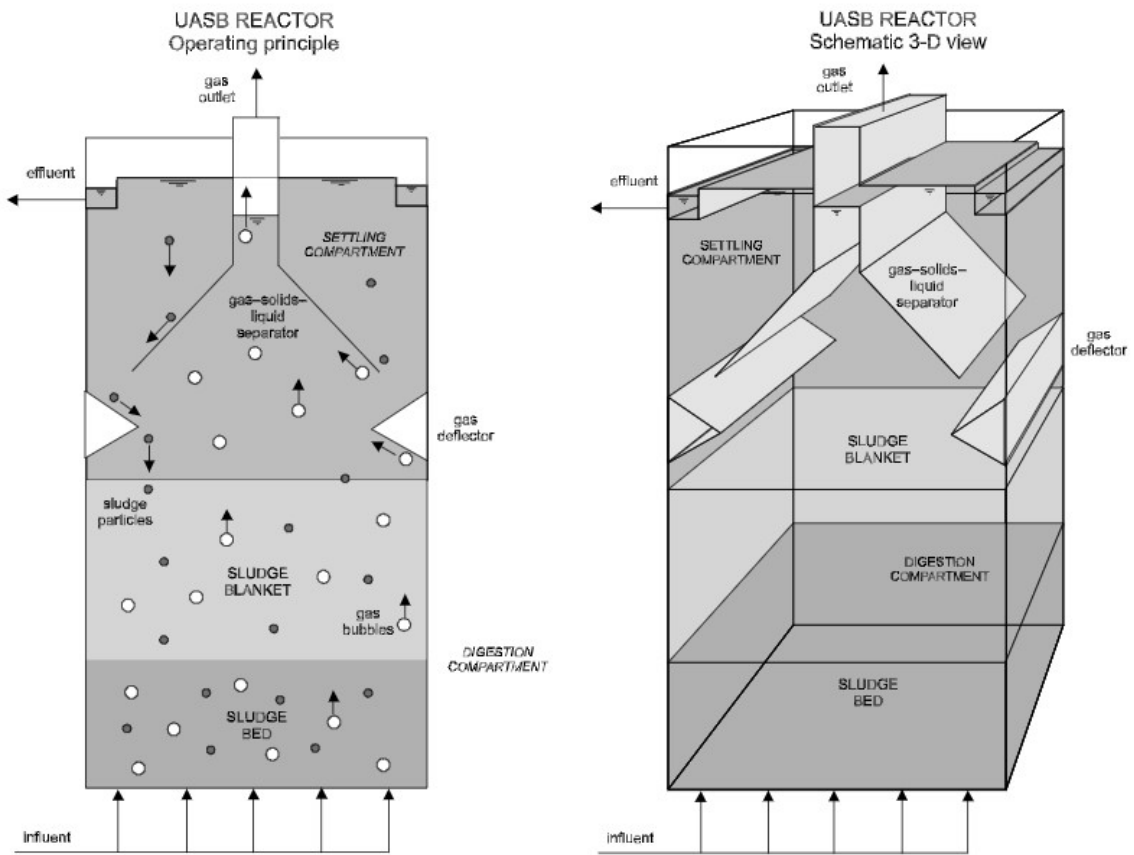
En este tipo de reactores el agua entra al sistema desde el fondo y fluye a través de una capa de lodos generada dentro de este. Esta capa de lodos es la que permite el tratamiento del agua residual, disminuyendo de gran forma la carga orgánica (Metcalf and Eddy Inc., 2003) Debido a las reacciones anaerobias se forman gases como metano y dióxido de carbono, los cuales deben ser recolectados y no dejar que salgan al ambiente (von Sperling & de Lemos, 2005).

Las partes críticas de este sistema además de la capa de lodos son el sistema de distribución del afluente, el separador de sólidos, líquidos y gases y la recolección del efluente (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

Las ventajas de este sistema es que la concentración de lodos dentro del reactor es muy alta, debido a esto el volumen requerido para estos reactores es menor a otros sistemas. Otro factor importante de estos reactores es que no necesitan un tratamiento primario de sedimentación, únicamente el tratamiento preliminar (von Sperling & de Lemos, 2005).

A continuación, se presenta el esquema general de un RAFA:

Figura 17. Esquema de un reactor anaerobio de flujo ascendente.



(von Sperling & de Lemos, 2005)

La eficiencia de remoción de estos sistemas en cuanto a la DQO es de 90 % a 95 %, así como también se pueden obtener valores bajos de sólidos sedimentables totales en el efluente (Metcalf and Eddy Inc., 2003)

Algunas de las combinaciones más comunes del RAFA con un sistema de tratamiento posterior son (von Sperling & de Lemos, 2005):

- RAFA + Lagunas de maduración en series.
- RAFA + Flujo superficial.
- RAFA + Lodos activados.
- RAFA + Biofiltro aireado sumergido.
- RAFA + Filtro anaerobio.
- RAFA + Tratamiento físicoquímico.

6. Sistemas de lodos activados. Hay muchas variantes en el proceso de lodos activados, en este caso se presentarán las más utilizadas y que se tiene mayor conocimiento. Los sistemas de lodos activados se pueden clasificar en las siguientes categorías (von Sperling & de Lemos, 2005):

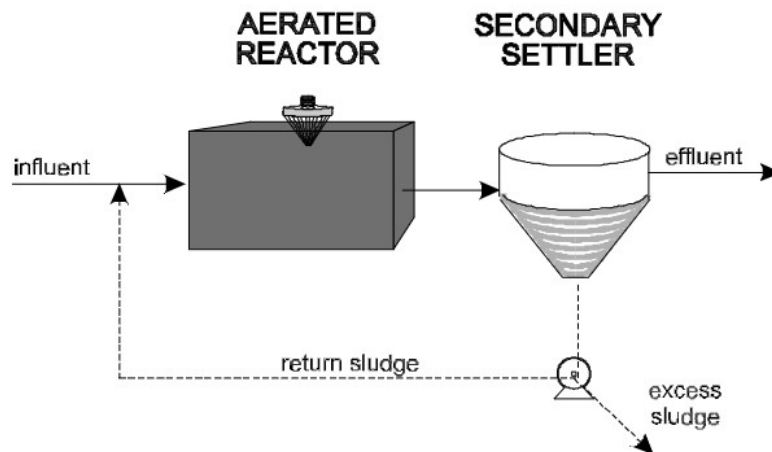
- División de acuerdo a edad de los lodos:
 - Lodos activados convencionales.
 - Aireación extendida.
- División de acuerdo al flujo:
 - Flujo continuo.
 - Flujo intermitente.
- División dependiendo de los objetivos de tratamiento:
 - Reducción de carbono orgánico (DBO y DQO).
 - Reducción de carbono orgánico y nutrientes (Nitrógeno y/o Fósforo).

Lodos activados convencionales

Analizando los sistemas de laguna aireadas es evidente que la reducción de volumen puede obtenerse incrementando la concentración de biomasa en suspensión del líquido. Entre más bacterias hay en suspensión, mejor será el consumo de alimento, en consecuencia, se obtiene la reducción de la materia orgánica en el agua residual.

Con este concepto, analizando las lagunas aireadas seguidas por unidades de sedimentación posterior, se puede observar que hay bacterias todavía activas en esos sistemas posteriores. Si una parte de esas bacterias se regresara a la unidad de anterior, la concentración de bacterias aumentaría de gran forma. Este es el principio básico de los lodos activados, ya que los sólidos son recirculados del fondo de la unidad de sedimentación hacia la cámara de lodos activados como se puede mostrar a continuación:

Figura 18. Esquema de un sistema de lodos activados.



(von Sperling & de Lemos, 2005)

El tiempo de retención de los lodos es llamado edad de los lodos o tiempo de retención de sólidos, el cual está entre 4 y 10 días en el sistema convencional. Este tiempo es el que las bacterias tienen para consumir y metabolizar prácticamente toda la materia orgánica en el agua residual.

Debido a la constante recarga de alimento en forma de DBO en el tanque, las bacterias crecen y se reproducen continuamente. Si se deja que la población de bacterias crezca a concentraciones excesivas la transferencia de oxígeno a todas las bacterias sería difícil. Si esto sucede demasiadas bacterias pasarían a la unidad de sedimentación y no todas sedimentarían, por lo que se tendrían concentraciones altas de lodos en el efluente final, deteriorando la calidad del cuerpo receptor.

Para mantener el equilibrio se debe remover aproximadamente la cantidad de biomasa que se incrementa por reproducción, esto se le conoce como exceso de lodos que se tiene que remover y luego tratar en otro sistema (von Sperling & de Lemos, 2005).

Como se puede ver en estos sistemas sí se necesita un consumo eléctrico por las bombas que recirculan los lodos de un tanque al otro, así como el equipo necesario para mantener los sólidos en suspensión. Debido a esto no son comunes en áreas rurales donde la energía eléctrica es intermitente o nula. Debido a esto no son de gran utilidad en este trabajo porque no se podrían aplicar en la región seleccionada.

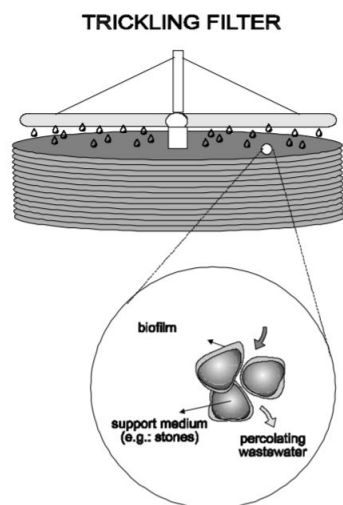
7. Reactores de biopelículas aerobias. En esta sección se denominan como unidades aerobias los reactores de biopelículas, en donde la biomasa crece en los medios de soporte. Hay muchas variantes para este concepto, las más utilizadas son las que se presentan a continuación:

- Filtros percoladores de baja tasa.
- Filtros percoladores de alta tasa.
- Biofiltros aireados sumergidos.
- Contactores biológicos rotatorios.

Filtros percoladores de baja tasa

Los filtros percoladores se utilizan hace varios años como tratamiento aeróbico de aguas residuales domésticas o industriales. Estos filtros son torres que pueden tener un área superficial cuadrada o circular, donde dentro tiene un material de soporte donde crecerán las bacterias que generarán el tratamiento (Huamaní Galindo, 2018).

Figura 19. Esquema de filtro percolador.



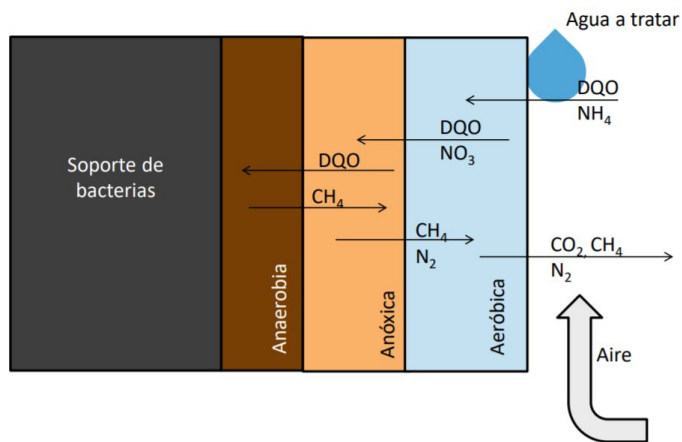
(von Sperling & de Lemos, 2005)

Para el medio de soporte existen varios materiales, pueden ser piedras de distinto tipo o medios plásticos con varias configuraciones y medidas. Alrededor de ellos se forma la película biológica conformada por las bacterias las cuales se forman por el constante vertimiento del agua residual desde la parte superior y dejar correr hacia abajo humedeciendo el medio de soporte (Huamaní Galindo, 2018).

En esta biopelícula existen varios tipos de microorganismos, en la capa superficial del medio de soporte están los microorganismos aerobios que están en contacto con el aire. Luego se genera una capa interna donde no hay presencia de oxígeno y genera un ambiente anóxico. Con el crecimiento de estas dos capas se genera una capa anaerobia internamente por la falta de oxígeno (Huamaní Galindo, 2018).

En la siguiente figura se puede ver un esquema de la vista microscópica de la biopelícula:

Figura 20. Vista microscópica de la biopelícula en un filtro percolador.



(Recinos, 2020)

Por último, las bacterias pierden su capacidad de adherirse al medio de soporte y se desprenden de este, fluyendo con el agua y llevados hasta el fondo donde se recolecta el agua combinada con estos sólidos (Huamaní Galindo, 2018).

Esto genera un proceso de restauración del sistema generando nuevas bacterias sin necesidad de adicionar algún químico. Estos sistemas tienen alta eficiencia de remoción de DBO lo cual es una gran ventaja para el tratamiento de aguas residuales domésticas. La desventaja es que pueden producir malos olores y crecimiento de insectos (Huamaní Galindo, 2018).

Lo complejo de estos sistemas es que tienen varias partes que son importantes para el buen funcionamiento de la unidad. El primero es el sistema de distribución del agua residual en la parte superior del filtro. Este debe distribuir el agua de forma homogénea en todo el medio de soporte para que todo el sistema funcione de igual forma (Huamaní Galindo, 2018).

Luego se debe tener una forma de drenaje en la parte inferior del medio de soporte, para que se pueda recolectar el agua sin alterar el medio de soporte. También es importante que exista ventilación desde la parte inferior del filtro, por el medio de soporte y hasta la parte superior, esto es necesario para que las bacterias tengan oxígeno suficiente para tratar la materia orgánica (Huamaní Galindo, 2018).

Los demás tipos de biofiltro requieren de sistemas de bombeo y tecnología más avanzada que no podrían ser aplicables a la región seleccionada (von Sperling & de Lemos, 2005).

G. Sistemas de tratamiento terciario

El tratamiento terciario tiene como objetivo complementar los procesos primarios y secundario para lograr efluentes de mejor calidad en los sistemas de tratamiento. Estos efluentes contienen una menor carga contaminante para que pueda utilizarse en distintos usos como recarga de acuíferos, recreación, agua industrial, etc. (Rojas, 2002).

Las sustancias o compuestos comúnmente removidos son:

- Fosfatos y nitratos
- Huevos y quistes de parásitos
- Sustancias tensoactivas
- Algas
- Bacterias y virus (desinfección)
- Radionucleidos
- Sólidos totales y disueltos
- Temperatura

Los procesos de tratamiento de esta categoría están conformados por procesos físicos, químicos y biológicos (Rojas, 2002).

Los tratamientos terciarios se pueden clasificar en dos categorías, naturales o artificiales. Cada uno de estos se basa en distintas tecnologías para lograr la reducción de los distintos parámetros mencionados anteriormente (von Sperling & de Lemos, 2005)

Entre los procesos naturales se encuentran (von Sperling & de Lemos, 2005):

- **Lagunas de maduración:** Son lagunas de poca profundidad, donde la penetración de los rayos UV y condiciones ambientales poco favorables causan alta mortalidad en los patógenos. Estas lagunas no necesitan productos químicos o energía eléctrica, pero si requieren grandes extensiones de área. Son sistemas muy recomendados gracias a su simplicidad y bajo costo.
- **Infiltración en suelo:** Las condiciones ambientales poco favorables en el suelo favorecen alta mortalidad de los patógenos. Una desventaja es que existe la posibilidad de contaminar las plantaciones donde se descargue el efluente. Este sistema no requiere productos químicos para su funcionamiento, aunque también requiere extensiones grandes de terreno.

