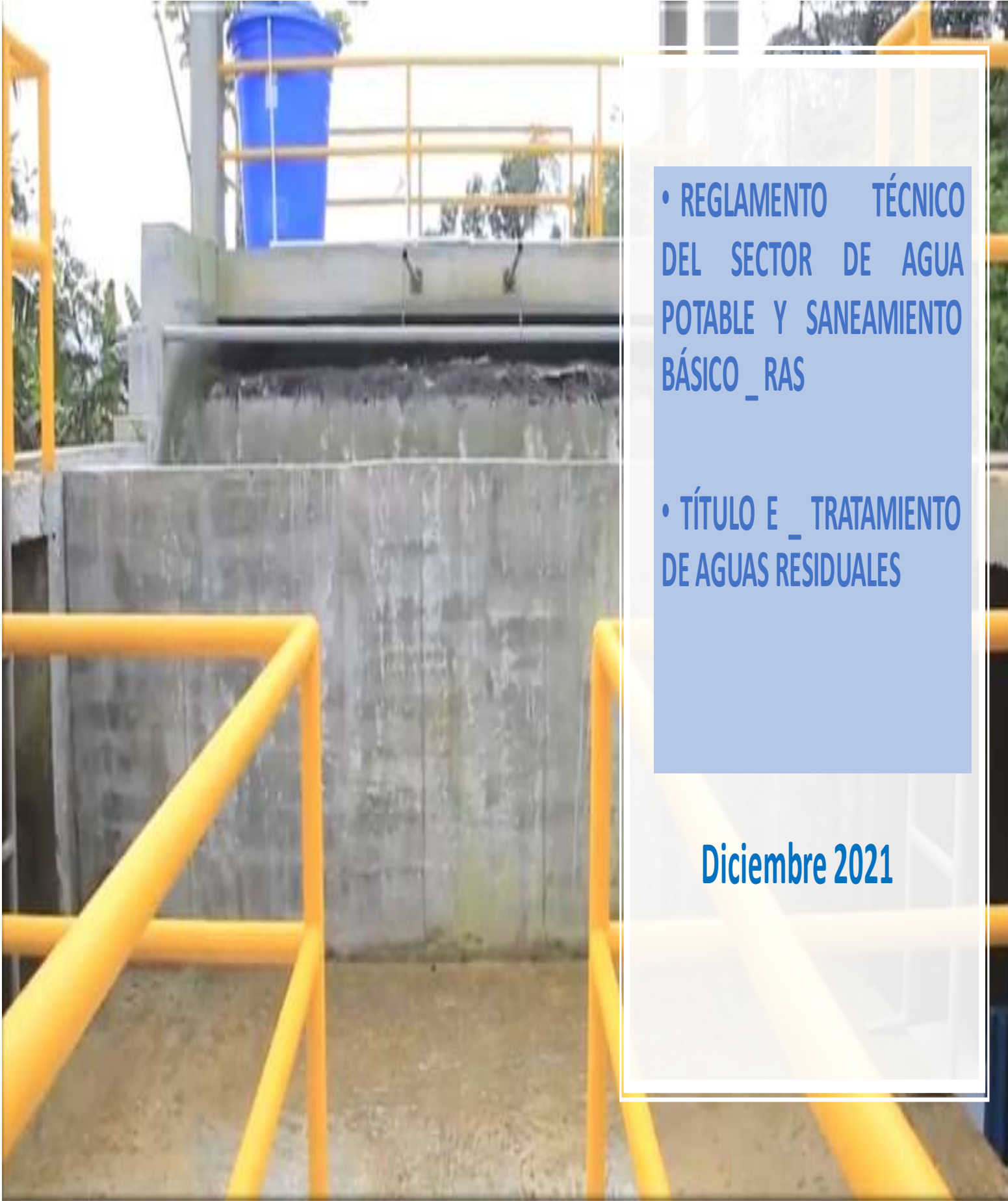




- REGLAMENTO TÉCNICO
DEL SECTOR DE AGUA
POTABLE Y SANEAMIENTO
BÁSICO _RAS

- TÍTULO E _TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES

Diciembre 2021

Iván Duque Márquez
Presidente de la República

Jonathan Tybalt Malagón González
Ministro de Vivienda, Ciudad y Territorio

José Luis Acero Vergel
Viceministro de Agua y Saneamiento Básico

Hugo Alonso Bahamón Fernández
Director de Política y Regulación

Gloria Patricia Tovar Álzate
Directora de Infraestructura y Desarrollo Empresarial

Apoyo Técnico

Consultoría realizada por la Universidad Javeriana 2012
Junta Técnica Asesora del RAS (Resolución 330 de 2017)

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio

Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico
Dirección de Infraestructura y Desarrollo Empresarial
Dirección de Política y Regulación
Grupo de Desarrollo Sostenible
Grupo de Política Sectorial

Equipo Técnico MVCT:

Braulio Cano Burgos
Carlos Augusto Sierra Ríos
Catalina Castañeda Ramírez
Jimmy Arnulfo Leguizamón Pérez
María Elena Cruz Latorre
Fredy Alberto Barros Gil
Claudia Yamileth Rendón Valencia
Miguel Ángel Castro Munar
Paola Marcella Tibaquirá Perdomo
Yulieth Rossio Coronel Picón

ISBN:

Catalogación en Publicación. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
Centro de Documentación y Referencia



Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y
Saneamiento Básico: TÍTULO E. Tratamiento de Aguas
Residuales / Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico
(Ed.)

