UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD AZCAPOTZALCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE UNA TECNOLOGÍA DESCENTRALIZADA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE DECISIÓN

PROYECTO PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA AMBIENTAL

PRESENTA

PAOLA MERINO HERNÁNDEZ

MATRÍCULA:

2172001064

ASESORA:

DRA. MÓNICA LILIANA SALAZAR PELÁEZ

CO-ASESOR:

DR. ULISES ROJAS ZAMORA

TRIMESTRE 22-P

SEPTIEMBRE 2022

Yo, Mónica Liliana Salazar Peláez, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

_____

Mónica Liliana Salazar Peláez

Yo, Ulises Rojas Zamora, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

_____

Ulises Rojas Zamora

Yo, Paola Merino Hernández, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

_____

Paola Merino Hernández

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

A mis padres César Merino y Rita Hernández, por siempre darme su apoyo y su amor en cada etapa de mi vida.

A mi hermana Areli, por su afecto y siempre creer en mí.

A mis asesores, la Dra. Mónica Salazar Peláez y el Dr. Ulises Rojas Zamora por apoyarme como su alumna y compartirme sus conocimientos. También agradezco su tiempo, compresión y paciencia. Este trabajo es todo gracias a ustedes.

A mis amigos, es especial a mi mejor amigo Alan Flores por su apoyo incondicional durante momentos de crisis, por ser una gran persona y mantenerse conmigo siempre.

A Yael Soria, por su tiempo, su amor y apoyo incondicional. Por su apoyo y su comprensión durante esta etapa de mi vida.

Dedico de manera especial a mi abuelo Baldomero Merino, a pesar de las dificultades que tuvimos, sé que siempre fui la pequeña que le llenada de orgullo, la niña inteligente, pero al mismo tiempo llena de impulsividad. Por ser mi compañero de diversión y travesuras. Por enseñarme a perdonar sin dañar a los demás. Agradezco a la vida por el abuelo que me dio, y dejarme disfrutar hasta el último momento de su vida a su lado.

Te amo abuelo, hasta siempre.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 1

2. MARCO TEÓRICO 3

2.1 CLASIFICACIÓN Y COMPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES 3

2.1.1 Características físicas 3

2.1.2 Características químicas 4

2.1.3 Características biológicas 4

2.1.4 Aguas residuales domésticas 5

2.1.5 Composición de las aguas negras 6

2.1.6 Composición de las aguas grises 7

2.2 CONTAMINANTES PRINCIPALES DE LAS AGUAS RESIDUALES Y CALIDAD DEL AGUA 9

2.3 PARAMETROS RELEVANTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 15

2.3.1 Eficiencia de remoción de contaminantes 15

2.3.2 Carga orgánica 15

2.3.3 Tiempo de retención hidráulica 15

2.4. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 16

2.4.1 TRATAMIENTO CENTRALIZADO DE AGUAS RESIDUALES 16

2.4.2 Clasificación de los sistemas de tratamiento 17

2.4.3 Niveles de tratamiento 17

2.4.4 Pretratamiento 18

2.4.5 Tratamiento primario 18

2.4.6 Tratamiento secundario 18

2.4.7 Tratamiento terciario 19

2.5 PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO 20

2.5.1 PTAR Atotonilco 23

2.5.2 Pretratamiento 23

2.5.3 Tren de Procesos Convencional (TPC) 24

2.5.4 Tren de Procesos Químicos 25

2.6 Tratamiento descentralizado 26

2.7 Humedales de tratamiento en México 26

2.7.1 Tipos de humedales 28

2.7.2 Parámetros de diseño 29
2.7.3 Ventajas y limitaciones 32
2.8 Tanque séptico 33
2.8.1 Tipos de tanques sépticos 34
2.8.2 Tanque séptico de una cámara 36
2.8.3 Tanque séptico de dos cámaras 36
2.8.4 Tanque séptico de tres cámaras 37
2.8.5 Parámetros de diseño 37
2.8.6 Dimensiones de las cámaras de los tanques sépticos 40
2.8.7 Ventajas y limitaciones 42
2.9 Tanque Imhoff 42
2.9.1 Parámetros de diseño 43
2.9.2 Ventajas y limitaciones 45
2.10 CALIDAD DEL AGUA TRATADA DE ACUERDO CON LA NORMATIVIDAD VIGENTE 46
2.11. CARACTERÍSTICAS DE LAS VIVIENDAS DE MÉXICO 47
2.11.1 Población y vivienda 47
2.11.2 Abastecimiento de agua potable y saneamiento 49
3.JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS 52
3.1 Justificación 52
3.2 Objetivos. 54
3.2.1 Objetivo general 54
3.2.2 Objetivos específicos 54
4. METODOLOGÍA 55
4.1. Evaluación y selección de tecnologías 56
4.2. Aspectos Técnicos 57
4.3 Aspectos económicos 58
4.4. Aspectos ambientales 58
4.5. Matriz de decisiones 59
5. RESULTADOS 62
5.1 DISEÑO DE LAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO 62
5.1.2 Memoria de cálculo para el diseño del tanque séptico 62
5.1.3 Memoria de cálculo para el dimensionamiento de la cámara uno 63

5.1.4 Memoria de cálculo para el dimensionamiento de la cámara dos séptico 64
5.1.5 Comprobación de diseño 64
5.2 Eficiencias de remoción 64
5.2.1 Eficiencia de remoción de DBO_5 65
5.2.3 Eficiencia de remoción de DQO 65
5.2.4 Eficiencia de remoción de SST 65
5.3 Carga orgánica 66
5.4 Planos del tanque séptico 67
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 69
7. CONCLUSIONES 70
8. REFERENCIAS 71
ANEXO 1 83
ANEXO 2 84
ANEXO 3 85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición típica promedio de aguas residuales domésticas 6
Tabla 2. Composición promedio de las aguas negras (Metcalf y Eddy,1995). 7
Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos típicos de las aguas grises (Guerra Moreno, 2019). 8
Tabla 4. Número de sitios de monitoreo con datos para cada indicador de calidad del agua, 2020 (SINA,2021) 10
Tabla 5. Escala de clasificación de calidad de agua DBO5 (mg/l), (SINA,2021). 11
Tabla 6. Grados de clasificación de calidad de agua DQO (mg/l), (SINA,2021). 11
Tabla 7. Grados de clasificación de calidad de agua SST (mg/l), (SINA,2021). 12
Tabla 8. Grados de clasificación de calidad de agua CF (NMP/100ml), (SINA,2021). 13
Tabla 9. Aportaciones promedio de contaminantes por habitante, (CONAGUA, 2019b). 14
Tabla 10. Eficiencias de remoción de los humedales artificiales (Díaz García y Paredes Ramos, 2022). 30
Tabla 11. Características de diseño y rendimiento para humedales artificiales (Crites, Middlebrooks, Bastian y Reed, 2014). 31
Tabla 12. Eficiencias de remoción de tanques sépticos (Seoánez Calvo y Gutiérrez de Ojesto, 1999). 35
Tabla 13. Profundidad del tanque con respecto a la población (CONAGUA, 2019d). 39
Tabla 14. Cálculos para el diseño de tanques sépticos en función de la población (CONAGUA, 2019d). 41
Tabla 15. Dimensiones para las cámaras de tanques sépticos con base en la población (CONAGUA, 2019d). 41
Tabla 16. Fórmulas para dimensionar la cámara de sedimentación de tanques imhoff (OPS, 2005). 44
Tabla 17. Criterios de diseño de un tanque imhoff (Arroba, Arroba, 2017). 44
Tabla 18. Factores de capacidad relativa respecto a la temperatura y tiempo de digestión, (OPS,2005) 45
Tabla 19. Normas aplicables para el tratamiento de aguas residuales 46
Tabla 20. Infraestructura hidráulica de la Ciudad de México (Martínez Macedo, 2018). 50
Tabla 21. Abastecimiento y dotación de agua potable en la ciudad de México (SEDEMA, 2019). 51
Tabla 22. Propuestas de tecnologías descentralizadas (elaboración propia). 57
Tabla 23. Matriz de decisiones para la selección de tecnología descentralizada (elaboración propia). 59
Tabla 24. Matriz de decisiones para evaluar los humedales artificiales 60
Tabla 25. Matriz de decisiones para evaluar los tanques sépticos. 60
Tabla 26. Matriz de decisiones para evaluar los tanques imhoff. 61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aguas residuales domésticas, (Flowen, 2021).....5
Figura 2. Indicadores de calidad del agua, (CONAGUA, 2021a).....9
Figura 3. Sistema de tratamiento centralizado, (Shanaghan,2019). 17
Figura 4. Tren de tratamiento (Arias Gómez y Rodríguez Sánchez, 2021). 20
Figura 5. Distribución de plantas de tratamiento de aguas residuales en México, (adaptado de CONAGUA, 2019). 21
Figura 6. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, (CONAGUA,2019). 21
Figura 7.Sistema de lodos activados (Valdevielso, 2020). 22
Figura 8. PTAR Atotonilco, Hidalgo (Ayesa,2018). 23
Figura 9.Tren de tratamiento de aguas de la PTAR Atotonilco (Futurenviro,2015). 24
Figura 10. Tratamiento descentralizado (Graham et al, 2019).....26
Figura 11. Humedal artificial del Bosque de San Juan de Aragón (Gaceta UNAM, 2020). 27
Figura 12. Tipos de humedales artificiales (iagua, 2015). 28
Figura 13. Humedal artificial de flujo superficial (Moron, 2018).....28
Figura 14. Humedal artificial de flujo subsuperficial (Moron, 2018). 29
Figura 15. Sistema de tanque séptico (CONAGUA, 2019c).....33
Figura 16. Partes de un tanque séptico (Cáceres Magnus, 2018).....35
Figura 17. Tanque séptico de una cámara, (deagua,2020).....36
Figura 18. Tanque séptico de dos cámaras (deagua, 2020).....36
Figura 19. Tanque séptico de tres cámaras (deagua, 2020). 37
Figura 20. Tanque Imhoff (Salas, 2020).....42
Figura 21. Distribución de viviendas habitadas a nivel nacional (INEGI,2020).....47
Figura 22. Distribución de viviendas habitadas en la Ciudad de México (INEGI,2020). 48
Figura 23. Tamaños de construcción de las viviendas en México (INEGI, 2020). 48
Figura 24. Fuentes de abastecimiento de agua en la ciudad de México (Agua, 2021). 49
Figura 25. Diagrama de flujo 55
Figura 26. Planos del tanque séptico con 2 cámaras. 67

RESUMEN

En este proyecto se investigaron los fundamentos de configuración y operación de las tecnologías del tratamiento de aguas residuales existentes, estableciendo para ello contrastes y semejanzas entre ellas, sus beneficios y limitaciones, así como el aforo y las demandas técnicas típicas para su correcto desempeño. Se investigaron, de manera general, los criterios sobre tratamiento, las tecnologías actuales, su desarrollo y las propiedades a considerar para la configuración de sistemas de tratamiento para aguas residuales de origen doméstico, haciendo énfasis en la inclusión de principios sustentables y un enfoque descentralizado. Particularmente, se estudiaron aspectos técnicos de las diferentes tecnologías, tales como las eficiencias de remoción de contaminantes, carga orgánica y tiempo hidráulico promedio de operación, los costos de construcción e instalación, demanda de área para su instalación y de energía para su operación.

Se planteó como caso de estudio la alcaldía de Iztapalapa, considerándola como una zona donde se necesitan el tratamiento *in situ* de aguas residuales debido al desabasto hídrico que tiene dicha zona. Para ello, se definieron las particularidades del influente a tratar, considerando datos reportados en la literatura, el caudal producido, tipos de contaminantes y su concentración, así como la normatividad aplicable para la descarga del agua tratada y el uso de esta. Se consideraron los impactos socioeconómicos y ambientales derivados de la instalación de tecnologías descentralizadas en la población objetivo, de acuerdo con factores como el consumo de agua y abastecimiento otorgado a la población, la densidad de la población, la amenaza de contaminar el acuífero local, la infraestructura actual, costos de los sistemas y asequibilidad para la población.

De tal forma que se tomaron en cuenta los sistemas más robustos y eficientes que permitan producir agua reusable al menor costo, para reducir así el impacto al ambiente por la sobredemanda de agua para el consumo humano, tomando en consideración en todo momento la protección de la salud.

Así, se diseñó un tanque séptico con dos cámaras para servir a una comunidad de 50 habitantes, con un abasto de 235 litros por habitante al día, considerando un tiempo de retención hidráulica de 1.5 días. Con la proyección del tanque séptico se obtuvieron concentraciones de contaminantes en el efluente de, 23 mg/l de DBO, 187 mg/l de DQO, 22.1 mg/l de SST y una carga orgánica de 0.026 kg/ m^3-l. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece las concentraciones de contaminantes en las aguas tratadas para su reuso, las aguas residuales tratadas pueden ser utilizadas en servicios públicos de contacto indirecto u ocasional.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del desarrollo sustentable número 6 de la agenda 2030 busca preservar los recursos hídricos y su administración sostenible, así como el acceso a saneamiento básico para la población mundial, de tal manera que la población tenga conexión a los medios de agua potable y saneamiento de manera equitativa e higiénica. Dentro de este enfoque, se considera fundamental el desarrollo de soluciones sustentables para solucionar las deficiencias en las instalaciones para el tratamiento de las aguas servidas y, a su vez, mejorar los sistemas de abastecimiento de agua (Cepal, 2018).

En este sentido, es innegable que la disposición y conexión al agua son sumamente importantes para asegurar y resguardar la salud y bienestar de la sociedad. La incorporación al abastecimiento de agua para consumo humano y al saneamiento dependen de la correcta gestión de estos recursos, lo que implica considerar los diversos contextos sociales y económicos al momento de tomar decisiones, de tal manera que cualquier ciudadano sea capaz de gozar de los beneficios y oportunidades que ofrece la libre incorporación al agua y servicios de saneamiento de calidad (Ferro, 2017b).

De acuerdo con el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos (UNESCO, 2019), a partir de los años ochenta del siglo XX, el consumo del agua ha ido incrementando a una tasa anual del 1%, lo cual ha sido impulsado por la expansión poblacional, el avance socioeconómico y la transición de los patrones de consumo. Las estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas también indican que aún existen 4 billones de habitantes en el mundo que no disponen de instalaciones sanitarias básicas, como retretes o letrinas (principalmente en zonas rurales) y, peor aún, más de 67 millones de habitantes aún evacuan al aire libre (Agenda 2030, 2017).

Adicionalmente, más del 80% de las aguas servidas provenientes de las practicas humanas se desembocan en cuerpos de agua sin ningún tratamiento previo, generando graves problemas de contaminación. Aunado a esto, se estima que la demanda mundial de agua continuará incrementando a un ritmo similar hasta el año 2050, lo cual supone un crecimiento del 20 al 30% al actual consumismo, en virtud especialmente del crecimiento en la industria y el uso doméstico (Pérez Martínez y Hernández Gil, 2020).

En México, las estadísticas de los recursos hídricos reportadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018a) muestran que el alcance nacional de conexión al agua encauzada es de 95.3% de la población (97.8% urbana, 87% rural), mientras que el 94.4% de la población (97.4% urbana, 85.0% rural) cuenta con cobertura de agua en la vivienda o predio. En cuanto a la cobertura de alcantarillado, el 92.8% de la población (97.4 %urbana, 77.7% rural) tiene acceso a los servicios saneamiento básico y el 91.4% (96.6 urbana, 74.2 % rural) de la población tiene acceso a red pública o fosa séptica.

Bajo el contexto descrito, actualmente se trata sólo el 63% de las aguas residuales colectadas en el alcantarillado, valor que se encuentra por debajo de otros países de América Latina, como Argentina y Chile, que superan el 80% de cobertura del servicio (de Anda Sánchez, 2017b). Cerca del 60% de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son centralizadas, por lo cual las aguas residuales de diferentes orígenes se mezclan, transportan y tratan en grandes instalaciones, lo que genera inseguridad en la reutilización del agua, además de implicar altos costos de operación y de infraestructura.

Sumado a esto, el daño ambiental es proporcional a la cantidad de PTAR sin operar, puesto que se trata sólo el 72.7% de la capacidad instalada (CONAGUA, 2018a). En la zona urbana se trata el 87.5% de las aguas residuales colectadas, mientras que en las áreas rurales se trata sólo el 38.4%.

Ante esta problemática, una solución es el uso de tecnologías descentralizadas, las cuales se distinguen por ser unidades de tratamiento robustas, de fácil operación y con menores costos que las tecnologías centralizadas. De esta manera, este trabajo busca seleccionar y diseñar tecnologías descentralizadas utilizando herramientas de decisión, para procesar aguas residuales domésticas, con el fin de conseguir mayor control y mejora de la calidad del agua y, al mismo tiempo, contar opciones de tratamiento adaptadas al contexto nacional.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CLASIFICACIÓN Y COMPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES

La composición de las aguas residuales depende de las fuentes en donde se producen y esta se refiere a los componentes físicos, químicos y biológicos de las mismas. Así, las aguas residuales se clasifican en domésticas, municipales, pluviales, industriales y agrícolas (Caldes, 2020). Las primeras están constituidas por residuos de jabón, orina, heces fecales, y detergentes usados durante las actividades cotidianas en las casas habitación. Como producto de dichas descargas, las aguas servidas generalmente muestran altas concentraciones de fósforo, nitrógeno y compuestos orgánicos (INNOTEC LABORATORIOS, 2021), además de microorganismos patógenos que pueden representar un riesgo a la salud. Por otra parte, las aguas residuales pluviales están constituidas por el agua producida por precipitación natural que no es absorbida por el suelo y, por ello, fluye en los sistemas de alcantarillado y de drenaje pluvial (Valdevieso, 2020).

2.1.1 Características físicas

Respecto a las características físicas se encuentran los sólidos suspendidos totales (SST), la temperatura, el color, el olor y la turbidez (Giraldo Jurado Lozada Cadeño, 2019). El origen de los SST se da por la erosión del suelo y las aguas servidas. Los SST del agua residual están constituidos por los sólidos sedimentables, suspendidos y coloidales. Estos se miden gravimétricamente al ser retenerse mediante un filtro de fibra de vidrio con un orificio de 1,5 µm, desecado y llevado a evaporación a 105 ± 2 grados centígrados de acuerdo con la NMX-AA-034-SCFI-2015.La variación de los SST es dependiente del origen de las aguas, meses del año, temperatura y precipitaciones. El aumento de este parámetro provoca que un cuerpo de agua disminuya su capacidad de tolerar la variedad de la vida acuática (Labprocess, 2021). La temperatura constituye un parámetro muy importante por sus efectos en las velocidades de las reacciones químicas y en la aplicabilidad del agua a diversas aplicaciones. De acuerdo con Metcalf y Eddy (2003), explican que la variación en la temperatura puede repercutir en una variación en la solubilidad del oxígeno, cambios en la velocidad de sedimentación, aumento de la toxicidad de muchas sustancias.

El color es el resultado del deterioro natural del material orgánico. El agua residual en estado reciente suele ser gris al darse la descomposición de ésta, por medio de las bacterias. Mientras que el agua séptica se da en ausencia de oxígeno disuelto y el color de esta agua se torna a negro. El color puede variar en cuanto a la composición química y la edad del agua residual (Pire,2019). El olor se debe a la producción de gases originados por la desintegración de la materia orgánica. El agua residual séptica tiene un olor característico a huevo podrido, producido por los microrganismos en condiciones anaerobias al reducir los sulfatos a sulfitos (Pire, 2019). La importancia de la turbidez radica en la transmisión de la luz a través del agua, por lo cual se considera un indicador de calidad y esta se relaciona con el material residual y coloidal en suspensión (Ávila Rojas Y Villanueva Montealegre, 2020).

2.1.2 Características químicas

En cuanto a parámetros químicos se encuentran el pH, la alcalinidad, DBO_5, DQO y oxígeno disuelto (Pire, 2019). El pH es un parámetro de calidad de agua que indica la concentración ideal para la vida acuática y el consumo humano. Este parámetro indica la acidez o la alcalinidad del agua. Su escala es logarítmica con valores de 0 a 14 unidades, siendo 7 la medida neutra. Cuando esta escala incrementa el agua presenta un pH básico y si esta disminuye el pH que presenta es ácido. La importancia del pH radica en las reacciones químicas que pueden alterar la acumulación de otros elementos contenidos en el agua modificando el nivel de toxicidad. Mientras que la alcalinidad mide la capacidad que tiene el agua para tolerar cambios de pH (García, 2019).

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) es el oxígeno disponible que posee un agua para que microorganismos como bacterias (aeróbicas o anaeróbicas), plancton y hongos, consuman durante la desintegración de las sustancias orgánicas contenidas en esta. La DBO_5 representa la cantidad de oxígeno requerida para oxidar el material orgánico por mecanismos químicos y convertirla en CO_2 y H2O. Este es un proceso biológico, siendo un proceso que depende de la temperatura, que se realiza a condiciones estándar (a 20°C durante 5 días). De manera general cuanta más contaminada este el agua, mayor será la demanda de DBO (LABOMERSA, 2021).

El desarrollo de los organismos aerobios se da en presencia del oxígeno disuelto. La importancia del oxígeno disuelto está en evitar olores desagradables y en ser un indicador importante para preservar la vida en los ecosistemas acuáticos. Pues este parámetro es responsable de la descomposición de la materia orgánica y de la respiración de los organismos aerobios. Las altas concentraciones de oxígeno disuelto en los ecosistemas acuáticos favorecen las condiciones de un ecosistema saludable y estable que permite preservar la diversidad de los organismos (TECPA, 2022).

2.1.3 Características biológicas

Las características biológicas se representan por la presencia de microorganismos y bacterias que se miden en función de los coliformes totales y fecales. Los coliformes totales son bacterias Gram- Negativas, no esporuladas con morfología de bastón, con la capacidad de crecer en condiciones aerobias y anaerobias en presencia de sales binarias o bien de otros agentes de superficie activos con similares propiedades inhibitorias del crecimiento (Sotil Flores, 2017). Por otra parte, los coliformes fecales son organismos termo tolerantes (soportan temperaturas de hasta 45°C). La presencia de los coliformes indica contaminación en el agua, derivada de residuos de excretas humanas, de animales, de la erosión del suelo o bien de una combinación de las tres fuentes mencionadas. Estos microorganismos son específicos para representar problemas en la salud, como es el caso de *Escherichia Coli* y *Aerobacter* (Achircana Mamani y Mestas Castro, 2020).

2.1.4 Aguas residuales domésticas

Respecto a las descargas de aguas residuales municipales se encuentran las aguas residuales domésticas, que son generadas en las actividades cotidianas en viviendas, restaurantes, centros comerciales, escuelas y lavanderías. A su vez estas aguas residuales pueden subdividirse en aguas negras y aguas grises como se muestra en la figura 1 (Eco Intellutions, 2019). Las aguas residuales domésticas tienen características físicas, químicas y biológicas que son esenciales para el desempeño de los medios de tratamiento de aguas residuales.

Según la UNESCO (UNESCO, 2017), el caudal producido de aguas residuales domésticas es de 174.57 litros por habitante por vivienda por segundo considerando que la composición de las aguas residuales domésticas es heterogénea química, física y biológicamente. Sin embargo, las concentraciones de los parámetros antes mencionado pueden fluctuar en el tiempo, ya sea por el aumento poblacional, así como por la influencia de factores geográficos locales. En la tabla 1 se muestra la composición típica promedio de aguas residuales domésticas.

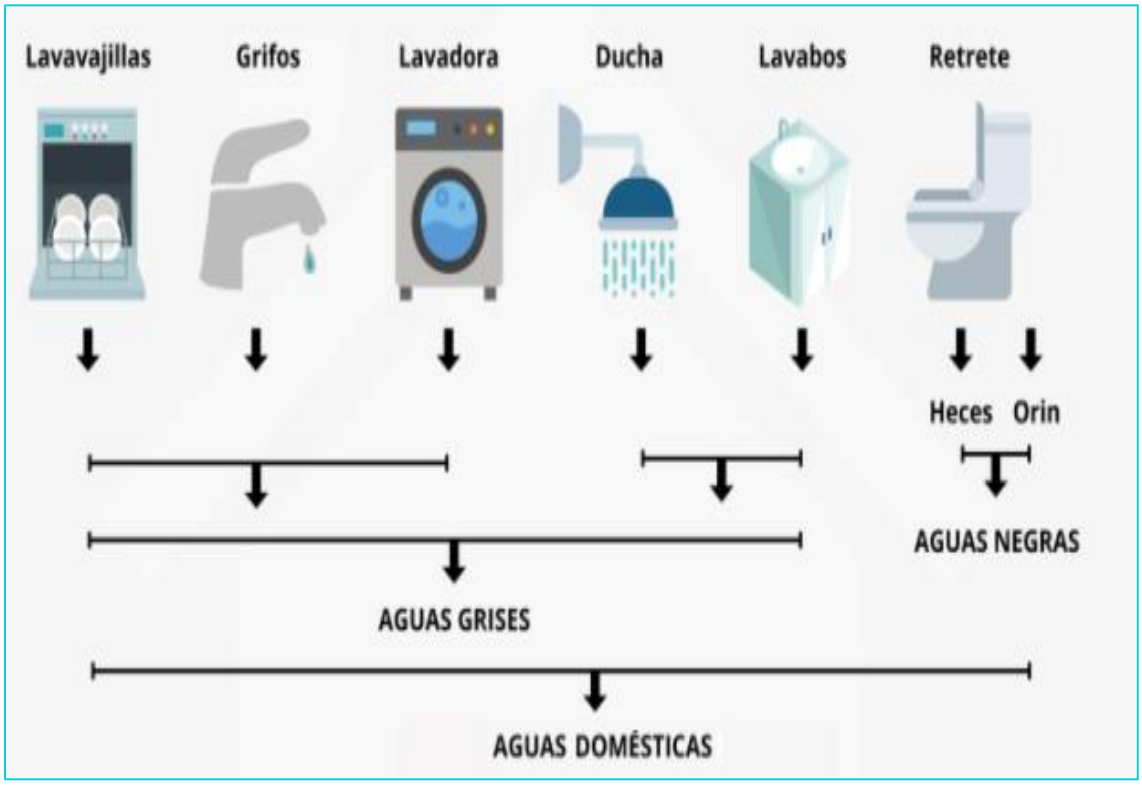


Figura 1. Aguas residuales domésticas, (Flowen, 2021)

Tabla 1. Composición típica promedio de aguas residuales domésticas

Autor	Parámetro	Valor
Metcalf y Eddy (2003)	SST	220 mg/L
	Temperatura	23°C
	Turbidez	146.68 NTU
Bódalo y Gómez (2002)	pH	7.2 unidades
	Conductividad	532.94 µS/cm
	Alcalinidad	100 mg/L de $CaCO_3$
	DBO_5	280 mg/L
	DQO	614 mg/L
	Coliformes Totales	225 NMP/100ml
CONAGUA (2019b)	Sólidos totales	720 mg/L
	Solidos disueltos totales	500 mg/L
	Solidos fijos	300 mg/L
	Solidos volátiles	200 mg/L
	Solidos suspendidos fijos	55 mg/L
	Solidos suspendidos volátiles	165 mg/L
	Sólidos sedimentables	10 ml/L
	Carbono orgánico total	160 ml/L
	Nitrógeno total	40 ml/L
	Fosfatos (como P)	8 ml/L
	Grasas	100 ml/L

2.1.5 Composición de las aguas negras

Las aguas negras son aquellas que contienen desechos humanos, materia orgánica y minerales. La composición típica de las aguas negras se muestra en la tabla 2. En cuanto a los desechos humanos se encuentran la orina y las heces fecales, estos desechos tienen un alto contenido de microorganismos que pueden generar enfermedades si no se les da un tratamiento (CBR ingeniería, 2021). Sus características biológicas se relacionan directamente con las concentraciones traza de coliformes fecales y totales, frecuentemente con *Escherichia Coli* generados principalmente los desechos humanos (Fibras y Normas de Colombia, 2019).