Los procesos artificiales más utilizados son (von Sperling & de Lemos, 2005):

- **Cloración:** El cloro acaba con los microorganismos patógenos, aunque a los quistes protozoarios y huevos de helmintos no les causa mayor daño. Este sistema requiere altas dosis de cloro, lo que puede incrementar los costos de operación, pero si se tiene mayor remoción de carga orgánica en los tratamientos secundarios, disminuirá la dosis necesaria. Pueden existir productos residuales tóxicos para el ser humano. La toxicidad causada por el cloro residual también debe considerarse para no afectar los cuerpos receptores. Este sistema es muy utilizado en países en vías de desarrollo por sus grandes eficiencias.
- **Tratamiento por medio de ozono:** El ozono es un agente muy efectivo en la remoción de patógenos. Este sistema generalmente tiene un costo mayor, por lo que no se utiliza a grandes escalas en los países en vías de desarrollo.
- **Radiación Ultravioleta:** Esta radiación es generada por lámparas especiales, la cual afecta la reproducción de los agentes patógenos. En este sistema no se generan subproductos tóxicos, pero requiere que el agua se presente bastante clara para que la luz pueda penetrar en todo el líquido.
- **Membranas:** En este sistema el agua residual pasa por membranas de dimensiones nanométricas, lo que constituye una barrera física para los microorganismos patógenos, los cuales tienen dimensiones mayores que las de los poros. Este proceso es muy recomendado porque no requiere de productos químicos para su implementación. Los costos de este sistema son caros, pero han ido reduciendo con el paso de los años.

H. Histograma

El histograma es una gráfica de distribución de un conjunto de datos. Se considera como un tipo especial de gráfico de barras, donde cada barra va unida a la siguiente sin dejar espacio. Este gráfico representa la acumulación o tendencia, la variabilidad o dispersión y la forma de distribución de los datos (UNAM, 2013).

Es importante mencionar que los datos se deben de agrupar en clases o grupos del mismo tamaño o ancho, este ancho se conoce como intervalo. Para determinar cuántos grupos se deben utilizar para realizar el histograma es una interrogante común en la investigación, pero se ha definido que la cantidad de grupos depende del objetivo del mismo. Ya que la cantidad de grupos representa que tan resumido o detallado será el gráfico (UNAM, 2013).

Behar y Grima (2006) mencionan que no hay una regla fija para determinar la cantidad de grupos al momento de elaborar un histograma. Es razonable incrementar la cantidad de grupos conforme aumenta la cantidad de datos. Se recomienda la siguiente distribución como un parámetro inicial al momento de realizar un histograma:

Cuadro 15
Número de intervalos para realizar un histograma.

Núm. de datos	Núm. de intervalos
20* – 50	7
50 – 75	10
75 – 100	12
Más de 100	15

*Para menos de 20 datos es mejor utilizar un diagrama de puntos

(Behar & Grima, 2006)

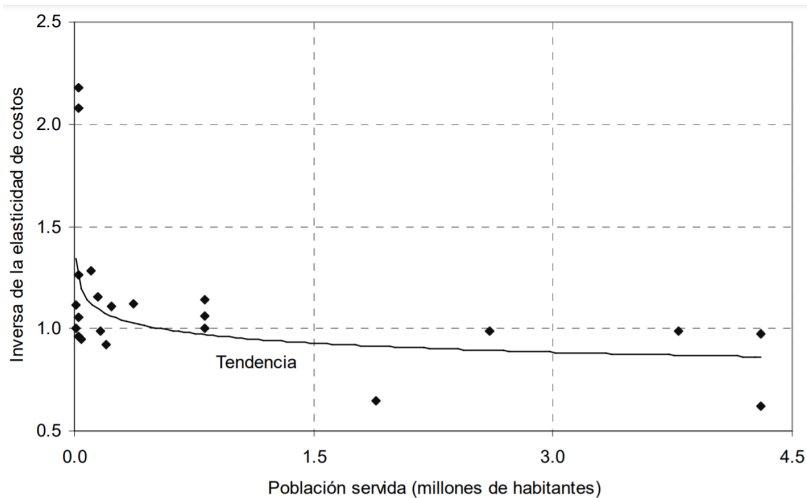
I. Economía de escala

Las economías de escala representan la tendencia de la variación de los costos de un producto o servicio conforme se incrementa su producción, ya que comparten en general gastos requeridos para ella. Esto significa que conforme se incrementa la producción se reduce el costo unitario del producto o servicio, en el tratamiento de aguas residuales se describe como la variación en el costo del sistema entre más personas lo requieran (Ferro & Lentini, 2010).

Esto es interesante para este estudio ya que representa que habrá una variación entre el costo unitario entre todos los grupos, abriendo la posibilidad de que sea más factible hacer un sistema mayor para más personas que uno pequeño.

En el estudio de Ferro Lentini (2010) se recopilaron los resultados de distintos países para determinar la economía de escala en los sistemas de agua potable y los sistemas de tratamiento de aguas residuales, en donde se realizó la siguiente gráfica donde representan estos resultados.

Figura 21. Economía de escala en servicios de alcantarillado.



(Ferro & Lentini, 2010)

Esta gráfica se utilizará para determinar la variación en el costo per cápita conforme la cantidad de personas conectadas se incrementa. Con la gráfica se puede ver que los costos disminuyen entre más personas estén consideradas para el sistema.

J. Análisis por medio de una matriz de decisión

Definición de matriz de decisión

La matriz de decisión es un gráfico o tabla que permite a un equipo o individuo identificar y analizar la tasa de la fuerza de las relaciones entre conjuntos de información (Alfaro, 2007).

Se utiliza con frecuencia durante las actividades de planificación de la calidad para seleccionar un producto o servicio, características y objetivos y desarrollar los procesos para sopesar las alternativas (Alfaro, 2007).

Como utilizarlo depende de las necesidades del equipo, estas pueden ser el producto, prestaciones del servicio, etapas del proceso, costo, o las posibles soluciones (Alfaro, 2007).

Una matriz de decisión se conforma de los siguientes elementos (Alfaro, 2007):

- Estrategias: formadas por variables controladas que son las alternativas y opciones que se pueden elegir.
- Estados de la naturaleza: son variables no controladas, representan las situaciones o los sucesos en los que no se puede influir y que condicionan la decisión que se tome.
- Probabilidades: son posibilidades de que se produzca cada estado de la naturaleza.
- Resultados o desenlaces: son los resultados esperados en cada una de las estrategias, dado un estado concreto de la naturaleza.

La matriz de decisión es una técnica aplicable a distintos campos, dentro y fuera de la ingeniería, para la toma de decisiones racionales, entre distintas alternativas aparentemente posibles. Mejora la objetividad del proceso de selección por ser estructurado, de metodología sistemática, repetible y con resultados en idioma universal (números) (Schiazzano, 2007).

Consiste en la ponderación (numérica) del grado de cumplimiento que cada idea de diseño alcanza respecto de cada uno de los criterios a cumplir por la máquina que se procura proyectar, para luego integrar estas ponderaciones en una única calificación global (puntuación) de la idea de diseño. La comparación de las calificaciones globales es un criterio racional para la selección, evidentemente se elige la (o las) ideas de mayor puntaje (Schiazzano, 2007).

La matriz de decisión se muestra a continuación:

*Cuadro 16
Matriz de decisión.*

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Total
Peso	5	7	3	
Opción 1	2	3	2	37
Opción 2	3	1	3	31
Opción 3	2	2	0	24

Opción 1 = Criterio 1 * Peso 1 + Criterio 2 * Peso 2 + Criterio 3 * Peso 3
 Opción 2 = Criterio 1 * Peso 1 + Criterio 2 * Peso 2 + Criterio 3 * Peso 3
 Opción 3 = Criterio 1 * Peso 1 + Criterio 2 * Peso 2 + Criterio 3 * Peso 3

(UCAB, 2012)

K. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una herramienta que se utiliza para entender cuáles son las variables que pueden afectar en mayor magnitud a algún proyecto y cuáles tienen un bajo impacto (de Administración y Negocios, 2019).

Este tipo de análisis se utiliza en la gestión de proyectos, ingeniería, geografía, entre muchas áreas más, ya que es de gran utilidad para la toma de decisiones (de Administración y Negocios, 2019).

Con los resultados del análisis de sensibilidad se pueden graficar en el eje X los porcentajes de variación que se establecieron y en el eje Y la variable que se está analizando.

VII. Marco experimental

Como se indicó en la metodología el primer paso para elaborar la guía es determinar los grupos y rangos de estos que serán la base de los sistemas a escoger y diseñar posteriormente. Es necesario determinar la cantidad de personas de cada grupo ya que sin estos es más complejo poder analizar el caudal de agua residual que llega a cada sistema de tratamiento.

A. Determinación de la cantidad de grupos

Revisando bibliografía se encontró muy poca información de los rangos de personas para los cuáles los sistemas de tratamiento son aplicables, se pudo ver que los sistemas dependen más de la calidad de agua que llega a estos y los niveles de reducción buscados (Brown Salazar, 2004) (von Sperling & de Lemos, 2005). Debido a esto se decidió acudir a la estadística para analizar la distribución de la población y poder saber dónde se encuentra la mayor cantidad población de estos departamentos, con el fin de que la guía pueda ser útil para la mayoría de municipios de la región seleccionada.

Para empezar con datos del CENSO (2018) se obtuvo la población total de cada municipio dentro de los departamentos de la región seleccionada para que sea el parámetro base de la selección de grupos. Luego para los diseños de plantas de tratamiento e instalaciones hidrosanitarias se recomienda un tiempo de diseño de 20 años (INFOM-MSPAS, 2011) por lo que hay que analizar el crecimiento de la población para ese tiempo, de esa forma el sistema de tratamiento puede funcionar en esa cantidad de tiempo como mínimo. A pesar de diseñar para 20 años, siempre se debe de revisar conforme el paso de los años que las condiciones y bases con las que se diseñó sigan igual o muy similares, ya que cambios drásticos pueden afectar el funcionamiento de este.

Entonces, para determinar la cantidad de personas que habrá en esos municipios en 20 años se decidió calcular esas cantidades por medio del procedimiento de crecimiento geométrico. Este procedimiento utiliza el crecimiento anual y la cantidad de personas en el año inicial. El crecimiento poblacional anual de toda la población en el país se encontró que es de 2.4 % (Instituto Nacional de Estadística, 2014).

Como se mencionó anteriormente se utilizará la estadística para determinar la cantidad de grupos y su rango de población, se considera que un histograma es de gran utilidad para este trabajo ya que representa gráficamente el comportamiento de la población y los rangos donde se encuentra la mayoría.

El objetivo de la guía no es que todos y cada uno de los municipios puedan aplicar los sistemas de tratamiento planteados, sin embargo, sí para la mayoría por eso el histograma ayuda en este caso. Solo se tomarán los rangos donde se concentre la mayoría de la población, esto con el fin de que la guía sea útil para la mayoría de los municipios.

Para determinar los rangos y cantidad de grupos se hizo una primera iteración con un Histograma tomando 15 grupos como lo recomienda la estadística cuando se tienen más de 100 datos (Behar & Grima, 2006), sin embargo la diferencia entre el máximo y mínimo de cada uno es de 19,105 personas. Esta cantidad se considera muy grande para los rangos de población de los sistemas de tratamiento (Brown Salazar, 2004), debido a esta situación se decidió hacer un histograma más detallado para conocer los rangos de personas donde hay mayor concentración de frecuencias. La

estadística menciona que la cantidad de grupos es algo arbitrario y que puede cambiarse con el propósito necesario (Behar Grima, 2006), por lo tanto, con el fin de obtener un histograma detallado donde se especifique de mejor forma los grupos donde se concentra la mayoría de la población, se establecieron 50 grupos con lo que se obtuvo una diferencia o ancho de grupo de 5732 personas, de esta forma el histograma puede dar gráficamente los grupos con las mayores frecuencias.

A continuación, se presenta el primer histograma realizado con el ancho de intervalo de 19,105 personas, como se puede ver en el gráfico pareciera que la concentración de personas se encuentra del grupo 1 al 4, indicando que la mayoría de frecuencias están de 3,809 hasta las 80,229.

*Cuadro 17
Distribución de grupos con 15 intervalos.*

Rango	No de Intervalos	Ancho de intervalo
286,575	15	19,105
		19,105

Grupo	Min	Max	Cantidad	Marca de Clase
1	3,809	22,914	34	13,362
2	22,914	42,019	30	32,467
3	42,019	61,124	22	51,572
4	61,124	80,229	19	70,677
5	80,229	99,334	8	89,782
6	99,334	118,439	4	108,887
7	118,439	137,544	5	127,992
8	137,544	156,649	5	147,097
9	156,649	175,754	5	166,202
10	175,754	194,859	1	185,307
11	194,859	213,964	0	204,412
12	213,964	233,069	1	223,517
13	233,069	252,174	1	242,622
14	252,174	271,279	0	261,727
15	271,279	290,384	1	280,832

Elaboración propia.

Figura 22. Histograma con 15 intervalos.



Elaboración propia.

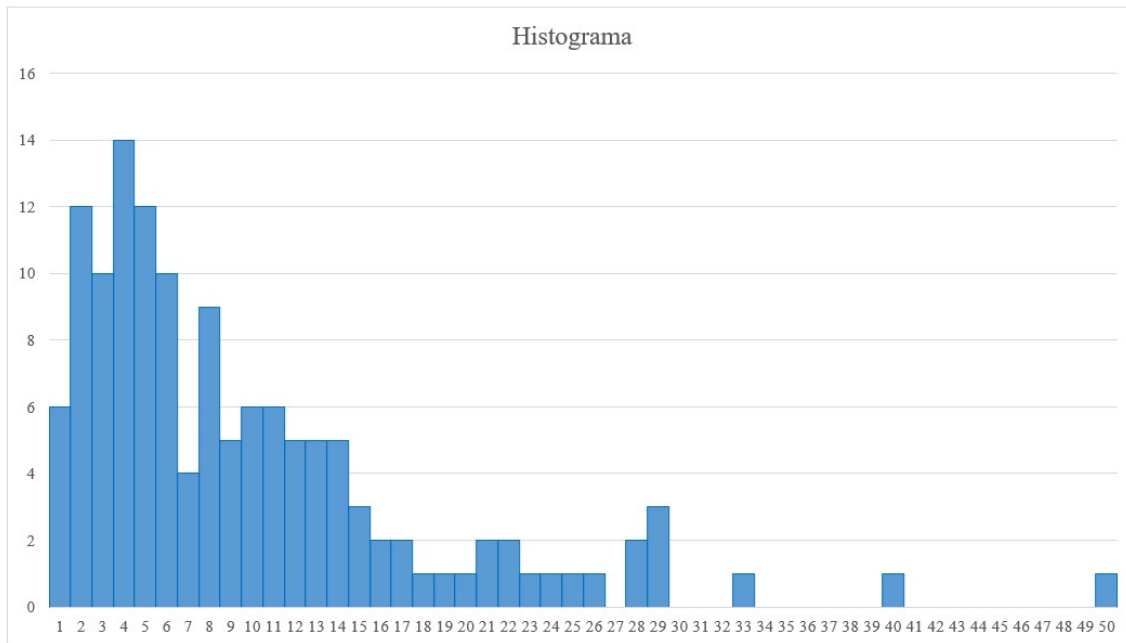
Luego se presenta el histograma realizado con 50 grupos, como se puede ver mejoró el detalle del comportamiento de los grupos encontrando que la mayoría se encuentran del grupo 2 al 8, en un rango de personas de 9,532 a 49,656.