Número de páginas p.

ISBN: _____

1. Saneamiento básico 2. Servicios públicos 3. Aguas
residuales 4. Sistemas de tratamiento de aguas residuales.
Reglamento técnico de agua potable y saneamiento básico

© **Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio**

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión de material contenido en este documento para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización de los titulares de los derechos de autor, siempre que se cite claramente la fuente. Se prohíbe la reproducción de este documento para fines comerciales.

Distribución gratuita

Presentación

El Reglamento técnico de Agua y Saneamiento (RAS) está compuesto por una parte obligatoria, principalmente la Resolución 330 de 2017, modificada por las resoluciones 799 y 908 de 2021 y otra parte, los manuales de buenas prácticas de ingeniería, conocidos como los títulos del RAS, en donde se realizan recomendaciones mínimas para formulación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación y mantenimiento de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo, de forma que se logre con esta infraestructura prestar un servicio con una calidad determinada.

El presente título, establece las condiciones requeridas para la concepción y el desarrollo de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Así mismo orienta la planificación, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la operación, el mantenimiento y el seguimiento de la operación de estos sistemas y sus componentes.

Con la actualización del título E, se busca informar a diseñadores y tomadores de decisiones, sobre aquellos aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar, implementar, operar y mantener sistemas, haciendo uso de las tecnologías aplicables; reseñando una amplia bibliografía sobre cada uno de los temas.

Ministro de Vivienda, Ciudad y Territorio

CONTENIDO

0	GENERALIDADES	9
0.1	Alcance	9
0.2	Enfoque y consideraciones generales.....	9
0.3	Abreviaturas	11
0.4	Glosario.....	13
1	CAUDAL DE AGUA RESIDUALES	18
2	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL Y DEL CUERPO RECEPTOR	20
2.1	Marco Normativo	20
2.2	Conceptos generales	21
2.3	Programa de monitoreo.....	22
2.4	Toma de muestras y metodologías de aforo.....	23
2.5	Caracterización de vertimientos a la red de alcantarillado.....	26
2.6	Caracterización en la planta de tratamiento de aguas residuales	27
2.7	Caracterización del vertimiento a la fuente receptora.....	29
2.8	Caracterización de emisarios submarinos	30
2.9	Estudios de tratabilidad.....	¡Error! Marcador no definido.
3	DESARROLLO DE UN PROYECTO DE AGUAS RESIDUALES	33
3.1	Etapas de conceptualización y planificación	33
3.1.1	Articulación de los proyectos con los planes o esquemas de ordenamiento territorial, los planes ambientales, regionales y sectoriales.....	33
3.1.2	Problemas, objetivos y metas	34
3.2	Planeación de proyectos por etapas	35
3.3	Etapas de planeación de los proyectos de tratamiento de aguas residuales.....	35
3.3.1	Actividades preliminares de la planeación	35
3.3.2	Etapas de selección de las alternativas tecnológicas dentro del proceso de planeación	39
3.3.3	Etapas finales del proceso de planeación	45
3.4	Etapas de diseño de los proyectos de tratamiento de aguas residuales	45

3.5	Etapa de construcción.....	48
3.6	Puesta en marcha.....	48
3.7	Etapa de operación y mantenimiento	50
3.8	Planos y memorias de cálculo	50
4	TRATAMIENTOS DESCENTRALIZADOS.....	51
4.1	Objetivo.....	51
4.2	Procesos Tecnológicos descentralizados.....	52
4.3	Clasificación de las soluciones	53
4.3.1	Cuando se trata de viviendas rurales dispersas unifamiliares	53
4.3.2	Viviendas o entornos rurales dispersos y pequeños centros poblados rurales.....	54
4.4	Estudios básicos requeridos.....	54
4.5	Selección de las alternativas tecnológicas	56
5	TRATAMIENTOS CENTRALIZADOS.....	¡Error! Marcador no definido.
6	LODOS Y BIOSOLIDOS.....	65
6.1	Tratamiento de lodos	65
6.1.1	Tecnologías de tratamiento de lodos	68
6.2	Caracterización de lodos y biosólidos	69
6.2.1	Clasificación de los Biosólidos	75
6.2.2	Materiales Orgánicos Estabilizados.....	75
6.2.3	Alternativas de uso de los Biosólidos.....	¡Error! Marcador no definido.
7	GASES.....	¡Error! Marcador no definido.
7.1	Normatividad	¡Error! Marcador no definido.
7.2	Caracterización del gas.....	¡Error! Marcador no definido.
7.3	Utilización del gas.....	¡Error! Marcador no definido.
7.3.1	Quema de Biogás.....	¡Error! Marcador no definido.
7.3.2	Aprovechamiento de Biogás	¡Error! Marcador no definido.
8	REÚSO DEL AGUA RESIDUAL TRATADA.....	¡Error! Marcador no definido.
8.1	Normatividad	¡Error! Marcador no definido.
8.2	Aspectos metodológicos para la planificación de un proyecto de reúso	¡Error! Marcador no definido.
8.2.1	Información general.....	¡Error! Marcador no definido.
8.2.2	Diagnóstico.....	¡Error! Marcador no definido.