Tabla 2. Composición promedio de las aguas negras (Metcalf y Eddy,1995).

Parámetro	Valor
SST	40 000 mg/L
DBO_5	6 000 mg/L
DQO	30 000 mg/L
pH	7 unidades

Sin embargo, de acuerdo con Rueda Morales (2019), también contienen nutrientes como el nitrógeno (90% en orina, 10% en heces), fósforo (65% en orina, 35% en heces) y potasio (73% en orina, 27% en heces). El tratamiento adecuado de estos residuos puede generar oportunidades para producir energía como es el caso del biogás o como fertilizantes para la agricultura. Sin embargo, se requiere especial tratamiento para disminuir los riesgos a la salud de la población y al medio ambiente (aecid, 2017).

2.1.6 Composición de las aguas grises

Las aguas grises son generadas en las lavadoras, fregaderos, duchas y cocinas. Este tipo de agua tiene una composición variada, puesto que contienen detergentes, residuos de productos de higiene personal y cosméticos, grasas, desperdicios de alimentos y lavado de autos (Dutch Water Tech, 2021).

Las características y la composición fisicoquímica y biológica dependen de acuerdo con el tipo de productos químicos que se utilizan en las actividades que se desarrollan en las viviendas o servicios. Por ello se utilizan parámetros fisicoquímicos que permiten su caracterización tales como; temperatura, dureza, oxígeno disuelto, alcalinidad, DBO_5, DQO, Sólidos totales (ST), sólidos suspendidos (SS), conductividad, pH, grasas y aceites como se muestra en la tabla 3 (Peñaherrera Mora y Altamirano Carrasco, 2020).

Dentro de las características físicas se encuentran el color, la turbidez, la conductividad eléctrica, y la temperatura. La presencia del color gris es la característica principal de este tipo de aguas y se debe a la turbidez al estar combinada el agua potable y el agua residual (Fibras y Normas de Colombia, 2019). En cuanto a las características químicas depende principalmente a la concentración de detergentes y otros productos químicos sintéticos compuestos de fosfatos, nitratos y agentes tensoactivos, que contiene los productos de *limpieza, (*Guerra Moreno, 2019). Las características químicas que presentan son la presencia de grasas y aceites (10%), carbohidratos (25% a 50%), proteínas (40% a 60%), agentes tensoactivos y nutrientes.

Este tipo de aguas contiene sales, grasas y nutrientes en menor cantidad en comparación con las aguas negras. En la tabla 3 se muestra la composición fisicoquímica de las aguas grises, *s*in embargo, se pueden encontrar contaminantes traza de compuestos como aluminio, fosforo, sulfatos, zinc, calcios derivados de las actividades realizadas en las viviendas y los lugares antes mencionados (Peñaherrera Mora y Altamirano Carrasco, 2020).

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos típicos de las aguas grises (Guerra Moreno, 2019).

Parámetro	Valor
DBO_5	90- 290 mg/l
SST	45-330 mg/L
Coliformes totales (CT)	10^1- 10^6 UFC/100 ml
Turbidez	22- 200 NTU
Temperatura	18 – 30 °C
Conductividad	300 a 1.500 µS/cm
pH	6 a 8 unidades

En cuanto a los caudales producidos, estos tienen una composición típica como se mostró en la tabla 1 del apartado 2.1.5. Las aguas residuales domésticas no integran a las de origen industrial, y cerca del 99.9% de las aguas residuales domesticas entre un 40 y 70 % de los SST son orgánicos. El nivel de procesamiento requerido y las condiciones para manipular los sólidos del sistema de tratamiento, se determina a partir de la concentración de los sólidos suspendidos sedimentables presentes en el influente. Por ello se toma como referencia una aportación de 70 gramos de solidos suspendidos por persona al día.

El pH puede variar directamente en la entrada de sustancias básicas o ácidas (sintéticas o naturales) y de la temperatura. Esto se da porque a temperaturas elevadas, las moléculas propenden a separarse sus átomos hidrógeno y oxígeno. Al producirse esta separación, aumenta la producción de hidrógeno y por tanto el pH (Avendaño Rivera, 2018). La conductividad puede variar por la presencia de sales inorgánicas que al disolverse en el agua no se disocian (Carbotecnia, 2021).

La alcalinidad varia principalmente en las cantidades de hidróxidos, carbonato y bicarbonatos de elementos como el calcio, magnesio, sodio, potasio y amoniaco siendo los más comunes el bicarbonato de calcio y el de magnesio (Barreto Pardo et al., 2019). La DBO varia en cuanto a la cantidad de bacterias (aeróbicas o anaeróbicas) hongos y plancton y la temperatura (20°C), puesto que estos microorganismos consumen el oxígeno en la degradación de la materia orgánica.

La DQO varia con respecto a la cantidad de material orgánico e inorgánico, pues entre mayor sea la cantidad de contaminantes mayor será la demanda química de oxígeno (Duran Quintero y Gonzales Baquero, 2022). En cuanto a los coliformes totales varia cuando existe una vía de contaminación con aguas negras o desechos en descomposición, las cuales al ingresar pueden utilizar esta vía para ingresar al suministro de agua (Torres Rivero, 2020).

2.2 CONTAMINANTES PRINCIPALES DE LAS AGUAS RESIDUALES Y CALIDAD DEL AGUA

Dentro de los contaminantes principales que constituyen a las aguas residuales se encuentran los sólidos suspendidos, patógenos, nutrientes y la materia orgánica. La importancia de estos contaminantes radica en que son los principales indicadores de la calidad del agua, la cual se determina a través de sus características físicas y químicas. Estos niveles de calidad se miden mediante cuatro indicadores (figura 2); DBO_5, DQO, SST, CF y concentración de nutrientes (SINA, 2022).

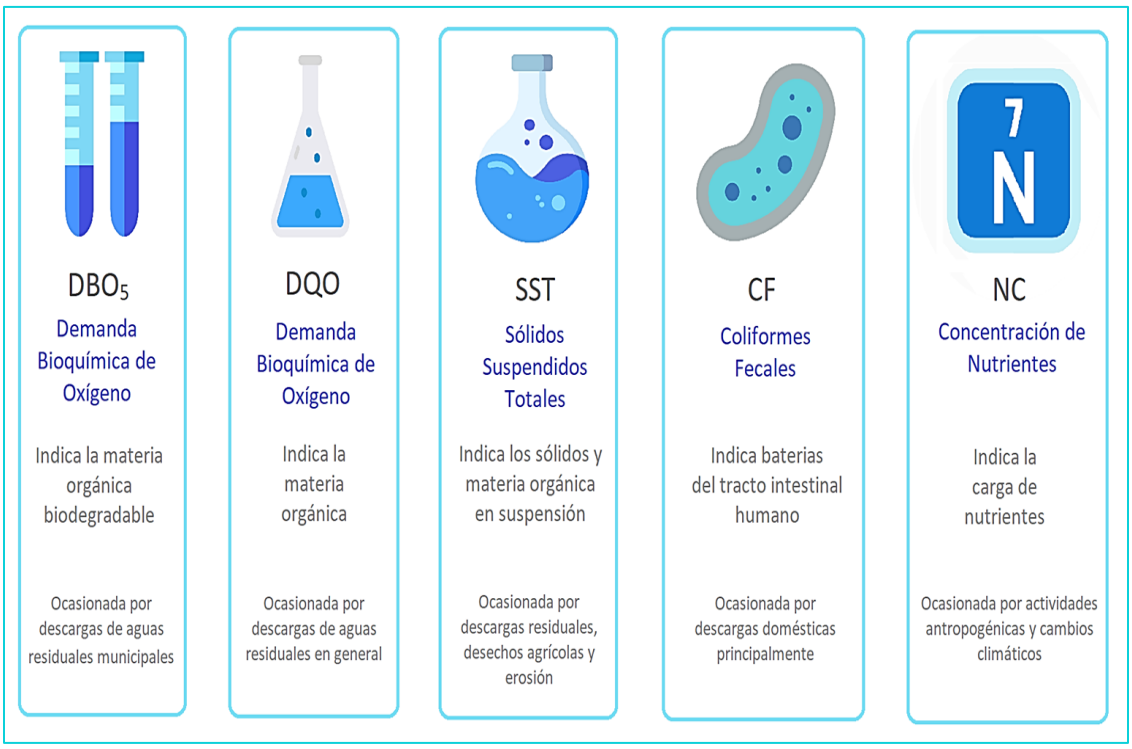


Figura 2. Indicadores de calidad del agua, (CONAGUA, 2021a).

La DBO_5 se vincula con la cantidad de oxígeno disuelto que consumen los microorganismos, mientras que la DQO mide la porción total de materia orgánica que puede oxidarse, sin importar su grado de biodegradabilidad (Olivera Ángeles, 2021). El aumento de las concentraciones de estos parámetros incide en la disminución de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua, y por consiguiente la repercusión en los ecosistemas acuáticos. Su determinación es útil para conocer la cantidad cercana de oxígeno para estabilizar la materia orgánica y con ello determinar el grado de contaminación del agua. Comúnmente, la DQO debe ser mayor que la DBO_5 puesto que existe una mayor cantidad de compuestos susceptibles a la oxidación química que a la oxidación biológica (SINA, 2022).

El indicador de SST es de utilidad para evaluar la cantidad de sólidos que puedan hacer que un cuerpo de agua pierda la capacidad de sostener la vida acuática, mientras que los coliformes totales son un indicador de la concentración de un grupo especial de bacterias que, si se detectan en altas cantidades en los influentes , representan un foco de infección, por ello se consideran como un indicador de calidad ambiental (Semanate, 2020). En 2020 en México los indicadores de calidad del agua se realizaron conforme a lo establecido en la tabla 4, con los resultados consignados en las tablas 5, 6, 7 y 8 (SINA,2021).

Tabla 4. Número de sitios de monitoreo con datos para cada indicador de calidad del agua, 2020 (SINA,2021).

Indicadores de calidad del agua	**Número de sitios de monitoreo**
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)	2581
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	2581
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	3489
Coliformes Fecales (CF)	2582

De acuerdo con sitios de monitoreo en los que se evaluó la DBO5 (Tabla 4.1), 52% se registraron en azul, 12% en verde, 26% en amarillo, 8% en naranja y 2% en rojo. Respecto a la DQO, 31% se registraron en naranja, 25% en amarillo, 5% en rojo, 22% en azul y 18% en verde. En relación con los SST, 51% se registraron en azul, 29% en verde, 9% en amarillo, 7% en naranja y 4% en rojo. En cuanto a los CF, 34% se encontraron en rojo, 29% en naranja, 18% en amarillo, 15% en azul, y el 4% en verde (SINA,2021).

Con base a estos resultados, el 90% de los sitios de monitoreo de la DBO cumplen con los limites aceptables de calidad del agua y un 10% presenta un incumplimiento a los límites de calidad del agua. Mientras que el 65% de los sitios de monitoreo de la DQO cumplen con los límites de calidad y un 35% incumple con los límites. Respecto a los sitios de monitoreo de SST, el 89% cumplen con los límites de calidad del agua y un 11% presenta un incumplimiento.

En relación con los CF 37% cumplen con los límites de calidad del agua y el 63% incumple con los límites de calidad del agua lo cual es perjudicial para la salud. Es importante mencionar que los sitios de monitoreo para la calidad del agua están ubicados en zonas con alta influencia antropogénica (SINA,2021). Debido a los altos índices de contaminación que muestran la mayoría de los cuerpos de agua en nuestro país, se requiere del tratamiento de las aguas residuales para su depuración antes de que sean descargadas en los cuerpos receptores. En la tabla 9 se muestra la aportación de contaminantes por habitante al día.

Tabla 5. Escala de clasificación de calidad de agua DBO5 (mg/l), (SINA,2021).

0< DBO_5 ≤3	**Excelente**	**No contaminada**	**Azul**
3< DBO_5 ≤6	**Buena Calidad**	Concentración mínima de materia orgánica biodegradable en aguas superficiales	**Verde**
6< DBO_5 ≤30	**Aceptable**	Indicio de contaminación. Las aguas superficiales se pueden auto depurar o con efluentes tratados biológicamente	**Amarillo**
30<DBO_5≤120	**Contaminada**	Contenido de aguas crudas particularmente municipales en las aguas superficiales.	**Naranja**
120<DBO_5	**Fuertemente contaminada**	Contenido de aguas crudas de aguas crudas de origen municipal y no municipal, con alto impacto en las aguas superficiales.	**Rojo**

Tabla 6. Grados de clasificación de calidad de agua DQO (mg/l), (SINA,2021).

0< DQO ≤10	**Excelente**	**No contaminada**	**Azul**
10< DQO ≤20	**Buena Calidad**	Concentración mínima de materia orgánica biodegradable en aguas superficiales	**Verde**
20< DQO ≤40	**Aceptable**	Indicio de contaminación. Las aguas superficiales se pueden auto depurar o con efluentes tratados biológicamente	**Amarillo**
40<DQO≤200	**Contaminada**	Contenido de aguas crudas particularmente municipales en las aguas superficiales.	**Naranja**
200< DQO	**Gravemente contaminada**	Contenido de aguas crudas de aguas crudas de origen municipal y no municipal, con alto impacto en las aguas superficiales	**Rojo**

Tabla 7. Grados de clasificación de calidad de agua SST (mg/l), (SINA,2021).

0< SST≤25	**Excelente**	Muy buena calidad sin alteraciones.	**Azul**
25< SST≤75	**Buena Calidad**	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable	**Verde**
75< SST≤150	**Aceptable**	Indicios de contaminación en aguas superficiales, contenido de efluentes tratados biológicamente. Condiciones regulares para peces y restricciones para el riego agrícola.	**Amarillo**
150< SST≤400	**Contaminada**	Mala calidad de las aguas superficiales, contenido de aguas servidas crudas. Contenido elevado de material suspendido.	**Naranja**
400< SST	**Fuertemente contaminada**	Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Mala condición para peces.	**Rojo**

Tabla 8. Grados de clasificación de calidad de agua CF (NMP/100ml), (SINA,2021).

0< CF≤100	**Excelente**	Sin evidencia de cambios en los valores bacteriológicos de calidad para la zona superficial de los cuerpos de agua.	**Azul**
0< CF≤100	**Buena Calidad**	Calidad aceptable para los ecosistemas acuáticos y su uso recreativo. Índices de alteraciones en la calidad bacteriológica.	**Verde**
0< CF≤100	**Aceptable**	La calidad es aceptable para abastecimiento y riego agrícola. Presenta niveles bajos de alteración ante las actividades antropogénicas.	**Amarillo**
0< CF≤100	**Contaminada**	Presenta contaminación bacteriológica con alteraciones fuera de las condiciones normales.	**Naranja**
0< CF	**Fuertemente contaminada**	Presenta contaminación bacteriológica y alteración severa en aguas superficiales.	**Rojo**

Tabla 9. Aportaciones promedio de contaminantes por habitante, (CONAGUA, 2019b).

Parámetro	Aportación (g/hab*día)	Aportación (mg/hab*día)
DBO	54	0.054
DQO	110	0.11
Nitrógeno total (NT)	8	0.008
Fosfatos totales	4.6	0.00046
Sólidos totales (ST)	243	0.243
Sólidos suspendidos totales (SST)	52	0.052
Sólidos totales dispersos	191	0.191
Sólidos volátiles	95	0.095
Sólidos volátiles suspendidos	36	0.036
Sólidos volátiles dispersos	59	0.059
Sólidos totales fijos	148	0.148
Sólidos fijos suspendidos	16	0.016
Sólidos fijos dispersos	132	0.132

2.3 PARAMETROS RELEVANTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

2.3.1 Eficiencia de remoción de contaminantes

La eficiencia de remoción de contaminantes es un parámetro de gran importancia en la elección de un sistema de tratamiento puesto que con ello se calcula el porcentaje de contaminantes que es capaz de eliminar un sistema. Esta eficiencia está dada por la siguiente ecuación (Metcalf y Eddy, 2003):

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} x100$$

Donde:
E= Eficiencia de remoción de carga contaminante (%)
S= Carga contaminante de salida (mg/L)
So= Carga contaminante de entrada (mg/L)

2.3.2 Carga orgánica

La carga orgánica es la dosis de materia orgánica biodegradable, siendo que se aplica para el diseño de sistemas de tratamiento de agua residual. Este parámetro se calcula mediante la siguiente ecuación (Metcalf y Eddy, 2003):

$$Carga\ org\acute{a}nica = \frac{(Q)(S)}{V}$$

donde:
Q = Flujo de agua residual afluente, [m^3/d]
S = Concentración de sustrato en el afluente, DBO [kg / m^3]
V = Volumen del tanque de aireación [m^3]

2.3.3 Tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica se refiere al tiempo de permanencia del flujo de agua en un sistema de tratamiento desde la captación hasta el suministro de esta. Este parámetro se obtiene mediante la siguiente formula (Metcalf y Eddy, 2003):

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

donde:
V = Volumen del tanque de aireación [m]
Q = Influente, [m^3/d]

2.4. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de aguas residuales consiste en la eliminación de sustancias componentes orgánicos e inorgánicos, que contaminan el agua, los cuales pueden estar en forma de partículas suspendidas y/o disueltas (CONAGUA, 2018). Generalmente el objetivo del proceso es la producción de agua tratada con un nivel de calidad adecuado para ser descargada a un cuerpo de agua o bien para la reutilización directa, tomando como referencia la normatividad aplicable (IANAS y UNESCO, 2019).

Esto se cumple a través de la implementación de operaciones unitarias de tratamiento basadas en procesos fisicoquímicos y biológicos con respecto a las particularidades del influente a tratar y la calidad deseada del efluente (CONAGUA, 2020). Dentro de las tecnologías para procesar las aguas servidas se encuentran las tecnologías centralizadas y descentralizadas. Las primeras son convenientes para tratar grandes volúmenes de agua provenientes de poblaciones enteras, mientras que las segundas son adecuadas para el tratamiento de menores caudales, generados en una o un conjunto de viviendas o comunidades pequeñas (Polanía Janzasoy y Calderón Vallejo, 2018).

2.4.1 TRATAMIENTO CENTRALIZADO DE AGUAS RESIDUALES

Las tecnologías centralizadas son sistemas de recolección de agua residual producida en casas habitación, áreas comerciales, plantas industriales, instituciones y transportes públicos donde al final del sistema, si es que hay un tratamiento, habitualmente se da en una planta de aguas residuales ubicada a las afueras de la ciudad. Sin embargo, estos sistemas de tratamiento generan costos elevados de construcción y operación debido al alto consumo energético, dificultando aún más la recuperación del agua convirtiéndose en un sistema no sostenible (Alvarado Granados et al., 2018). Como ya se mencionó, cerca del 60% de las PTAR que existen en México son centralizadas, siendo los principales procesos de tratamiento empleados por caudal tratado: lodos activados (52.90%), 10.40% lagunas de estabilización, mientras que los tratamientos anaeróbicos y humedales representaron 0.89% (CONAGUA, 2018a). Desde esta perspectiva, el tratamiento descentralizado de aguas servidas aporta diversas ventajas, entre ellas, la reutilización de las aguas residuales municipales. Aun cuando, el volumen de agua reutilizado atiende una pequeña parte del volumen total de efluentes municipales generados (Flores Ortega, 2019).

Las tecnologías para el tratamiento centralizado de aguas residuales se distinguen en virtud de infraestructuras hidráulicas de gran tamaño y capacidad de recepción de efluente, proveniente de la red de drenaje público (CONAGUA, 2018). En la figura 3, se muestran las unidades de proceso que integran a los sistemas centralizados. Como se observa, en estas plantas las aguas residuales recolectadas de casas habitación, industrias, zonas de influencias, transportes e instituciones son transportados en torno a la planta de tratamiento para su depuración a través de las redes de alcantarillado. Una vez que son tratadas son descargadas en los cuerpos receptores o reutilizadas comúnmente en actividades de riego de áreas verdes, generalmente lejos del sitio de origen (Polonía Janzasoy y Calderón Vallejo, 2018).

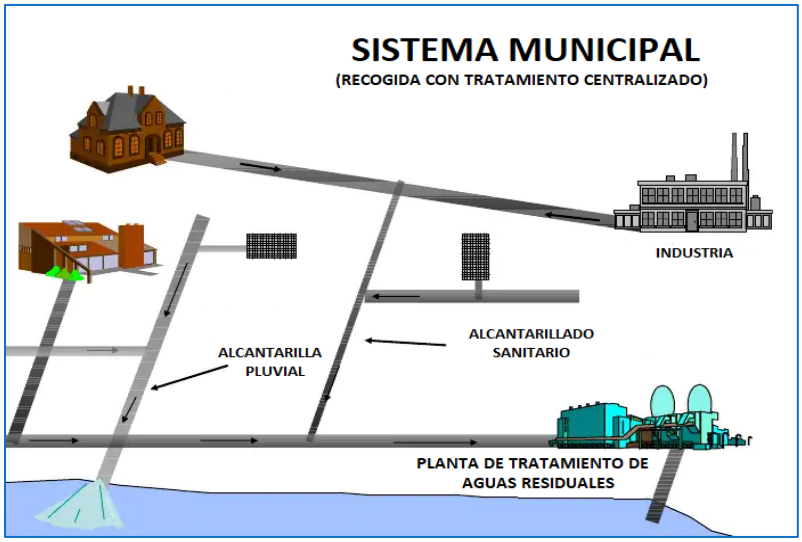


Figura 3. Sistema de tratamiento centralizado, (Shanaghan,2019).

2.4.2 Clasificación de los sistemas de tratamiento

Los sistemas de tratamiento se clasifican en función del tipo de proceso que se aplica para el saneamiento de las aguas residuales y del nivel de depuración que se pretenda conseguir en: físicos, fisicoquímicos y biológicos. El tratamiento físico consiste en la eliminación de sólidos de gran tamaño y partículas suspendidas, aplicando fuerzas físicas como la gravedad, conocidas como operaciones unitarias (Acevedo Ocón, 2020). Los procesos fisicoquímicos favorecen la sedimentación de los sólidos suspendidos, y la remoción de materia disuelta y coloidal. Estos procesos involucran operaciones unitarias y procesos de precipitación química, coagulación química, floculación y sedimentación o filtración (Gonzáles et al, 2020), así como procedimientos de oxidación avanzada, entre otros. A su vez, los tratamientos biológicos se caracterizan por utilizar microorganismos (destacando las bacterias) para eliminar la materia orgánica biodegradable soluble, coloidal y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, usualmente contenidos en las aguas residuales (Bonilla Abarca et al., 2017).

2.4.3 Niveles de tratamiento

El diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales usualmente considera la integración de diferentes fases: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento terciario y tratamiento avanzado (Acevedo Ocón, 2020).

Con el pretratamiento se espera eliminar aquellos elementos de gran tamaño que pudieran generar inconvenientes operacionales y de mantenimiento. Por su parte, el tratamiento primario considera la aplicación de operaciones unitarias para la eliminación de sólidos sedimentables y flotantes presentes en las aguas residuales (ACUATECNIA S.A.S, 2018). Con respecto al tratamiento secundario, se aplican procesos fisicoquímicos y biológicos, para eliminar la mayor parte de material orgánico y nutrientes (Nuevo, 2018). Finalmente, el

tratamiento terciario se incorpora de manera complementaria los procesos biológicos, fisicoquímicos y las operaciones unitarias, eliminando otros contaminantes como lo son los minerales y metales pesados, cuya disminución no resulta significativa en el tratamiento secundario (Tito, 2020), así como microorganismos patógenos. A continuación, se describen de forma particular los fundamentos de cada etapa de operación.

2.4.4 Pretratamiento

El pretratamiento tiene como propósito la eliminación de sólidos de gran tamaño y arenas que pudieran causar problemas de operación y mantenimiento en los procesos siguientes (Ramalho, 2021). Este pretratamiento se lleva a cabo mediante las operaciones unitarias físicas como cribado y desarenación. El cribado se lleva a cabo mediante el uso de rejillas en los canales de entrada de efluente a la planta, en las cuales quedan atrapados residuos de diámetro mayor, tales como astillas de madera, fragmentos de plástico, papel, entre otros; mientras que la desarenación tiene como objetivo, remover materiales inorgánicos que pudiesen desgastar o causar abrasión en los equipos mecánicos de la planta (Bermúdez Grisales y Carrillo Loaiza, 2019).