Cuadro 18
Distribución de grupos con 50 intervalos.

Grupo	Min	Med	Max	Cantidad	%
1	3,800	6,666	9,532	6	4.55%
2	9,533	12,399	15,265	12	9.09%
3	15,266	18,132	20,998	10	7.58%
4	20,999	23,865	26,731	14	10.61%
5	26,732	29,598	32,464	12	9.09%
6	32,465	35,331	38,197	9	6.82%
7	38,198	41,064	43,930	2	1.52%
8	43,931	46,797	49,663	9	6.82%
9	49,664	52,530	55,396	5	3.79%
10	55,397	58,263	61,129	6	4.55%
11	61,130	63,996	66,862	6	4.55%
12	66,863	69,729	72,595	5	3.79%
13	72,596	75,462	78,328	5	3.79%
14	78,329	81,195	84,061	5	3.79%
15	84,062	86,928	89,794	3	2.27%
16	89,795	92,661	95,527	2	1.52%
17	95,528	98,394	101,260	2	1.52%
18	101,261	104,127	106,993	1	0.76%
19	106,994	109,860	112,726	1	0.76%
20	112,727	115,593	118,459	1	0.76%
21	118,460	121,326	124,192	2	1.52%
22	124,193	127,059	129,925	2	1.52%
23	129,926	132,792	135,658	1	0.76%
24	135,659	138,525	141,391	1	0.76%
25	141,392	144,258	147,124	1	0.76%
26	147,125	149,991	152,857	1	0.76%
27	152,858	155,724	158,590	0	0.00%
28	158,591	161,457	164,323	2	1.52%
29	164,324	167,190	170,056	3	2.27%
30	170,057	172,923	175,789	0	0.00%
31	175,790	178,656	181,522	0	0.00%
32	181,523	184,389	187,255	0	0.00%
33	187,256	190,122	192,988	1	0.76%
34	192,989	195,855	198,721	0	0.00%
35	198,722	201,588	204,454	0	0.00%
36	204,455	207,321	210,187	0	0.00%
37	210,188	213,054	215,920	0	0.00%
38	215,921	218,787	221,653	0	0.00%
39	221,654	224,520	227,386	0	0.00%
40	227,387	230,253	233,119	1	0.76%
41	233,120	235,986	238,852	0	0.00%
42	238,853	241,719	244,585	0	0.00%
43	244,586	247,452	250,318	0	0.00%
44	250,319	253,185	256,051	0	0.00%
45	256,052	258,918	261,784	0	0.00%
46	261,785	264,651	267,517	0	0.00%
47	267,518	270,384	273,250	0	0.00%
48	273,251	276,117	278,983	0	0.00%
49	278,984	281,850	284,716	0	0.00%
50	284,716	287,582	290,448	1	0.76%

Elaboración propia.

Figura 23. Histograma con 50 intervalos.



Elaboración propia.

Con esta distribución se pudo encontrar de forma más detallada la concentración de frecuencias la cual está entre las poblaciones de 9,532 a 49,656 personas. Con la concentración de frecuencias se determinó que los grupos de la guía serán los grupos del 2, 4 y 5, además se incluirá el grupo 3 para que haya continuidad entre los grupos. De esta forma la guía contará con 4 grupos, con un ancho de intervalo de 5,700 personas. Se estima que ese ancho de intervalo para cada grupo está dentro de los parámetros necesarios para los sistemas de tratamiento (Brown, 2004) y así los sistemas quedan más ajustados al grupo, que no queden muy grandes para el mínimo o muy pequeños para el máximo. Para mayor facilidad se redondeó a 5,500 personas. Con esta selección los grupos quedan como se observa a continuación con valores redondeados:

Cuadro 19
Grupos definidos.

Grupo	Min	Med	Max
1	9,500	12,250	15,000
2	15,001	17,750	20,500
3	20,501	23,250	26,000
4	26,001	28,750	31,500

Elaboración propia.

B. Determinación de caudales de diseño

Con los grupos establecidos, se puede proceder a determinar los caudales de diseño para cada uno. Para determinar este caudal hay ciertas consideraciones que se tomaron para que el caudal sea lo más certero posible y se asimile a las condiciones reales que se tendrán.

La primera consideración fue determinar la cantidad de personas en el municipio que estarán conectadas al drenaje y por lo tanto sus aguas residuales deberán ser tratadas, esto se debe a que en una población no el 100 % está conectada a los drenajes (Instituto Nacional de Estadística Guatemala, 2018). En el país el porcentaje de personas que están conectadas al drenaje es de 33.70 % (Instituto Nacional de Estadística Guatemala, 2018), en el cálculo del caudal se tomó un 50 % ya que se esperaría que conforme pasan los años más personas se conecten a los drenajes. Luego si se estimara un sistema de tratamiento para cada municipio este debería tener dimensiones muy grandes y su costo sería mucho mayor, utilizando como referencia el Acuerdo Gubernativo 58-2019 (Gobierno de Guatemala, 2019) el cual es la reforma del Acuerdo Gubernativo 236-2006 (Gobierno de Guatemala, 2006) indica que los municipios deberían de tener por lo menos dos plantas de tratamiento de aguas residuales al año 2027. Por lo tanto, se estimó que la mitad de la población estará conectada al sistema de tratamiento, esto hace que los caudales sean más bajos, disminuyendo las dimensiones y el costo de cada sistema con el fin de incentivar a que se empiece la construcción de al menos una de ellas. Al disminuir los costos es más probable que las municipalidades puedan implementar los sistemas. Con todas estas consideraciones se llegó a determinar la cantidad de personas que estarán conectadas en 20 años al sistema de tratamiento como se detalla a continuación:

Cuadro 20
Proyección esperada de personas conectadas al sistema de tratamiento.

Grupo	Cantidad media del grupo	Porcentaje actual de personas conectadas al drenaje	Porcentaje de personas esperadas conectadas al drenaje en 20 años	Cantidad de PTARs por municipio	Cantidad media de personas conectadas al drenaje en 20 años por PTAR
1	12,250	33.70%	50.00%	2	3,063
2	17,750	33.70%	50.00%	2	4,438
3	23,250	33.70%	50.00%	2	5,813
4	28,750	33.70%	50.00%	2	7,188

Elaboración propia con referencia de (Instituto Nacional de Estadística Guatemala, 2018) (Gobierno de Guatemala, 2006) (Gobierno de Guatemala, 2019).

Solo teniendo la cantidad de personas para cada sistema no es suficiente para determinar los caudales de diseño en cada uno. Para calcular el caudal medio de diseño se utilizará la siguiente ecuación:

Figura 24. Ecuación de caudal de diseño.

$$Q_{med} = P * D * F_R$$

Donde:

Q_{med} = Caudal medio de diseño

P = cantidad media de personas del grupo (habitantes)

D = dotación (L/hab/día)

F_R = factor de retorno de aguas residuales

(EMPAGUA, 2018)

Sabiendo esto se necesita determinar una dotación de consumo de agua potable por persona y el factor de retorno de aguas residuales, el cual indica el porcentaje del agua potable consumida que se convierte en agua residual.

Para la dotación de consumo de agua potable por persona, se debe tomar en cuenta varios aspectos de la población, ya que dependiendo de estos será el consumo de agua, algunos de estos factores son el clima, los ingresos económicos, si el área es rural o urbana, entre otros. Luego de revisar bibliografía, se determinó una dotación de 110 L/hab/día la cual corresponde a un estimado al consumo de agua en la región seleccionada (SEGEPLAN-BID, 2006) (Ministerio de Salud Pública y Asistencia, 2011) (INFOM-MSPAS, 2011). Este valor se obtuvo de forma bibliográfica, por falta de datos de la región.

Luego se determinó un factor de retorno de aguas residuales del 85 % del consumo de agua potable lo cual está dentro del rango aceptable de 75 y 90 % (EMPAGUA, 2018).

Por último, se necesita determinar un factor para el caudal máximo y un factor para el caudal mínimo de diseño, estos representan el comportamiento del caudal en los drenajes, ya que no siempre se recibe la misma cantidad de agua, sino que varía dependiendo de las horas, del lugar, entre otros. Los factores para determinar el caudal máximo y mínimo se determinaron de 1.8 y 0.5 respectivamente según recomendaciones de von Sperling de Lemos (2005).

A continuación, se presenta la tabla con los factores considerados para determinar los caudales de diseño de cada grupo:

*Cuadro 21
Cálculo de caudales de diseño.*

Grupo	Cantidad de personas conectadas al drenaje en 20 años por cada PTAR estimada en el municipio	Dotación (L/hab/día)	Factor de retorno para aguas residuales	Caudal de diseño (L/día)	Factor de incremento para caudal máximo	Factor de disminución para caudal mínimo
1	3,063	110	85%	286.344	1.8	0.5
2	4,438	110	85%	414.906	1.8	0.5
3	5,813	110	85%	543.469	1.8	0.5
4	7,188	110	85%	672.031	1.8	0.5

Elaboración propia con datos de (EMPAGUA, 2018) (Herrera Quezada, 2005) (SEGEPLAN-BID, 2006) (Ministerio de Salud Pública y Asistencia, 2011) (von Sperling & de Lemos, 2005)

Aplicando estos factores de incremento y de decremento del caudal medio se tiene la siguiente tabla con los caudales de diseño para cada grupo:

*Cuadro 22
Caudales de diseño.*

Grupo	Caudal medio de diseño (m3/día)	Caudal máximo de diseño (m3/día)	Caudal mínimo de diseño (m3/día)
1	287	517	144
2	415	747	208
3	544	980	272
4	673	1,212	337

Elaboración propia.

Estos caudales fueron calculados para la época seca, donde el agua de lluvia no influye, esto se debe a que se consideró colocar un rebalse previo al sistema de tratamiento para que a la planta solo ingrese el caudal de diseño. Esta situación se decidió ya que es la más crítica, porque el agua de lluvia diluye los parámetros de calidad del agua, necesitando un menor nivel de tratamiento. Si se incluye el agua de lluvia como parte del tratamiento las dimensiones de cada unidad aumentarían en gran proporción y dejaría al sistema sobredimensionado para el verano.

Como se alteró por medio de factores la cantidad inicial de personas que estarán conectadas al sistema de tratamiento los grupos deben de calcularse nuevamente tomando en cuenta estas reducciones. Los grupos finales para este trabajo son los siguientes:

Cuadro 23
Grupos finales para la guía.

Grupo	Mínimo	Promedio	Máximo
1	2,401	3,100	3,800
2	3,801	4,500	5,200
3	5,201	5,900	6,600
4	6,601	7,300	8,000

Elaboración propia.

Estos grupos son los que aparecerán en la guía y con los que se diseñarán los sistemas de tratamiento. Se redondearon a los cientos más cercanos para mayor facilidad.

C. Determinación de parámetros físicos, químicos y biológicos del agua residual

Teniendo los caudales definidos se necesitan definir los parámetros físicos, químicos y biológicos del agua residual a tratar. En el diseño se está considerando que el agua residual será del tipo ordinaria o también denominada doméstica ya que solo se estima que los hogares estén conectados al colector sanitario (Ministerio de Economía, 2017) (Gobierno de Guatemala, 2006).

El Acuerdo Gubernativo 236-2006 solicita que las municipalidades deben de hacer un estudio técnico de las aguas residuales de su municipio, no se ha encontrado ninguno de estos estudios para tomar esos parámetros de la calidad del agua como referencia (Gobierno de Guatemala, 2006). Por lo tanto, por medio de revisión bibliográfica se compararon los parámetros de distintas fuentes para tener un valor cercano a la realidad de las características del agua residual a tratar en la región (von Sperling & de Lemos, 2005) (Metcalf and Eddy Inc., 2003) (Oakley & Salguero, 2011) (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, 1992). Comparando estas referencias se llegó a los siguientes resultados:

Cuadro 24
Parámetros del agua residual doméstica a tratar.

Parámetro	Concentración (mg/L)	
	Rango	Asumido
Sólidos Suspendidos	200-450	300
DBO5	50-400	350
DQO	450-800	600
Nitrógeno Total	35-60	50.00
Fósforo Total	4-15	12.00
pH	6.7-8.0	7
Alcalinidad	100-250	180
Metales Pesados	≈ 0	≈ 0
	Concentración (NMP/100 mL)	
	Rango	Asumido
Coliformes Fecales	2.84E+02 - 2.01E+09	4.7E+07

Elaboración propia con datos de (von Sperling & de Lemos, 2005) (Oakley & Salguero, 2011) (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, 1992) (Metcalf and Eddy Inc., 2003).

Inicialmente se plantea que el agua se reutilice para el sector agrícola, el Acuerdo Gubernativo 236-2006 sí detalla los límites para cumplir con ese fin, sin embargo, se encontró que no describe específicamente límites para todos los parámetros del agua residual (Gobierno de Guatemala, 2006). Únicamente describe los límites de DBO5 y Coliformes Fecales, mas no de sólidos totales, nitrógeno ni fósforo los cuales se considera son de alta importancia para no sobrecargar los suelos con excesivos nutrientes y puedan afectar las cosechas. También se comparó con los límites máximos para reúso agrícola de la FAO (1992) (columna 4 del Cuadro 24) donde se pudo encontrar que los límites de la FAO tampoco describen los límites máximos para la mayoría de los parámetros, únicamente para el nitrógeno total, potencial de hidrógeno y coliformes fecales.

Además, se llegó a la conclusión que la cantidad de agua por día es alta y para aprovecharla al 100 % para riego agrícola habría que tener sistemas de distribución grandes los cuales incrementan el costo de la aplicación del sistema completo.

Adicionalmente se observó que los límites para reúso son menos estrictos que para descargas a cuerpos receptores. Por ello, considerando que una parte del agua se descargará a algún cuerpo receptor y la otra se pueda reutilizar para la agricultura, se decidió diseñar los sistemas para que el 100 % del agua se pueda descargar en un cuerpo receptor. De esta forma en todo caso si se decidiera utilizar para la agricultura se busca que también cumpla con los máximos permisibles. Esto con el fin de preservar el ambiente y la salud de la población que tengan relación con el cuerpo receptor.

El Acuerdo Gubernativo 236-2006 tuvo una reforma la cual corresponde al Acuerdo Gubernativo 58-2019 donde especifica los límites máximos permisibles para descargas de municipalidades y entidades que traten el agua residual del alcantarillado público. Esta guía busca fomentar la imple-

mentación de sistemas de tratamiento en la región seleccionada por cualquier entidad o persona, especialmente las municipalidades con el fin de cumplir con el Acuerdo Gubernativo 236-2006 (Gobierno de Guatemala, 2006) (Gobierno de Guatemala, 2019).