8.2.3	Análisis de alternativas de solución y selección	¡Error! Marcador no definido.
8.2.4	Elaboración del plan de obras.....	¡Error! Marcador no definido.
8.2.5	Determinación de costos del proyecto.....	¡Error! Marcador no definido.
8.2.6	Formulación del Plan de Negocios y/o hoja de ruta para la implementación del proyecto.....	¡Error! Marcador no definido.
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	¡Error! Marcador no definido.

Lista de Anexos

- Anexo 1 – Selección de tecnologías de tratamiento centralizadas
- Anexo 2 – Fichas técnicas de procesos de tratamiento de aguas residuales descentralizados y centralizados
- Anexo 3 – Fichas técnicas de tratamiento de lodos y biosólidos
- Anexo 4 – Fichas técnicas de tratamiento de biogás

Lista de Tablas

No.	Nombre de la Tabla
1	Caudales de Diseño para el Tratamiento de aguas residuales (Tabla 22 Res 330 de 2017)
2	Tipo de Muestras
3	Aspectos para la limpieza de envases
4	Metodologías de Aforo
5	Caracterización en plantas de tratamiento de aguas residuales
6	Parámetros mínimos que deben medirse en vertimientos puntuales. Res630/2015
7	Estudios básicos específicos solicitados
8	Aspectos en la determinación de los proyectos de aguas residuales
9	Análisis de costos para cada alternativa
10	Parámetros y valores máximos permisibles - ARD De las soluciones individuales de saneamiento de viviendas unifamiliares y bifamiliares (Res 631/2015)
11	Procesos sistema séptico
12	Distancias mínimas a sistemas sépticos
13	Información básica específica solicitada - Artículo 181 de la Resolución 330 de 2017
14	Generación de lodos en las etapas de tratamiento de aguas residuales
15	Composición característica de lodos urbanos
16	Puntos de muestreo de lodos
17	Preservación de muestras en el muestreo y análisis de lodos
18	Frecuencia de muestreo de biosólidos
19	Frecuencia de muestreo de lodos
20	Parámetros Fisicoquímicos para los Materiales Orgánicos Estabilizados
21	Eficiencia de la actividad de separación de la fracción orgánica
22	Contenidos de Materiales Inertes
23	Articulado dentro del Decreto 1077 de 2015 relacionados con el uso de los biosólidos
24	Articulado dentro del Decreto 1077 de 2015 relacionados con los productores de los biosólidos
25	Compuestos del biogás

0 GENERALIDADES

0.1 Alcance

El presente título tiene como propósito brindar orientaciones básicas para la planeación, el diseño, construcción, puesta en marcha, operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales y la gestión de subproductos del tratamiento, implementados en Colombia, a través de conceptos que sirvan de orientación a los profesionales interesados en el desarrollo de este tipo de proyectos.

0.2 Enfoque y consideraciones generales

El Título E es un manual de buenas prácticas de ingeniería que contiene la normatividad básica para la planeación, desarrollo, operación, puesta en marcha, y mantenimiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales y una guía para realizar las gestiones al respecto, teniendo en cuenta criterios de seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia y sostenibilidad, para dar cumplimiento a la normativa sectorial y ambiental del país. Es importante señalar, que algunos de los aspectos incluidos en este título se complementan, amplían y/o articulan con los demás títulos del RAS.

Adicionalmente, el Título Incluye un conjunto de Fichas Técnicas sobre tecnologías de tratamiento descentralizados y centralizados, así como tecnologías para el tratamiento de lodos, en las cuales se presenta la descripción general de la tecnología, Sistemas de Pretratamiento necesarios, Aplicabilidad, ventajas y desventajas, aspectos de diseño, rendimientos esperados, aplicabilidad, efectos, Aspectos particulares de operación y mantenimiento y referencias bibliográficas.

Por otro lado, el tratamiento de las aguas residuales está íntimamente asociado con la Gestión integral del Recurso Hídrico, en la medida que permite reducir los niveles de contaminación de las fuentes receptoras, permitiendo así su uso para el desarrollo de otras actividades ya sean económicas, recreativas, entre otros.