2.4.5 Tratamiento primario

En el tratamiento primario se reducen los sólidos suspendidos (flotantes y sedimentables) a través de procesos físicos como la sedimentación y flotación. En la sedimentación se logra el asentamiento de los sólidos en el fondo de un tanque a través de la fuerza de gravedad, mientras que la flotación separa la materia sólida o líquida que presentan una ligera diferencia de densidad con el agua. Para ello se generan pequeñas burbujas de aire que se asocian a las partículas presentes en el agua para ser arrastradas hacia la superficie, donde pueden ser fácilmente removidas (Acuatécnica, 2018).

2.4.6 Tratamiento secundario

En el tratamiento secundario se lleva a cabo la eliminación de materia orgánica, medida como DBO_5 y DQO, nutrientes y patógenos. En este nivel de tratamiento se complementan los procesos químicos y biológicos para lograr la disminución de los contaminantes mediante la acción metabólica de distintos tipos de microorganismos o a partir de su reacción química con distintas sustancias químicas (Vargas et al., 2020). De acuerdo con Metcalf y Edy (2003), en este nivel de tratamiento, se utilizan los siguientes procesos; coagulación- floculación, filtración y procesos biológicos.

Con la coagulación se neutralizan las cargas electronegativas entre las partículas, adicionando reactivos coagulantes como las sales de aluminio o de hierro, mezclándose en un tanque hasta tener una solución homogénea. Este proceso consiste en tres fases; hidrolisis, difusión y reacción (Weber Jr Walter, 2021). La hidrolisis corresponde con la disociación del coagulante en el agua, en la difusión se da la dispersión homogénea del coagulante en el agua y finalmente en la reacción se desestabilizan y neutralizan las partículas coloidales en suspensión (Weber Jr Walter, 2021).

La floculación se refiere a la agregación de los coloides mediante la agitación suave de las partículas coloidales previamente desestabilizadas en la coagulación. En este proceso se forman los flóculos de mayor tamaño y densidad que pueden precipitar a causa de la fuerza de gravedad. Mientras que la filtración es un procedimiento que consiste en filtrar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión (Castellanos Niño y Quintero Cubillos, 2019).

En lo que respecta a los procesos biológicos, existen los sistemas aerobios (demandan oxígeno molecular disuelto), anaerobios (funcionan sin oxígeno), anóxicos (funcionan sin oxígeno, pero con presencia de nitrato para reducirlo a nitrógeno molecular) y anóxicos combinados y de lagunaje (Buitrón Méndez et al., 2018). Los principales sistemas biológicos aerobios de tratamiento secundario incluyen los siguientes procesos; lodos activados, lagunas de estabilización, discos biológicos rotatorios, filtros percoladores y filtros sumergidos. Mientras que en los procesos secundarios anaerobios se incluyen los siguientes procesos: fosa séptica, tanque Imhoff, filtro anaerobio, reactor de lecho de lodos (USAB) (Metcalf y Edy, 2003).

Los sistemas biológicos se pueden clasificar con base en la correlación sustrato-microorganismo y la relación entre el tiempo de retención hidráulico (TRH) y el tiempo de retención celular (TRC) (López Vázquez et al.,2017). La correlación sustrato-microorganismo se refiere a las condiciones de disponibilidad de alimento con las que cuentan los microorganismos (Castañeda,2020). El TRH se refiere al tiempo en que el caudal permanece en el sistema, mientras que el TRC indica el tiempo de resistencia celular en el sistema (Macías Ramos y Padilla Holguín, 2021).

2.4.7 Tratamiento terciario

Los tratamientos terciarios de aguas residuales consisten en ejecutar operaciones y procesos físicos y químicos con la finalidad de reducir la concentración de contaminantes, nutrientes y del mismo modo, eliminar virus y bacterias (Saaltink, 2021). Al llevar a cabo la desinfección se inactivan bacterias, virus y/o cualquier patógeno que represente un riesgo para la salud de la población, permitiendo su reutilización directa y/o su descarga a un cuerpo de agua.

En este nivel de tratamiento se encuentran las siguientes tecnologías y procesos: filtración, osmosis inversa, radiación UV, ozonación o intercambio catiónico. El tratamiento terciario, se lleva a cabo cuando el agua está destinada a un uso específico o cuando deben cumplirse con niveles de remoción estrictos para su descarga (Fúquene et al., 2019).

Las diferentes etapas de proceso comúnmente consideradas en el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales y su función específica en la remoción de contaminantes se muestran en la Figura 4.

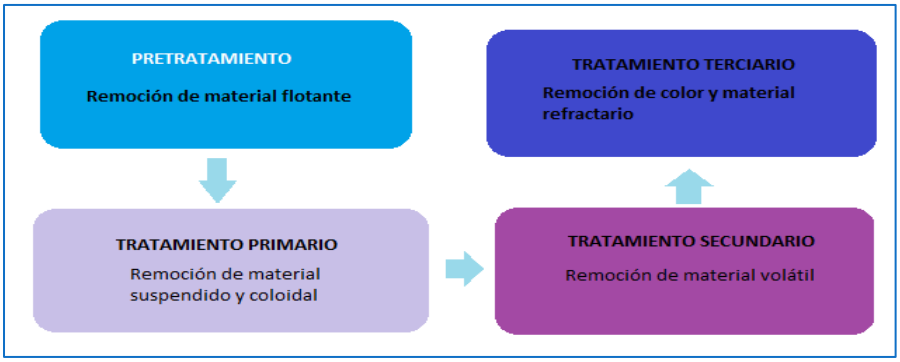


Figura 4. Tren de tratamiento (Arias Gómez y Rodríguez Sánchez, 2021).

2.5 PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO

En México, las estadísticas del agua reportadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018a) muestran que el alcance nacional de conexión al agua entubada es de 95.3% de la población (97.8% urbana, 87% rural), mientras que el 94.4% de la población (97.4% urbana, 85.0% rural) cuenta con cobertura de agua en la vivienda o predio. En cuanto a la cobertura de alcantarillado, el 92.8% de la población (97.4 %urbana, 77.7% rural) tiene acceso a los servicios saneamiento básico y el 91.4% (96.6 urbana, 74.2 % rural) de la población tiene acceso a red pública o fosa séptica.

De acuerdo con el inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación (CONAGUA, 2019), establece que en México existen 3361 plantas de tratamiento, de las cuales para 2018 sólo 2640 plantas municipales de tratamiento se encontraban en operación, con una capacidad instalada de 181 152. 22 l/s y un caudal de tratamiento de 137 698.61 l/s, es decir sólo el 64% del agua residual generada y colectada de los sistemas de alcantarillado a nivel municipal.

Sin embargo, en el año 2019, se registraron 2642 nuevas plantas de tratamiento en operación en la república mexicana (figura 5), con una capacidad instalada de 194 715.32 l/s y un caudal tratado de 141 479.04 l/s, obteniendo un tratamiento del 65.7% de agua residual generada y colectada. En México, los procesos típicos de tratamiento de aguas residuales municipales se integran por lodos activados, lagunas de estabilización, lagunas aireadas filtros biológicos entre otros (figura 6). De las 2642 plantas de tratamiento de aguas residuales que operan en el país, 49.04% integran el proceso de lodos activados y 9.94% lagunas de estabilización (CONAGUA, 2019).

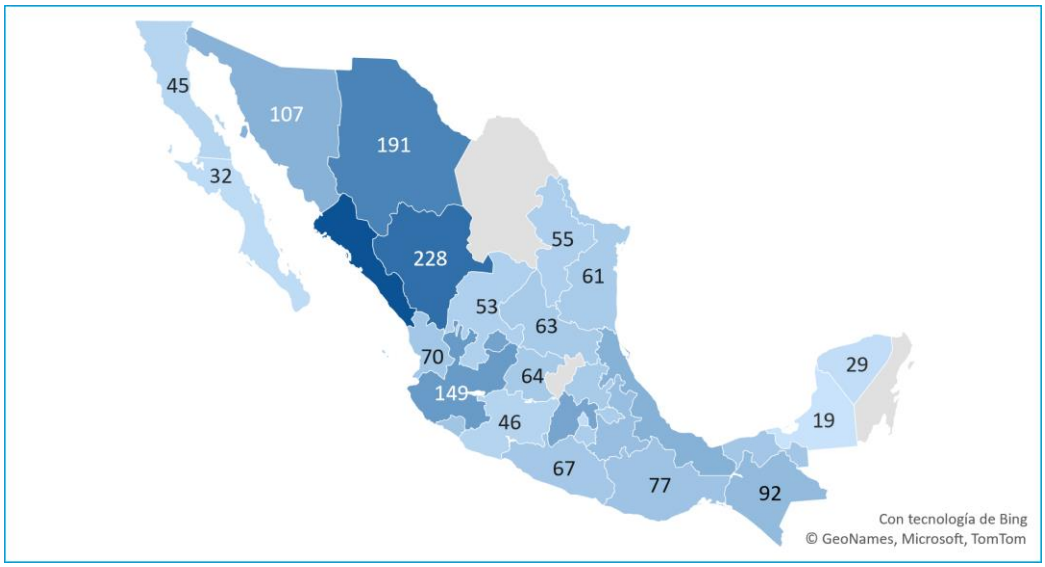


Figura 5. Distribución de plantas de tratamiento de aguas residuales en México, (adaptado de CONAGUA, 2019).

De las 32 entidades federativas, Aguascalientes Guerrero, Jalisco, Veracruz y el Estado de México, son las entidades con mayor cantidad de plantas de tratamiento. A pesar de ello, la falta recursos económicos, la deficiencia en las infraestructuras y la carencia de alcantarillado sanitario que alimenta dichas plantas son las principales causas por las cuales el resto de las plantas de tratamiento (PTAR) quedan sin operar. Sumado a esto, el daño ambiental es proporcional a la cantidad de PTAR sin operar, puesto que se trata sólo el 65.7% de la capacidad instalada (CONAGUA, 2018a). En la zona urbana se trata el 87.5% de las aguas residuales colectadas, mientras que en las regiones rurales se trata sólo el 38.4% (CONAGUA, 2019).

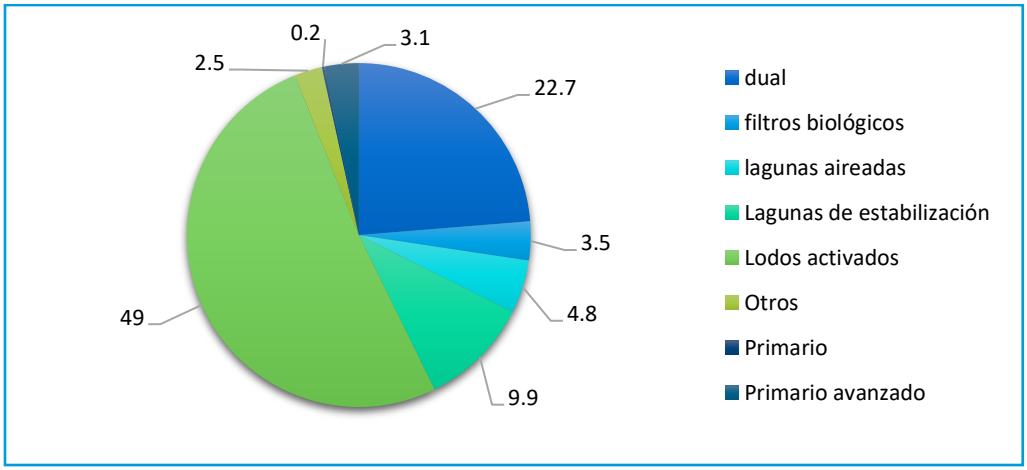


Figura 6. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, (CONAGUA,2019).

Como se muestra en la figura 6, el sistema de lodos activados representa la tecnología de tratamiento centralizado más aplicada en México. Estos sistemas están conformados por un biorreactor o tanque de aireación, un sistema de separación de sólidos primario y secundario y una línea de recirculación como se muestra en la figura 7 (Valdevielso, 2020). Los procesos de lodos activados se basan en la acción metabólica de distintos tipos de microorganismos que se encuentran mezclados con la materia orgánica de las aguas residuales, la cual utilizan como sustrato para su mantenimiento y reproducción.

Por ello, antes de realizar el tratamiento con lodos activados, se debe realizar una caracterización del agua residual para determinar su índice de biodegradabilidad y con ello definir las condiciones de operación. El tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados inicia condicionando la aireación al inyectar aire a través de difusores de burbuja fina para favorecer el crecimiento de una biomasa microbiana con la capacidad de oxidar la materia orgánica (Pérez Sandoval y Sernaque Vela, 2019).

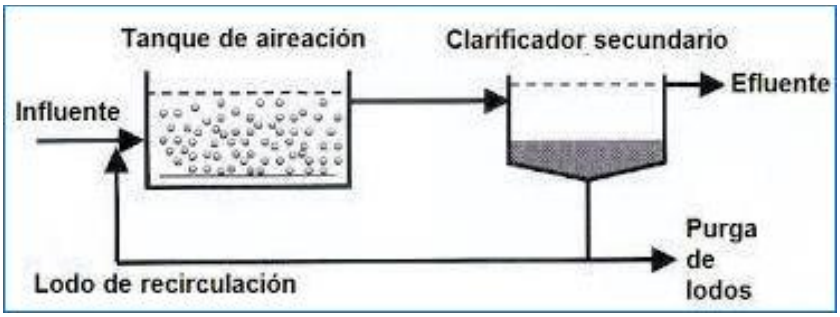


Figura 7.Sistema de lodos activados (Valdevielso, 2020).

La aireación se suministra a partir de un difusor instalado en la base del tanque, los cuales están conectados a sopladores que operan a diferentes presiones, dependiendo de la capacidad volumétrica de tratamiento del sistema. De esta forma, la aireación continua del sistema garantiza el suministro del oxígeno necesario para la degradación de los contaminantes en el agua por acción microbiana. Seguidamente, el licor mezclado pasa por un tanque de sedimentación secundaria, donde el agua residual tratada es disociada de los microorganismos y los productos de la degradación. El exceso de lodos se purga periódicamente al tanque de lodos para su estabilización (Bendezu Zúñiga y Jurado Pari, 2021).

Los sistemas de lodos activados presentan eficiencias de remoción que superan el 80 % de DBO_5 y SST. Sin embargo, su eficiencia depende de un buen diseño y operación. Por ello el funcionamiento óptimo de estos sistemas depende de variables como la carga orgánica, la temperatura y el tiempo de residencia hidráulico**.** Aunado a esto, este tipo de procesos presentan elevados costes de operación y mantenimiento debido al alto consumo energético (CONAGUA, 2018a).

2.5.1 PTAR Atotonilco

Una de las plantas de tratamiento más grandes del mundo, y representativa de los sistemas centralizados, se encuentra en el estado de Hidalgo, en el municipio de Atotonilco (figura 6). La planta tiene una capacidad de tratamiento de 35 m^3/s en temporada de estiaje, un caudal medio de 42 m^3/s en temporada de lluvias y un caudal máximo de diseño de 50 m^3/s. Esto representa un caudal medio diario de 3,628,800 m^3/día y de 3,024,000 m^3/día en cada una de las épocas, para tratar aproximadamente el 60% de las aguas residuales originadas en el Valle de México (PROYECTOS MÉXICO, 2021).

Figura 8. PTAR Atotonilco, Hidalgo (Ayesa,2018).

Esta planta de tratamiento contempla las fases de tratamiento anteriormente descritas para los sistemas de tratamiento de aguas residuales. En la figura 9 se muestra que su tren de tratamiento se compone de dos trenes; tren de procesos convencionales (TPC) y tren de procesos químicos (TPQ). El TPC está constituido por: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y desinfección, en conjunto con infraestructuras para el manejo y tratamiento de grasas y aceites, sólidos y lodos producidos en este tren. En contraste con el TPC, el TPQ en el tratamiento primario se adicionan productos químicos (Futurenviro, 2015).

2.5.2 Pretratamiento

Cuando el agua ingresa a la planta se alimenta a un proceso de remoción de grasas y sedimentación primaria, durante el cual se generan lodos primarios. Estos son tratados a través de procesos de tamizado, espesamiento, estabilización y deshidratación de los lodos derivados de los trenes de tratamiento. Para llevar a cabo el pretratamiento, la planta cuenta con 10 rejillas de desbaste, cuchara bivalva, 20 rejillas finas automáticas, 16 equipos de desarenado-desengrasado y un sistema de biofiltros para controlar los olores durante este pretratamiento.

El desbaste se lleva a cabo con un caudal de 50 m^3/s como caudal máximo de operación, mientras que la cuchara bivalva tiene una capacidad de 2,000 litros de agua residual. Esta agua residual es transportada por gravedad hacia los equipos de desarenado- desengrasado, con una capacidad de 3.6 m^3/s por equipo. Posteriormente los sólidos y arenas generados son depositados en rellenos sanitarios, generando 100,000 toneladas al año (RETEMA,2019).

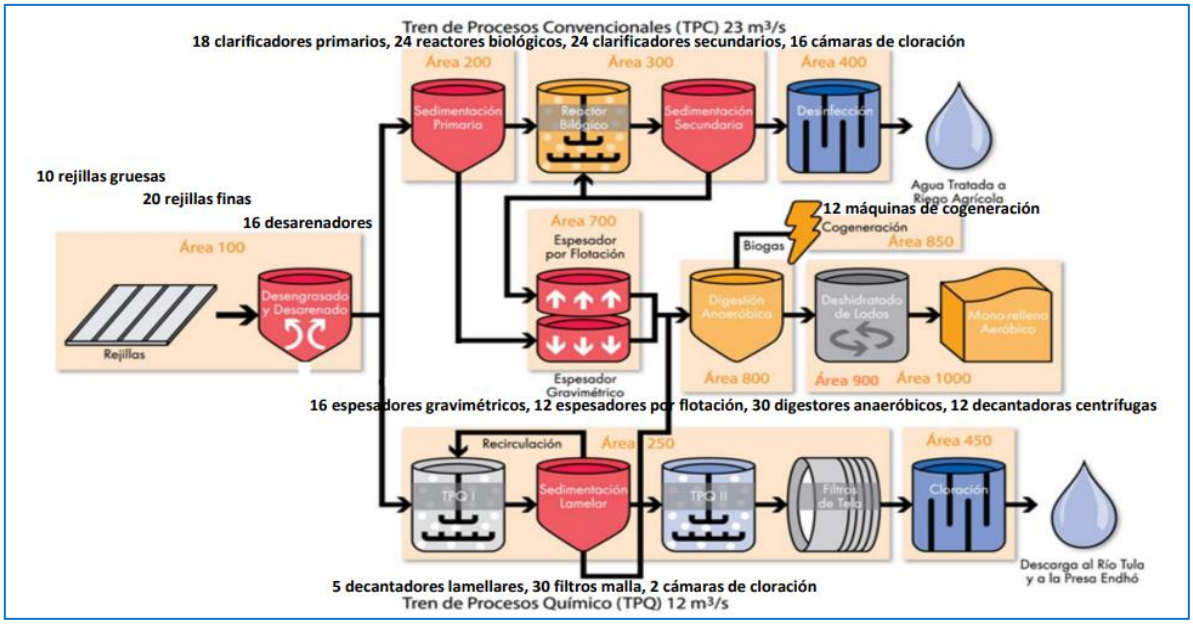


Figura 9.Tren de tratamiento de aguas de la PTAR Atotonilco (Futurenviro,2015).

2.5.3 Tren de Procesos Convencional (TPC)

Este tren tiene como infraestructura hidráulica 18 clarificadores laminares, 28 unidades de bombeo del efluente primario a reactores biológicos, 28 unidades de reactores biológicos aerobios de lodos activados, 24 equipos de clarificación secundaria, 16 dispositivos para la desinfección con cloro gas (con un TRH de 30 minutos), y se complementa con sistemas auxiliares para incendio y fugas de cloro.

El TPC comienza con la clarificación primaria con una capacidad de 1,950 l/s por clarificador. De los caudales transportados en la clarificación primaria, se destina un caudal máximo de 33m^3/s para el TPC y un caudal de 17 m^3/s para el TPQ en época de lluvia. El efluente de los clarificadores primarios es transferido por gravedad al cárcamo de bombeo, donde cada bomba cuenta con un aforo de 1.435 m^3/s. Dicho efluente se distribuye en los reactores con un volumen total de 259.740 m^3.

Las descargas de los reactores llegan a los clarificadores secundarios, los cuales son rectangulares. Cada clarificador secundario tiene una capacidad hidráulica de operación de 33 m^3/s más una correlación del 100% del caudal representativo promedio (23 m^3/s). Posteriormente se lleva a cabo la desinfección al inyectar gas cloro.

2.5.4 Tren de Procesos Químicos

Este tren de tratamiento químico consta de 3 fases: fase 1 (mezcla, floculación, sedimentación), fase 2 (mezcla y floculación previa a filtración) y fase 3 (cloración, desinfección). La fase 1 inicia agregando cloruro férrico como coagulante y polímero como floculante. El coagulante se almacena en 2 dispositivos tipo puente viajero, transitando de forma longitudinal al clarificador a través de 28 tuberías perforadas que tiene instaladas.

Para la segunda fase, son succionados los lodos secundarios sedimentados mediante el efecto sifón, y transportados hacia la superficie de cada clarificador, posteriormente se descargan en los cárcamos de lodos secundarios, en donde se encuentran 2 bombas de recirculación de lodos y 1 en espera, que cumple la función de purgar los lodos, enviándolos a la etapa de espesamiento.

Finalmente, en la tercera etapa, el efluente es desinfectado con gas cloro, empleando 2 cámaras de contacto con un volumen de 21.714 m^3. El efluente del tratamiento llevado en el TPC se descarga al Canal El Salto- Tlamaco, el cual se aprovecha para riego agrícola. Mientras que el efluente del tratamiento llevado en el TPQ se descarga principalmente hacia el Río Tula.

2.6 Tratamiento descentralizado

El tratamiento de aguas residuales a partir de tecnologías descentralizadas radica en tratar y disponer de volúmenes pequeños de aguas generadas en viviendas cercanas (figura 10), con el objetivo de controlar mejor los sistemas de tratamiento y poder reutilizar el agua tratada (Reich, 2019). Por sus características, estos sistemas son viables en comunidades con baja densidad de población, por ejemplo, en casas habitación o conjuntos de estas, parques industriales y/o algunas zonas donde no se cuente con saneamiento, de tal manera que la instalación de sistemas pequeños y de fácil operación permite generar agua tratada que puede reusarse cerca o en los mismos sitios donde es generada.

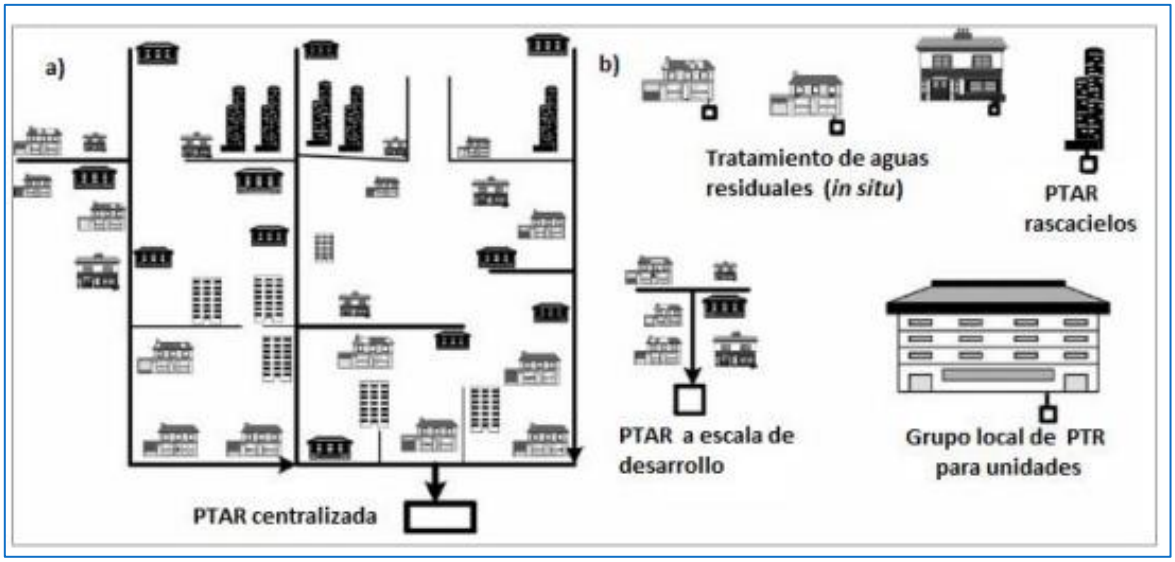


Figura 10. Tratamiento descentralizado (Graham et al, 2019).

Dentro de las tecnologías descentralizadas las más comunes se encuentran los tanques sépticos, los tanques Imhoff y los humedales artificiales. En México, de los sistemas de tratamiento descritos, el 1.9% (0.22% por caudal tratado) del tratamiento de aguas residuales se lleva en tanques Imhoff, 2.9% en humedales (0.69% por caudal tratado), y en 3.8% (0.1% por caudal tratado) en fosa séptica (SINA,2019).

2.7 Humedales de tratamiento en México

Los humedales son sitios artificiales o naturales, cuyos suelos están cubiertos de agua de manera permanente o temporal. En estos sistemas se desarrollan operaciones y procesos físico y biológicos que contribuyen con la regulación del ciclo hidrológico. Dentro de los procesos físicos se encuentra la sedimentación y la filtración, que permiten la remoción de los SST y de materia orgánica biodegradable contenida en las aguas residuales, mientras que la eliminación de metales pesados se da a través de la sedimentación y la adsorción sobre la superficie de la planta y los detritos.

Algunos ejemplos de humedales naturales son los manglares y los pantanos, los cuales representan ecosistemas viables para el desarrollo de la biodiversidad, para especies como reptiles, mamíferos y aves migratorias, por mencionar algunos. Aunado a esto, los humedales ofrecen servicios ambientales importantes como la producción de alimentos y materias primas (CEMDA, 2018).