Se investigó los límites de la normativa panameña para descargas de aguas residuales a cuerpos receptores (Autoridad del Canal de Panamá, 2018) con el fin de tener más fuentes de comparación. La normativa panameña da límites para los parámetros buscados y es más estricta que la normativa guatemalteca. Entre más estrictos son los límites, mejor será la calidad del agua en el efluente lo que significa que habrá menor impacto negativo al medio ambiente. Teniendo esta premisa y comparando los límites de las normativas mencionadas se pudo determinar los límites establecidos para el diseño de los sistemas de tratamiento en este trabajo, estos límites son una combinación de las 3 normativas. A continuación, se detallan las concentraciones del agua residual a tratar, los límites máximos de las normativas mencionadas anteriormente, los parámetros que necesitan tratamiento y las concentraciones buscadas:

Cuadro 25
Parámetros del agua residual doméstica a los que se busca llegar.

Parámetro	Concentración del agua residual (mg/L)	Concentración máxima para municipalidades según Acuerdo 58-2019 (mg/L)	Concentración máxima para reuso en agricultura Tipo A (mg/L) (FAO, 1992)	Concentración máxima de descarga Panamá (mg/L) (ACP, 2018)	Tratamiento	Valor objetivo (mg/L)
Sólidos Suspendidos	300	100	-	35	NECESITA	80
DBO5	350	100	-	35	NECESITA	35
DQO	600	-	-	100	NECESITA	100
Nitrógeno Total	50	20	< 5	10	NECESITA	10
Fósforo Total	10	10	-	5	NECESITA	5
pH	7	6 a 9	6.5-8	5.5 a 9	NO NECESITA	-
Alcalinidad	180	-	-	-	-	-
Metales Pesados	≈ 0	-	-	-	NO NECESITA	-
	(NMP/100mL)	(NMP/100mL)	(NMP/100mL)	(NMP/100mL)		(NMP/100mL)
Coliformes Fecales	4.7E+07	<1x10 ⁴	<1000	1000	NECESITA	<1000

Elaboración propia con datos de (von Sperling & de Lemos, 2005) (Gobierno de Guatemala, 2019) (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, 1992) (Oakley & Salguero, 2011) (Autoridad del Canal de Panamá, 2018)

D. Criterios iniciales para el diseño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales

Se han adoptado ciertos criterios para el diseño de las plantas de tratamiento, estos se detallan a continuación:

- Se consideró que a los sistemas de tratamiento llegará tanto agua residual como agua pluvial, no se tiene información del tipo de drenajes que existen en la región seleccionada si son separativos o combinados. Álvarez Muñoz (2004) menciona que la mayoría de los drenajes en la ciudad de Guatemala son combinados, usando esta referencia se consideró así en el diseño (Álvarez Muñoz, 2004). El agua pluvial incrementa el caudal, sin embargo, se considera que se tendrá que construir un rebalse previo al sistema de tratamiento para que al sistema entren solo los caudales con los que se diseñó. Si se considerara tratar el agua incluyendo agua residual y pluvial se tendría sistemas de tratamiento excesivamente grandes que son necesarios solo para la época de lluvia, esto hace más costosa su implementación reduciendo la posibilidad de que se lleven a cabo.

- El sistema se diseñó para la época seca, esto con el fin de tratar el agua más contaminada, ya que en época de lluvia el agua residual se diluye con agua de lluvia por tener drenajes combinados reduciendo las concentraciones del agua a tratar. La eficiencia en cada época será distinta, sin embargo, se enfocó más en la época seca por ser la crítica donde la mayor contaminación puede llegar a los cuerpos receptores.
- Los sistemas no deben requerir energía eléctrica, esto se determinó ya que en la región no se cuenta con energía eléctrica en todas partes y tampoco se asegura que sea constante a lo largo del día y la época (Ministerio de Energía y Minas, 2020), esto puede llegar a afectar o incluso inhabilitar los sistemas que requieren de bombeo o algún otro equipo eléctrico. Además, el consumo de energía eléctrica por el sistema también incrementa los gastos de operación y disminuiría la posibilidad de su implementación.

E. Selección de los Sistemas de Tratamiento a diseñar y comparar

Con todo lo definido anteriormente se puede proceder a determinar los sistemas que cumplen con las consideraciones tomadas, así como también con los parámetros establecidos. El proceso de selección de un sistema de tratamiento depende de varios factores. Brown Salazar (2004) indica que para seleccionar un sistema de tratamiento hay muchos factores que afectan esta decisión, entre los más importantes están el espacio disponible para llevarlos a cabo, conciencia de aspectos ambientales, aceptabilidad cultural, costos de construcción y costos y capacidad de operación. von Sperling & de Lemos (2005) menciona que no se pueden tomar solamente criterios de selección económicos, ya que hay factores cuantitativos como cualitativos, entonces la selección siempre será subjetiva dependiendo de los aspectos del lugar, entidad, entre otros.

Inicialmente se planteaba comparar los sistemas únicamente por su eficiencia y sus costos, sin embargo, ahora que se ha investigado más y aprendido que los sistemas de tratamiento tienen más aspectos que deben ser considerados se tomarán en cuenta en el proceso de selección y luego la comparación entre estos sistemas.

No todos los sistemas tienen las mismas capacidades de reducir ciertos parámetros del agua residual (Brown Salazar, 2004), tomando esa referencia se determinó el porcentaje de reducción para cada parámetro del agua residual definida los cuales se presentan a continuación:

*Cuadro 26
Límites buscados y porcentajes de reducción necesarios en el efluente.*

Parámetro	Inicial (mg/L)	Objetivo (mg/L)	Reducción necesaria
DBO5	350	35	90.00%
DQO	600	100	85.42%
Sólidos Suspendidos Totales	300	80	73.33%
Nitrógeno Total	50	10	73.33%
Fósforo Total	10	5	16.67%
Coliformes Fecales	4.7E+07 NMP/100 mL	<1000 NMP/100 mL	4.672 log

Elaboración propia.

Estos parámetros son para llegar a los límites establecidos anteriormente, se deben buscar sistemas que tengan reducciones cercanas a estos porcentajes. Los sistemas que tengan porcentajes distintos a estos no cumplirán con los límites buscados y no serán posibles de implementar.

Para la selección de sistemas de tratamiento se utilizó como referencia principal la Tabla 4.9 de von Sperling & de Lemos (2005) donde se detallan los porcentajes de reducción de distintos sistemas y sus combinaciones, con ello se determinaron las siguientes configuraciones que pueden lograr el objetivo de este trabajo:

1. Laguna anaerobia + Laguna facultativa + Laguna de maduración
2. Laguna anaerobia + Laguna facultativa + Remoción de algas
3. Tratamiento en tierra de baja tasa
4. Tratamiento en tierra de alta infiltración
5. Tratamiento en tierra de flujo superficial
6. Humedales artificiales
7. Sedimentador primario + filtro percolador
8. Fosa séptica + Infiltración normal
9. Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) + Laguna de maduración
10. RAFA + Tratamiento en tierra de flujo superficial

Como se puede ver hay varias configuraciones que pueden cumplir con los límites buscados, sin embargo, hay algunos que son similares como lo son el 1 con el 2, el 3, 4, 5 y 6, y el 8 y 9, el 7 si es distinto a los demás. En este trabajo se escogieron tres opciones que son distintas entre ellas y además cada una toma en consideración un factor vital para la implementación de los mismos el cual es el área con la que se cuenta para aplicar el sistema.

Por lo tanto, las configuraciones finales de tratamiento secundario y terciario para este trabajo serán:

1. Laguna anaerobia + Laguna facultativa + Laguna de maduración
2. Sedimentador primario + filtro percolador
3. RAFA + Tratamiento en tierra de flujo superficial (Overland Flow)

Las tres opciones contarán con el mismo tratamiento preliminar, el cual se define por las siguientes unidades:

1. Trampa de grasas
2. Canal de rejas

3. Desarenador

4. Canal Parshall

El pretratamiento, como se explicó en el Marco Teórico, funciona para que los sistemas puedan trabajar de forma adecuada y no presenten problemas de taponamiento por grasa, sólidos de gran tamaño, acumulación de arena, etc. De esta forma el agua residual llega con mejor calidad a las unidades de tratamiento posteriores.

En el Anexo 1 se encuentran las memorias de cálculo de cada configuración de tratamiento. Se hace la observación que para el diseño se utilizó información de (von Sperling & de Lemos, 2005) (Metcalf and Eddy Inc., 2003) (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2003) (Mara, 1997) (Mbwele, 2006).

También como parte del diseño se necesitaba la información del clima en la región seleccionada (Weatherspark, 2020) donde se tienen datos históricos del clima en cada uno de los departamentos seleccionados. A continuación, se presenta la tabla con los datos de la temperatura en cada uno de los departamentos:

Cuadro 27
Temperaturas promedio máximas y mínimas de la región seleccionada.

Departamento	T _{prom}	
	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)
Sololá	10	23
San Marcos	8	25
Quiché	11	26
Huehuetenango	10	26
Quetzaltenango	8	21
Totonicapán	7	17
Promedios	9	23
Promedio total	16.0	

Elaboración propia con datos de (Weatherspark, 2020)

Entre los resultados obtenidos fueron las dimensiones de cada sistema, esto se utiliza no solo la construcción de las plantas de tratamiento, sino también para comparar entre opciones la cantidad de área que requieren y las configuraciones que necesitan mayor o menor área.

Los sistemas necesitan áreas auxiliares como cuartos de bombas, cuartos de limpieza, bodega, entre otros. Por lo tanto, para determinar el área requerida de cada sistema completo se tomó que estas áreas auxiliares ocupan un 25 % adicional del área específica de las unidades (von Sperling & de Lemos, 2005). Este factor de incremento se utilizó para todos los sistemas con el fin de que el área presentada en la guía sea más cercana a la realidad y esté dentro de las consideraciones para la entidad que lleve a cabo alguna de las opciones.

A continuación, se presenta la tabla con las áreas requeridas por cada opción para los cuatro grupos:

Cuadro 28
Áreas requeridas por cada opción.

Grupo	Lagunas (m2)	Filtro Percolador (m2)	RAFA + Flujo Superficial (m2)
1	8,306	244	3,876
2	12,202	333	6,221
3	15,707	435	8,970
4	20,451	364	8,335

Elaboración propia.

9Como se puede ver las lagunas son el sistema que mayor área requieren en comparación con las otras dos opciones. Luego el sistema del RAFA + flujo superficial es el que requiere un área mediana, esto se debe a que el tratamiento de flujo superficial requiere una gran área, si se buscara otra configuración con el RAFA podría disminuirse esta área. Luego el filtro percolador a pesar de no cumplir con uno de los límites, es el que menor área requiere y por lo tanto lo hace más eficiente en términos de tamaño y aplicación para entidades que dispongan de poca área para implementar el sistema.

Luego de realizar el diseño de cada sistema de tratamiento se obtuvo los siguientes resultados:

Cuadro 29
Resultados de reducciones del grupo 1.

RESULTADOS DEL GRUPO 1

Parámetro	Inicial (mg/L)	Objetivo (mg/L)	Lagunas (% de remoción)	Filtro Percolador (% de remoción)	RAFA + Flujo Superficial (% de remoción)
DBO5	350	35	92.28%	92.05%	89.02%
DQO	600	100	85.42%	85.00%	84.29%
Sólidos Suspendidos Totales	300	80	76.67%	84.39%	86.67%
Nitrógeno Total	50	10	76.64%	50.00%	65.00%
Fósforo Total	10	5	24.00%	30.00%	58.00%
Coliformes Fecales	4.7E+07 NMP/100 mL	<1000 NMP/100 mL	99.99791%	99.99957%	99.99%
Coliformes Fecales (logaritmos reducidos)	4.7E+07 NMP/100 mL	<1000 NMP/100 mL	4.679 log	5.37 log	4 log

% No cumple para el valor objetivo, pero sí cumple con el límite del Acuerdo Gubernativo 58-2019

% No cumple para el valor objetivo y no cumple con el límite del Acuerdo Gubernativo 58-2019

Elaboración propia.

Se puede ver que las opciones de lagunas y de RAFA + flujo superficial cumplen con todos los límites máximos del Acuerdo Gubernativo 58-2019. Para la reducción de nitrógeno y fósforo es

donde hay mayor problema de todas las opciones para llegar a los límites definidos, únicamente la opción del RAFA sí llegó a la concentración buscada de fósforo total, sin embargo, tiene la deficiencia que tiene menor reducción de Coliformes Fecales.

Cuadro 30
Resultados de reducciones del grupo 2.

RESULTADOS DEL GRUPO 2

Parámetro	Inicial (mg/L)	Objetivo (mg/L)	Lagunas (% de remoción)	Filtro Percolador (% de remoción)	RAFA + Flujo Superficial (% de remoción)
DBO5	350	35	92.28%	92.08%	88.92%
DQO	600	100	85.42%	85.00%	84.19%
Sólidos Suspendidos Totales	300	80	76.67%	84.39%	86.67%
Nitrógeno Total	50	10	76.64%	50.00%	65.00%
Fósforo Total	10	5	24.00%	30.00%	58.00%
Coliformes Fecales	4.7E+07 NMP/100 mL	<1000 NMP/100 mL	99.99791%	99.99957%	99.99%
Coliformes Fecales (logaritmos reducidos)	4.7E+07 NMP/100 mL	<1000 NMP/100 mL	4.679 log	5.371 log	4 log

% No cumple para el valor objetivo, pero sí cumple con el límite del Acuerdo Gubernativo 58-2019

% No cumple para el valor objetivo y no cumple con el límite del Acuerdo Gubernativo 58-2019

Elaboración propia.

En el grupo 2 se tuvo resultados similares al grupo 1, se considera que es así porque los caudales promedio de diseño son muy parecidos. En este caso de igual forma los sistemas que sí cumplen con todos los límites máximos permisibles de la normativa guatemalteca son las lagunas y el RAFA + flujo superficial.

Cuadro 31
Resultados de reducciones del grupo 3.

RESULTADOS DEL GRUPO 3

Parámetro	Inicial (mg/L)	Objetivo (mg/L)	Lagunas (% de remoción)	Filtro Percolador (% de remoción)	RAFA + Flujo Superficial (% de remoción)
DBO5	350	35	92.28%	92.37%	89.55%
DQO	600	100	85.42%	85.00%	84.83%
Sólidos Suspendidos Totales	300	80	76.67%	85.36%	86.67%
Nitrógeno Total	50	10	76.64%	50.00%	65.00%
Fósforo Total	10	5	24.00%	30.00%	58.00%
Coliformes Fecales	4.7E+07 NMP/100 mL	<1000 NMP/100 mL	99.99791%	99.99957%	99.99%
Coliformes Fecales (logaritmos reducidos)	4.7E+07 NMP/100 mL	<1000 NMP/100 mL	4.679 log	5.371 log	4 log

% No cumple para el valor objetivo, pero sí cumple con el límite del Acuerdo Gubernativo 58-2019

% No cumple para el valor objetivo y no cumple con el límite del Acuerdo Gubernativo 58-2019

Elaboración propia.

En este caso los porcentajes si han variado ligeramente con los resultados del grupo 1 y 2. Conforme se incrementan los caudales sí afectan los tiempos de retención hidráulica, cambiando en cierta parte la eficiencia de remoción de parámetros.

Cuadro 32
Resultados de reducciones del grupo 4.