Adicionalmente, el tratamiento de aguas residuales trae consigo la generación de subproductos como el agua residual tratada, lodos y biosólidos, y gases, los cuales tradicionalmente han sido vistos como residuos del tratamiento y sobre los cuales se realiza un manejo para reducir las afectaciones sobre el medio ambiente. Sin embargo, en el marco de la incorporación del concepto de economía circular en la prestación de los servicios de aguas potable y saneamiento básico, las prácticas asociadas con la gestión de los subproductos, se convierten en una estrategia para reducir los impactos derivados de los procesos del tratamiento.

En este sentido se ha identificado que la promoción del reúso del agua residual tratada para usos agrícola y/o industrial, el uso de biosólidos en restauración, mejoramiento o recuperación de suelos degradados, remediación de suelos contaminados, entre otros, y el aprovechamiento del biogás para la generación de calor para calentamiento en procesos, generación de energía eléctrica, entre otros, se convierten en estrategias cada vez más viables para aprovechar las características de estos subproductos.

Considerando, los aspectos antes mencionados, el presente título se ha estructurado como se describe a continuación:

Capítulo 0 Generalidades, contiene el alcance, aspectos generales del título como lo son la relación del tratamiento de las aguas residuales con la gestión integral del recurso hídrico y el concepto de economía circular, así como la gestión de subproductos. Además, incluye las abreviaturas y el glosario.

Capítulo 1 Caudal de Diseño, define la forma como se calculan los diferentes caudales de diseño con los cuales se deben diseñar los procesos a incorporar en un sistema de tratamiento de aguas residuales.

Capítulo 2 Caracterización del vertimiento de aguas residuales y del cuerpo receptor, presenta los requerimientos técnicos y normativos para la caracterización en calidad y cantidad tanto de los vertimientos puntuales, como de las fuentes receptoras.

Capítulo 3 Desarrollo de un proyecto de aguas residuales, presenta las etapas secuenciales que deben considerarse en el desarrollo de este tipo de proyectos, partiendo de las exigencias generales que trae la Resolución 330 de 2017.

Capítulo 4 Tratamientos descentralizados, con las consideraciones, tecnologías aplicables y requisitos técnicos para atender viviendas dispersas o pequeños centros poblados.

Capítulo 5 Tratamientos centralizados, con las consideraciones, tecnologías aplicables y requisitos técnicos de los sistemas centralizados de tratamiento.

Capítulo 6 Lodos y biosólidos, en el marco de la normatividad existente, presenta los lineamientos a seguir para que técnicamente se pueda realizar el tratamiento y aprovechamiento de estos subproductos.

Capítulo 7 Gases, en el marco de la normatividad existente, presenta los lineamientos a seguir para que técnicamente se pueda realizar el tratamiento y aprovechamiento de estos subproductos.

Capítulo 8 Reúso del agua residual tratada, presenta la normatividad asociada al reúso y los aspectos metodológicos para la planificación de un proyecto de reúso.

0.3 Abreviaturas

AOP	Procesos avanzados de oxidación, por sus siglas en inglés Advanced Oxidation Process
BNR	Proceso de remoción biológica de nutrientes, por sus siglas en inglés Biological nutrient removal
CAR	Corporación Autónoma Regional
CEC	Capacidad de intercambio catiónico, por sus siglas en inglés
CM _i	Concentración máxima permisible de la sustancia i establecida en la normatividad legal o como meta de calidad, en mg/L
CONPES	Consejo Nacional de Política Económica y Social
CRA	Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico
CR _i	Concentración registrada de la sustancia i en el efluente o vertimiento, en mg/L
DAF	Flotación por aire disuelto, por sus siglas en inglés Dissolved Air Flotation
DNP	Departamento Nacional de Planeación
EPS	Sustancias poliméricas extracelulares que se producen en las biopelículas, por sus siglas en inglés Extracellular Polymeric Substances
FAR	Filtro de arena
FAFA	Filtro anaerobio de flujo ascendente
FBBR	Bioreactor de Lecho Fluidificado, por sus siglas en inglés Fluidized bed biological reactor
F/M	Abreviación de la expresión en inglés <i>Food/Microorganism Mass</i> , que es la relación entre la carga orgánica y la masa de microorganismos que intervienen en el tratamiento del agua
GEI	Gases de Efecto Invernadero
HDPE	Polietileno de alta densidad, por sus siglas en inglés High density polyethylene
ICONTEC	Instituto Colombiano de Normas Técnicas
IFAS	Proceso de tratamiento, llamado así por las siglas en inglés de <i>Integrated Fixed Film Activated Sludge</i> , que consiste en un reactor de biopelícula con recirculación de lodos activados

IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
MVCT	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MBR	Bioreactor de membrana, por sus siglas en inglés <i>Membrane Bio Reactor</i>
MG	Militamices giratorios
NTC	Norma técnica colombiana
OD	Oxígeno disuelto
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PLC	Abreviación de la expresión en inglés <i>Programmable Logic Controller</i> , es un dispositivo programable que controla los procesos automáticamente
PIGCCS	Plan Integral de Gestión de Cambio Climático Sectorial.
PSMV	Plan de saneamiento y manejo de vertimientos
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
PVC	Cloruro de Polivinilo, por sus siglas en inglés Polyvinylchloride
RAFA	Reactor anaerobio de flujo ascendente
RAP	Reactor anaerobio de flujo a pistón
RAS	Reglamento técnico de agua potable y saneamiento básico
SBR	Reactor secuencial discontinuo, por las siglas en inglés de <i>Sequential Batch Reactor</i>
SRT	Siglas en inglés de <i>Sludge Retention Time</i> , que equivale al tiempo de retención de lodos, también llamado edad de lodos
SSFW	Humedal construido de flujo subsuperficial, por sus siglas en inglés Subsuperficial Flow Wetland.
SSLM	Sólidos suspendidos en el licor mezclado
SSPD	Superintendencia de Servicio Públicos Domiciliarios
TMP Pressure	Presión a través de la membrana, por sus siglas en inglés <i>Transmembrane Pressure</i>
TPQA	Tratamiento Primario Químicamente Asistido

UASB	Reactor anaeróbico de flujo ascendente, por sus siglas en inglés <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UV	Ultravioleta
VFW	Humedal construido de flujo vertical, por sus siglas en inglés Vertical Flow Wetland.
WAO	Oxidación Húmeda no Catalítica, por sus siglas en inglés Wet Air Oxidation

0.4 Glosario

Para interpretar y aplicar el presente título del RAS, se tendrán en cuenta las siguientes definiciones, además de las establecidas en el artículo 256 de la Resolución 330 de 2017 o las normas que la modifique o sustituya:

Absorción: Concentración selectiva de sólidos disueltos en el interior de un material sólido, por difusión.

Abultamiento del lodo: Proliferación de organismos filamentosos en el licor mixto que causa un deterioro en la asentabilidad del lodo.

Acetogénesis: Etapa básica del proceso anaerobio en la cual los productos de la acidogénesis son convertidos en ácido acético, hidrógeno y gas carbónico.

Acidez: Capacidad de una solución acuosa para reaccionar con iones hidroxilo. Se mide cuantitativamente por titulación con una solución alcalina normalizada y se expresa usualmente en términos de mg/l como carbonato de calcio.

Acidogénesis: Etapa básica del proceso anaerobio en la cual las moléculas pequeñas, producto de la hidrólisis, se transforman en hidrógeno, gas carbónico y ácidos orgánicos (butírico, propiónico y acético).

Afluente: Agua residual u otro líquido que ingrese a un reservorio, o algún proceso de tratamiento.

Aguas crudas: aguas residuales que no han sido tratadas.

Aguas regeneradas: Aguas residuales tratadas que han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan.

Aguas residuales o aguas servidas: Residuos líquidos provenientes del uso doméstico, comercial e industrial.

Ambiente aerobio: proceso que requiere la presencia de oxígeno.

Ambiente anaerobio: Proceso desarrollado en ausencia de oxígeno molecular.

Ambiente anóxico: Ambiente bioquímico en el cual no existe oxígeno molecular, pero existe oxígeno en forma combinada como nitratos y nitritos.

Análisis de laboratorio: Examen del agua, agua residual o lodos, efectuado por un laboratorio.

Autoridades Ambientales Competentes: Para efectos del presente documento, se consideran como autoridades ambientales competentes:

- a. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sectorial (MADS).
- b. Corporaciones Autónomas Regionales (CAR).
- c. Corporaciones de Desarrollo Sostenible
- d. Los municipios, distritos o áreas metropolitanas cuya población urbana fuere igual o superior a un millón de habitantes (1.000.000).
- e. Autoridades Ambientales Distritales a que se refiere la Ley 768 de 2002.

Bacteria: Grupo de organismos microscópicos unicelulares, rígidos carentes de clorofila, que desempeñan una serie de procesos de tratamiento que incluyen oxidación biológica, fermentaciones, digestión, nitrificación y desnitrificación.

Biodegradación: Degradación de la materia orgánica por acción de microorganismos sobre el suelo, aire, cuerpos de agua receptores o procesos de tratamiento de aguas residuales.

Bioportador: Partícula inerte que tiene capacidad de desarrollar en su superficie un cultivo de organismos aeróbicos o anaeróbicos, y que se mantiene suspensión o en forma de filtro sumergido o emergido en los reactores para incrementar la biomasa y acelerar los procesos de tratamiento

Biopelícula: Película biológica adherida a un medio sólido que lleva a cabo la degradación de la materia orgánica.