Los humedales artificiales son sistemas diseñados para remoción de contaminantes contenidos en las aguas residuales. Comúnmente se basan en estanques de poca profundidad que impermeabilizados en la base para evitar la infiltración de agua al subsuelo. Se diseñan con una pequeña pendiente que facilite el flujo del agua, y con un lecho relleno de grava o algún otro material que cumpla de función de filtrar residuos rígidos y servir como sustrato para las especies vegetales (Carbajal Rowan et al., 2018). Un ejemplo de ello es el humedal artificial que se construyó en el Bosque de San Juan de Aragón (figura 11), en la Ciudad de México en el 2020, el cual permite tratar y depurar un caudal de 140 mil litros de agua al día, y que es aprovechada para la protección de aves locales y migratorias (Gaceta UNAM, 2020).

Figura 11. Humedal artificial del Bosque de San Juan de Aragón (Gaceta UNAM, 2020).

2.7.1 Tipos de humedales

Estos sistemas de tratamiento se clasifican en humedales de flujo superficial (HFS) y en humedales de flujo subsuperficial (HFSS) en función de su diseño hidráulico, pueden ser de flujo vertical u horizontal como se muestra en la figura 12 (Arteaga Cortez et al., 2019).

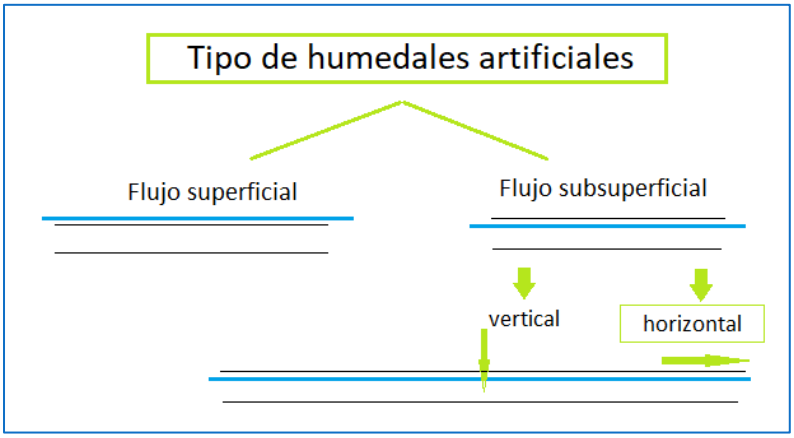


Figura 12. Tipos de humedales artificiales (iagua, 2015).

En los humedales de flujo superficial (figura 13) el influente corre por mediante los tallos de las plantas, quedando expuesta directamente a la atmósfera. Este ejemplar de humedales constituye una transformación al sistema de lagunas convencionales. En contraste con éstas, tienen una menor profundidad y tienen plantas. Sin embargo, estos sistemas demandan más área que los HFSS y son una opción cuando se necesita remover nutrientes, específicamente fósforo (iagua,2015).

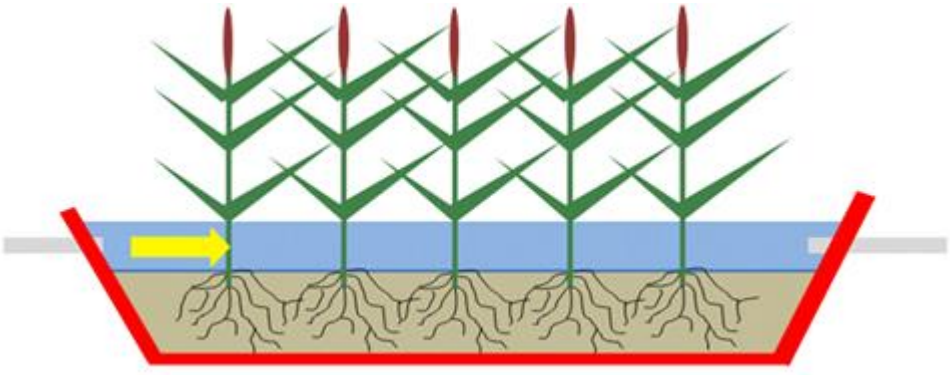


Figura 13. Humedal artificial de flujo superficial (Moron, 2018).

En los humedales de flujo subsuperficial, el agua circula a través de un medio granular (figura 14), constituido por un sustrato inerte (arenas, gravas). Conforme el agua se va filtrando, ocurre la saturación e insaturación de oxígeno, el cual se difunde a través de los rizomas de las plantas hidrófitas sembradas, estimulando las condiciones óptimas para el abastecimiento de oxígeno al agua residual, de tal forma que tengan la cantidad necesaria para la degradación microbiana y la remoción de contaminantes.

Asimismo, para facilitar las condiciones aerobias del medio poroso, se suele situar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías cribadas con salidas al exterior. La gran disimilitud entre estos sistemas no radica en la dirección del flujo, si no de las condiciones aerobias y anaerobias. (Tilley et al., 2020).

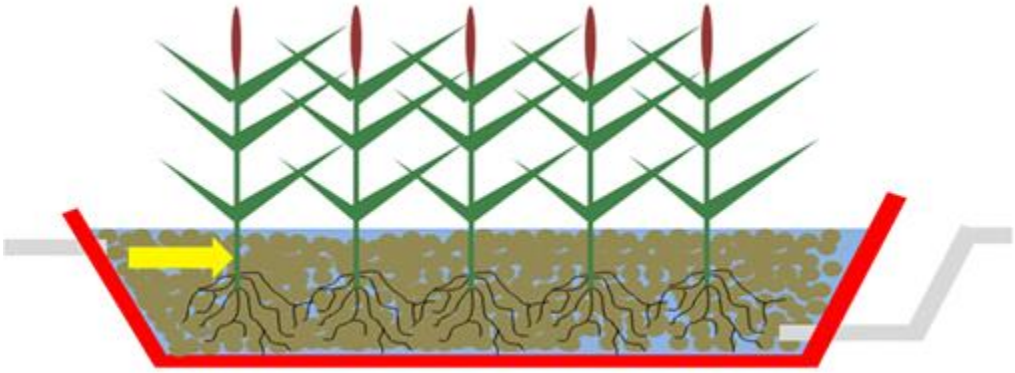


Figura 14. Humedal artificial de flujo subsuperficial (Moron, 2018).

2.7.2 Parámetros de diseño

Para el diseño de estos sistemas de tratamiento se consideran parámetros como la topografía, las condiciones climáticas ambientales (temperatura máxima y mínima), temperatura promedio del agua residual, su estacionalidad y velocidad; elementos que establecen el valor de las constantes de remoción, la temporada de estiaje y el periodo de lluvias. Para determinar el tren de tratamiento normalmente los parámetros a considerar son: las concentraciones de SST, DBO_5, CF, nitrógeno y fosforo total, así como las restricciones de vertido de aguas tratas de acuerdo con la normatividad vigente (Seoánez Calvo y Gutiérrez de Ojesto, 1999).

Los principales parámetros de diseño de los humedales artificiales son; área superficial, área transversal, relación largo- ancho, tiempo de retención hidráulica, la carga orgánica y la carga hidráulica aplicadas al humedal. Estos sistemas de tratamiento presentan diversas eficiencias de remoción como se muestra en la tabla 10. En cuanto a la carga orgánica, estos sistemas consideran una carga que oscile entre 40 y 300 ppm (Seoánez Calvo y Gutiérrez de Ojesto, 1999).

Tabla 10. Eficiencias de remoción de los humedales artificiales (Díaz García y Paredes Ramos, 2022).

Parámetro	Porcentaje
DBO	60-98%
DQO	55-80%
SST	60-98%
CF	99-99.9%
NT	30-70%
PT	20-60%

El área disponible para el humedal requiere una superficie de 2.5 a 9 m^2 por habitante. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que el área de tratamiento obtenida debe adaptarse a las condiciones mencionadas y algunas observaciones que incluyen la relación largo-ancho, profundidad y pendiente. De manera complementaria, se verifica que los medios filtrantes sean acordes con las características físicas, requeridas como porosidad, conductividad hidráulica, granulometría y la resistencia mecánica del material para relleno, esto aplica para humedales de flujo subsuperficial horizontal o vertical (Gómez Chavarro, 2021).

Los humedales artificiales son redes dinámicas, pues conforme pasa el tiempo, sus características físicas varían dentro y fuera de estos por lo cual pueden alterar el tipo de flujo, las características hidráulicas y operativas del sistema. En cuestión de la ubicación del humedal, es recomendable no ubicarse en zona con riesgo de inundación, puesto que se verían afectadas las funciones de operación y mantenimiento en cuestión de daño en las tuberías o de azolve del pretratamiento. Aunado a esto, un rasgo importante a contemplar es la ampliación del sistema para ampliar la capacidad de tratamiento en un futuro (Arteaga Cortez y del Valle Paniagua, 2018).

Para determinar las dimensiones del humedal, primero se establecen las características del influente tales como concentración de SST, DBO, temperatura promedio de las aguas servidas en invierno, el caudal promedio al día, tipo de suelo, asequibilidad del área donde se pretende construir montar el humedal, porcentaje y edad del alcantarillado, distancia entre el sitio de descarga y el humedal, la existencia de tratamientos previos (rejillas, tanque imhoff, tanques sépticos), macrófitas de la región, población actual y proyectada y la normatividad aplicable respecto a su reusó o cuerpo receptor (Seoánez Calvo y Gutiérrez de Ojesto, 1999).

Con base en el libro Natural Wastewater Treatment Systems (Cites, Middlebrooks, Bastian, y Reed,2014) los valores característicos para el diseño de humedales artificiales y la calidad de los efluentes esperados se muestran en la tabla 11. Respecto a la energía requerida, los humedales artificiales tienen un consumo energético mínimo, pues su principal fuente de energía se da durante la fotosíntesis y el sistema vascular de las macrófitas. A su vez, es ideal para zonas con climas cálidos, sin embargo, también se pueden implementar en climas fríos, la diferencia radica en la premura de reducir contaminantes y la profundidad del sistema.

Tabla 11. Características de diseño y rendimiento para humedales artificiales (Crites, Middlebrooks, Bastian y Reed, 2014).

Tecnología de tratamiento	**Tiempo de retención hidráulica (días)**	**Profundidad (m)**	**Carga orgánica (kg/hab*día)**	**Características del efluente (mg/l)**
Humedal superficial	7-15	0.1-0.6	100	DBO_5 5-10
				SST 5-15
				NT 5-20
Humedal subsuperficial	3-14	0.3-0.6	90	DBO_5 5-40
				SST 5-20
				NT 5-20

En cuanto a los costos de inversión, estos sistemas requieren una inversión de $31,588.81 pesos aproximadamente. Respecto a la operación y mantenimiento de los humedales artificiales, se requiere extraer malezas y hojarascas del lecho del humedal, podar la vegetación implementada en el sistema eliminando aproximadamente un 15% de la vegetación, con una frecuencia de dos a tres veces al año. Esto con la finalidad de evitar la disminución de la energía solar que requiere la vegetación. Las actividades antes mencionadas no requieren mucha capacitación por parte de los operadores del sistema (CONAGUA, 2019).

2.7.3 Ventajas y limitaciones

La eficiencia de remoción de estos sistemas es considerablemente buena, la cual puede ser muy efectiva con un tiempo de retención hidráulico razonable. En cuanto a los costes de operación y mantenimiento se consideran bajos en comparación con otros sistemas de tratamiento de agua residual al no requerir de personal especializado y al casi nulo consumo energéticos, pues su principal fuente de energía es el sol para llevar a cabo los procesos de remoción, además de tener una vida útil de más de 40 años (Rivera Flores y Jiménez Renders, 2020).

Aunado a esto, benefician el ambiente al favorecer el crecimiento y aumento de la biodiversidad, ya que establecen nuevos hábitats y a su vez permiten la reutilización del agua tratada. Por ello se pueden integrar perfectamente en zonas rurales y urbanas en parques y jardines por mencionar algunas y generalmente no producen malos olores. Pueden proyectarse unipersonales, unifamiliares y hasta para ciudades medianas con disponibilidad de terreno (Arce Cardona, 2018).

Sin embargo, se tiene que considerar que demandan grandes extensiones de terreno, aproximadamente 2.5 a 9 m^2 por habitante, especialmente si se requiere la remoción de nutrientes. Como se mencionó anteriormente, la eficiencia puede verse afectada por cambios de temperatura, principalmente en invierno, reduciendo el porcentaje de remoción de DBO y de las reacciones biológicas responsables por la nitrificación y desnitrificación. No obstante, demandan de un proceso complementario de desinfección para eliminar absolutamente los organismos patógenos, pues estos pueden colmatarse en poco tiempo cuando no cuentan con sistemas de pretratamiento adecuados. Es por ello por lo que en su aplicación suelen complementarse con rejillas, desarenadores o tanques imhoff y/o tanques sépticos (Arce Cardona, 2018).

2.8 Tanque séptico

Los tanques sépticos son dispositivos aprovechables para solucionar las problemáticas asociadas al tratamiento de agua residual doméstica, adecuada y usualmente independiente de las condiciones geográficas del sitio. Estos sistemas tienen aplicación en viviendas individuales que disponen de abastecimiento de agua potable, pero no con alcantarillado. La acción séptica es un proceso biológico en el cual los microorganismos, en condiciones anaerobias (ausencia se oxígeno) transforman la materia orgánica a material parcialmente oxidado, que son los productos de degradación que pueden servir como formas inferiores de la vida vegetal. Dichos sistemas constan de dos partes, el tanque donde se desarrollan los procesos físicos y biológicos y la instalación hidráulica para el tratamiento del efluente del tanque ya sean zanjas, pozos o lechos de infiltración como se muestra en la figura 15 (CONAGUA, 2019c).

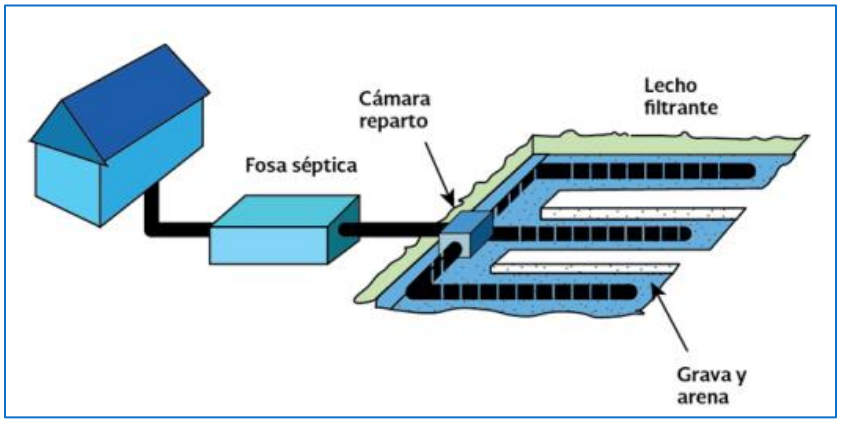


Figura 15. Sistema de tanque séptico (CONAGUA, 2019c).

El tren de tratamiento de estos sistemas se constituye por el pretratamiento, el tratamiento primerio y secundario, aplicando principalmente los procesos físicos y biológicos. El tratamiento de las aguas residuales por este tipo de unidades brinda un arreglo a la problemática generada por la distribución de los desechos líquidos. La función más crucial es la conservación de la capacidad de adsorción del sitio en que se establece. Para proveer esta seguridad, es necesario que el tanque séptico realice tres funciones; la eliminación de sólidos, el tratamiento biológico y el almacenamiento de natas y lodos. Bajo la acción de la fuerza de gravedad, se separan los sólidos sedimentables que a su vez se van acumulando en el fondo de los tanques y constituyen los lodos, produciendo una nata sobre la superficie líquida. La capa intermedia entre los sedimentos y flotantes integra el agua clarificada, que constituye el efluente del tanque séptico (Pulido Salazar y Jiménez Cuellar, 2021).

Respecto a los procesos biológicos, la fracción orgánica de los sólidos que se sedimentan en el fondo de los tanques sufre una biodigestión anaerobia, disminuyendo su volumen a partir de la conversión de los elementos orgánicos complejos en elementos más simples y estables, como el biogás, que es una mezcla de metano y dióxido de carbono y otros elementos traza. Dicha reducción de volumen del material orgánico sedimentado permite espaciar los periodos de purga de lodos acumulados. No obstante, permanece un residuo de sólidos inertes al cual se tiene que adecuación un volumen para su almacenamiento con la finalidad de prevenir que el efluente los desplace fuera del tanque (Velásquez Forero, 2019).

Debido a que los tanques sépticos se ubican sepultados, se requiere bombear periódicamente el tanque, puesto que el sistema acumula lodos en el fondo. A medida que la cantidad de lodos aumentan y las aguas residuales permanecen menos tiempo en el tanque, aumenta la probabilidad de que los sólidos se dispersen al área de absorción. La mayoría de las fosas sépticas tienen espacio suficiente para acumular lodo por 2 a 5 años. La frecuencia con la que se debe bombear un sistema séptico está directamente relacionada con el aforo de la fosa séptica, el volumen de aguas residuales que entran y la cantidad de sólidos que entran (DL-MANUAL, 2020).

2.8.1 Tipos de tanques sépticos

En los tanques sépticos se definen cuatro regiones; área de almacenamiento, donde se depositan los sólidos o lodos, área de clarificación o sedimentación, zona de grasas o natas y el espacio libre idóneo para gases generados por el proceso de descomposición de la materia. La función de cada cámara séptica es dependiente del número de persona para las cuales servirá. En figura 16 se presentan algunas partes típicas de un sistema séptico. Las paredes de las cámaras sépticas se cimentan de diferentes materiales; piedra, ladrillo, hormigón armado, hormigón ciclópeo y materiales prefabricados (hormigón, fibra de cemento y PVC) (Álvarez Florido y Ospina Gómez, 2019). Los lodos generados en un tanque séptico contienen tan solo 3% de sólidos, con concentraciones de materia orgánica de hasta 3000 mg/l más un 92% de agua (Sasse,1998).

Estos sistemas de tratamiento están proyectados para tratar el agua residual en un tiempo de retención (TRH) mínimo de 36 a 72 horas, permitiendo la separación de las partículas suspendidas (Sasse, 1998). Los tanques sépticos fueron diseñados principalmente para aguas residuales domésticas y para aquellas que contienen una porción considerable de sólidos sedimentables. Estos sistemas tienen diferentes porcentajes de remoción de contaminantes como se muestra en la tabla 12. El porcentaje de remoción de DQO depende en gran medida de la cantidad de sólidos sedimentables. La remoción de contaminantes por tanques sépticos en climas cálidos, pueden remover de manera eficiente mayor o igual al 80% los SST y hasta un 90% de DBO_5 del influente.

Por otro parte, en climas fríos, la remoción es menor con un porcentaje de remoción por debajo del 50%, esto se debe la relación de la actividad bacteriana y la temperatura, pues la actividad bacteriana disminuye a la par de la temperatura (Sasse,1998).

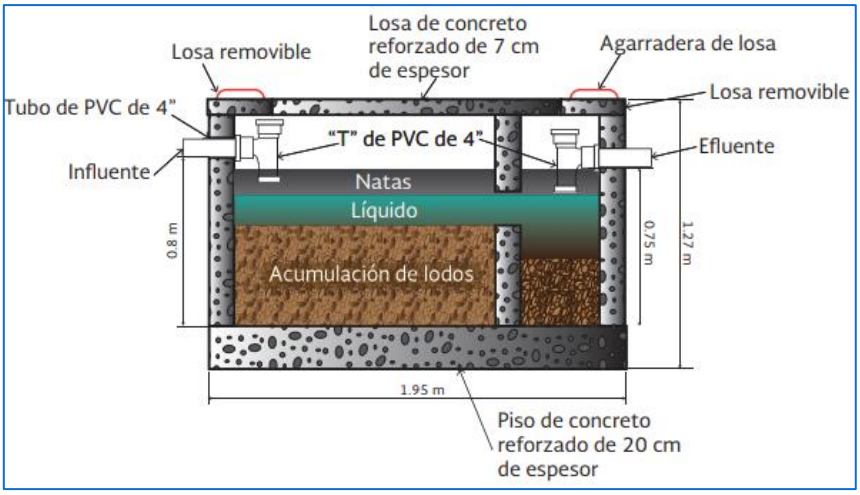


Figura 16. Partes de un tanque séptico (Cáceres Magnus, 2018).

Tabla 12. Eficiencias de remoción de tanques sépticos (Seoánez Calvo y Gutiérrez de Ojesto, 1999).

Parámetro	Porcentaje
DBO	90%
DQO	30-60%
SST	50-90%
CF	10-90%
NT	0-60%
PT	0-75%

2.8.2 Tanque séptico de una cámara

En los tanques de un solo compartimento (figura 17), cuando las burbujas de gas generadas en los lodos suben a la superficie arrastran materia orgánica particulada en descomposición y microorganismos inoculando el agua residual cruda a la entrada, por lo cual se convierte en un obstáculo para la sedimentación de partículas (CONAGUA,2019c).

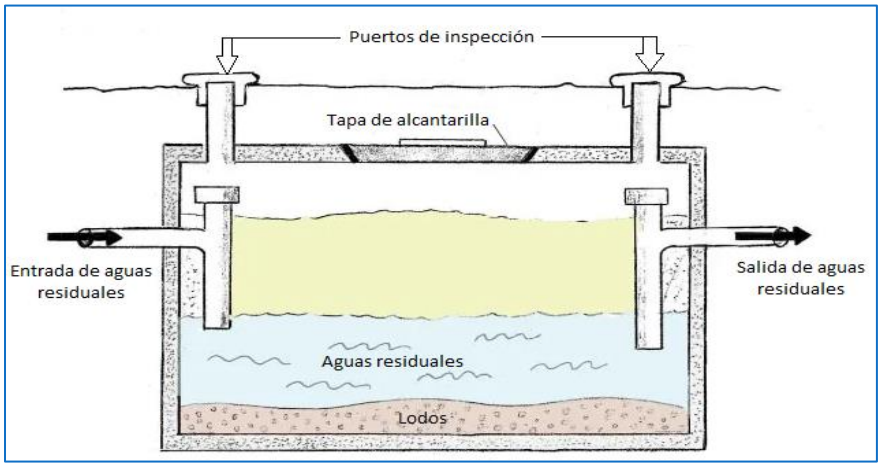


Figura 17. Tanque séptico de una cámara, (deagua,2020).

2.8.3 Tanque séptico de dos cámaras

Los tanques sépticos de dos cámaras (figura 18) cuentan con mejores condiciones para que las partículas más ligeras sedimenten. La masa de los lodos en la segunda cámara tiene mayor homogeneidad y un grado superior de floculación. En esta cámara, se forma menor cantidad de espuma y menor porción de sólidos suspendidos. En cuanto al volumen, en la primera cámara el volumen debe ser equivalente a la mitad o dos tercias partes de la segunda cámara (CONAGUA,2019c).

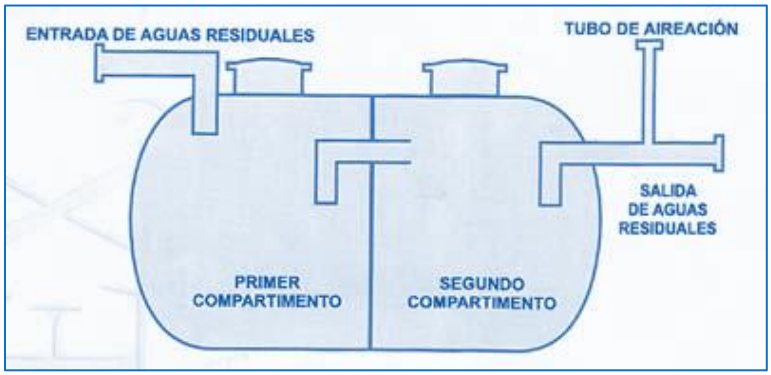


Figura 18. Tanque séptico de dos cámaras (deagua, 2020).

2.8.4 Tanque séptico de tres cámaras

En la figura 19 se muestra un tanque séptico de tres cámaras, en el primer compartimento debido a la turbulencia producida por la entrada del influente se mezclan la espuma y los lodos y el influente. El segundo compartimento recoge el influente con menor carga y por ello menor turbulencia, lo que permite mejores condiciones para sedimentar solidos de baja densidad. En el tercer compartimento se lleva a cabo la separación de las aguas grises de las aguas servidas, pues al primer compartimento solo entran aguas sépticas. Cabe resaltar que el uso de más de 3 compartimentos no representa una ventaja práctica o mejora en la eficiencia de remoción del procedimiento (deagua, 2020).

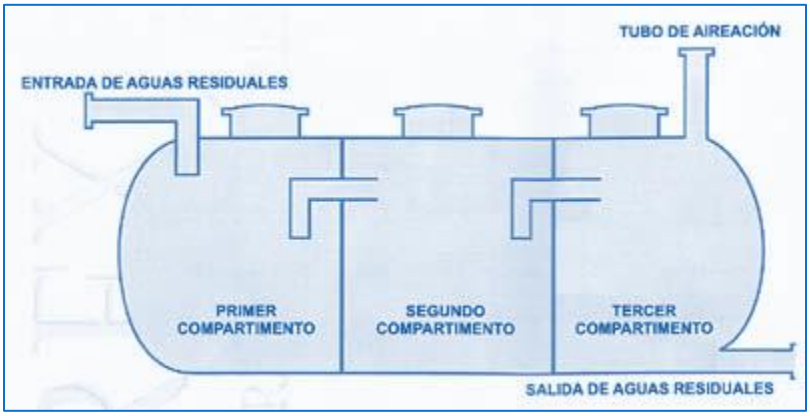


Figura 19. Tanque séptico de tres cámaras (deagua, 2020).

2.8.5 Parámetros de diseño

El diseño de un tanque séptico debe tener la capacidad de eliminar casi todos los sólidos sedimentables y descomponer los elementos orgánicos en condiciones anaerobias. Dentro de los parámetros a considerar están el volumen, estructuras de entradas y salidas del tanque, tiempo de retención y el proceso de digestión. El volumen del tanque debe permitir la retención apropiada del agua residual. La ubicación de las entradas y salidas del tanque permiten dispersar la energía del fluido, minimizando la turbulencia y evitar cortos circuitos (CONAGUA, 2021b).