RESULTADOS DEL GRUPO 4

Parámetro	Inicial (mg/L)	Objetivo (mg/L)	Lagunas (% de remoción)	Filtro Percolador (% de remoción)	RAFA + Flujo Superficial (% de remoción)
DBO5	350	35	92.66%	94.95%	89.49%
DQO	600	100	85.42%	85.00%	84.77%
Sólidos Suspendidos Totales	300	80	76.67%	85.13%	86.67%
Nitrógeno Total	50	10	77.42%	50.00%	65.00%
Fósforo Total	10	5	24.00%	30.00%	58.00%
Coliformes Fecales	4.7E+07 NMP/100 mL	<1000 NMP/100 mL	99.99844%	99.99957%	99.99%
Coliformes Fecales (logaritmos reducidos)	4.7E+07 NMP/100 mL	<1000 NMP/100 mL	4.807 log	5.371 log	4 log

% No cumple para el valor objetivo, pero sí cumple con el límite del Acuerdo Gubernativo 58-2019

% No cumple para el valor objetivo y no cumple con el límite del Acuerdo Gubernativo 58-2019

Elaboración propia.

Para el grupo 4 también se tiene una ligera variación con el grupo 3, de igual forma como el caudal incrementó los tiempos de retención crecen y afectan en las dimensiones de cada sistema, esto afecta a las eficiencias de remoción.

Como se puede observar ninguno de los sistemas logró llegar a todas las concentraciones buscadas, a pesar de que inicialmente se esperaba que sí llegaran, los porcentajes de referencia para seleccionar cada sistema son generalizados y también dependen de la concentración inicial.

La segunda alternativa que corresponde al sistema con filtro percolador no logró cumplir con el límite de Nitrógeno Total del Acuerdo Gubernativo 58-2019 para ninguno de los grupos (Gobierno de Guatemala, 2019). No se descarta la opción del todo porque según se ha podido investigar el efluente contiene una alta nitrificación debido a la acción de las bacterias. Esto significa que han convertido el 90 % de amonio en nitrato, el cual tiene menor impacto negativo al ambiente que el amonio (Metcalf and Eddy Inc., 2003) (Ghasemian y col., 2013) (von Sperling & de Lemos, 2005). Entonces el nitrógeno cambió de forma a lo largo del sistema, dando un efluente con mejor calidad en referencia al nitrógeno total que en el afluente. Tampoco se puede descartar ya que en los demás parámetros tiene un buen desempeño, además que como se mencionaba anteriormente la eficiencia no es el único factor para decidir el mejor sistema.

En general se puede ver que las eficiencias de remoción son muy parecidas entre cada grupo, observando las ecuaciones de reducción de parámetros se puede ver que en la mayoría dependen de ciertos factores ya definidos que no dependen del caudal que reciben. En algunos casos sí se utiliza el tiempo de retención hidráulica del sistema para determinar la eficiencia de remoción, sin embargo, la variación no ha sido significativa. Se podría decir que el criterio vital para seleccionar un sistema de tratamiento en general por medio de sus eficiencias, fuera de este trabajo, sería la calidad del agua que se busca tratar, ya que dependiendo de cada parámetro se busca un sistema de tratamiento específico para reducir esos parámetros a los límites de la normativa que se vaya a utilizar.

En general por ello los sistemas no se clasifican por caudales, sino por los parámetros que logran reducir. Por ello fue tan importante al inicio determinar los parámetros de la calidad de agua que se

buscaba tratar. También por ello se utilizaron las mismas tres opciones en los 4 grupos, ya que por tener las mismas concentraciones y buscar las mismas reducciones se pueden utilizar las mismas configuraciones.

F. Determinación del costo de construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento

El objetivo de hacer un análisis de costos es determinar dos de los factores importantes en la toma de decisión de cada sistema lo cuales son el costo de construcción de este y los costos de operación y mantenimiento.

Para llevar a cabo este análisis inicialmente se revisó bibliografía con el fin de encontrar datos similares a las condiciones guatemaltecas. Se encontraron factores de costo per cápita de las unidades de tratamiento para Centro América (Brown Salazar, 2004), donde luego se sumaron para determinar el Factor Total de cada alternativa.

Este factor se tuvo que incrementar debido a la inflación del Quetzal y poder obtener un valor al precio del 2020 (Banco de Guatemala, 2020), de esta forma el valor presentado está actualizado y así la entidad que busque la implementación de estos sistemas pueda una referencia certera de los costos.

Adicionalmente, se tomó en cuenta la Economía de Escala, la cual describe que para un mismo producto o servicio puede haber una variación porcentual si se incrementa la cantidad de personas que lo adquieren (Ferro & Lentini, 2010). Esto quiere decir, en este caso, que entre más personas estén conectadas a un sistema de tratamiento menor será el costo por habitante.

Con esto finalmente se pudo determinar el costo total de construcción, operación y mantenimiento de cada sistema de tratamiento con datos reales al 2020 y certeros para la realidad de Guatemala. Cabe mencionar que estos costos son directos y no toman en cuenta factores específicos del lugar como costo del terreno, drenajes de conexión al alcantarillado, entre otros.

El resumen del costo estimado de construcción se presenta a continuación:

*Cuadro 33
Costo estimado de construcción de cada sistema de tratamiento diseñado.*

Resumen de Costos de Construcción por Habitante con Economía de Escala

Alternativa	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4	
	Factor de Construcción ^{1, 2, 3} (Q/hab)	Costo Total de Construcción	Factor de Construcción ^{1, 2, 3} (Q/hab)	Costo Total de Construcción	Factor de Construcción ^{1, 2, 3} (Q/hab)	Costo Total de Construcción	Factor de Construcción ^{1, 2, 3} (Q/hab)	Costo Total de Construcción
Lagunas	Q576.98	Q1,788,629.46	Q558.06	Q2,511,259.31	Q538.71	Q3,178,395.13	Q520.23	Q3,797,661.24
Filtro Percolador	Q807.77	Q2,504,073.89	Q781.28	Q3,515,752.72	Q754.19	Q4,449,740.12	Q728.32	Q5,316,710.13
RAFA + Flijo Superficial	Q1,125.11	Q3,487,829.89	Q1,088.21	Q4,896,959.10	Q1,050.49	Q6,197,874.86	Q1,014.44	Q7,405,444.62

Elaboración propia con datos de 1. (Brown Salazar, 2004), 2. (Banco de Guatemala, 2020), 3. (Ferro & Lentini, 2010)

Observando la tabla anterior se puede ver que la opción de menor costo es la de Lagunas de estabilización, también se puede ver que el sistema más costoso es el RAFA + Tratamiento en tierra de flujo superficial. La alternativa del RAFA es más costosa debido al tratamiento de flujo

superficial el cual comprende una mayor área y a pesar de que no necesita una membrana debajo, necesita canales de distribución y recolección a lo largo de los extremos del sistema.

Como se mencionó con anterioridad, en este trabajo no se incluyó el precio del terreno, el cual también podría afectar el resultado de las alternativas.

Por otra parte, es importante determinar el costo de operación y mantenimiento de los sistemas ya que en algunos casos se ha visto que un sistema puede requerir una menor inversión inicial, sin embargo, los gastos anuales de operación y mantenimiento son más altos en comparación con otros sistemas, lo que en total los hacen más costosos que otros.

A continuación, se presentan los estimados de costo de operación y mantenimiento para cada sistema:

Cuadro 34
Costo estimado de operación y mantenimiento de cada sistema de tratamiento diseñado.

Resumen de Costos de Operación y Mantenimiento por Habitante con Economía de Escala

Alternativa	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4	
	Factor de O&M ^{1,2,3} (Q/hab)	Costo Total de O&M	Factor de O&M ^{1,2,3} (Q/hab)	Costo Total de O&M	Factor de O&M ^{1,2,3} (Q/hab)	Costo Total de O&M	Factor de O&M ^{1,2,3} (Q/hab)	Costo Total de O&M
Lagunas	Q7.69	Q23,853.46	Q7.44	Q33,490.57	Q7.18	Q42,387.60	Q6.94	Q50,646.24
Filtro Percolador	Q12.31	Q38,163.08	Q11.91	Q53,581.47	Q11.49	Q67,815.81	Q11.10	Q81,028.77
RAFA + Flujo Superficial	Q15.90	Q49,280.02	Q15.38	Q69,189.79	Q14.84	Q87,570.61	Q14.33	Q104,632.52

Elaboración propia con datos de 1. (Brown Salazar, 2004), 2. (Banco de Guatemala, 2020), 3. (Ferro & Lentini, 2010)

Analizando la tabla anterior se puede ver que el sistema con los menores costos de operación y mantenimiento anuales es el sistema de lagunas de estabilización. Seguido por el filtro percolador el cual tiene un valor medio y por último el RAFA tiene los costos más elevados. La alternativa del RAFA se considera que tiene un costo mayor debido a que necesita de mayor control de los lodos, por un personal con mayor capacitación y conocimiento, además el Tratamiento de flujo superficial requiere el control de la vegetación cortando ramas demasiado grandes, recoger las hojas y basura que interfieran con el paso, entre otros controles en grandes extensiones de área.

G. Análisis comparativo entre las distintas opciones para cada grupo

Para comparar las alternativas, se recomienda hacer un análisis por medio de una matriz de decisión (Brown Salazar, 2004). A pesar de que en la guía se detallarán todas las alternativas, se busca hacer una comparación entre ellas para poder ver qué opción tiene más ventajas ante otras, sin indicar que las otras opciones sean menos adecuadas. Esto también es subjetivo ya que se establecen ponderaciones arbitrarias a criterio del evaluador, indicando que, en condiciones específicas de un lugar, estas ponderaciones cambiarían y podría encontrarse un resultado totalmente distinto.

Las variables para este análisis fueron la eficiencia de remoción de parámetros de calidad del agua, el costo de construcción, operación y mantenimiento de los sistemas y el área requerida por cada uno. En este trabajo se dio una ponderación mayor a la eficiencia de reducción de DBO₅, Coliformes Fecales, Costo de Construcción y Costo de Operación y Mantenimiento.

El parámetro de DBO5 se escogió de alta importancia ya que es el principal factor que afecta la calidad del agua del cuerpo receptor y que si no se toma como importante podría afectar la vida de todos los seres vivos que tienen interacción con el cuerpo receptor. Luego la eficiencia de reducción de coliformes fecales también se consideró de alta importancia ya que en las áreas rurales la principal fuente de agua es de ríos, lagos y lagunas, por lo que es importante asegurar que el agua lleve la menor cantidad de patógenos que puedan afectar la salud de las personas que consumen esta agua. Estos parámetros de calidad de agua, según Oakley Salguero (2011) deben ser los más importantes en comparación de los otros para la región de Centro América, ya que son los dos principales que mayor impacto ambiental y a la salud pueden causar.

También se consideró de alta importancia el costo de construcción, el costo de operación y mantenimiento de los sistemas ya que es un factor que afecta de gran forma la decisión de si se implementará el sistema o no.

Los parámetros de DQO, SST, nitrógeno total y fósforo total se les asignó una ponderación de 2 % menor que las variables más importantes.

Por último, se agregó la variable de aprovechamiento de subproductos ya que se busca que las plantas no solo traten el agua residual, sino que también se pueda aprovechar al máximo su implementación y brindar más recursos al lugar donde se apliquen. La configuración de Lagunas de estabilización y la del filtro percolador no generan ningún subproducto más que el agua tratada, la cual se puede utilizar para riego en agricultura. La alternativa del RAFA + flujo superficial genera la mayor cantidad de subproductos, ya que además del agua tratada que se puede utilizar para riego, también genera metano por el proceso anaerobio del RAFA, así como también genera mayor aprovechamiento de plantaciones por el tratamiento de flujo superficial, esto le da un valor importante a esta configuración.

Llevando a cabo la matriz de decisión y dando una calificación a cada uno de los criterios dependiendo de su eficiencia o de su costo se obtuvo las siguientes tablas:

H. Matriz de decisión del grupo 1

Cuadro 35
Matriz de decisión realizada para el grupo 1.

Criterio	Ponderación	Lagunas			Filtro Percolador			RAFA + Flujo Superficial		
		% de remoción	Calificación	Puntaje del total	% de remoción	Calificación	Puntaje del total	% de remoción	Calificación	Puntaje del total
DBO5	12%	92%	10	12	92%	10	12	89%	9	11
DQO	8%	85%	10	8	85%	10	8	84%	9	7
Sólidos Suspendidos Totales	8%	77%	7	6	84%	9	7	87%	10	8
Nitrógeno Total	8%	77%	6	5	50%	2	2	65%	4	3
Fósforo Total	8%	24%	5	4	30%	6	5	58%	7	6
Coliformes Fecales	12%	4.7 log	9	11	5.4 log	10	12	4 log	7	8
Costo de construcción	12%	Q1,788,629	10	12	Q2,504,074	7	8	Q3,487,830	5	6
Costo de O&M	12%	Q23,853	10	12	Q38,163	7	8	Q49,280	4	5
Área Requerida	10%	8,306	5	5	244	10	10	3,876	7	7
Aprovechamiento de Subproductos	10%	Agua Para Riego	5	5	Agua Para Riego	5	5	Agua Para Riego + Metano + Plantaciones Agrícolas	10	10
Puntaje Total	100%		77	79		76	77		72	71

Elaboración propia.

Con la matriz de decisión se puede ver que las dos opciones con mayor puntaje son la de Lagunas de estabilización y la del filtro percolador. A pesar de tener un puntaje muy similar cada una tiene condiciones distintas, como se puede ver que la primera requiere grandes extensiones de área y la segunda un área pequeña. Luego los costos tanto de construcción, operación y mantenimiento son mayores en el filtro percolador sin embargo no son lejanos los de las Lagunas. La opción del RAFA tiene grandes eficiencias de remoción, aunque su costo es más elevado, esto se debe a que requiere mano de obra más especializada para que se ejecute satisfactoriamente el separador de gases, líquidos y sólidos. Otros aspectos que también requieren precisión como los distribuidores de caudal, los canales recolectores del efluente y la recolección de gas hacen que su costo sea mayor.

Aunque a pesar del RAFA tener mayor costo y menor puntaje, tiene el beneficio de que tiene la mayor cantidad de subproductos, por lo que esto le da una puntuación mayor en esa variable. Esto lo coloca cerca de las otras dos alternativas y da una variable más para que la entidad pueda tener una mejor decisión entre cualquiera de las tres configuraciones.

I. Matriz de decisión del grupo 2

*Cuadro 36
Matriz de decisión realizada para el grupo 2.*

Criterio	Ponderación	Lagunas			Filtro Percolador			RAFA + Flujo Superficial		
		% de remoción	Calificación	Puntaje del total	% de remoción	Calificación	Puntaje del total	% de remoción	Calificación	Puntaje del total
DBO5	12%	92%	10	12	92%	10	12	89%	9	11
DQO	8%	85%	10	8	85%	10	8	84%	9	7
Sólidos Suspendidos Totales	8%	77%	7	6	84%	9	7	87%	10	8
Nitrógeno Total	8%	77%	6	5	50%	2	2	65%	4	3
Fósforo Total	8%	24%	5	4	30%	6	5	58%	7	6
Coliformes Fecales	12%	4.7 log	9	11	5.4 log	10	12	4 log	7	8
Costo de construcción	12%	Q2,511,259	10	12	Q3,515,753	7	8	Q4,896,959	6	7
Costo de O&M	12%	Q33,491	10	12	Q53,581	7	8	Q69,190	4	5
Área Requerida	10%	12,202	4	4	333	10	10	6,221	6	6
Aprovechamiento de Subproductos	10%	Agua Para Riego	5	5	Agua Para Riego	5	5	Agua Para Riego + Metano + Plantaciones Agrícolas	10	10
Puntaje Total	100%		76	78		76	77		72	71

Elaboración propia.