Capacidad de asimilación y dilución: capacidad de un cuerpo de agua para aceptar y degradar sustancias, elementos o formas de energía, a través de procesos naturales, físicos químicos o biológicos sin que se afecten los criterios de calidad e impidan los usos asignados.

Caracterización de aguas: Muestreos y análisis de laboratorio realizados a un cuerpo de agua o a un vertimiento para determinar su calidad.

Caudal medio: Caudal medio anual.

Compuestos orgánicos refractarios: Aquellos resistentes a la degradación. Plaguicidas, plásticos, detergentes, residuos industriales y aceites.

Concentración: Denominase concentración de una sustancia, elemento o compuesto en un líquido, la relación existente entre su masa y el volumen del líquido que lo contiene.

Descomposición anaerobia: Degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular por efecto de microorganismos. Usualmente va acompañada de la generación de ácidos y gas metano.

Desnitrificación: Conversión de nitratos contenidos en la biomasa aeróbica en nitrógeno en su forma gaseosa N_2 mediante procesos anóxicos.

Digestión aerobia: Descomposición biológica de la materia orgánica de un lodo en presencia de oxígeno.

Digestión anaerobia: Descomposición biológica de la materia orgánica de un lodo en ausencia de oxígeno.

Eco-eficiencia: Basado en el concepto de crear más bienes y servicios utilizando menos recursos y creando menos residuos y contaminación. Se alcanza mediante la distribución de bienes con precios competitivos y servicios que satisfagan las necesidades humanas y brinden calidad de vida a la vez que reduzcan progresivamente los impactos medioambientales de bienes y la intensidad de recursos a través del ciclo de vida entero a un nivel al menos en línea con la capacidad estimada de ser llevada por la Tierra

Fotosíntesis: Mecanismo por el cual, las plantas absorben dióxido de carbono y expiden oxígeno al recibir la radiación solar.

Material Orgánico Estabilizado: Producto orgánico sólido, resultante del proceso de estabilización de la fracción orgánica de los residuos sólidos.

Metanogénesis: Etapa del proceso anaerobio en la cual se genera gas metano y gas carbónico.

Mortalidad de bacterias: Medida de descomposición de la población bacteriana. Normalmente se expresa por un coeficiente cinético de primer orden.

Muestra compuesta. Es la mezcla de varias muestras puntuales de una misma fuente, tomadas a intervalos programados y por períodos determinados, las cuales pueden tener volúmenes iguales o ser proporcionales al caudal durante el período de muestras.

Muestra integrada: Es aquella que se forma por la mezcla de muestras puntuales tomadas en diferentes puntos simultáneamente, o lo más cerca posible. Un ejemplo de este tipo de muestra ocurre en un río o corriente que varía en composición de acuerdo con el ancho y la profundidad.

Nitrificación: Conversión nitrógeno orgánico y amoniacal en biomasa aeróbica y nitratos mediante procesos aeróbicos.

Oxígeno disuelto: Concentración de oxígeno medida en un líquido, por debajo de la saturación. Normalmente se expresa en mg/L.

Plan de Cumplimiento: Plan que contiene los programas, proyectos y actividades orientadas al cumplimiento a los requisitos de calidad de agua de los vertimientos y los objetivos de calidad de la fuente receptora.

Plan de expansión de costo mínimo: Plan de inversión a mediano y largo plazo, cuya factibilidad técnica, económica, financiera, y ambiental, garantiza minimizar los costos de expansión del servicio. Los planes oficiales de inversión serán indicativos y se harán con el propósito de garantizar continuidad, calidad, y confiabilidad en el suministro del servicio.

Responsables de Vertimientos: Son las personas, los establecimientos o entidades que vierten aguas residuales a cuerpos de agua naturales, o que no cumplen con la calidad de las aguas residuales establecidas por las personas prestadoras del servicio de alcantarillado que utilizan.

Tasas Retributivas: Contribuciones que deben hacer los establecimientos o personas responsables de vertimientos puntuales a cuerpos naturales de agua de acuerdo con lo establecido en el Decreto 1076 de 2015 del MADS o las normas que los modifiquen o sustituyan.

Toxicidad: La propiedad que tiene una sustancia, elemento o compuesto, de causar daños en la salud humana o la muerte de un organismo vivo.

Sólidos activos: Son la parte de los sólidos volátiles en suspensión que representan los microorganismos.

Sustancias de interés sanitario: Compuestos, elementos, sustancias y parámetros indicadores de contaminación fisicoquímica y biológica, que permiten evaluar la calidad del vertimiento y su efecto sobre el recurso hídrico. Son las contenidas en el Artículo 20 del Decreto 1594 de 1984, o aquel que lo modifique o reemplace, así como las demás que definan las autoridades competentes.

Tiempo de retención celular: Tiempo medio teórico de retención de la masa de microorganismos en un proceso de tratamiento, también conocido como edad de lodos. Usualmente se expresa como la razón entre la masa celular de microorganismos sobre la masa extraída por día.