En cuanto a las salidas, deben retener los lodos y natas. A pesar de que estos tanques operan bajo condiciones anaerobias se debe tener precauciones para ventilar los gases generados en el tanque (CONAGUA,2019c). Con base en el catálogo general de montos unitarios para la construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado (CONAGUA, 2021b), el equipamiento y la colocación de una fosa séptica de concreto, con dimensiones de 0.6 m de diámetro interior y 2.50 m d longitud para para 10 personas, tiene un costo de $ 16,261.42 pesos mexicanos.

La demanda de área de un tanque séptico oscila entre 0.4 y 0.6 m^2 por habitante (Seoánez Calvo y Gutiérrez de Ojesto, 1999). Sin embargo, esto puede variar dependiendo del número de habitantes, la contribución de aguas negras (L/hab d), el tipo de clima y el volumen del tanque séptico. Pues de estos factores dependen las dimensiones del tanque y el número de cámaras con las que estarán equipados los tanques. La eficiencia del tanque se asocia directamente con su área superficial mientras que su capacidad de almacenamiento se asocia con la profundidad del tanque. A continuación, se presentan las ecuaciones para obtener los parámetros antes mencionados numeradas respectivamente (CONAGUA, 2019d).

El volumen del tanque se obtiene con la siguiente ecuación:

$$V_t = A_p P t \quad (1)$$

Donde

$V_t = volumen\ del\ tanque\ (L)$

$A_p = aportación\ de\ aguas\ negras\ por\ habitante\ (\frac{L}{hab * día})$

$P = población\ (número\ de\ habitantes)$

$t = tiempo\ de\ retención\ (días)$

El volumen obtenido con la ecuación 1 no comprende el aglutinamiento de lodos. Para calcular el volumen total del tanque se necesita conocer el volumen de lodos producido por habitante con un margen de 0.07m^3 de lodo al año por habitante y conocer el tiempo de vida útil del tanque séptico. Esto se obtiene con la siguiente ecuación:

$$V_{lp} = 0.07 m^3 P t_{vl} \quad (2)$$

$Donde$:
$V_{lp} = volumen\ de\ lodos\ producidos, [m^3]$
$P = población\ [número\ de\ habitantes]$
$t_{vl} = tiempo\ de\ vaciado\ de\ lodos, [años]$

Para obtener el volumen disponible para las aguas residuales en el tanque séptico se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_T = V_t + V_{lp} \quad (3)$$

Donde

$V_T = volumen\ total\ del\ tanque, [m^3]$
$V_t = volumen\ del\ tanque$ sin $acumulación\ de\ lodos, [m^3]$
$V_{lp} = volumen\ de\ lodos\ producidos, [m^3]$

Con respecto a las dimensiones del tanque se sugiere que la relación largo-ancho del tanque sea entre 2 m de largo por 1 metro de ancho y 3 m de largo por 1 m de ancho. Para la profundidad del tanque se debe tomar en cuenta la población para la cual se instalará el tanque séptico como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Profundidad del tanque con respecto a la población (CONAGUA, 2019d).

Profundidad (m)	**Población (número de habitantes)**
1.7	19
2.0	30
2.3	50
2.5	100

Para calcular la altura total del tanque séptico se toma en consideración la profundidad calculada para el volumen total del tanque, la cual corresponde a un 80% de la altura total. Esta altura total se calcula con la siguiente ecuación:

$$H_T = P_{VT}\frac{1}{0.8} \quad (4)$$

Donde

$H_T = altura\ total\ del\ tanque\ séptico, [m]$
$P_{VT} = profundidad\ calculada\ para\ el\ volumen\ total, [m]$

Para calcular las dimensiones del tanque se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_T = abP_{VT} \quad (5)$$

$Donde$:
$a = ancho\ del\ tanque, (m)$
$b = largo\ del\ tanque, (m)$
$P_{VT} = profundidad\ calculada\ para\ el\ volumen\ total, [m]$

2.8.6 Dimensiones de las cámaras de los tanques sépticos

Con base en el manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (saneamiento básico) de la CONAGUA (CONAGUA,2019d), para una población de 1 a 20 habitantes, se recomienda diseñar tanques sépticos de 2 cámaras, pues los tanque con volúmenes pequeños, son más sensibles ante la fluctuación de las aguas residuales.

Para calcular las dimensiones del cámara 1 se debe considerar que la capacidad de la primera cámara debe ser dos terceras partes del volumen total requerido del tanque. Expresado matemáticamente se tiene que:

$$V_{c1} = \frac{2}{3} V_T \quad (6)$$

$Donde$:
$V_{c1} = Volumen\ de\ la\ cámara\ 1, [m^3]$
$V_T = Volumen\ total\ del\ tanque, [m^3]$

Para calcular las dimensiones del cámara 2 se debe considerar que la capacidad de la segunda cámara debe ser la mitad a una tercera parte del volumen total del tanque. Expresado matemáticamente se tiene que:

$$V_{c2} = \frac{1}{3} V_T \quad (7)$$

$Donde$:
$V_{c2} = Volumen\ de\ la\ cámara\ 2, [m^3]$
$V_T = Volumen\ total\ del\ tanque, [m^3]$

Finalmente, para obtener la longitud de las cámaras se utiliza la siguiente ecuación:

$$L_{Ci} = \frac{V_{ci}}{\mathrm{P_{VT}} * a} \quad (8)$$

$Donde$:
$L_{ci}, = longitud\ de\ cámara, [m^3]$
$V_{ci} = Volumen\ de\ la\ cámara, [m^3]$
$a = ancho\ del\ tanque, [m]$
$P_{VT} = profundidad\ calculada\ para\ el\ volumen\ total, [m]$

En las tablas 14 y 15 se muestran los cálculos para tanques sépticos que sirven para una población de entre 1 y 100 habitantes y las dimensiones para las cámaras (CONAGUA, 2019d).

Tabla 14. Cálculos para el diseño de tanques sépticos en función de la población (CONAGUA, 2019d).

Número de habitantes	Número de cámaras	Dotación (L/ hab*día)	Aportación (L/ hab*día)	Volumen del tanque (sin acumulación de lodos)	Volumen total del tanque (con acumulación de lodos)
5	2	150	135	675	1375
10	2	150	135	1350	2750
15	2	150	135	2025	4125
20	2	150	135	2700	5500
30	2	150	135	4050	8250
40	2	150	135	5400	11000
60	2	150	135	8100	16500
80	2	150	135	10800	22000
100	2	150	135	13500	27500

Tabla 15. Dimensiones para las cámaras de tanques sépticos con base en la población (CONAGUA, 2019d).

Número de habitantes	P_{vt} (m)	Ancho del tanque (m)	Largo del tanque (m)	H_T (m)	Largo de cámara 1 (m)	Largo de cámara 2 (m)
5	1.7	0.63	1.88	2.13	1.3	0.6
10	1.7	0.75	2.24	2.13	1.5	0.7
15	1.7	0.91	2.74	2.13	1.8	0.9
20	2	0.97	2.92	2.5	1.9	1
30	2	1.19	3.57	2.5	2.4	1.2
40	2.3	1.28	3.84	2.88	2.6	1.3
60	2.5	1.51	4.52	3.13	3	1.5
80	2.5	1.74	5.21	3.13	3.5	1.7
100	2.5	1.94	5.83	3.13	3.9	1.9

2.8.7 Ventajas y limitaciones

Son sistemas flexibles que se adaptan a las exigencias de acondicionar de los desechos de cada residencia, pueden tratar cualquier agua residual domestica (aguas negras o grises) sin alteraciones en su funcionamiento, además se generan cantidades pequeñas de lodos durante su operación. Este tipo de tecnologías al construirse bajo tierra demandan menor área de construcción, además de que su mantenimiento es económico y generalmente se realiza una vez cada dos años. Sin embargo, si la limpieza no se realiza adecuadamente, puede generar malos olores (Mahiara, 2020).

2.9 Tanque Imhoff

Los tanques Imhoff son sistemas de tratamiento anaerobios a través de la sedimentación de sólidos. Estos sistemas se constituyen de 3 compartimentos; cámara de digestión, cámara de sedimentación y cámara de natas (figura 20). La construcción de estos tanques es a base de concreto y pueden ser de forma cuadrada o rectangular. A través de un deflector o mampara, el agua residual fluye hasta la zona de sedimentación. La cámara de sedimentación tiene forma de V, con una ranura en la parte inferior donde se lleva a cabo la sedimentación (Vela Ríos, 2019). En esta cámara, el influente permanece aproximadamente 2 a 4 horas y los sólidos caen hacía la cámara de digestión. La digestión produce gases que suben por las rejillas de ventilación hacia la cámara de natas. Mientras que los lodos acumulados en la digestión se compactan y se descomponen en un periodo de dos a tres meses (Tilley et al., 2018b).

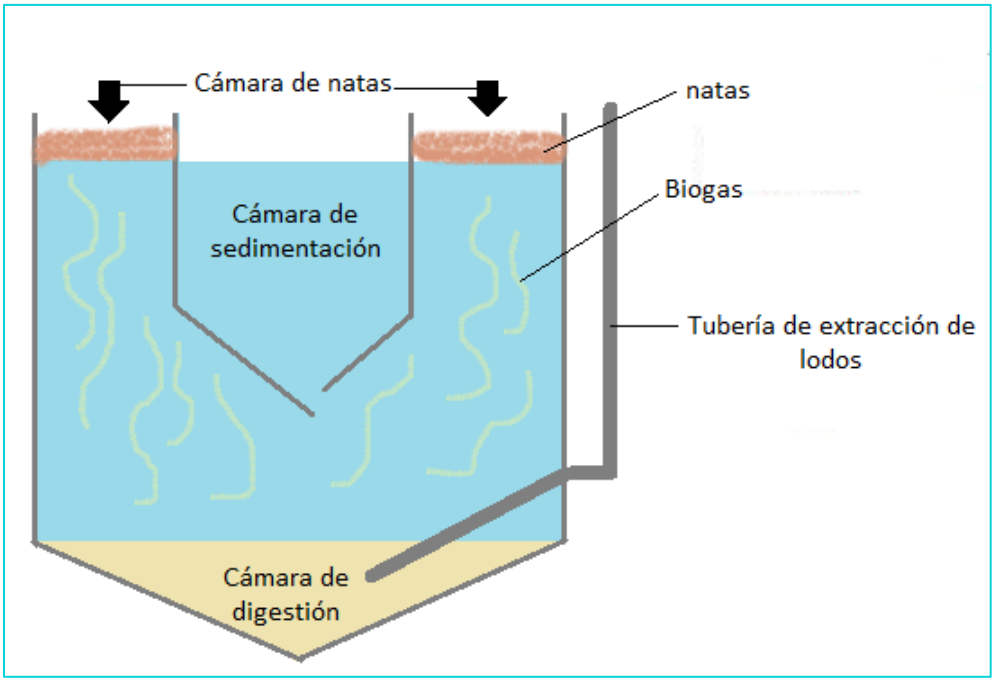


Figura 20. Tanque Imhoff (Salas, 2020).

2.9.1 Parámetros de diseño

Los tanques Imhoff habitualmente son subterráneos con concreto reforzado, no obstante, se pueden construir en la superficie de la tierra para posibilitar la separación de lodo por gravedad sin embargo todavía se requerirá bombear el influente. En cuanto a su infraestructura hidráulica se utilizan tubos en forma de T o bien separativos en la entrada y salida para disminuir la velocidad y evitar que rebase el sistema. Las dimensiones del tanque como la profundidad pueden ser entre 7 a 9.5 m, la ranura de la cámara de sedimentación puede ser de 0.15 a 0.30 m de ancho. Las paredes deben estas inclinadas a 45° grados o más, ya que facilita el deslizamiento del lodo hacia el centro. Las dimensiones de la cámara de digestión dependen principalmente de la cantidad de lodos emanados por la población equivalente, la estabilización de los lodos y la temperatura. Sin embargo, esta cámara está diseñada para almacenar lodos en un periodo de 4 a 12 meses y que sean digeridos (EAWAG, 2020).

En cuanto a su eficiencia de remoción se encuentra entre el 35% y 85% de remoción de SST, 25% a 35% de remoción de DBO y de 30% a 65% de remoción de DQO conduciendo a una apropiada estabilización de lodos, dependiendo del diseño y condiciones de los tanques de Imhoff, brindando un 40% de disminución de la materia orgánica en la zona de digestión (EAWAG,2020). La cantidad de contaminantes expresados normalmente como DBO5 o DQO, que ingresa al sistema por metro cúbico del tanque o reactor biológico, es de 0.4 calculado con el factor DBO_5/DQO permitiendo espaciar en el tiempo las operaciones de extracción de los lodos acumulados (Tilley et al.,2018b).

Respecto al tiempo de retención hidráulica suele ser de 2 a 4 horas para preservar un efluente aerobio para su tratamiento suplementario o descarga (Tilley et al.,2018b). Por su parte el área demandada por los tanques imhoff es de 0.0005 m^2 por litro al día (Sasse,1998). El dimensionamiento de los tanques imhoff se lleva a cabo con base en la Guía de diseño de tanques sépticos, tanques imhoff y lagunas de estabilización de la Organización Panamericana de la Salud (OPS,2005). Las dimensiones de los compartimentos de los tanques imhoff se dimensionan de manera independiente, es por ello por lo que para diseñar la cámara de sedimentación se utilizan las ecuaciones que se muestran en la tabla 16. Por su parte en la tabla 17 se muestran algunos diseños críticos para el diseño de los tanques imhoff.

Tabla 16. Fórmulas para dimensionar la cámara de sedimentación de tanques imhoff (OPS, 2005).

Magnitud	Fórmula	Descripción de las variables
Área	$\boldsymbol{As = \frac{Dotación}{Cs}}$	As= área superficial, [m^2] Cs= carga superficial, [m^3/m^2*día] Dotación= litros por habitante al día
Volumen	**Vs= Dotación* TRH**	Vs= volumen del sedimentador, [m^3] Dotación= litros por habitante al día TRH= tiempo de retención hidráulica
Longitud	$\boldsymbol{Lv = \frac{Q_{max}}{C_{hv}}}$	Q_{max}= caudal máximo de diseño, [m^3/día] C_{hv}= carga hidráulica, [m^3/m^2*día] L_v= mínima del vertedero de salida

Tabla 17. Criterios de diseño de un tanque imhoff (Arroba, Arroba, 2017).

Compartimento	Parámetro	Valor
Cámara de sedimentación	Relación largo-ancho	2:1- 5:1 (m)
	Pendiente	1,25:1 a 1,75:1 (m)
	Carga superficial	25-40 m^3/m^2d
	TRH	1,5-4 horas
Cámara de lodos	Volumen	55-100 L/cápita
	Tubería de recolección de lodos	200-300 mm
	Profundidad por debajo la cámara de sedimentación hasta la superficie del lecho de lodos	30-90 cm
	Profundidad del tanque (desde la superficie hasta el fondo del tanque)	7-10 m
Área de ventilación	Área superficial	15-30 % del total
	Ancho de la abertura	45-75 cm

Con base en la guía de diseño de tanques sépticos, tanques imhoff y lagunas de estabilización de la Organización Panamericana de la Salud (OPS,2005), la determinación de lodos se determina tomando en cuenta una reducción del 50% de los sólidos volátiles, con una densidad de 1.05 kg por litro y un promedio de sólidos de 12.5 % al peso. Considerando que la cámara tiene como objetivo almacenar lodos durante la digestión de acuerdo con la temperatura, se tomaran en cuenta los valores de la tabla 18 para obtener el volumen de almacenamiento considerando un margen de 70 litros de lodo al año por habitante.

Tabla 18. Factores de capacidad relativa respecto a la temperatura y tiempo de digestión, (OPS,2005).

Temperatura °C	**Factor de capacidad relativa (fcr)**	**Tiempo de digestión (días)**
5	2.0	110
10	1.4	76
15	1.0	55
20	0.7	40
>25	0.5	30

2.9.2 Ventajas y limitaciones

El lodo no se descarga en el efluente, pues el lodo se deseca y se evacua con más facilidad que el proveniente de los tanques sépticos, esto se debe a que los lodos tienen entre un 90 y 95% de humedad. El gas generado en la cámara de digestión provoca un arrastre de partículas de lodo desde el fondo hasta la superficie del agua que crean una capa superior de escoria que debe eliminarse periódicamente. Los lodos se acumulan en la cámara de digestión, donde pasan por un proceso anaeróbico y se estabilizan parcialmente (Arroba Arroba, 2017).

La fracción líquida permanece solo unas pocas horas en el tanque (entre 3,5 y 7 horas); esto permite obtener un efluente final fresco (no séptico). Los sólidos permanecen por mucho más tiempo en la cámara de digestión con condiciones uniformes y controladas que garantizan un buen espesamiento. La producción de biogás es superior a la de las fosas sépticas y es necesario un correcto sistema de ventilación para evitar problemas de malos olores. Estos sistemas tienen un bajo costo de operación. Sin embargo, al ser infraestructuras de muy alta profundidad pueden representar un inconveniente si la capa freática es alta (Arroba Arroba, 2017).

2.10 CALIDAD DEL AGUA TRATADA DE ACUERDO CON LA NORMATIVIDAD VIGENTE

La reglamentación de la calidad de las aguas tratadas en Latinoamérica, se pueden catalogar en tres tipos; normatividad que establece límites máximos permisibles para descargar los efluentes en cuerpos receptores, la normatividad que regula un porcentaje mínimo de remoción de ciertos contaminantes y la normatividad encargada en preservar la calidad de cuerpos receptores de manera independiente de la o las descargas existentes. El objetivo de la normatividad es poder tipificar la contaminación en las aguas residuales y a su vez controlarla y/o minimizarla. En México se toman en cuenta las normas que aparecen en la tabla 19 para el tratamiento de aguas residuales, mientras que los límites establecidos para cada norma se encuentran en los anexos 1, 2 y 3 respectivamente.

Tabla 19. Normas aplicables para el tratamiento de aguas residuales

Norma	Contenido
NOM-001-SEMARNAT-2021	Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.
NOM-002-SEMARNAT-1996	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
NOM-003-SEMARNAT-1997	Límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos.

.

Los cuerpos receptores a los que se expone la NOM-001-SEMARNAT-2021, son ríos, arroyos, canales, drenes, zonas marinas mexicanas, lagos, lagunas y embalses. También considera el reuso de efluentes para áreas verdes, para infiltración y otro tipo de riegos y en suelos cársticos. Los servicios públicos de reuso que señala la NOM-003-SEMARNAT-2021 se dividen cuanto al tipo de contacto que se tenga con el efluente, por tanto, la norma los divide el reuso del efluente en servicios de contacto directo y en servicios de contacto indirecto u ocasional. En el tipo de reuso de contacto directo se encuentra llenado de lagos artificiales destinados para actividades recreativas, riego de parques y jardines y lavado de autos. Respecto al reuso en servicios de contacto indirecto u ocasional, se encuentra el regado de camellones, abastecimiento de sistemas conta incendios, lagos artificiales no recreativos y panteones.

2.11. CARACTERÍSTICAS DE LAS VIVIENDAS DE MÉXICO

2.11.1 Población y vivienda

En México con base en el censo de población y vivienda (INEGI,2020) la población es de 126,014,024 millones de habitantes los cuales habitan 35, 219, 141 millones de viviendas particulares distribuidas como se muestran en la figura 21. Por su parte en la ciudad de México la población es de 9,209,944 millones de habitantes, con 1, 114 viviendas colectivas y 2,756 319 millones de viviendas particulares, las cuales se encuentran distribuidas en las 16 alcaldías como se muestra en la figura 22. De estas viviendas se encuentran habitadas 2 756 319 millones, 207 026 mil deshabitadas y 71 780 viviendas en uso temporal (SEDECO,2020).

Figura 21. Distribución de viviendas habitadas a nivel nacional (INEGI,2020).

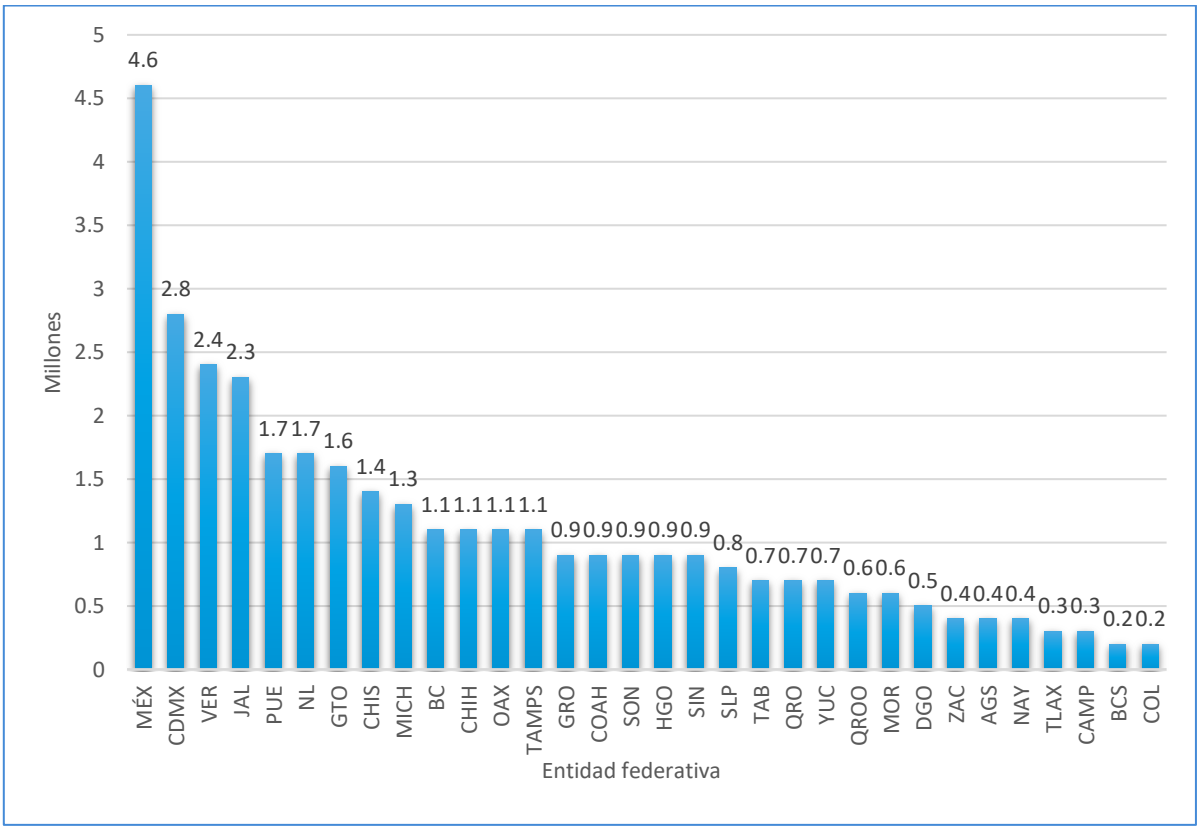
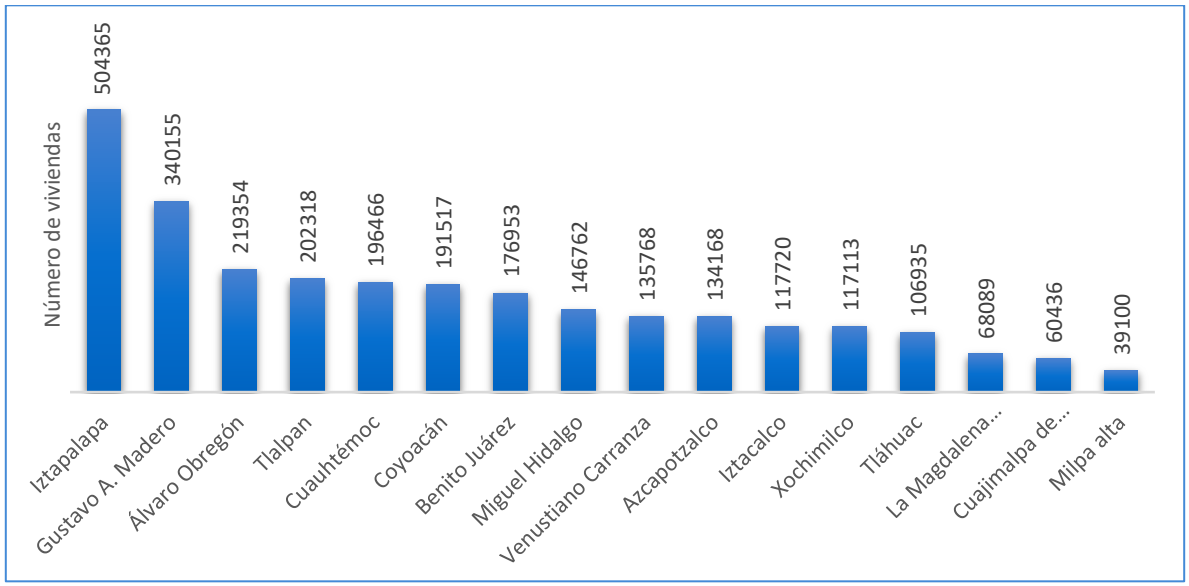


Figura 22. Distribución de viviendas habitadas en la Ciudad de México (INEGI,2020).



Con respecto a las viviendas, estas se clasifican en dos tipos; viviendas particulares y viviendas colectivas. Las viviendas particulares son habitadas por familias con vinculo sanguíneo o sin él. Dentro de las viviendas particulares se encuentran las casas independientes, departamentos, quintas, vecindades, cabañas y viviendas improvisadas (INEGI, 2020).

En cuanto a las viviendas colectivas, son colectivas porque en ellas se llevan a cabo actividades sujetas a normas administrativas, compartiendo un estilo de vida por cuestiones de trabajo, estudio, religión, turismo por mencionar algunos. Este tipo de viviendas se clasifica en institucionales y no institucionales (INEGI, 2020).