Para el Grupo 2 la configuración de lagunas de estabilización tuvo el mayor puntaje entre las tres, aunque la configuración del filtro percolador está un punto abajo. Estas dos opciones tienen buenas características como también algunas desventajas. Se puede ver que el filtro percolador no cumple con la reducción de nitrógeno para llegar al límite establecido por el Acuerdo Gubernativo 236-2006 (Gobierno de Guatemala, 2006), sin embargo, como se mencionó anteriormente este efluente ha sido nitrificado, por lo que el nitrógeno total en la salida causa menor impacto ambiental que el de la afluente. La configuración del RAFA + flujo superficial tuvo un puntaje menor a pesar de que tiene la mayor cantidad de subproductos.

Dependiendo de la entidad que busque aplicar algunos de estos sistemas dentro del Grupo 2, deberá evaluar cuál de las configuraciones tiene mayor beneficios para ellos.

J. Matriz de decisión del grupo 3

Cuadro 37
Matriz de decisión realizada para el grupo 3.

Criterio	Ponderación	Lagunas			Filtro Percolador			RAFA + Flujo Superficial		
		% de remoción	Calificación	Puntaje del total	% de remoción	Calificación	Puntaje del total	% de remoción	Calificación	Puntaje del total
DBO5	12%	92%	10	12	92%	10	12	90%	9	11
DQO	8%	85%	10	8	85%	10	8	85%	10	8
Sólidos Suspendidos Totales	8%	77%	7	6	85%	9	7	87%	10	8
Nitrógeno Total	8%	77%	6	5	50%	2	2	65%	5	4
Fósforo Total	8%	24%	5	4	30%	6	5	58%	10	8
Coliformes Fecales	12%	4.7 log	8	10	5.4 log	10	12	4 log	6	7
Costo de construcción	12%	Q3.178,395	10	12	Q4.449,740	8	10	Q6.197,875	6	7
Costo de O&M	12%	Q42.388	10	12	Q67,816	6	7	Q87,571	4	5
Área Requerida	10%	15,707	4	4	435	10	10	8,970	7	7
Aprovechamiento de Subproductos	10%	Agua Para Riego	5	5	Agua Para Riego	5	5	Agua Para Riego + Metano + Plantaciones Agrícolas	10	10
Puntaje Total	100%		75	77		76	77		77	75

Elaboración propia.

En esta matriz se puede ver que las lagunas comienzan a disminuir su puntaje, indicando que para grupos mayores genera más complicaciones, como lo es su área que comienza a ser más extensa y eso hace que sea difícil de llevar a cabo. El RAFA comienza a elevar su puntaje, señalando que para una mayor población su desempeño general es mejor, la generación de subproductos también hizo que su puntaje elevara, llegando muy similar al puntaje de las otras dos configuraciones.

En este grupo las configuraciones se empiezan a emparejar, dando tres opciones diferentes pero con puntajes similares, por lo tanto se puede decir que ninguna es mejor que otra, sino que depende de las necesidades y capacidades específicas del lugar y de la entidad.

K. Matriz de decisión del grupo 4

Cuadro 38
Matriz de decisión realizada para el grupo 4.

Criterio	Ponderación	Lagunas			Filtro Percolador			RAFA + Flujo Superficial		
		% de remoción	Calificación	Puntaje del total	% de remoción	Calificación	Puntaje del total	% de remoción	Calificación	Puntaje del total
DBO5	12%	93%	9	11	95%	10	12	89%	7	8
DQO	8%	85%	10	8	85%	10	8	85%	10	8
Sólidos Suspendidos Totales	8%	77%	7	6	85%	9	7	87%	10	8
Nitrógeno Total	8%	77%	6	5	50%	2	2	65%	5	4
Fósforo Total	8%	24%	4	3	30%	5	4	58%	10	8
Coliformes Fecales	12%	4.8 log	8	10	5.4 log	10	12	4 log	6	7
Costo de construcción	12%	Q3,797,661	10	12	Q5,316,710	7	8	Q7,405,445	4	5
Costo de O&M	12%	Q50,646	10	12	Q81,029	7	8	Q104,633	4	5
Área Requerida	10%	20,451	4	4	364	10	10	8,335	7	7
Aprovechamiento de Subproductos	10%	Agua Para Riego	5	5	Agua Para Riego	5	5	Agua Para Riego + Metano + Plantaciones Agrícolas	10	10
Puntaje Total	100%		73	75		75	77		73	70

Elaboración propia.

Con esta última matriz se pudo ver que en general todas las alternativas disminuyeron su puntaje, esto puede indicar que para una mayor cantidad de personas su desempeño es menor. Puede que haya otras opciones que para esta cantidad de personas tengan mejor desempeño en general tomando en cuenta estas variables.

En este grupo la alternativa con mayor puntaje es el filtro percolador, ya que tiene una combinación entre rendimiento satisfactorio, precio intermedio y área pequeña. La configuración de Lagunas sigue estando muy cerca. La opción del RAFA + flujo superficial disminuyó su puntaje alejándola de las otras dos.

L. Análisis de sensibilidad

Para determinar la influencia de cada variable en el puntaje total de cada grupo y cada alternativa, se llevo a cabo un análisis de sensibilidad.

En este caso se tomó una variación en la ponderación de cada variable entre -40 % y 40 %, con ello se puede determinar cuál sería el puntaje total con esas variaciones. Esto se llevó a cabo para determinar para cada alternativa en cada grupo qué variables son las críticas que afectan de mayor forma el puntaje de cada configuración.

A continuación como ejemplo se presenta el cuadro resumen para la alternativa de lagunas de estabilización del grupo 1.

Cuadro 39

Cuadro de análisis de sensibilidad para la opción de lagunas de estabilización del grupo 1.

Análisis de Sensibilidad de la configuración de Lagunas de Estabilización

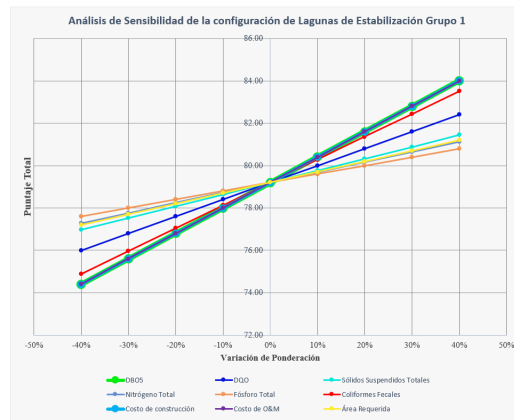
Parámetro	Variaciones en Ponderación								
	-40%	-30%	-20%	-10%	0%	10%	20%	30%	40%
DBO5									
Punteo Total	74.40	75.60	76.80	78.00	79.20	80.40	81.60	82.80	84.00
DQO									
Punteo Total	76.00	76.80	77.60	78.40	79.20	80.00	80.80	81.60	82.40
Sólidos Suspendedos Totales									
Punteo Total	76.96	77.52	78.08	78.64	79.20	79.76	80.32	80.88	81.44
Nitrógeno Total									
Punteo Total	77.28	77.76	78.24	78.72	79.20	79.68	80.16	80.64	81.12
Fósforo Total									
Punteo Total	77.60	78.00	78.40	78.80	79.20	79.60	80.00	80.40	80.80
Coliformes Fecales									
Punteo Total	74.88	75.96	77.04	78.12	79.20	80.28	81.36	82.44	83.52
Costo de construcción									
Punteo Total	74.40	75.60	76.80	78.00	79.20	80.40	81.60	82.80	84.00
Costo de O&M									
Punteo Total	74.40	75.60	76.80	78.00	79.20	80.40	81.60	82.80	84.00
Área Requerida									
Punteo Total	77.20	77.70	78.20	78.70	79.20	79.70	80.20	80.70	81.20
Aprovechamiento de Subproductos									
Punteo Total	77.20	77.70	78.20	78.70	79.20	79.70	80.20	80.70	81.20

Elaboración propia.

Como se puede ver, cada variable afecta de distinta forma el resultado. En forma de tabla se dificulta entender los resultados, por lo que se realizó un diagrama para hacer visible gráficamente estos datos. En el eje de las abscisas se tiene el porcentaje de variación en la ponderación de esa variable. En el eje de las ordenadas se tiene el puntaje total para cada variación.

Este resultado se presenta a continuación:

Figura 25. Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción de lagunas de estabilización del grupo 1.

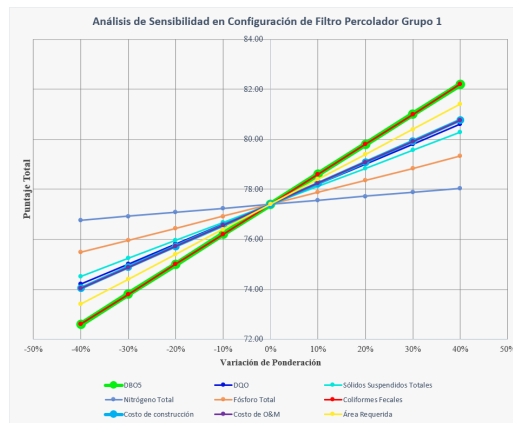


Elaboración propia.

Como se puede ver las variables que afectan de mayor forma el resultado son la eficiencia de remoción de DBO, el costo de construcción, así como también el costo de operación y mantenimiento. Por lo tanto se puede decir que esas variables tienen mayor importancia en la matriz de decisión.

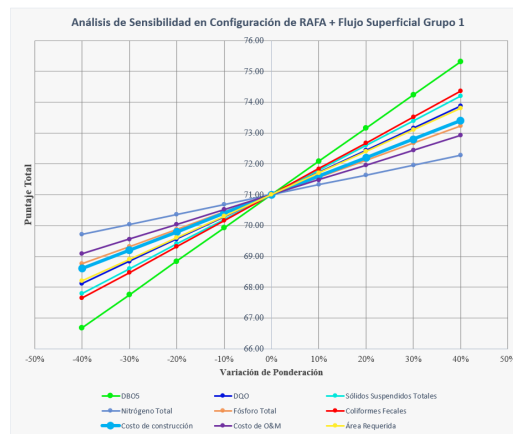
Llevando a cabo el análisis de sensibilidad para cada alternativa de cada grupo se pudo encontrar que las variables de mayor importancia no se replican siempre en las otras alternativas, así como tampoco en los otros grupos. A continuación se presentan los gráficos para cada análisis de sensibilidad:

Figura 26. Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del filtro percolador del grupo 1.



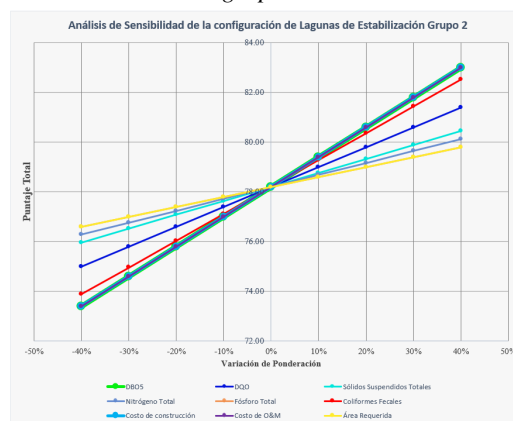
Elaboración propia.

Figura 27. Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del RAFA + flujo superficial del grupo 1.



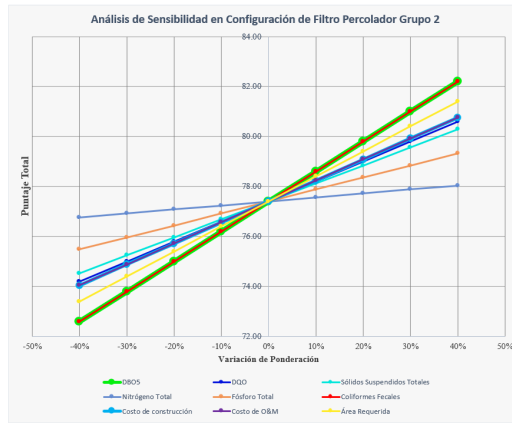
Elaboración propia.

Figura 28. Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción de lagunas de estabilización del grupo 2.



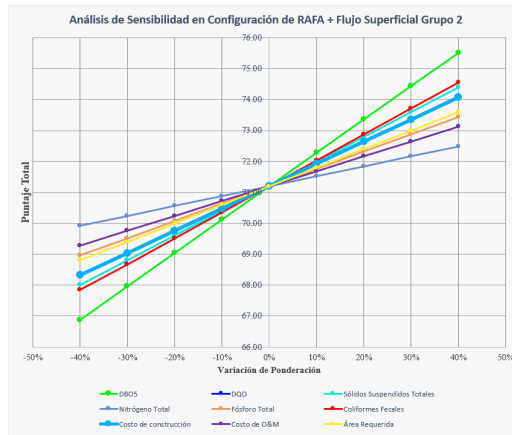
Elaboración propia.

Figura 29. Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del filtro percolador del grupo 2.



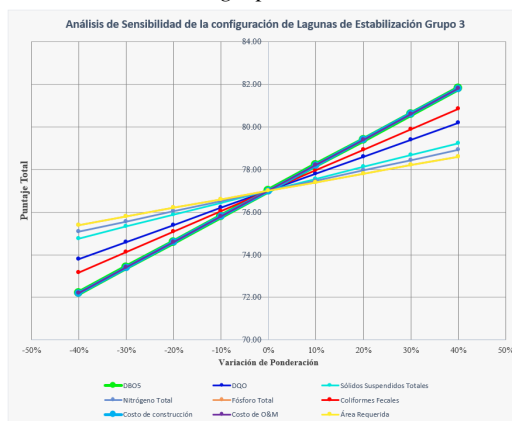
Elaboración propia.

Figura 30. Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del RAFA + flujo superficial del grupo 2.



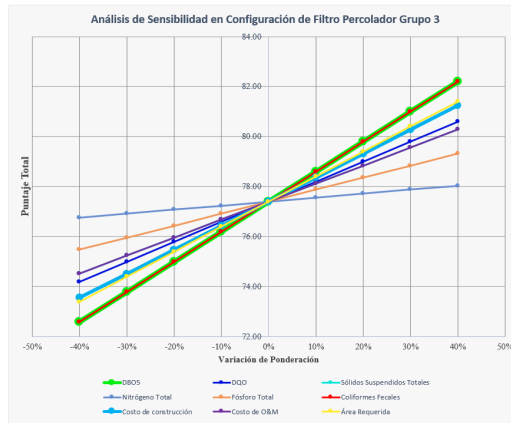
Elaboración propia.

Figura 31. Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción de lagunas de estabilización del grupo 3.