Tratamiento convencional: procesos de tratamiento bien conocidos y utilizados en la práctica. Generalmente se refiere a procesos de tratamiento primario o secundario. Se excluyen los procesos de tratamiento terciario o avanzado.



Tubo pitot: Tubo doblado de forma especial, que al igual que el molinete es útil para medir velocidades en una tubería.

1 CAUDAL DE AGUAS RESIDUALES

De acuerdo con el artículo 134 de la resolución 330 de 2017, los aportes de aguas residuales deben determinarse con base en información de consumos y/o mediciones recientes registrados en la localidad, y considerando las densidades previstas para el período de diseño con base en el Plan de Ordenamiento Territorial o Plan Básico de Ordenamiento Territorial o Esquema de Ordenamiento Territorial y Plan de Desarrollo del municipio a través de zonificación del uso de la tierra.

Dentro de los caudales que requieren ser calculados se encuentran:

- Caudal de aguas residuales domésticas: se calcula con base en las proyecciones de demanda de agua potable, proyecciones de población, dotación y coeficiente de retorno de acuerdo con la información disponible para la realización de dichos análisis.
- Caudal de aguas residuales no domésticas: se establece para zonas netamente industriales, comerciales e institucionales, y requiere de análisis específicos en el área de estudio para su definición. Se debe alinear con instrumentos de planeación del municipio.
- Caudal medio diario: corresponde a la suma de los aportes de aguas residuales domésticas y no domésticas (industriales, comerciales e institucionales).
- Caudal máximo horario, máximo diario y máximo mensual: La estimación de estos caudales se realiza teniendo en cuenta factores pico¹, que se deben calcular utilizando datos históricos de factores máximos del área de influencia del proyecto, de plantas de aguas residuales similares en tamaño y condiciones. En caso de ausencia de datos de campo, utilizar la Tabla 23 en el artículo 166 de la resolución 330 de 2017, modificado por el artículo 46 de la Resolución 799 de 2021.
- Caudal de infiltración. El caudal de infiltración debe estimarse a partir de aforos en el sistema y de consideraciones sobre la naturaleza y permeabilidad del suelo, la topografía de la zona y su drenaje, la cantidad y distribución temporal de la precipitación, la variación del nivel freático con respecto a las cotas clave de las tuberías, las dimensiones, estado y tipo de tuberías, los tipos, número y calidad constructiva de uniones y juntas, el número de estructuras de conexión y demás estructuras, y su calidad constructiva.
Ante la ausencia de información se acepta que la infiltración se calcule con base en un factor de 0,1 L/s ha, aplicado al área de afluencia de infiltración del alcantarillado, entendida esta como el área de las calles del sector beneficiado con el sistema.

¹ A diferencia de los factores de mayoración de los sistemas de alcantarillado que tienen en cuenta las variaciones en el consumo de agua por parte de la población, en la determinación de los caudales que llegan a las plantas de tratamiento tienen en cuenta los usos del agua y los aportes que llegan a puntos definidos para iniciar el tratamiento de las descargas.

Adicionalmente, para el diseño de los diferentes procesos unitarios deberán considerarse los caudales de diseño establecidos en la siguiente tabla de la resolución 330 de 2017².

Tabla 1 Caudales de Diseño para el Tratamiento de aguas residuales (Tabla 22 Res 330 de 2017)

Caudal	Descripción	Aplicación
Caudal medio de diseño	Caudal medio diario de capacidad de la PTAR	- Caudal medio de referencia - Caudal de diseño de unidades de tanques sépticos - Sistemas lagunares
Caudal máximo horario	Máximo volumen en una hora, identificado en los registros estudiados	- Dimensionamiento de sistemas de bombeo, procesos físicos (desarenadores, cribados, trampas de grasa y sedimentadores primarios y secundarios) - Desarrollo de estrategias operativas - Conductos de interconexión de unidades de proceso
Caudal máximo diario	Máximo volumen en un día, identificado en los registros estudiados	- Dimensionamiento de tanques de regulación - Dimensionamiento de sistemas de bombeo de lodos - Dimensionamiento de dosificación química
Caudal máximo mensual	Caudal promedio diario para el mes con el mayor volumen mensual identificado en los registros estudiados	- Dimensionamiento de bioreactores. - Dimensionamiento del almacenamiento de químicos

De esta forma, para poblaciones que generen caudales superiores a los 30 lts/seg, el caudal de la planta de tratamiento de aguas residuales se calculará afectando el caudal medio de diseño en Tiempo Seco por el factor pico definido, más un caudal de infiltración.

Los procesos y unidades de Plantas de tratamiento de aguas residuales, excepto sistemas lagunares, para localidades con caudales de diseño iguales o menores a 30 lts/seg, se proyectarán con un caudal de tres (3) veces el caudal medio correspondiente al valor de Tiempo Seco según se define arriba. No se considera infiltración ni conexiones erradas.