En relación con el tamaño de la construcción, se tienen viviendas de 55 m^2, de 56 a 100 m^2 y de 150 m^2 o más, siendo 150 m^2 el tamaño de construcción de las viviendas que predominan en México como se muestran en la figura 23 (INEGI,2020).

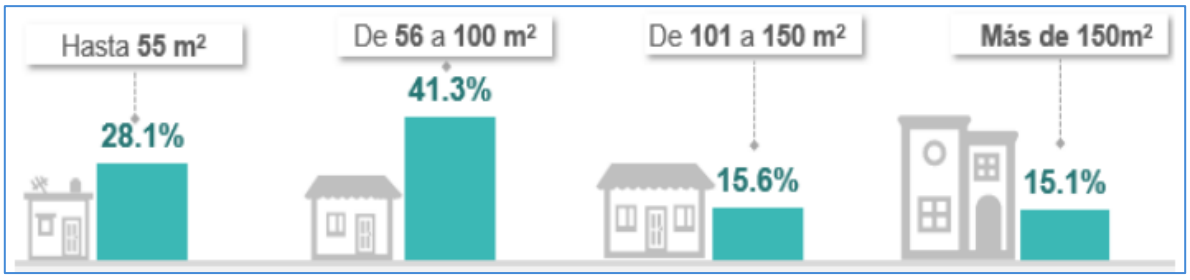


Figura 23. Tamaños de construcción de las viviendas en México (INEGI, 2020).

2.11.2 Abastecimiento de agua potable y saneamiento

Con base en la Encuesta Nacional de Vivienda (ENVI) 2020 se estimó que el total de viviendas particulares habitadas, 90.5% de la población tienen agua entubada dentro de la vivienda, 8. 3% disponen de agua entubada sólo en el patio o terreno y el 1.1% de la población restante no disponen de agua entubada. En cuanto a saneamiento 94.2% de las viviendas tiene acceso a la red pública, 5.1% están conectadas a un tanque séptico y el 0.2% no cuenta con drenaje.

El Sistema de Agua Potable de la Ciudad de México (SACMEX) es el responsable del abastecimiento drenaje, alcantarillado, desalojo, tratamiento de aguas residuales y pluviales y la reutilización y aprovechamientos de estas. Este organismo tiene la responsabilidad de distribuir el agua a toda la ciudad sin diferencias socioeconómicas, políticas o culturales. El acuífero de la zona metropolitana del valle de México es su principal fuente de abastecimiento, con un gasto promedio de 31.2 m^3/s como se muestra en la figura 24 (SACMEX, 2020).

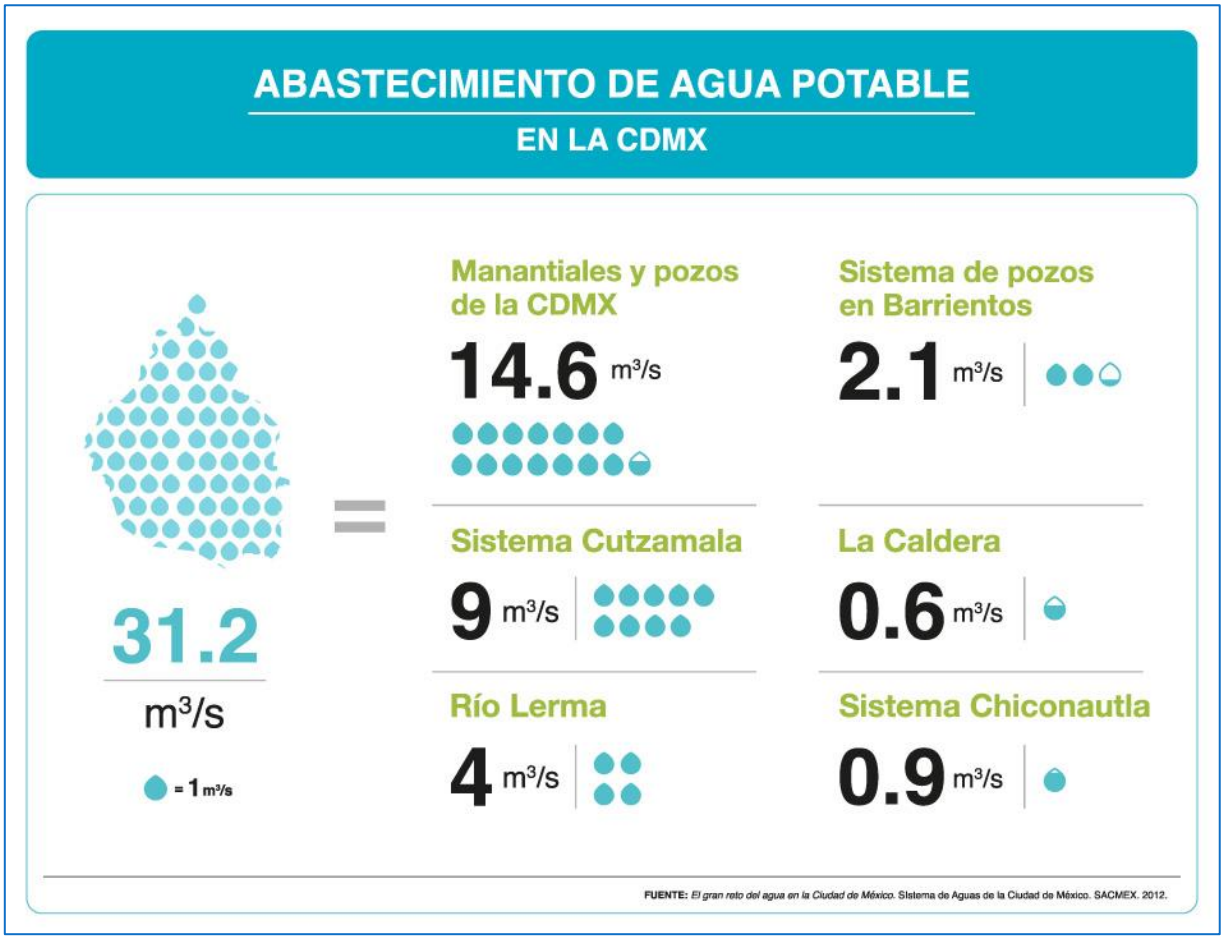


Figura 24. Fuentes de abastecimiento de agua en la ciudad de México (Agua, 2021).

Este acuífero está conformado por el sistema Cutzamala (operado por CONAGUA), Lerma (operado por SACMEX) y los manantiales, Chiconautla, Barrientos y la Caldera que complementan el suministro de agua. El sistema Cutzamala brinda el 32% del abastecimiento con 10,000 litros por segundo al día, Lerma es un complejo de 50 pozos que aportan 4,500 litro por segundo al día, mientras que los manantiales antes mencionados proporcionan 12, 000 litros por segundo al día (SACMEX, 2020).

La infraestructura hidráulica se constituye por dos redes, tanques de almacenamiento, plantas de bombeo, plantas potabilizadoras, pozos, manantiales, estaciones medidoras de presión, líneas de conducción y acueductos y dispositivos de cloración como se expone en la tabla 20 (Martínez Macedo, 2018).

Tabla 20. Infraestructura hidráulica de la Ciudad de México (Martínez Macedo, 2018).

Instalaciones	**Unidades**
Red primaria	976 km
Red secundaria	11 954 km
Tanques de almacenamiento	295
Plantas de bombeo	254
Plantas potabilizadoras	34
Pozos	972
Manantiales	68
Estaciones medidoras de presión	56
Líneas de conducción y acueductos	514
Dispositivos de cloración	435

Sin embargo, la problemática radica en la infraestructura obsoleta al rebasar el periodo de vida útil, pues cerca del 42% del agua abastecida se pierde en red por fugas, agua no contabilizada y clandestinaje, al tener 430 puntos del sistema que no cuentan con medidores. No obstante, se tienen un déficit de agua potable de 3 m^3/s, una sobre explotación de 17.79 m^3/s, con una disminución de los niveles del acuífero de 1 metro por año y 30 cm de hundimiento del subsuelo por año (Fondos de Agua, 2019).

Aunado a esto, el agua pluvial De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el consumo promedio de agua potable por persona debe ser de 50 a 100 litros por día por persona, sin embargo, en la ciudad de México en promedio se consumen 380 litros por persona al día representando un 200 % más de lo recomendado por la OMS (EL FINANCIERO, 2022).

Esta cifra es alarmante pues el abastecimiento de agua potable en las alcaldías de la ciudad no es equitativo como se señala en la tabla 21. En cuanto a la aportación de aguas residuales de los 9,209,944 millones de habitantes de la ciudad de México generan 22 510.98 litros por habitante por vivienda por segundo, sin embargo, de esto solo 3340 litros por segundo son tratados en las plantas operadas por SACMEX (SEDEMA, 2016).

Tabla 21. Abastecimiento y dotación de agua potable en la ciudad de México (SEDEMA, 2019).

Alcaldías	Población total 2020	Gasto total (m^3/s)	Dotación (L/hab/día)
Iztapalapa	1,835,486	4,746	235
Gustavo A. Madero	1,173,351	3,340	237
Álvaro Obregón	759,137	2,515	321
Tlalpan	699,928	3,712	560
Coyoacán	614,447	2,589	355
Cuauhtémoc	545,884	1,956	332
Venustiano Carranza	443,704	1,071	203
Xochimilco	442,178	1,579	374
Benito Juárez	434,153	1,670	406
Azcapotzalco	432,205	2,030	404
Miguel Hidalgo	414,470	2,020	502
Iztacalco	404,695	1,028	219
Tláhuac	392,313	725	210
La Magdalena Contreras	247,622	1,402	554
Cuajimalpa de Morelos	217,686	505	293
Milpa Alta	152,685	451	410

Como se puede ver en la tabla 17, las alcaldías con menor abastecimiento de agua potable son; Venustiano Carranza, Tláhuac, Iztacalco, Cuauhtémoc, Iztapalapa y Gustavo A. Madero siendo estas dos últimas alcaldías con mayor población en la ciudad de México. Este aumento de población representa un factor de gran importancia sobre la demanda del suministro del agua y por tanto el aumento en la aportación de aguas residuales (SEDEMA, 2019).

La pésima calidad y la falta de abastecimiento de los servicios hídricos es otra problemática que padecen las y los habitantes de estas alcaldías siendo Iztapalapa la alcaldía más afectada. Esta alcaldía se encuentra ubicada al oriente de la ciudad de México y es la alcaldía como mayor número de habitantes.

La alcaldía cuenta con 79 pozos de extracción, sin embargo, no todos funcionan bien y su operación es deficiente, pues una vez que se extrae el agua de los pozos, esta es llevada a las plantas de potabilización de SACMEX, siendo estas el punto de distribución para las alcaldías incluyendo Iztapalapa. A pesar de esto, no hay suficiente presión para abastecer el agua y en el caso de Iztapalapa el agua se distribuye en camiones cisterna los cuales resultan poco eficientes (Montero, 2021).

Esta alcaldía tiene acceso al agua mediante el sistema de agua potable lo cual representa un 27% de su población, un 23% mediante pipas y el 50% de la población por horarios establecidos en que tienen servicio de agua potable en sus casas. Aunado a esto la presión que suministra el agua es muy baja lo cual implica una mala calidad en la misma, lo cual repercute en las actividades cotidianas de higiene personal y limpieza en sus hogares. (UNODC, 2021).

Pues la población afecta afirma que el servicio es deficiente, porque el agua tarda en llegar aproximadamente cada 8 días y en varias ocasiones llega con gusanos, mal olor y con mucha turbidez. Asociado a esta problemática, el deterioro, la falta de mantenimiento del sistema de drenaje, así como la acumulación de basura ha suscitado inundaciones considerables. Siendo los asentamientos irregulares los más propensos a inundaciones (UNODC, 2021).

Ante estas situaciones, es evidente los problemas técnicos del tratamiento centralizado, pues resulta difícil cumplir sus funciones debido al entorno institucional y a que su interacción con las 16 alcaldías refleja prácticas y hábitos que impiden cumplir las normas y el abastecimiento continuo para todos los usuarios (Montero, 2021).

3.JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

3.1 Justificación

El enfoque tradicional de saneamiento urbano se fundamenta en la recolección y transporte de aguas residuales industriales y municipales mediante sistemas centralizados, los cuales consisten en grandes redes de alcantarillado que transportan las aguas residuales desde el sitio de generación hasta una gran planta central de tratamiento. Sin embargo, contar con un sistema centralizado no es garantía de que la población tenga acceso a saneamiento básico de calidad (Martínez Austria et al., 2019).

Conforme al Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales de CONAGUA, en el 2017 operaban 2526 PTAR en el país, las cuales trataron 135.6 m^3/s, es decir, sólo el 63% de los 215.2 m^3/s recolectados a través de los sistemas de alcantarillado. Además, actualmente se reportan algunas entidades federativas como Chiapas, Jalisco, Tamaulipas, Tlaxcala y el Estado de México con más del 50% de sus PTAR fuera de operación (de Anda Sánchez, 2020).

De acuerdo con entrevistas autoridades y operadores de los servicios de agua y alcantarillado, este problema se puede asociar a los altos consumos de energía y costos de operación (Gallegos Cereceres et al., 2018). Para empeorar la situación, muchos municipios que cuentan con una PTAR centralizada tienen deudas significativas derivadas del adeudo adquirido para la edificación de esta, añadidos al coste de operación y mantenimiento. Hasta la fecha, la implementación del tratamiento de aguas residuales empleando sistemas

centralizados en México ha funcionado como una solución general para las grandes ciudades. Sin embargo, los costos relacionados con la instalación y operación de estos sistemas son considerablemente elevados y, peor aún, es común que se presenten deficiencias en su operación, repercutiendo de manera negativa en la población, puesto que se pueden suscitar problemas de salud provocados por la descarga de aguas tratadas que no cumplen con los parámetros de calidad establecidos en la normatividad vigente.

También se debe considerar que la conexión al agua potable y al saneamiento de aguas residuales no es equitativa en zonas rurales en contraste con zonas urbanas. Por ello, el tratamiento de aguas residuales mediante tecnologías descentralizadas debe considerarse como una opción de solución sustentable a la problemática descrita. Conjuntamente, los procesos de selección de estos sistemas deben basarse en las limitaciones y características particulares de cada región para determinar la viabilidad de su instalación.

Este proceso distingue a las tecnologías descentralizadas de las soluciones tradicionales, proporcionando un grado de innovación y adaptabilidad a partir de la consideración de las necesidades de la población vulnerable, para proveer el acceso equitativo al agua y al saneamiento para la población (Abramo et al., 2019). Por lo anteriormente expuesto, en México es preciso fomentar de manera significativa los proyectos de investigación para poder aplicar tecnologías innovadoras y acordes a las diversas condiciones ambientales. Así mismo, es importante que los sistemas a instalarse sean seleccionados a partir de herramientas técnicas de decisión que consideren las características de las diferentes tecnologías de tratamiento, así como las condiciones locales del sitio en donde se pretende su instalación.

3.2 OBJETIVOS

3.2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar diferentes tecnologías de tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas para un caso de estudio de la Ciudad de México en función de sus características técnicas y la calidad del agua tratada obtenida.

3.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar las tecnologías de tratamiento descentralizado más adecuadas para su instalación en un caso de estudio de la Ciudad de México, utilizando herramientas de decisión, así como la información recabada a partir de una revisión bibliográfica.
- Diseñar las tecnologías seleccionadas para un caso de estudio en la Ciudad de México, considerando las Normas Técnicas Ecológicas y Sanitarias aplicables.
- Comparar los diseños seleccionados en función de la calidad del agua tratada obtenida y la normatividad vigente en materia de reúso.

4. METODOLOGÍA

La presente investigación se realizó con la finalidad de obtener nuevos conocimientos para seleccionar y diseñar tecnologías descentralizadas para su instalación en viviendas de la ciudad de México. La investigación se dividió en cuatro fases para la ejecución de esta, como lo muestra el siguiente diagrama de flujo (figura 25).

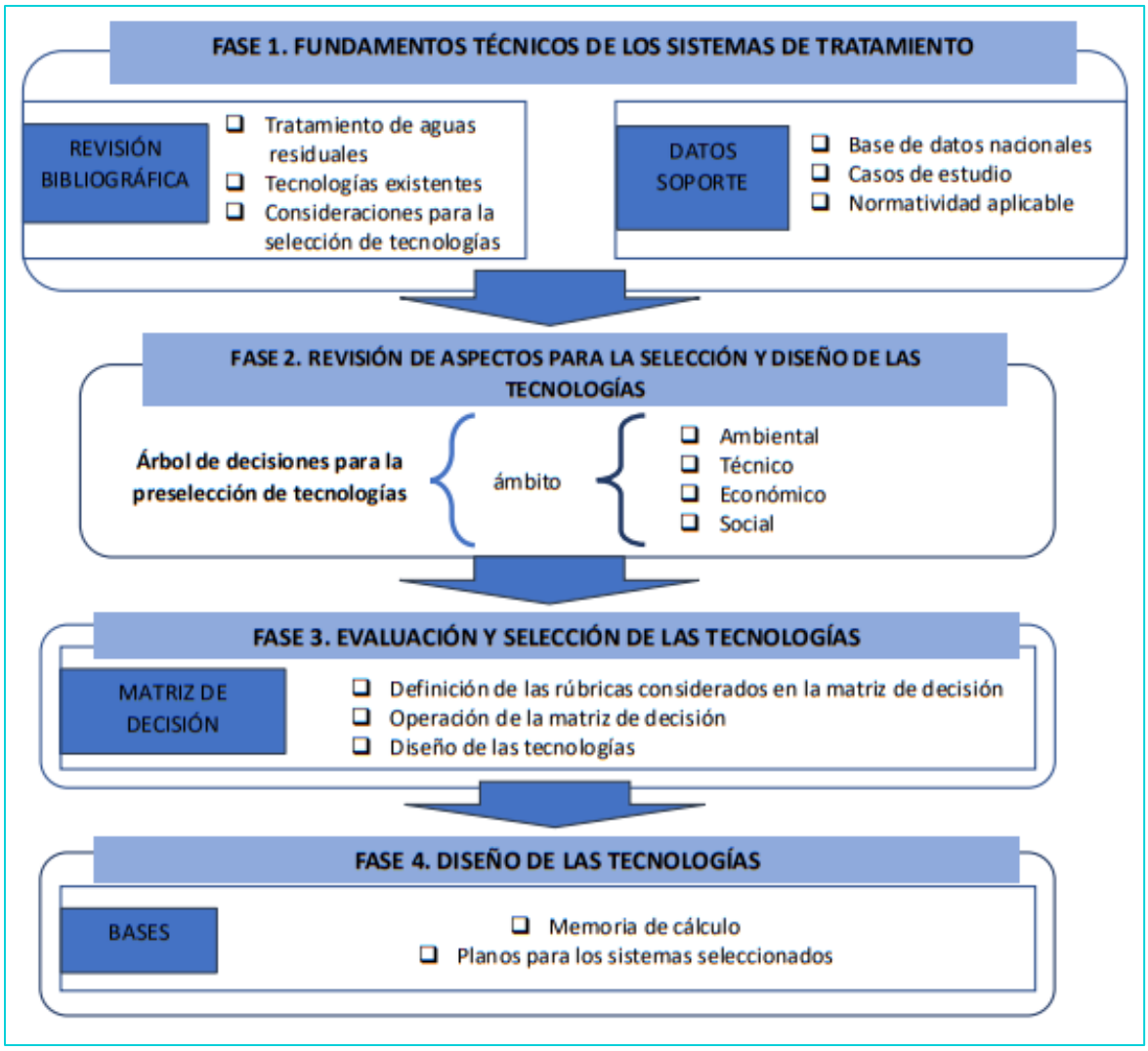


Figura 25. Diagrama de flujo

4.1. Evaluación y selección de tecnologías

Se estudiaron los sistemas centralizados y descentralizados, las plantas de tratamiento de aguas residuales como tecnologías centralizadas y como tecnologías descentralizadas los tanques sépticos, los humedales artificiales y los tanques imhoff. De manera puntual, la importancia del tratamiento de aguas residuales radica en establecer las exigencias de calidad del agua a trata para su disposición en un cuerpo receptor o con fines de reúso acorde a la situación actual de la ciudad de México. Aunado a esto, buscar los mejores escenarios de reuso de aguas residuales tratadas, para obtener beneficios sociales, ambientales y económicos significativos.

Es por ello por lo que con base en las referencias bibliográficas se planteó como caso de estudio una vivienda ubicada en la alcaldía Iztapalapa. Considerando los datos reportados en la investigación se tomaron en cuenta los sistemas más robustos y eficientes que permita producir agua reusable al menor costo, para reducir así el impacto al ambiente por la sobredemanda de agua potable, teniendo en presente en todo momento la protección de la salud. Para fines del proyecto, la obtención del gasto recolectado aproximado de las viviendas en la ciudad de México se hizo con base en datos estadísticos del INEGI.

Para poder seleccionar la tecnología descentralizada adecuada, se elaboró una matriz de decisiones. La rúbrica de la matriz es analítica y presenta 3 aspectos clave, técnico, económico y ambiental. Respecto a los criterios técnicos, se valuaron aspectos como la aplicabilidad del proceso, la complejidad de construcción y equipamiento, el tiempo de resistencia hidráulico, aspectos de localización y la eficiencia en la remoción de contaminantes. En cuanto a los aspectos económicos, se consideraron la flexibilidad de operación, el área requerida para su instalación, demanda energética y los costos de construcción, mantenimiento y operación. Finalmente, para el criterio ambiental se consideró la generación de olores y lodos, esteticismo del paisaje y la reutilización de las aguas residuales tratadas.

Para seleccionar la tecnología a utilizar, se aplicó una función ponderada considerando 4 niveles de ponderación, 0, 1, 2 y 3. El nivel 0 indica que es inaplicable, el nivel 1 indicara que es deficiente, el nivel 2 indicara que es adecuado y el nivel 3 indicara que es muy bueno. En este caso hipotético se tienen 3 propuestas de sistemas de tratamiento; humedales artificiales (opción A), tanques sépticos (opción B) y tanques Imhoff (opción C) como se muestra en la tabla 22. A continuación, se describen los aspectos antes mencionados, los cuales fueron analizados por cada tecnología propuesta en esta investigación.

Tabla 22. Propuestas de tecnologías descentralizadas (elaboración propia).

Tecnologías descentralizadas	Valor numérico asignado	Descripción
Humedal artificial	0	Inaplicable
	1	Deficiente
	2	Adecuado
	3	Muy bueno
Tanque séptico	0	Inaplicable
	1	Deficiente
	2	Adecuado
	3	Muy bueno
Tanque imhoff	0	Inaplicable
	1	Deficiente
	2	Adecuado
	3	Muy bueno

4.2. Aspectos Técnicos

Estos tres procesos de tratamiento han sido aplicados en México, siendo la fosa séptica la más aplicada en comparativa de los humedales artificiales y los tanques Imhoff. Estos procesos son manejados con éxito para el tratamiento de aguas residuales municipales de manera general y de manera particular en el caudal definido por el proyecto hipotético. Sin embargo, en aspectos técnicos generales,

los humedales artificiales son más sensibles a variaciones en el caudal que los tanques sépticos y los tanques Imhoff. Pues sus características físicas dentro y fuera del humedal pueden variar y las nuevas condiciones pueden provocar alteraciones en sus características hidráulicas y operativas.

Los tanques sépticos están proyectados para el tratamiento de las aguas residuales en un tiempo de retención (TRH) mínimo de 36 a 72 horas, permitiendo la separación de las partículas suspendidas teniendo una eficiencia de remoción de 25% al 50% de eliminación de DQO y de 30% a 81% para SS. El tiempo de retención hidráulica de un tanque imhoff suele ser de 2 a 4 horas para conservar un efluente aerobio para su tratamiento complementario o descarga eliminando del 50 al 70% de sólidos suspendidos y reduce el

DQO en un 25 a 50%. Mientras que los humedales artificiales eliminan requieren tiempos de retención muy altos de 7 a 14 días para mostrar evidencia de su eficiencia satisfactoria.

4.3 Aspectos económicos

Los tanques sépticos presentan un mínimo grado de complejidad para su operación tomando en cuenta en su infraestructura la remoción de lodos. Dado que estos sistemas no requieren partes mecánicas, su mantenimiento es escaso y por ello demanda menor atención al operar. Son tecnologías adaptables ante una vasta gama de exigencias de disposición de los desechos de cada vivienda, y su vez pueden tratar agua domestica de cualquier fuente, ya se de baños o cocinas, sin correr el riesgo de alterar su funcionamiento.

Los humedales artificiales su nivel de dificultad de operación es mínimo pues los procesos bioquímicos implicados para la remoción de contaminantes se desarrollan de manera natural, lo que implica la reducción de costes en cuanto al consumo de energía eléctrica, pues estos sistemas solo requieren de energía solar para llevar a cabo los ciclos del sistema. Sin embargo, si su mantenimiento no es adecuado, se puede presentar la colmatación del sustrato lo que resultaría como una problemática ante este sistema de tratamiento.

Los tanques imhoff son idóneos para ciudades modestas y comunidades pequeñas donde no se requiera atención constante y meticulosa, y que a su vez el efluente cumpla con ciertos requerimientos para impedir la contaminación de las corrientes de agua. Sin embargo, son estructuras profundas lo cual en algunas ocasiones dificulta su construcción en suelos característicos de arena fluida o roca, y a su vez contemplar el nivel freático, pues cuando este suele ser alto, el tanque puede quedar a flote o desplazarse en cuanto se encuentre vacío, y en algunas ocasiones puede generar malos olores, aunque su funcionamiento sea correcto.

Para la construcción de un tanque séptico se requiere de un suelo con área suficiente y de naturaleza permeable, que tolere la absorción del efluente. En cuanto a los humedales artificiales generalmente requieren extensas superficies para su implementación. Por su parte los tanques imhoff necesitan poco terreno en comparación con los humedales artificiales.