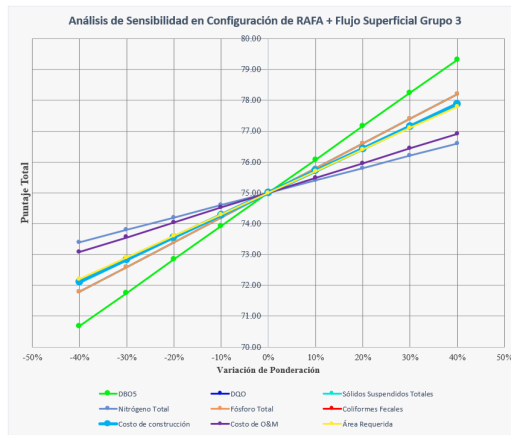
Elaboración propia.

Figura 32. Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del filtro percolador del grupo 3.



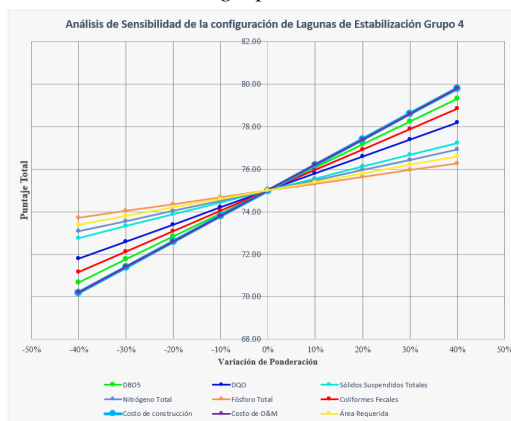
Elaboración propia.

Figura 33. Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del RAFA + flujo superficial del grupo 3.



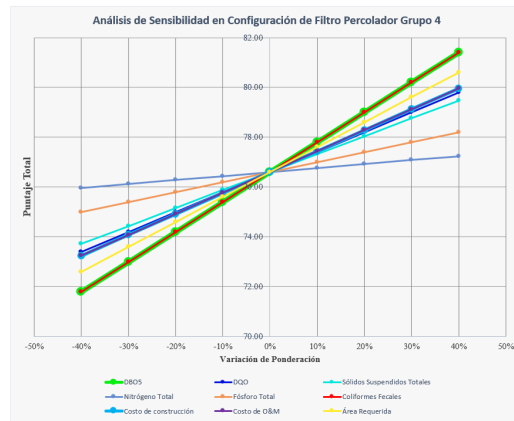
Elaboración propia.

Figura 34. Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción de lagunas de estabilización del grupo 4.



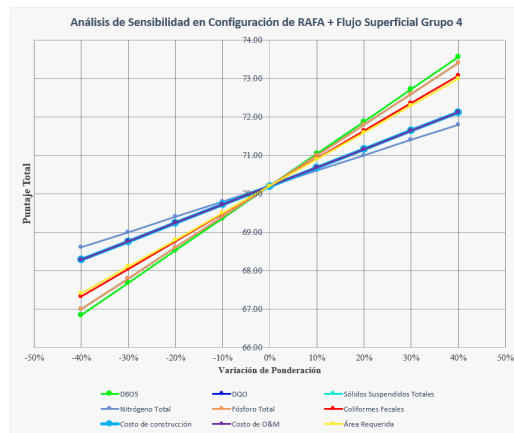
Elaboración propia.

Figura 35. Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del filtro percolador del grupo 4.



Elaboración propia.

Figura 36. Gráfico de resultado del análisis de sensibilidad para la opción del RAFA + flujo superficial del grupo 4.



Elaboración propia.

Con estos resultados se pudo encontrar que las variables de DBO, costo de construcción y costo de operación, son las críticas para la alternativa de lagunas de estabilización en todos los grupos. Únicamente en el Grupo 4 la DBO no es el más crítico.

Luego para la alternativa del filtro percolador las variables críticas son la DBO y los coliformes fecales en todos los grupos.

Por último, para la configuración del RAFA + flujo superficial tuvo la DBO como variable crítica, seguida muy cerca por la reducción de fósforo total en todos los grupos.

M. Elaboración de la guía

Como se mencionó anteriormente, en la guía se presentarán todas las alternativas, ya que se ha podido encontrar a lo largo del trabajo que cada sistema tiene distintas características y en cada situación específica puede haber un sistema con mejor desempeño.

Esto se considera de gran valor para los sistemas de tratamiento, ya que no se cierra a una única opción como la mejor, sino que para cada situación hay distintas opciones con distintas ventajas y desventajas, por lo que da a la entidad una aplicación más adecuada a su situación.

La guía, el cual es el anexo 1, comprende un resumen de todo el trabajo, donde se describe el objetivo de ella, un pequeño resumen de cada sistema de tratamiento y el cuadro de resultados donde se resumen todos los resultados de cada configuración para cada grupo.

A continuación, se presenta la tabla principal de la guía donde se unieron todas las alternativas. En ella se establecen las unidades del sistema para el tratamiento secundario y terciario, los porcentajes de remoción de los parámetros de calidad del agua, el costo total de construcción, operación y mantenimiento. Luego se ve el área requerida por el sistema y el tipo de área que necesita. Ya que unos sistemas necesitan áreas planas y otros se adaptan mejor a terrenos montañosos.

En amarillo se presentan los porcentajes de remoción de ciertos parámetros que no cumplieron con el valor objetivo que se definió anteriormente, pero que sí cumplen con el Acuerdo Gubernativo 236-2006. En rojo se presenta el porcentaje de reducción que no cumple con el Acuerdo Gubernativo 236-2006 para que sea tomado en cuenta.

Las alternativas que están en color azul son las que tuvieron mejor puntaje con la matriz de decisión realizada para cada grupo.

Cuadro 40
Guía de implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales para la Región Occidente de Guatemala.

GUÍA DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO

Grupo	Población del lugar	Unidades de la PTAR	% Eficiencia de Remoción						Coliformes Fecales (logaritmos reducidos)	Costo de Construcción*	Costo de O&M	Área requerida** (m2)	Tipo de Terreno	Subproductos
			DBO5	DQO	SST	N total	P total							
1	2,401 a 3,800	Laguna Anaerobia Laguna Facultativa Laguna de Maduración	92%	85%	77%	77%	24%	4.7 log	Q1,788,629	Q23,853	8,306	Plano	Agua Para Riego	
		Sedimentador Primario Filtro Percolador de baja tasa Sedimentador Secundario Clorador	92%	85%	84%	50%	30%	5.4 log	Q2,504,074	Q38,163	244	Quebrado	Agua Para Riego	
		Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) Tratamiento en Tierra de Flujo Superficial	89%	84%	87%	65%	58%	4 log	Q3,487,830	Q49,280	3,876	Combinado	Agua Para Riego + Metano + Plantaciones	
2	3,801 a 5,200	Laguna Anaerobia Laguna Facultativa Laguna de Maduración	92%	85%	77%	77%	24%	4.7 log	Q2,511,259	Q33,491	1,202	Plano	Agua Para Riego	
		Sedimentador Primario Filtro Percolador de baja tasa Sedimentador Secundario Clorador	92%	85%	84%	50%	30%	5.4 log	Q3,515,753	Q53,581	333	Quebrado	Agua Para Riego	
		Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) Tratamiento en Tierra de Flujo Superficial	89%	84%	87%	65%	58%	4 log	Q4,896,959	Q69,190	6,221	Combinado	Agua Para Riego + Metano + Plantaciones	
3	5,201 a 6,600	Laguna Anaerobia Laguna Facultativa Laguna de Maduración	92%	85%	77%	77%	24%	4.7 log	Q3,178,395	Q42,388	15,707	Plano	Agua Para Riego	
		Sedimentador Primario Filtro Percolador de baja tasa Sedimentador Secundario Clorador	92%	85%	85%	50%	30%	5.4 log	Q4,449,740	Q67,816	435	Quebrado	Agua Para Riego	
		Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) Tratamiento en Tierra de Flujo Superficial	90%	85%	87%	65%	58%	4 log	Q6,197,875	Q87,571	8,970	Combinado	Agua Para Riego + Metano + Plantaciones	
4	6,601 a 8,000	Laguna Anaerobia Laguna Facultativa Laguna de Maduración	93%	85%	77%	77%	24%	4.8 log	Q3,797,661	Q50,646	20,451	Plano	Agua Para Riego	
		Sedimentador Primario Filtro Percolador de baja tasa Sedimentador Secundario Clorador	95%	85%	85%	50%	30%	5.371 log	Q5,316,710	Q81,029	364	Quebrado	Agua Para Riego	
		Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) Tratamiento en Tierra de Flujo Superficial	89%	85%	87%	65%	58%	4 log	Q7,405,445	Q104,633	8,335	Combinado	Agua Para Riego + Metano + Plantaciones	

Elaboración propia.

N. Discusión de resultados

Inicialmente se planteaba diseñar sistemas de tratamiento de aguas residuales para la totalidad de personas en el lugar, sin embargo, como se ha investigado no se encuentra conectado a los drenajes el 100 % de la población del lugar (Instituto Nacional de Estadística Guatemala, 2018). Por ello no se diseñó para la cantidad total de personas, sino que se determinó que el 50 % de estas sí se estima puedan llegar a estar conectadas en 20 años.

La entidad que busque la implementación de alguno de los sistemas planteados en esta guía debe contemplar realizar estudios técnicos específicos para determinar que el caudal y la calidad del agua a tratar se aproximen a los definidos en este trabajo. Como se sabe que no necesariamente los parámetros serán iguales a los estimados, se deja la memoria de cálculo de cada sistema como base para que algún profesional calificado pueda tomarlo y adaptarlo a las condiciones propias del lugar donde se busque implementar. Esto hace que la guía no se cierre únicamente a lo establecido, sino que pueda abrir la posibilidad a que se pueda utilizar en distintos estudios y aplicaciones.

Una ventaja general para todos los sistemas es que actualmente se utilizan en la región (Oakley & Salguero, 2011), por lo que se cuenta con mano de obra calificada para su implementación. Este factor también influyó la decisión de los sistemas a seleccionar para la guía, ya que puede que haya otros sistemas altamente eficientes sin embargo no existe personal apto para su aplicación, operación y mantenimiento y traerla de otro lugar resultaría elevando los costos.

A lo largo del trabajo se fueron adaptando ciertas limitantes para realizar la guía con el propósito que sea lo más cercano a la realidad del área definida.

También durante el trabajo se encontró que el Acuerdo Gubernativo 236-2006 no especifica los límites permisibles de descarga de todos los parámetros del agua para el reúso de la misma en el sector Agrícola. Por lo que se utilizaron los límites máximos para descarga a cuerpos receptores, asegurando evitar contribuir al impacto ambiental si no se utiliza la totalidad del agua para la agricultura.

El primer aspecto que se pudo analizar luego de realizar los diseños para cada grupo es que la reducción de los parámetros de calidad del agua depende de la concentración de estos en el afluente, de las dimensiones del sistema y de una gran cantidad de factores distintos para cada uno como lo son la carga orgánica, constantes empíricas de cada sistema, cargas superficiales, etc. Determinar estos factores en la región seleccionada sería un trabajo totalmente distinto ya que requiere de otros conocimientos adicionales, así como de instalaciones y equipo adecuado para su determinación, sin embargo, sería de gran utilidad para todas las personas y entidades que implementan o estudian los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Se pudo determinar que la opción de Lagunas de estabilización es muy eficaz para mejorar la calidad del agua residual, este sistema, a pesar de ser utilizado hace varios años aún tiene competitividad. Además, su construcción es relativamente más simple, por lo que es más fácil su aplicación y tiene un menor costo que otros sistemas. Otra ventaja de este es que tiene el menor costo de operación y mantenimiento, ya que no tiene una tecnología compleja. Este aspecto también es positivo ya que no se requiere de conocimientos avanzados para controlar su operación y mantenimiento.

La mayor desventaja es el área requerida, ya que como se ha visto en el diseño de estos sistemas, requieren áreas extensas, lo cual no siempre está disponible al momento de implementar un

sistema de tratamiento de aguas residuales. Claramente este costo disminuye si el terreno donde se implementará ya es plano, sin embargo, en casos donde se deben de realizar las plataformas correspondientes incrementa su costo.

La configuración del filtro percolador con sedimentadores y un clorador es la que tuvo el mejor puntaje para el Grupo 3 y 4. Una de sus ventajas es que requiere la menor área, lo cual es de gran utilidad porque no siempre se cuenta con grandes extensiones de terreno. Esto lo hace más versátil ya que se puede adaptar al lugar para que no incremente los costos de construcción, además por tener varias unidades estas es más fácil su adaptación al terreno. En este caso no cumplió con el límite máximo de Nitrógeno Total, lo cual no se considera negativo ya que como se ha visto, el efluente es rico en nitrato, el cual utilizan las plantas para producir proteínas. Por lo tanto, el nitrógeno fue transformado a un compuesto que aprovechan las plantas mejorando la calidad del efluente, aunque el nitrógeno total solamente se reduzca en un 50 %.

No se descartó este sistema ya que tiene alta eficiencia en la remoción de DBO5 y de Coliformes Fecales, los cuales tienen alta importancia en el área de Latinoamérica (Oakley & Salguero, 2011). También como se pudo encontrar en las matrices de decisión tiene el mayor puntaje para los últimos dos grupos y en el segundo obtuvo el mismo puntaje que las Lagunas de estabilización siendo ambos los mejor puntuados. Demostrando que la eficiencia no es la única variable importante en los sistemas de tratamiento, sino que hay más variables las cuales dependen de las necesidades del lugar y de la entidad.

Por otra parte, se pudo encontrar que la configuración del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente con el Tratamiento en Tierra de flujo superficial tiene alta eficiencia también en remoción de parámetros sin embargo, sus costos de construcción, operación y mantenimiento son elevados. El área requerida es considerable, para la unidad del RAFA, por ser un sistema compacto tiene gran versatilidad en su ubicación ya que se puede adaptar a lugares con topografías complicadas. El sistema de flujo superficial sí requiere de una mayor área, sin embargo, por ser un tratamiento de disposición en tierra la pendiente se puede modificar para adaptarlo a superficies variables. La ventaja es que esa área no se toma como pérdida, sino que se puede aprovechar para el cultivo de distintas plantaciones como maíz, pastos, entre otros, lo cual puede dar un retorno económico por la producción de estos. La combinación del sistema del RAFA y el flujo superficial tuvo resultados interesantes porque es una alternativa distinta a las otras dos consideradas en este trabajo.

Los costos de construcción, operación y mantenimiento de esta alternativa son los más altos de las tres opciones, esto se debe a que la operación del RAFA es más compleja y requiere de un conocimiento más avanzado. Esta alternativa tiene la ventaja de que puede dar un retorno económico si se busca aprovechar el metano que produce el RAFA ya sea para usos industriales, domésticos o energéticos, esto incrementa su valor, lo que lo hace un sistema más atractivo.

Realizando el análisis de sensibilidad se pudo ver que cada alternativa tiene sus variables críticas, aunque se pudo ver que en todas las configuraciones estaba presente la remoción de DBO. Esto significa que es una de las variables más importantes en el estudio y se debe velar porque se tengan altas eficiencias de este parámetro. Esto se podía esperar ya que es el parámetro principal que indica el nivel de contaminación del agua.