4.4. Aspectos ambientales

En los tres sistemas de tratamiento la generación de lodos es mínima pues los tanques sépticos su generación de lodos es poco significativa durante su operación. Los humedales no originan biosólidos, ni lodos residuales que demanden tratamiento subsecuente y disposición. Y en cuanto a los tanques imhoff, el lodo se seca y se extrae con mayor facilidad que el procedente de los tanques sépticos, esto se debe a que contiene de 90 a 95% de humedad.

4.5. Matriz de decisiones

Con base a la información recabada en el marco teórico y los criterios antes mencionados se elaboró la siguiente matriz de decisiones como se muestra en la tabla 23, como herramienta para determinar qué sistema de tratamiento de aguas residuales es aplicable para una vivienda en la alcaldía de Iztapalapa. Es por ello por lo que se llenaron 3 matrices para evaluar las 3 tecnologías propuestas como se expone en las tablas 24, 25 y 26 respectivamente.

Tabla 23. Matriz de decisiones para la selección de tecnología descentralizada (elaboración propia).

Aspecto	Parámetro	Valor ponderado (Vp)
Técnico (42%)	Complejidad de construcción y equipamiento	
	Tiempo de resistencia hidráulico	
	Aspectos de localización	
	Aplicabilidad del proceso	
	Eficiencias de remoción	
Económico (33%)	Flexibilidad de operación	
	Costos (construcción, operación y mantenimiento)	
	Consumo de energía eléctrica	
	Área requerida	
Ambiental (25%)	Generación de olores y lodos	
	Esteticismo	
	Calidad del efluente	

Tabla 24. Matriz de decisiones para evaluar los humedales artificiales

Aspecto	Parámetro	Valor ponderado (Vp)
Técnico (42%)	Complejidad de construcción y equipamiento	2
	Tiempo de resistencia hidráulico	0
	Aspectos de localización	1
	Aplicabilidad del proceso	2
	Eficiencias de remoción	3
Económico (33%)	Flexibilidad de operación	3
	Costos (construcción, operación y mantenimiento)	2
	Consumo de energía eléctrica	3
	Área requerida	1
Ambiental (25%)	Generación de olores y lodos	3
	Esteticismo	3
	Calidad del efluente	3
	TOTAL	**26**

Tabla 25. Matriz de decisiones para evaluar los tanques sépticos.

Aspecto	Parámetro	Valor ponderado (Vp)
Técnico (42%)	Complejidad de construcción y equipamiento	3
	Tiempo de resistencia hidráulico	2
	Aspectos de localización	3
	Aplicabilidad del proceso	2
	Eficiencias de remoción	3
Económico (33%)	Flexibilidad de operación	2
	Costos (construcción, operación y mantenimiento)	3
	Consumo de energía eléctrica	3
	Área requerida	3
Ambiental (25%)	Generación de olores y lodos	2
	Esteticismo	3
	Calidad del efluente	2
	TOTAL	**31**

Tabla 26. Matriz de decisiones para evaluar los tanques imhoff.

Aspecto	Parámetro	Valor ponderado (Vp)
Técnico (42%)	Complejidad de construcción y equipamiento	3
	Tiempo de resistencia hidráulico	3
	Aspectos de localización	3
	Aplicabilidad del proceso	3
	Eficiencias de remoción	1
Económico (33%)	Flexibilidad de operación	2
	Costos (construcción, operación y mantenimiento)	3
	Consumo de energía eléctrica	3
	Área requerida	3
Ambiental (25%)	Generación de olores y lodos	1
	Esteticismo	3
	Calidad del efluente	1
	TOTAL	**29**

5. RESULTADOS

5.1 DISEÑO DE LAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO

Con base a los resultados de la matriz de decisiones, para este estudio de caso hipotético es viable aplicar un tanque séptico para una comunidad de la alcaldía de Iztapalapa.

5.1.2 Memoria de cálculo para el diseño del tanque séptico

Para el diseño del tanque séptico se contempla una población de 50 habitantes, con una dotación de 235 litros por habitante al día, considerando un tiempo de retención hidráulica de 1.5 días. El volumen del tanque séptico se calculó en función de los parámetros antes mencionados con la ecuación 1 de la sección 3.8.5 como se muestra a continuación.

$$V_t = \left[\left(235\frac{l}{hab * día}\right)(50\ habitantes)(1.5\ día)\right]\left(\frac{1m^3}{1000}\right) = 17.625m^3$$

El volumen obtenido del tanque no incluye la acumulación de lodos, para ello se requiere calcular primero el volumen de lodos acumulados, por lo cual se aplica la ecuación 2 de la sección 3.8.5, considerando un margen de 0.07 m^3 de lodos por habitante al año y un periodo de vaciado de lodos de 2 años. Con esto se obtiene que:

$$V_{lp} = \left(\frac{0.07m^3}{habitante * año}\right)(50\ habitantes)(2\ años)$$

$$V_{lp} = 7m^3$$

Obtenido el volumen de acumulación de lodos se aplica la ecuación 3 de la sección 3.8.5 Para obtener el volumen total del tanque. Con un volumen del tanque de 17.625 m^3 y un volumen de 7m^3 de lodos acumulados se tiene que:

$$V_T = 17.625\ m^3 + 7m^3 = 24.625m^3$$

Para obtener la altura total del tanque se utilizará la ecuación 4 de la sección 3.8.5 considerando una profundidad de 2.3 metros como se sugiere en la tabla 8 de la sección mencionada. Con esto se obtiene que:

$$H_T = (2.3m)\left(\frac{1}{0.8}\right) = 2.875m$$

Como se mencionó en la sección 3.8.5 la eficiencia de sedimentación del tanque está vinculada con su área superficial, mientras que la capacidad de almacenamiento está vinculada con la profundidad.

Es por ello por lo que se considera utilizar la relación largo- ancho de 1 metro de largo por 3 metros de ancho, de acuerdo con lo recomendado en las bibliografías. Para calcular las dimensiones largo y ancho del tanque, se utilizará la ecuación 5 de la sección 3.8.5. Con esta ecuación y las consideraciones mencionadas se tiene que:

$$V_T = abP_{VT}$$
$$b = 3a$$
$$V_T = 3a^2P_{VT}$$

Por tanto, se tiene que:

$$\frac{V_T}{3P_{VT}} = a^2$$

$$\left(\frac{V_T}{3P_{VT}}\right)^{\frac{1}{2}} = (a^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$a = \left(\frac{24.625m^3}{3m\ (2.3m)}\right)^{0.5} = 1.8891\text{m} \approx 2\text{m}$$

$$b = 3(1.8891m) = 5.6674m \approx 6m$$

Con base en las referencias bibliográficas, para un rango de población de 1 a 20 habitantes se recomienda utilizar tanques sépticos de 2 cámaras, dado que los tanques con un volumen pequeño son más sensibles ante la oscilación de las aguas residuales a la entrada del tanque.

5.1.3 Memoria de cálculo para el dimensionamiento de la cámara uno

Para calcular las dimensiones del cámara 1 utilizará la ecuación 1 de la sección 6.6.2. Con esto se tiene que:

$$V_{c1} = \frac{2}{3}(24\ .625m^3) = 16.42m^3$$

Con el volumen obtenido de la cámara 1, se calcula la longitud de la cámara utilizando la ecuación 3 de la sección 6.6.2 considerando una profundidad de 2 metros después de restar 0.3 metros correspondientes al borde libre. Con esto se tiene que:

$$L_{C1} = \frac{11.75m^3}{2.\,\text{m} * 2m} = 2.9375m \approx 4m$$

5.1.4 Memoria de cálculo para el dimensionamiento de la cámara dos séptico

Para calcular las dimensiones del cámara 2 utilizará la ecuación 2 de la sección 6.6.2. Con esto se tiene que:

$$V_{c2} = \frac{1}{3}(24.625\ m^3) = 8.2083 m^3$$

Con el volumen obtenido de la cámara 2, se calcula su longitud de la cámara utilizando la ecuación 4 de la sección 6.6. Con esto se tiene que:

$$L_{C2} = \frac{8.2083 m^3}{2.\,\mathrm{m} * 2m} = 2.0521 m \approx 2m$$

5.1.5 Comprobación de diseño

Para comprobar que el diseño del tanque séptico es correcto, se comprobó el TRH después de la acumulación de lodos, dividiendo el volumen total del tanque entre el volumen promedio de aguas residuales, con estos datos se encontró que el TRH fue:

$$TRH = \frac{24.625 m^3}{11.75 \frac{m^3}{día}} = 2.0957\ días$$

realizando la conversión de días a horas se tiene un TRH de:

$$TRH = (2.0957\ días)\left(\frac{24 horas}{día}\right) = 50.2978\ horas \approx 50\ horas$$

Con base al TRH de 50 horas, se tiene que el diseño es correcto, pues se encuentra dentro del rango de 36 a 72 horas de TRH recomendado.

5.2 Eficiencias de remoción

Para determinar la concentración de DBO_5, DQO, SST, en el influente, se debe analizar una muestra del agua residual en un laboratorio certificado. Sin embargo, en ausencia de este análisis, se toman como referencias las aportaciones promedio de estos contaminantes por habitante al día que aparecen en la tabla 1 de la sección 5.2.3. Para calcular la concentración de los contaminantes mencionados, se utiliza la ecuación de la sección 5.2.3, para después comparar con los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad vigente.

5.2.1 Eficiencia de remoción de DBO_5

Considerando una aportación de 54000 mg por habitante al día de DBO_5 en las aguas residuales domésticas, la concentración en el influente se obtiene dividiendo la aportación entre la dotación de agua potable de 235 litros por habitante al día. Con estos datos se tiene que la concentración del influente es:

$$concentración\ de\ DBO_5 = \frac{\frac{54000mg}{hab} * día}{235\frac{l}{hab * día}} = 229.78mg/l\ \approx 230\frac{mg}{l}$$

Despejando S_0 de la ecuación de la sección 5.2.3 se tiene:

$$S = 230\left(1 - \frac{90}{100}\right) = 23\text{mg/l}$$

5.2.3 Eficiencia de remoción de DQO

Considerando una aportación de 110000 mg por habitante al día de DQO en las aguas residuales domésticas, la concentración en el influente se obtuvo dividiendo la aportación entre la dotación de agua potable de 235 litros por habitante al día. Con estos datos se tiene que la concentración del influente es:

$$concentración\ de\ DQO = \frac{\frac{110000mg}{hab} * día}{235\frac{l}{hab * día}} = 468.09mg/l\ \approx 468\frac{mg}{l}$$

Despejando S_0 de la ecuación de la sección 5.2.3 se tiene:

$$S = 468\left(1 - \frac{60}{100}\right) = 187\text{mg/l}$$

5.2.4 Eficiencia de remoción de SST

Considerando una aportación de 52000 mg por habitante al día de SST en las aguas residuales domésticas, la concentración en el influente se obtuvo dividiendo la aportación entre la dotación de agua potable de 235 litros por habitante al día. Con estos datos se tiene que la concentración del influente es:

$$concentración\ de\ SST = \frac{\frac{52000mg}{hab} * día}{235\frac{l}{hab * día}} = 221.28mg/l\ \approx 221\frac{mg}{l}$$

Despejando S_0 de la ecuación de la sección 5.2.3 se tiene:

$$S = 221\left(1 - \frac{90}{100}\right) = 22.1\text{mg/l}$$

5.3 Carga orgánica

Para calcular la carga orgánica, se considera que la concentración de sustrato en el influente es de 54 kg/l pues esta es la aportación de DBO5 por habitante, como se indicó en la tabla de la sección. Con estos datos se estimó que la carga orgánica sería:

$$Carga\ org\acute{a}nica = \frac{(11.75m3/d\acute{i}a)(0.054kg/l)}{24.625m^3} = 0.026\frac{kg}{hab * d\acute{i}a}$$

5.4 Planos del tanque séptico

En la figura 26 se muestra el diseño del tanque séptico y en la tabla 23 y 24 sus dimensiones y características correspondientes para el caso de estudio propuesto en Iztapalapa.

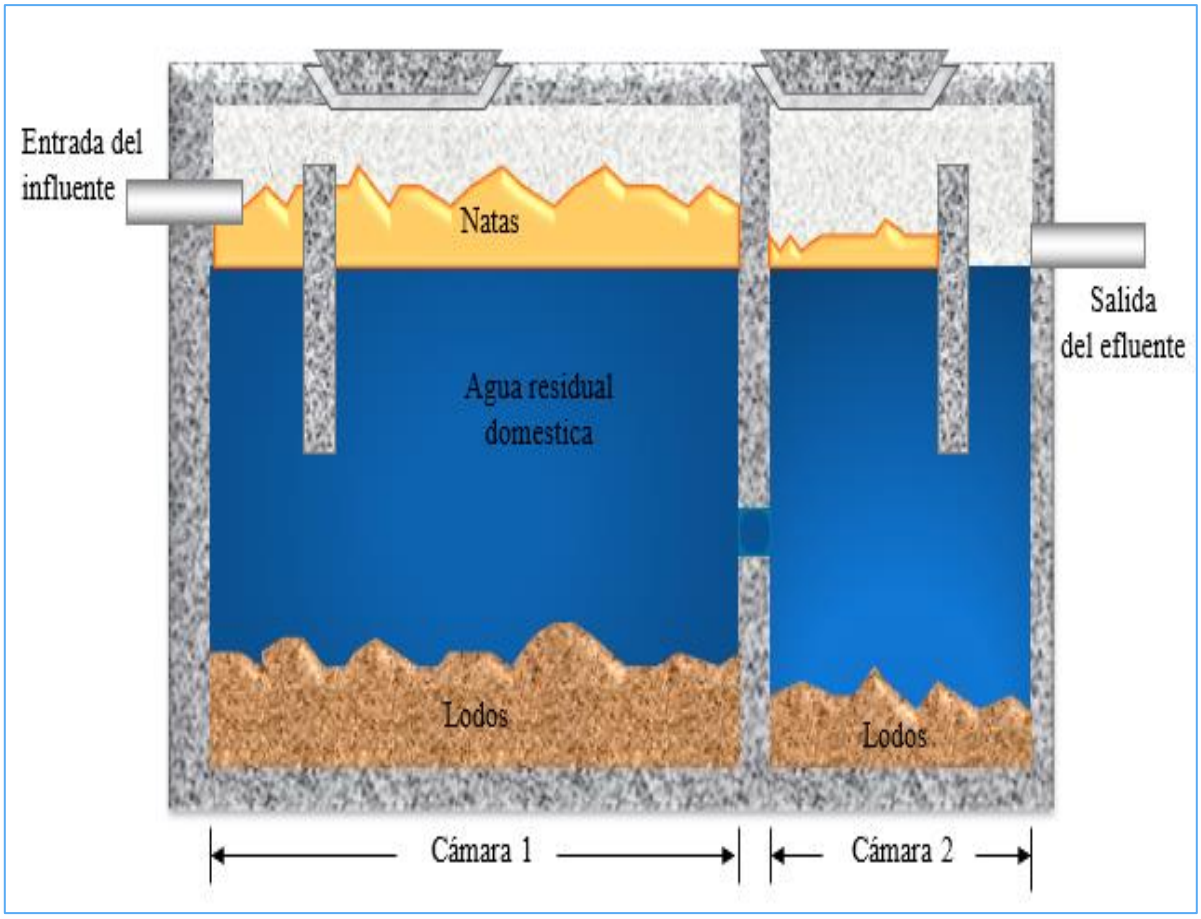


Figura 26. Planos del tanque séptico con 2 cámaras.

Tabla 24. Dimensiones para el tanque séptico con dos compartimentos.

Dimensiones del tanque	Valor
El volumen del tanque séptico (sin acumulación de lodos)	$17.625m^3$
El volumen del tanque séptico (con acumulación de lodos	$7m^3$
Volumen total del tanque	$24.625m^3$
Altura total del tanque	$2.875m$
Ancho	2m
Largo	6m
Volumen de la cámara 1	$16.42m^3$
Longitud de la cámara 1	$4m$
Volumen de la cámara 2	$8.2083m^3$
Longitud de la cámara 2	$2m$

Tabla 25. Calidad esperada para el tratamiento de aguas residuales

Calidad del efluente	Concentración
DBO5	23mg/l
DQO	187mg/l
SST	22.1 mg/l
Carga orgánica	0.026 kg/m^3*l

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La concentración de DBO_5 que puede tener el efluente, se encontró 3 mg/l por encima del límite establecido en la NOM-003-ECOL-1997 para uso en servicios al público con contacto directo. Sin embargo, para uso en servicios al público con contacto indirecto u ocasional se encontró 7 mg/l por debajo del límite establecido, lo cual resulta una concentración optima.

En cuanto a la concentración de SST, se encontró 2.1 mg/l por encima del límite establecido en para uso en servicios al público con contacto directo. Mientras que se encontró 7.9 mg/l por debajo del límite establecido para su uso en servicios con contacto directo u ocasional en la NOM-003-SEMARNAT-1997.Con base en la NOM-001-SEMARNAT-2021, la concentración de SST obtenida cumple con los limites permisibles que establece la norma.

Con base en la NOM-001-SEMARNAT-2021, la concentración de DQO, se encontró 7 mg/l por encima del límite establecido para descargas en ríos, arroyos, canales, drenes e infiltración en el suelo. Para descargas en embalses, lagos y lagunas, se encontró 67 mg/l por encima de lo establecido. Respecto a los límites establecidos para descargas en zonas marinas mexicanas, se encontró 87 mg/l por encima de lo permitido. Y finalmente para los límites establecidos para descargas en áreas verdes y suelos cársticos, se encontró 115 mg/l por encima de lo establecido.

La concentración obtenida de carga orgánica representa una velocidad baja con la que se suministra la materia, esto se debe a las condiciones anaerobias del tanque séptico, lo cual se convierte en un limitante para que las bacterias crezcan y consuman el sustrato. Pues con altas cargas de materia orgánica, la concentración de sustrato puede ser menor en el efluente, lo cual beneficia a la salud humada y la vida acuática especialmente. Dadas estas concentraciones, se tiene que el efluente se puede utilizar en infiltración del suelo y otro tipo de riegos.

Al realizar la comparación de la calidad del efluente que ofrece el tanque séptico diseñado en este trabajo de investigación, se tiene que el efluente puede ser utilizado en servicios públicos de contacto indirecto u ocasional, tales como lavar patios, calles, abastecimiento de lagos artificiales y sistemas contra incendio, parques recreativos, lavado de autos.

7. CONCLUSIONES

Para la sección y diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales es de suma importancia conocer los criterios sobre tratamiento de aguas residuales, tales como tipos de aguas residuales, su composición física, química y biológica para brindar un efluente que cumpla con la normatividad mexicana vigente en materia de aguas residuales y a su vez se ajuste a las necesidades de la población.

En México el abastecimiento de agua potable no es equitativo en la ciudad de México, pues presenta diversas deficiencias, tecnológicas, económicas y políticas. Se presenta mayor desabasto de agua potable en las zonas con mayor índice de población y aunado a esto, la calidad del agua potable presenta índices de calidad con riesgos a la salud. Sé tiene una cobertura del 92.8% de alcantarillado, no obstante, solo el 63% de las aguas residuales reciben tratamiento, el cual es con tecnologías centralizadas. Siendo una de las posibles razones por las cuales los influentes en áreas particulares de la ciudad presenten una alta concentración de contaminantes

Las tecnologías descentralizadas para el tratamiento de aguas residuales son sistemas de tratamiento in situ apropiado para zonas con población de bajos ingresos económicos o escasez de agua. Estas tecnologías se diseñan para zonas rurales, periurbanas como casas habitación, desarrollos ecoturísticos, parques industriales, áreas comerciales y también para pequeñas poblaciones de grandes comunidades

Los tanques sépticos sistemas de tratamiento biológico anaerobio. Los microorganismos y bacterias que se involucran en el tratamiento son anaeróbicas pues su desarrollo se da en ausencia del oxígeno. Durante el tratamiento se producen lodos que sedimentan en el fondo del tanque y gases que ascienden a la superficie del tanque arrastrando consigo partículas que forman una capa de natas. Son una alternativa de tratamiento descentralizado aplicable en zonas donde cuenten con redes de alcantarillado local.

Aunado a esto, pueden operar de manera eficiente considerando una capacidad mínima de 2000 litros y una capacidad máxima de 35 000 litros. Ofrecen eficiencias de remoción de SST optimas de acuerdo con lo establecido en las normas NOM-001-SEMARNAT-2021 y la NOM-003-SEMARNAT-1997. Sin embargo, las eficiencias de remoción de DQO no cumplen con la NOM-001-2021 por lo cual resulta ineficiente para la descarga directa en cuerpos receptores propiedad de la nación. No obstante, brinda eficiencias de remoción de DBO5 optimas de acuerdo con lo establecido en la NOM-003-SEMARNAT-1997 para reuso en servicios públicos de contacto indirecto u ocasional.

8. REFERENCIAS

Abramo, L., Cechinni, S., y Morales, B. (2019, 9 mayo). *Programas sociales, superación de la pobreza e inclusión laboral: aprendizajes desde América Latina y el Caribe*. REPOSITORIO DIGITAL Comisión Económica Para América Latina y El Caribe. https://repositorio.cepal.org/handle/11362/44602

Achircana Mamani, P. J., y Mestas Castro, A. M. (2020, 3 febrero). *Evaluación de la eficiencia de un reactor combinado RAFA-FAFA en el tratamiento de aguas residuales municipales en la localidad de Espinar – Cusco.* Repositorio UNSA. http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10613

Acevedo Ocón, G. M. (2020, 27 mayo). *Caracterización, evaluación y propuesta de tratamiento de las aguas residuales de una industria de fabricación de envases de aluminio - Repositorio Institucional USAC*. Repositorio del Sistema Bibliotecario Universidad de San Carlos de Guatemala. http://www.repositorio.usac.edu.gt/13737/

ACUATECNICA S.A.S (2018, 15 mayo). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Acuatécnica. http://acuatecnica.com/ (antes acuatecnia)

ACUATECNICA S.A.S (2018, 6 febrero). *Acuatécnica Líderes en Ingeniería Ambiental y Sanitaria*. http://acuatecnica.com/

aecid. (2017, 11 septiembre). *Día Mundial del retrete 2017: ¿A dónde van las heces?* https://www.aecid.es/Centro-Documentacion/Documentos/Divulgaci%C3%B3n/Comunicaci%C3%B3n/11_14_WTD2017_Factsheet_SPA.pdf

Agenda 2030. (2017, 11 septiembre). *Objetivo de Desarrollo Sostenible 6: Agua Limpia y Saneamiento.* GOBIERNO DE MÉXICO. https://www.gob.mx/agenda2030/articulos/6-agua-limpiay-saneamiento

Agua. (2021, 9 abril). *infografia_abastecimiento_agua-01 –*. Agua.org.mx. https://agua.org.mx/biblioteca/de-cuanta-agua-disponemos-el-agua-en-la-ciudad-infografia/infografia_abastecimiento_agua-01/

Alvarado Granados, A. R., Díaz Cuenca, E., y Pérez Ramírez, C. A. (2018, 6 marzo). El saneamiento del agua a través de la planeación hídrica. 1975–2018. http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/71099.

Álvarez Florido, L. J., y Ospina Gómez, H. C. (2019). *TIPIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS SÉPTICOS EN VIVIENDAS DE SUELO RURAL*. Repositorio Institucional Universidad Distrital Francisco José de Caldas. https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/16212/AlvarezFloridoLinaJanith2019.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Arce Cardona, P. A. (2018, 14 noviembre). *Lumieres - Repositorio institucional Universidad*

de América: Humedales artificiales: una alternativa para tratamiento de aguas de producción. Fundación Universidad de América. http://52.0.229.99/handle/20.500.11839/7132

Arias Gómez, J. J., y Rodríguez Sánchez, J. J. (2021, 3 noviembre). *Análisis multi-criterio para la selección de trenes de tratamiento de aguas residuales con fines de reúso del agua.* Universidad de Los Andes Colombia. https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/53531

Arroba Arroba, M. F. (2017, 3 enero). *Diseño del alcantarillado sanitario combinado y tratamiento de aguas servidas del sector de Langos San Andrés parroquia El Rosario cantón Guano provincia de Chimborazo.* Repositorio PUCE. http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/12119

Arteaga Cortez, V. M., Quevedo Nolasco, A., del Valle Paniagua, D. H., Castro Popoca, M., Bravo Vinaja, A., & Ramírez Zierold, J. A. (2019, 12 mayo). *Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo*. Scielo. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222019000500319

Arteaga Cortez, V. M., y del Valle Paniagua, D. H. (2018, 30 octubre). *DSpace at My University: Propuesta metodológica para la construcción de humedales artificiales*. Colegio de Postgraduados. http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/3092

Avendaño Rivera, P. A. (2018, 21 mayo). Producción de agua residual sintética como candidato a material de referencia en los parámetros de pH, sólidos suspendidos totales y demanda química de oxígeno. Repositorio UMSA. https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/16104

Ávila Rojas, M. A., y Villanueva Montealegre, J. D. (2020, 2 septiembre). *Análisis de calidad del agua (turbiedad y color) de un sistema de filtración de flujo ascendente construido con materiales granulares para bajantes de agua lluvia*. Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia. https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/24923

Ayesa. (2021, 16 diciembre). *PTAR de Atotonilco*. https://www.ayesa.com/en/sectors/water-and-the-environment/treatment-plants/137-ptar-de-atotonilco

Barreto Pardo, S., Vargas Moncada, D. K., Vargas Moncada, L., y Gómez Ayala, S. L. (2019, 11 diciembre). *Evaluación de coagulantes Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas*. amelica. http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/130/1301258001/1301258001.pdf

Bendezu Zuñiga, M. P., y Jurado Pari, C. (2021, 13 septiembre). *EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA POR MEDIO DE LODOS ACTIVADOS A ESCALA PILOTO EN EL CAMAL MUNICIPAL DEL DISTRITO DE HUANCAVELICA*. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Huancavelica. http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3766

Bermúdez Grisales, J. A., y Carrillo Loaiza, J. E. (2019). *Repositorio Institucional U católica*. Universidad Católica de Colombia. https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/24358

Bódalo, A., y Gómez, E. (2002). *Química en Murcia* (1.ª ed.). Universidad de Murcia Servicio de Publicaciones.