Para este trabajo se pudo determinar el sistema con el mayor puntaje, sin embargo no se puede establecer como mejor que los otros, en este caso se definieron las ponderaciones a criterio y comparando únicamente las variables de la eficiencia, costos y área requerida, más a lo largo del trabajo

se ha visto que cada sistema tiene sus ventajas y desventajas, y depende de las necesidades de la entidad que lo busque implementar las que definirán cuál es el sistema más adecuado.

Luego se puede ver que no se necesitan sistemas avanzados con equipos electromecánicos de alta tecnología para llegar a cumplir con los límites del Acuerdo Gubernativo 58-2019 y el Acuerdo Gubernativo 236-2006. A pesar de ello no se asegura que las municipalidades tengan la capacidad para implementar estos sistemas.

Las entidades gubernamentales, no gubernamentales, el sector privado y demás deberían enfocarse en aprovechar el agua residual para los múltiples usos que se le pueden dar al ser tratada. En este trabajo se enfocó en el sector agrícola ya que es uno de los más grandes del país, lo que podría representar mayor competitividad a nivel local y mundial de los productos agrícolas. Además, se disminuiría el daño ambiental que se está haciendo actualmente a los cuerpos de agua por la falta de tratamiento de las aguas residuales.

VIII. Conclusiones

La guía realizada cumple con el objetivo general de este trabajo y queda como recurso de alto valor para entidades que busquen implementar sistemas de tratamiento, fomentando la aplicación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la región occidente del país.

Se cumplió con el objetivo de determinar los parámetros de calidad del agua para la región seleccionada los cuales se determinaron como se muestra en la Figura 26.

Figura 37. Parámetros de calidad del agua residual en la región Occidente de Guatemala.

Parámetros de Calidad del Agua Residual en la Región Occidente de Guatemala

Parámetro	Concentración (mg/L)
Sólidos Suspendidos	300
DBO5	350
DQO	600
Nitrógeno Total	50.00
Fósforo Total	12.00
pH	7
Alcalinidad	180
Metales Pesados	≈ 0
	NMP/100 mL
Coliformes Fecales	4.7E+07

Se cumplió con el objetivo de determinar un estimado de los costos de construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento propuestos.

Determinar un sistema considerado mejor que los otros es algo subjetivo y depende de los objetivos de la implementación del mismo, ya que pueden cambiar en cada lugar dependiendo de las necesidades del proyecto, así como también está ligado a los recursos del lugar y de la entidad que busque su aplicación.

Las tres configuraciones propuestas presentan alta competitividad para su implementación en el área occidente del país, ya que sus eficiencias de remoción de parámetros son altas y son sistemas utilizados a nivel centroamericano.

IX. Recomendaciones

Como recomendación principal, se plantea hacer un trabajo más específico para cada uno de los departamentos tratados en este trabajo, de esa forma se puede tener información más concreta para cada uno, dando opciones más óptimas y exactas.

También se recomienda hacer trabajos similares en las otras regiones del país, para que de esta forma las entidades tengan más herramientas para combatir la falta de tratamiento de aguas residuales.

Distintas entidades pueden utilizar este trabajo para un anteproyecto y conocer un estimado de los beneficios de cada sistema en específico. Estas entidades pueden ser del sector público, privado, así como también la academia puede tomar este trabajo como base para estudios posteriores o para ampliar aún más la información.

Si se determina utilizar uno de los sistemas propuestos en la guía se recomienda hacer un diseño más exhaustivo de la planta de tratamiento, ya que para la elaboración de la guía se realizaron diseños de los aspectos principales de cada unidad. Con este diseño a detalle se pueden determinar aspectos como los diámetros de tubería requeridos para conectar cada unidad, el diseño estructural de cada sistema, materiales de construcción de cada sistema, entre otros.

Se recomienda analizar la calidad del agua y caudales específicos del lugar donde se busque implementar el sistema para determinar que se encuentre próximo a los estimados en la elaboración de esta guía.

El procedimiento de elaboración de esta guía se puede utilizar para realizar guías similares para otras regiones o si varían algunos de los criterios tomados en este trabajo.

Se considera vital que existan más recursos como este trabajo para fomentar la implementación de sistemas de tratamiento en Guatemala y Centro América, ya que requieren de mayor atención para mejorar las condiciones ambientales y de salud.

Se deben elaborar más pruebas y análisis para determinar los sistemas de tratamiento que han tenido un alto rendimiento en el país, para que se pueda enfocar en replicarlos en las áreas más necesitadas.

X. Glosario

Afluente: Es el caudal de agua que entra a una unidad o sistema de tratamiento.

Aguas residuales: Agua generada por el ser humano que contiene contaminantes dañinos para el ambiente y la salud.

Aguas residuales domesticas: Conjunto de líquidos provenientes de viviendas, comercios e instituciones a los que se les han agregado contaminantes para el ambiente y la salud.

Aguas residuales municipales: Conjunto de líquidos provenientes del alcantarillado de una población que contienen contaminantes dañinos para el ambiente y la salud.

Bacteria: Organismo unicelular que no depende de la luz solar para vivir.

Biomasa: Conjunto de organismos en un medio.

Contaminacion: Introducción al ambiente de elementos dañinos al a vida y que degradan la calidad de la atmósfera, agua, suelo u otros recursos naturales.

Cuerpo receptor: Cuerpo de agua o suelo donde se vierten las aguas residuales.

Demanda Bioquímica de Oxígeno: Es una medida que determina la contaminación orgánica. Se obtiene de la cantidad de oxígeno que consume la materia orgánica en el agua, generalmente se refiere a la DBO5.

Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días:: Es una medida que determina la contaminación orgánica. Se obtiene de la cantidad de oxígeno que consume la materia orgánica en el agua durante 5 días.

Demanda Química de Oxígeno: Es una medida que determina la contaminación orgánica. Es la cantidad de oxígeno que se requiere para degradar la materia orgánica por medios biológicos y químicos.

Efluente: Es el caudal de agua que sale de una unidad o sistema de tratamiento.

Eutrofizacion: Se define como un proceso de envejecimiento de un cuerpo de agua por excesiva concentración de nutrientes.

Excretas: Sustancias de desecho eliminadas por el ser humano.

Impacto ambiental: Alteración a uno o más componentes del ambiente.

Infiltracion: La acción de drenar el agua en el suelo.

Lodos: Conjunto de partículas sólidas con agua generado por procesos naturales o artificiales.

Materia orgánica: Conjunto compuesto principalmente Carbono, Hidrógeno, Oxígeno formando partículas macroscópicas, coloides o macromoléculas disueltas que pueden causar color, olor, sabor, el desarrollo de microorganismos patógenos o implicar la presencia de materia no biodegradable.

Natas: Conjunto de líquidos espesos flotantes.

Nitrificación: Conversión del amonio a nitrato en condiciones aerobias.

Oxidación: Acción donde se fija el oxígeno a otro compuesto por pérdida de electrones.

Oxígeno disuelto: Medida de la cantidad de oxígeno libre en el agua.

Patógenos: Microorganismos que generan enfermedades.

Saneamiento: Prácticas de higiene para la recolección, disposición o eliminación de excretas.

Sólidos Sedimentables Totales: Concentración de sólidos insolubles en el agua.

XI. Bibliografía

- Agencia Europea de Medio ambiente. (2018). *La vida subacuática está expuesta a graves amenazas*. AEMA. <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2018-el-agua-es-vida/articulos/la-vida-subacuatica-esta-expuesta>
- Alfaro, F. (2007). *Matriz de Decisiones*. UNAM.
- Alvarado Granados, J. & Ramos Villanueva, J. (2010). *Estado del arte de las estructuras: trampas de grasa y desarenadores en sistemas de alcantarillado*. Universidad de La Salle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/288
- Álvarez Muñoz, O. (2004). *Actualización de normas y reglamento de drenajes para la ciudad de Guatemala*. Universidad de San Carlos.
- Asamblea Nacional Constituyente. (1985). *Constitución Política de la República de Guatemala*. Diario de Centro América.
- Autoridad del Canal de Panamá. (2018). *2610-ESM-111-Norma para descarga de efluentes y metodología para su verificación*.
- Banco de Guatemala. (2020). *Ritmo Inflacionario 1996-2020*. <http://www.banguat.gob.gt/inc/ver.asp?id=/imm/imm01&e=569>
- Banco Mundial. (2017). *Diagnóstico de Agua, Saneamiento e Higiene y su Relación con la Pobreza y Nutrición en Guatemala*. <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/845711520948334504/pdf/124240-WP-PUBLIC-WWPDGuatemalaSP.pdf>
- Behar, R. & Grima, P. (2006). *¿En cuántos intervalos conviene dividir los datos para construir un histograma? o, más en general, ¿qué aspectos hay que tener en cuenta para construir un histograma?* Universidad Autónoma Metropolitana.
- Brown Salazar, D. (2004). *Guía para el Manejo de Excretas y Aguas Residuales Municipales*. PROARCA.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2003). *Especificaciones Técnicas para el Diseño de Trampa de Grasa*. CEPIS.
- Congreso de la República de Guatemala. (1986). *Decreto de la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, 68-86*. Diario de Centro América.
- Congreso de la República de Guatemala. (1997). *Decreto 90-1997: Código de Salud*. Diario de Centro América.
- Congreso de la República de Guatemala. (2002a). *Decreto 12-2002: Código Municipal*. Diario de Centro América.
- Congreso de la República de Guatemala. (2002b). *Decreto 56-2002: Reforma al Código Municipal*. Diario de Centro América.
- de Administración y Negocios, E. S. (2019). *Análisis de sensibilidad: ¿qué es y cuál es su importancia en un proyecto?* Conexión ESAN.
- EMPAGUA. (2018). *Manual para la evaluación de sistemas de agua y alcantarillado de proyectos en la Ciudad de Guatemala*. Municipalidad de Guatemala.
- Espigares García, M. & Pérez López, J. (2011). *Aguas Residuales: Composición*. http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf
- Ferro, G. & Lentini, E. (2010). *Economías de escala en los servicios de agua potable y alcantarillado*. CEPAL. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2011/02/economiaescalaserviciosaguapotblealcantarillado.pdf>
- Georgia Department of Natural Resources. (2010). *Guidelines for slow-rate land treatment of wastewater via spray irrigation*. Georgia DNR.
- Ghasemian, M., Nourmohammadi, D., Esmaeeli, M. & Akbarian, H. (2013). *Nitrogen Removal in a Full-Scale Domestic Wastewater Treatment Plant with Activated Sludge and Trickling Filter*. Journal of Environmental; Public Health.
- Gobierno de Guatemala. (2006). *Acuerdo Gubernativo No. 236-2006*.
- Gobierno de Guatemala. (2019). *Acuerdo Gubernativo No. 58-2019*.

- Herrera Quezada, A. B. (2005). *Diseño del sistema de abastecimiento de agua potable, aldea Sanguayabá Municipio de Palencia, Guatemala*. USAC.
- Huamaní Galindo, Z. (2018). *Estudio de Coeficientes Cinéticos de Filtros Percoladores por Etapas, con medio Filtrante de Piedra Volcánica*. USAC-Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hídricos.
- INFOM-MSPAS. (2011). *Guía de normas sanitarias para el diseño de sistemas rurales de abastecimiento de agua para consumo humano*. Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. <https://www.mspas.gob.gt/images/files/saludambiente/regulacionesvigentes/AguaConsumoHumano/NormasdeDisenoSistemasRuralesAgua.pdf>
- Instituto de Fomento Municipal. (2018). *Guía técnica para implementar plantas de tratamiento de aguas residuales en Guatemala*. <http://www.infom.gob.gt/nuestros-servicios/plantas-de-tratamiento/>
- Instituto Nacional de Estadística. (2014). *Caracterización de la República de Guatemala*. Instituto Nacional de Estadística.
- Instituto Nacional de Estadística Guatemala. (2018). *CENSO Poblacional*. <https://www.censopoblacion.gt/>
- Llagas, W. & Guadalupe, E. (2006). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Lux Monroy, M. (2010). *Medidores de flujo en canales abiertos*. USAC.
- Mara, D. (1997). *Design manual for waste stabilisation ponds in India*. Lagoon Technology International Ltd. Leeds.
- Mbwele, L. (2006). *Microbial Phosphorus Removal in Waste Stabilisation Pong Wastewater Treatment Systems*. Royal Institute of Technology.
- Metcalf and Eddy Inc. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw-Hill Companies, Inc.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Principales razones que obligan a la ampliación del plazo para construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales*. MARN. http://www.marn.gob.gt/noticias/noticia/Principales_razones_que_obligan_a_la_ampliacion_del_plazo_para_construccion_de_plantas_de_tratamiento_de_aguas_residuales
- Ministerio de Economía. (2017). *Perfiles departamentales*. Ministerio de Economía.
- Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Plan Indicativo de Electrificación Rural 2020-2032*. Ministerio de Energía y Minas.
- Ministerio de Salud Pública y Asistencia. (2011). *Acuerdo Ministerial No. 572-2011*.
- Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. (2013). *Política Nacional del Sector de Agua Potable y Saneamiento*.
- Oakley, S. & Salguero, L. (2011). *Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Centroamérica: Un manual de experiencias, diseño, operación y sostenibilidad*.
- OPS-CEPIS. (2005). *Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques imhoff y lagunas de estabilización*. OPS.
- Organización de las Naciones Unidas. (2019). *Mejorar el tratamiento de aguas residuales es crucial para la salud humana y los ecosistemas*. <https://www.unenvironment.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/mejorar-el-tratamiento-de-aguas-residuales-es-crucial-para-la>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. (1992). *Tratamiento de aguas residuales y uso en agricultura*.
- Organización Mundial de la Salud. (2012). *Progresos sobre el agua potable y saneamiento*. OMS. https://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/jmp2012/fast_facts/es/
- Organización Mundial de la Salud. (2019). *Saneamiento, Datos y Cifras*. <https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/sanitation>
- Organización Mundial de la Salud. (s.f.). *Saneamiento*. <https://www.who.int/topics/sanitation/es/>
- Orozco Jaramillo, Á. (2005). *Bioingeniería de Aguas Residuales*. Acodal.
- Recinos, C. (2020). *Tratamientos Secundarios*. UVG.

- Rodríguez Pimentel, H. (2017). *Las aguas residuales y sus efectos contaminantes*. <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>
- Rojas, R. (2002). *Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*. CEPIS.
- Salas, J. J. (2018). *Introducción a los Humedales Artificiales como tratamiento de las aguas residuales*. iAgua.
- Schiazzano, R. (2007). *Matriz de Decisión*. Universidad de Buenos Aires.
- SEGEPLAN-BID. (2006). *Estrategia para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de Guatemala*.
- Sigúí, N. (2016). *¿Por qué continúa la contaminación de aguas en Guatemala?* Universidad de San Carlos de Guatemala.
- UCAB. (2012). *El proceso de la toma de decisiones*. Universidad de Andrés Bello.
- UNAM. (2013). *Histograma*. USAC.
- von Sperling, M. & de Lemos, C. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. IWA Publishing.
- Weatherspark. (2020). *El clima promedio en Guatemala*. Cedar Lake Ventures, Inc.

XII. Anexos

- A. Guía de implementación de sistemas de tratamiento en los departamentos de Totonicapán, Quiché, Sololá, Huehuetenango, San Marcos, Quetzaltenango**

- B. Memorias de cálculo de los sistemas de tratamiento para cada grupo**