Bonilla Abarca, L., Bermeo Garay, M., Bonilla Bermeo, S., y Viteri García, I. (2017). *Tratamiento de Aguas Residuales de textilera utilizando carbón activado*. Compás Grupo de Capacitación e investigación pedagógica. http://hdl.handle.net/123456789/79

Buitrón Méndez, G., Reino Sánchez, C., y Carrera Muyo, J. (2018). *Manual técnico sobre tecnologías biológicas aerobias aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales | CYTED. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.* CYTED. https://www.cyted.org/es/biblioteca/manual-tecnico-sobre-tecnologias-biologicas-aerobias-aplicadas-al-tratamiento-de-aguas

Cáceres Magnus, H. (2018). *guía para la construcción de cámaras sépticas y sistemas de infiltración a nivel domiciliario*. Bivica. https://www.bivica.org/files/5440_camaras-septicas-construccion.pdf

Caldes, J. (2020, 15 enero). *Conoce los tipos de aguas residuales*. deagua. http://blogdeagua.es/conoce-los-tipos-de-aguas-residuales/

Carbajal Rowan, A., Zapattini Irala, C., y Quintero Zamora, C. (2018, 18 mayo). *Humedales Artificiales, una alternativa para la depuración de Aguas Residuales en el Municipio de Mizque, Bolivia. | Carvajal Rowan | Diseño y Tecnología para el Desarrollo.* DisTecD. http://polired.upm.es/index.php/distecd/article/view/3744/3830

Carbotecnia. (2021, 22 octubre). *¿Qué es la conductividad en el agua?* https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/que-es-la-conductividad-en-el-agua/

Castañeda, M. T. (2020, 26 febrero). *Estequiometría y cinética del crecimiento microbiano*. SEDICI. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/89651

Castellanos Niño, J. E., y Quintero Cubillos, A. F. (2019, 7 octubre). *Lumieres - Repositorio institucional Universidad de América: Desarrollo de una propuesta de sistema de tratamiento de aguas residuales generada en la empresa Producción y Gestión S.A.S.* Universidad de América. http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/7616

CBR ingeniería. (2021, 24 mayo). *Diferencias entre aguas grises, jabonosas y negras.* https://blog.cbr-ingenieria.com.mx/diferencias-entre-aguas-grises-jabonosas-y-negras#:%7E:text=Las%20aguas%20negras%20o%20cloacales,%2C%20org%C3%A1nicos%2C%20minerales%20y%20qu%C3%ADmicos.

CEMDA. (2018, 27 noviembre). *Humedales*. https://www.cemda.org.mx/humedales/

Cepal, N. U. (2018, 28 marzo). *Segundo informe anual sobre el progreso y los desafíos regionales de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe*. https://repositorio.cepal.org/handle/11362/43415

Colombia. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 28(2), 315–322. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000200315

CONAGUA. (2021b). *CATÁLOGO GENERAL DE PRECIOS UNITARIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO*. Gobierno de México. https://www.google.com/url?client=internal-element-cse&cx=001009928181730403690:azhagrfyx8s&q=https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/623785/Cat_logo_General_de_Agua_Potable_de_Precios_Unitarios_para_la_Construcci_n_de_Sistemas_de_Agua_Potable_y_Alcantarillado_2021.pdf&sa=U&ved=2ahUKEwjmroDe6cb1AhUSnWoFHcp2D-YQFnoECAMQAQ&usg=AOvVaw1BhMD5zN0ilfmuOmwm3-Yt

CONAGUA. (2020). *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.* Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/680584/DSAPAS_2020.pdf

CONAGUA. (2019). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación.* Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/611037/Inventario_2019.pdf

CONAGUA. (2019b). *Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales*. Gobierno de México. https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf

CONAGUA. (2019c, enero 2). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas Rurales, Periurbanas y Desarrollos Ecoturísticos*. https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas

CONAGUA. (2019d, enero 2). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento; Saneamiento básico*. CONAGUA. https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas

CONAGUA. (2018a). Estadísticas del agua en México. Sistema Nacional de Información del Agua. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf

Crites, R., Middlebrooks, E., Bastian, R., & Reed, S. (2014). Natural Wastewater Treatment Systems. Florida: IWA Publishing

deagua. (2020, 17 septiembre). *Fosa séptica*. http://blogdeagua.es/fosa-septica/

de Anda Sánchez, J. (2020, 6 octubre). Los retos en la recuperación de la *infraestructura de saneamiento en el contexto rural: reconversión tecnológica y rehabilitación de la PTARM de Copala, Jalisco.* Https://Rei.Iteso.Mx/Handle/11117/6344. https://rei.iteso.mx/handle/11117/6344

de Anda Sánchez, J. (2017b). *Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. Sociedad y ambiente.* http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-65762017000200119&script=sci_arttext

Díaz García, A., y Paredes Ramos, P. M. (2022). *Aprovechamiento de aguas residuales domésticas tratadas mediante el uso de un humedal artificial de piñón y girasol*. Dialnet. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8331419

DL-MANUAL. (2020, 14 septiembre). *Manual de Mantenimiento y Operación Del Tanque Séptico*. https://dl-manual.com/doc/manual-de-mantenimiento-y-operacion-del-tanque-septico-wo19qmplw4z5

Duran Quintero, G., y Gonzales Baquero, J. A. (2022*). TRATAMIENTO POR EL MÉTODO DE FITO-REMEDIACIÓN DE AGUAS SERVIDAS PROVENIENTES DE LAS INSTALACIONES DE LA UNIVERSIDAD LIBRE, SEDE BOSQUE POPULAR.* Repositorio Institucional unilibre. https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/21622

Dutch Water Tech. (2021, 2 junio). *¿Qué son las aguas grises? Diferencias en las aguas residuales | Dutch Water Tech*. Dutch Water Tech - Tratamiento del agua. https://dutchwatertech.net/es/base-de-conocimiento/que-son-las-aguas-grises/#:%7E:text=Las%20aguas%20grises%20son%20las,estado%20parado%20durante%20un%20tiempo.

EAWAG. (2020, 20 marzo). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento*. Agua.org.mx. https://agua.org.mx/biblioteca/compendio-de-sistemas-y-tecnologias-de-saneamiento/

Eco Intellutions. (2019, 13 febrero). *Tipos de Aguas Residuales, ¿cuántos existen y qué contienen?* Eco - Intellutions. https://ecointell.com.mx/plantas-de-tratamiento-de-agua/tipos-de-aguas-residuales-cuantos-existen-y-que-contienen

EL FINANCIERO. (2022, 23 marzo). *Día Mundial del Agua: ¿Cuánto cuesta en CDMX? y ¿Cuánta gasta una persona a diario?* https://www.elfinanciero.com.mx/nacional/2022/03/22/dia-mundial-del-agua-cuanto-cuesta-en-cdmx-y-cuanta-hasta-una-persona-a-diario/

Ferro, G. (2017b, abril 12). *América Latina y el Caribe hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible en agua y saneamiento: reformas recientes de las políticas sectoriales. REPOSITORIO DIGITAL Comisión Económica Para América Latina y El Caribe.*

https://repositorio.cepal.org/handle/11362/41136

Fibras y Normas de Colombia. (2019, 1 octubre). *AGUAS GRISES: DEFINICIÓN Y TRATAMIENTO*. https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/aguas-grises-definicion-y-tratamiento/

Flores Ortega, J. I. (2019, 6 diciembre*). La provisión descentralizada de servicios públicos en México: el caso del agua potable y su saneamiento.* Repositorio Digital CIDE. http://repositoriodigital.cide.edu/handle/11651/3988

Flowen. (2021, 28 agosto). *Tratamiento de aguas grises y su reutilización*. https://flowen.com.pe/site/tratamiento-de-aguas-grises-y-su-reutilizacion/

Fondos de Agua. (2019). *Sistema de Aguas de la Ciudad de México*. https://www.fondosdeagua.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/latin-america/aguas.pdf

Fúquene, D. M., Yate Segura, A., Duque Chaves, C. M., Chivirí Salomón, J. S., Valderrama López, C. F., Forero Ausique, V. F. (2019, 30 mayo). *Capítulo 8. Tratamiento de aguas residuales*. UNAD. https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/book/article/view/3123

FuturENVIRO. (2015, noviembre). *La planta de tratamiento de aguas residuales más grande de América Latina*.http://www.futurenviro.com/digital-versions/REP2015/Atotonilco/files/assets/common/downloads/PTAR%20Atotonilco%20.pdf

Gaceta UNAM. (2020, 10 febrero). *Humedal artificial en San Juan de Aragón*. https://www.gaceta.unam.mx/humedal-artificial-en-san-juan-de-aragon/

Gallegos Cereceres, V. M., Robles Lozoya, N., y Ahumada Erives, O. C. (2018). *Percepciones, actitudes y conductas respecto al servicio de agua potable en la Ciudad de México.*http://www.web.facpya.uanl.mx/vinculategica/Vincultagieca_4/42%20GALLEGOS_ROBLES_AHUMADA.pdf.

García, S. L. (2019*). Factores que influyen en el pH del agua mediante la aplicación de modelos de regresión lineal.* Dialnet. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7475468

Giraldo Jurado, E. A., y Lozada Cadeño, D. L. (2019, 5 agosto). *Origen de los olores en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Repositorio Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/981

Gómez Chavarro, C. I. (2021, 17 febrero). *Diseño de Humedales Artificiales*. Repositorio Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1378

González, A. C. P., Reyes, F. J. E., Cortes, N. G., y Cedillo, K. A. (2020). Coagulación, floculación y sedimentación para la clarificación de aguas residuales. Innovación en Biotecnología II, 73.

Guerra Moreno, L. P. (2019). *METODOLOGÍA PARA LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS LLUVIAS Y GRISES EN EDIFICACIONES*. Universidad Católica de Colombia. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23395/1/Metodolog%C3%ADa-para-la-reutilizaci%C3%B3n-de-aguas-lluvias-y-grises-en-edificaciones.pdf

iagua. (2015, 21 mayo). *Los humedales artificiales*. https://www.iagua.es/blogs/carolina-miguel/los-humedales-artificiales-componentes-y-tipos

IANAS y UNESCO. (2019, 4 octubre). *Calidad del Agua en las Américas: Riesgos y Oportunidades –*. Agua.org.mx. https://agua.org.mx/biblioteca/calidad-del-agua-en-las-americas-riesgos-y-oportunidades/

INEGI. (2020). *CLASIFICACIONES DEL CENSO DE POBLACIÓN Y VIVIENDA 2020*. https://inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198701.pdf

INEGI. (2020b). *Encuesta Nacional de Vivienda (ENVI) 2020*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/envi/2020/doc/envi_2020_presentacion.pdf

Infoabe. (2020, 14 julio). *Este es el plan de CDMX para garantizar abasto de agua potable a toda la población*. infobae. https://www.infobae.com/america/mexico/2020/07/14/este-es-el-plan-de-cdmx-para-garantizar-abasto-de-agua-potable-a-toda-la-poblacion/

INNOTEC LABORATORIOS. (2021, 17 junio). *Características de aguas residuales - Innotec Laboratorios*. 【InnotecLaboratorios】. https://www.innotec-laboratorios.es/la-importancia-y-caracteristicas-de-las-aguas-residuales/

ISC. (2008, 15 agosto). *NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA EL DISEÑO Y EJECUCIÓN DE OBRAS E INSTALACIONES HIDRÁULICAS*. https://www.isc.cdmx.gob.mx/dependencia/marco-normativo

LABOMERSA. (2021, 14 septiembre). *¿Por qué es importante DQO (Demanda Química de Oxígeno) y DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) en análisis de aguas? – Labomersa*. https://labomersa.com/2021/09/14/por-que-es-importante-dqo-demanda-quimica-de-oxigeno-y-dbo-demanda-biologica-de-oxigeno-en-analisis-de-aguas/#:%7E:text=La%20DBO%20es%20la%20demanda,org%C3%A1nicas%20contenidas%20en%20la%20muestra

Labprocess. (2021, 25 enero). *Turbidez y Sólidos Suspendidos Totales*. Labprocess | Productos de laboratorio y control de procesos. https://www.labprocess.es/turbidez-y-solidos-suspendidos-totales

López Vázquez, C. M., Buitrón Méndez, G., García, H., y Cervantes Carrillo, F. J. (2017). *Tratamiento anaerobio de aguas residuales: Principios, modelación y diseño*. library. https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/30973/640701.pdf?sequence=1#page=476

Macías Ramos, M. A., y Padilla Holguín, J. L. (2021). *Evaluación del tiempo de retención hidráulico de la planta de tratamiento de aguas residuales en base a lodos activados como posible causante de la contaminación odorífera en la ciudadela Puerto Seymour*. Repositorio Digital ULVR. http://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/4401

Mahiara, R. (2020, 21 noviembre). *Tanque Séptico: los Pros & Contras*. NATIVU blog. https://blog.nativu.com/tanque-septico-los-pros-contras/

Martínez Austria, P. F., Díaz Delgado, C., y Moeller Chávez, G. (2019, 1 abril). *Seguridad hídrica en México: diagnóstico general y desafíos principalesWater security in Mexico: general diagnosis and main challenges | Ingeniería del agua | IWA Publishing*. Ingeniería de Agua. https://iwaponline.com/IA/article/23/2/107/68023/Seguridad-hidrica-en-Mexico-diagnosticogeneral-y

Metcalf y Eddy. (2003). Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. 4th edition.

Metcalf y Eddy (1995). Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, vertido y reutilización.

Montero C., D. (2021, 3 febrero). *El abastecimiento de agua en Iztapalapa. Un análisis institucional*. Scielo. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-59962020000200301

Moron, E. (2018, 26 junio). *Determinación de la constante cinética para el diseño de sistemas de tratamiento biológico*. Steemkr. https://steemkr.com/stem-espanol/@emiliomoron/determinacion-de-la-constante-cinetica-para-el-diseno-de-sistemas-de-tratamiento-biologico

NOM-003-ECOL-1997 (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, con el objetivo de proteger el medio ambiente y la salud de la población.

Nuevo, D. (2018, 9 noviembre). *Tratamientos secundarios en depuración de aguas residuales*. TECPA. https://www.tecpa.es/edar-tratamiento-secundario-depuracion-aguas/

Olivera Ángeles, G. R. (2021, 10 diciembre). Comparación de la remoción de la DBO y DQO en filtros percoladores con *Eisenia foetida* y *Lumbricus terrestris* de las aguas residuales domésticas en Tuyururi-2019. Repositorio Institucional UNASAM. http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4758

OPS (2003). *Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización*. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OPS%202005.%20Gu%C3%ADa%20para%20el%20dise%C3%B1o%20de%20tanques%20s%C3%A9pticos.pdf

Peñaherrera Mora, C., y Altamirano Carrasco, F. A. (2020). *Reaprovechamiento de aguas grises, una revisión de las alternativas como un atenuante ambiental*. Repositorio UPEU. https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/4055/Claudia_Trabajo_Bachillerato_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pérez Martínez, J., y Hernández Gil, J. F. (2020, 11 mayo*). Una mirada crítica sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Telos Fundación Telefónica. https://telos.fundaciontelefonica.com/telos113-cuaderno-sostenibilidad-covid-19-una-mirada-critica-sobre-los-objetivos-de-desarrollosostenible/

Pire, C. (2019, 5 diciembre). *Las aguas residuales: tipos y características*. La Contaminación. https://lacontaminacion.org/aguas-residuales/#:%7E:text=Caracter%C3%ADsticas%20qu%C3%ADmicas%3A%20prote%C3%ADnas%2C%20carbohidratos%2C,bacterias%2C%20hongos)%20y%20virus.

Polanía Janzasoy, Á. V., y Calderón Vallejo, L. F. (2018, 26 febrero). *Evaluación De Una Estrategia Centralizada Y Una Descentralizada Para El Control De Contaminación En Cuerpos Hídricos*. Revista de Investigación Agraria y Ambiental. https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2077

PROYECTOS MÉXICO. (2021, 29 noviembre). *PTAR Atotonilco – Proyectos México*. https://www.proyectosmexico.gob.mx/proyecto_inversion/ptar-atotonilco/

Pulido Salazar, L. D., y Jiménez Cuellar, M. A. (2021). *Propuesta de mejoramiento al acueducto rural ASOACUAROBLE en el departamento del Meta y la disposición de aguas residuales de cada domicilio adscrito.* Universidad de La Salle Ciencia Unisalle. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2915&context=ing_ambiental_sanitaria

Ramalho, R. S. (2021) *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona-Bogotá-Buenos Aires-Caracas México: Editorial Reverté, S.A.

Reich, D. (2019, 24 junio). *¿Qué Es Tratamiento Descentralizado?* Fluence. https://www.fluencecorp.com/es/que-es-tratamiento-descentralizado/

RETEMA. (2019, 28 marzo). *Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco, México - Artículos y Reportajes*. https://www.retema.es/articulo/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-atotonilco-mexico-SYFU

Rivera Flores, K. V., y Jiménez Renders, D. (2020, 8 abril). *Los humedales artificiales*. Issuu. https://issuu.com/pronaturapeninsuladeyucatan/docs/kambul_marzo_2020/s/10420207#:%7E:text=Adem%C3%A1s%2C%20los%20humedales%20artificiales%20tienen,de%20m%C3%A1s%20de%2040%20a%C3%B1os.

Rodríguez Loaiza, D. C. (2020, 4 agosto). *Humedales artificiales subsuperficiales: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de la materia orgánica | Ingenierías USBMed*. INGENIERÍAS USBMed. https://revistas.usb.edu.co/index.php/IngUSBmed/article/view/4558

Rueda Morales, M. (2019, 20 diciembre). *Aprovechamiento de la orina como fuente de nutrientes en la agricultura | Revista Tecnología en Marcha*. TEC. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/4567

Saaltink, M. W. (2021, 12 marzo). *Evaluación de la recarga artificial de acuíferos como tratamiento terciario en depuración de aguas residuales y comparación frente a otros tratamientos terciarios. UPCommons*. Portal de Acceso Abierto al Conocimiento de La UPC. https://upcommons.upc.edu/handle/2117/341546

SACMEX. (2020, 14 julio). *Programa Estratégico para Garantizar el Derecho al Agua. 2020–2024*. https://www.sacmex.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Proyectos/programa-estrategico-2020-2024.pdf

Salas, J. J. (2020, 20 noviembre). *El modesto tanque Imhoff: fundamentos y diseño*. iagua. https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/modesto-tanque-imhoff-fundamentos-y-diseno

Sasse, L. (1998). DEWATS Tratamiento Descentralizado de Aguas Residuales en Países en Desarrollo. Asociación de Investigación y Desarrollo de Bremen en el Extranjero (BORDA), Alemania

SEDECO. (2020). *Principales Resultados del Censo Población y Vivienda 2020*. https://www.sedeco.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/resultados-del-censo-pob-y-viv-2020-1.pdf

SEDEMA. (2019). *Cuidar el agua es cosa de todos*. Cuidar el agua. http://www.cuidarelagua.cdmx.gob.mx/delegacion.html

Semanate, M. L. D. (2020, 22 diciembre). *REMOCIÓN DE TENSOACTIVOS Y COLIFORMES EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE PROCESOS FENTON*. Scielo. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992019000400931&script=sci_arttext

Shanaghan, P. E. (2019). Hazel Run: Upgrading Your Wastewater Treatment: You Have Choices. Https://Www.Slideshare.Net/Dmalchow/Wastewater-101-Decentralized-Approach-theCommunity-Process-and-Onsite-Treatment-Options-Presentation.

https://www.slideshare.net/dmalchow/wastewater-101-decentralized-approach-the-communityprocess-and-onsite-treatment-options-presentation

SINA. (2022). *Sistema Nacional de Informació³n del Agua | SINA*. Sistema Nacional de Información Del Agua | SINA. https://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?p=6#:%7E:text=Para%20la%20evaluaci%C3%B3n%20de%20la,S%C3%B3lidos%20Suspendidos%20Totales%20(SST).

SINA. (2021, junio). *Sistema Nacional de Información del Agua | SINA*. SINA. http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=calidadAgua&ver=reporte&o=5&n=nacional

Sotil Flores, H. D. (2017). *ANÁLISIS DE INDICADORES DE CONTAMINACIÓN BACTERIOLÓGICA (COLIFORMES TOTALES Y TERMOTOLERANTES) EN EL LAGO DE MORONACOCHA*. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Pereira - RIBUC. http://repositorio.ucp.edu.pe/bitstream/handle/UCP/274/SOTIL-1-Trabajo-An%C3%A1lisis.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=%2DCaracter%C3%ADsticas%3A%20Los%20coliformes%20termotolerantes%20son,grado%20klebsiella%2C%20Enterobacter%20y%20Citrobacter.

TECPA. (2022, 10 febrero). *La contaminación del agua*. TECPA. https://www.tecpa.es/contaminacion-de-aguas/#:%7E:text=Se%20define%20como%20la%20cantidad,ampliamente%20empleado%20es%20la%20DBO5.

Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., y Zurbrügg, C. S. R. Y. (2020). *Humedal artificial de flujo vertical*. SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management! https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/humedal-artificial-de-flujo-vertical

Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., y Zurbrügg, C. S. R. Y. (2018b). *Tanque Imhoff*. SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management! https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/tanque-imhoff#:%7E:text=El%20tanque%20Imhoff%20es%20una,asentado%20en%20la%20misma%20unidad.

Tito, B. (2020, 16 octubre). ▷ *Tratamiento Terciario de Aguas Residuales: desinfección y características*. Ingeniería Ambiental . https://ingenieriaambiental.net/tratamiento-terciario-de-aguas-residuales/

Torres Rivero, L. A. (2020, 30 diciembre). *Afectación de la calidad de agua de los pozos del campus Tecnológico de Cancún por mancha urbana*. ECORFAN. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Desarrollo_Urbano_y_Sustentable/vol6nu

m19/Revista_de_Desarrollo_Urbano_y_Sustentable_V6_N19_1.pdf

UNESCO. (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos.* https://es.unesco.org/water-security/wwap/wwdr

UNESCO. (2017). *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas 2017: Las aguas residuales: el recurso desaprovechado, resumen ejecutivo.* https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247552_spa

UNODC. (2021). *Evaluación de la Gobernanza de la Seguridad Urbana*. https://www.unodc.org/documents/Urban-security/210521_EGSU_Iztapalapa_Espanol.pdf

Valdevielso, A. (2020, 6 octubre). *¿Qué es un sistema de lodos activados?* iagua. https://www.iagua.es/respuestas/que-es-sistema-lodos-activados

Valdevieso, A. (2020, 19 octubre). *¿Qué son las aguas pluviales?* iagua. https://www.iagua.es/respuestas/que-son-aguas-pluviales

Vargas, A., Calderón, J., Velásquez, D., Castro, M., y Núñez, D. (2020). *Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia*. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 28(2), 315–322. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000200315

Vela Ríos, I. M. (2019). *Eficiencia de un Tanque Imhoff-HA a escala, para mejorar la calidad de las aguas servidas municipales del distrito de La Habana, Moyobamba.* Repositorio Institucional UNSM. http://hdl.handle.net/11458/3164

Velásquez Forero, J. C. (2019, 18 febrero). *Alternativa de construcción de alcantarillado y sistema séptico integrado, para el saneamiento de aguas residuales del centro poblado mata de café municipio de Muzo-Boyacá*. Repositorio USTA. https://repository.usta.edu.co/handle/11634/15630

Weber Jr Walter, J. (2021, 22 febrero). *Control de la calidad del agua*. Google Books. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=S9MfEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=procesos+fisicoqu%C3%ADmicos+para+tratamiento+de+aguas+residuales.&ots=EVl6S7fTTw&sig=-rl1kRKylmYNzEu0svCvd7w_YWg&redir_esc=y#v=onepage&q=procesos%20fisicoqu%C3%ADmicos%20para%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.&f=false

ANEXO 1

Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación que establece la NOM-001-SEMARNAT-2021

Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo								
										Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Grasas y Aceites	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21
Sólidos Suspendidos Totales	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140	20	24	28
Demanda Química de Oxígeno	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210	60	72	84
Carbono Orgánico Total*	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53	15	18	21
Nitrógeno Total	25	30	35	15	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	25	30
Fósforo Total	15	18	21	5	10	15	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5	10	15
Huevos de Helmintos (huevos/litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1								
Escherichia coli, (NMP/100 ml)	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	50	100	200
Enterococos fecales* (NMP/100 ml)	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	50	100	200

Simbología
N.A: No Aplica
P.M: Promedio Mensual
P.D: Promedio Diario
V.I: Valor Instantáneo
NMP: Número más probable
UpH: Unidades de pH
UT: Unidades de Toxicidad
* Si Cloruros es menor a 1000 mg/L se analiza y reporta DQO.
* Si Cloruros es mayor o igual a 1000 mg/L se analiza y reporta COT.
* Si la conductividad eléctrica menor a 3500 µS/cm se analiza y reporta *E. coli*.
* Si la conductividad eléctrica es mayor o igual a 3500 µS/cm se analiza y reporta Enterococos fecales.
Las determinaciones de Conductividad eléctrica y de Cloruros no requieren la acreditación y aprobación de la entidad correspondiente.

ANEXO 2

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal que establece la NOM-002-SEMARNAT-1996.

Parámetros (mg/l)	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Grasas y aceites	50	75	100
SS	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

Los límites máximos permisibles establecidos en la columna instantáneo son únicamente valores de referencia, en el caso de que el valor de cualquier análisis exceda el instantáneo, el responsable de la descarga queda obligado a presentar a la autoridad competente en el tiempo y forma que establezcan los ordenamientos legales locales, los promedios diario y mensual, así como los resultados de laboratorio de los análisis que los respaldan.

ANEXO 3

Límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos que establece la NOM-003-SEMARNAT-1997

Tipo de reuso	Promedio mensual				
	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de helminto (h/l)	Grasas y aceites (mg/l)	DBO5 (mg/l)	SST (mg/l)
Servicios al público con contacto directo	240	≥1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto	1000	≤5	15	30	30