² Tabla 22 del Artículo 166 de la Resolución 330 de 2017, modificado por la Resolución 799 de 2021.

2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL Y DEL CUERPO RECEPTOR

En este capítulo se establecen lineamientos para la caracterización de las aguas residuales, y del cuerpo receptor, en lo referente a la normatividad y procedimientos establecidos para el monitoreo de los caudales y parámetros de calidad requeridos.

A través del análisis de las características del agua residual y de la fuente receptora de dichos vertimientos, previo a la construcción del sistema de tratamiento, se establecen los parámetros de diseño de las diferentes operaciones unitarias de tratamiento requeridas para alcanzar los parámetros de calidad establecidos.

De otra parte, las caracterizaciones del agua residual deben realizarse durante la vida útil del proyecto como mecanismo de control y seguimiento a la operación de este.

2.1 Marco Normativo

La resolución 799 de 2021 que modificó artículo 167 de la resolución 330 de 2017, establece que, para determinar los requerimientos de tratamiento de las aguas residuales, deberán emplearse modelos de simulación de la calidad de la fuente receptora de acuerdo con la normatividad establecida por el MADS y los objetivos de calidad establecidos por la Autoridad Ambiental. Adicionalmente, el artículo 169 establece que se deben realizar mediciones de caudal y calidad del agua cruda en el sistema de alcantarillado que alimentará la PTAR, con anterioridad al diseño de esta. Además, es su artículo 217 señala que como mecanismo de control y seguimiento de la operación deberán realizarse monitoreo de la calidad del agua antes y después de las operaciones unitarias que lo conforman.

En línea con lo anterior, debe ser considerado lo dispuesto en el decreto 1076 de 2015 del MADS, en relación con los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados, Así como los parámetros y valores máximos permisibles establecidos por las resoluciones del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 631 de 2015³, 883 de 2018⁴ y la 699 del

³ Resolución 631 de 2015 “por la cual se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones” expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Modificada por la Resolución 2659 de 2015 para su entrada en vigencia.

⁴ Resolución 883 de 2018 “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas marinas, y se dictan otras disposiciones” expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

2021⁵, o aquellas normas que la modifique o sustituyan, para vertimientos a fuentes de agua superficial, al mar y al suelo respectivamente.

De otra parte, es importante señalar que los análisis de las muestras deberán ser realizados por laboratorios acreditados por el IDEAM, teniendo en cuenta que de acuerdo con lo definido en el decreto 1076 de 2015, el Artículo 2.2.8.9.1.5, es el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, la Entidad competente para establecer los sistemas de referencia para la acreditación e inter calibración analítica de los laboratorios cuya actividad esté relacionada con la producción de datos e información de carácter físico, químico y biótico de la calidad del medio ambiente de la República de Colombia. Adicionalmente, que de conformidad con el parágrafo 2 del Artículo 2.2.8.9.1.5 del decreto arriba mencionado, los laboratorios que produzcan información cuantitativa, física y biótica para los estudios o análisis ambientales requeridos por las Autoridades Ambientales competentes, y los demás que produzcan información de carácter oficial relacionada con la calidad del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, deberán poseer certificado de acreditación correspondiente otorgado por los laboratorios nacionales públicos de referencia del IDEAM.

En el caso de análisis de laboratorio, se aceptan resultados emitidos por laboratorios públicos o privados que se encuentren acreditados por el IDEAM para las variables, por demostración del cumplimiento de los requerimientos de la norma NTC-ISO-IEC 17025 “Requisitos Generales de Competencia de Laboratorios de Ensayo y Calibración”, versión 2005.

Adicionalmente, deberá considerarse lo establecido en la Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Subterráneas” y “Instructivo para la Toma de Muestras de Aguas Residuales” del IDEAM y la Resolución 959 de 2018, del MADS, por la cual se adopta la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para aguas superficiales continentales.

2.2 Conceptos generales

Un vertimiento se define como una descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido. Para el Vertimiento puntual se realiza a partir de un medio de conducción, del cual se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo. El Vertimiento no puntual es aquel en el cual no se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo

⁵ Resolución 699 de 2021 “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas Tratadas al suelo, y se dictan otras disposiciones” expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

de agua o al suelo, tal es el caso de vertimientos provenientes de escorrentía, aplicación de agroquímicos u otros similares (Decreto 1076/2015).

Los contaminantes se pueden clasificar como sólidos, líquidos y gases. Los sólidos son sustancias que toman esta forma luego de la evaporación del agua a los 103 a 105°C, y se clasifican como sólidos suspendidos cuando se encuentran en forma de cuerpos tales como partículas o coloides.

Los contaminantes en forma de líquidos y gases que se encuentran disueltos y se evaporan y no dejan residuos. Los sólidos se clasifican como volátiles, que están constituidos por materia orgánica y son susceptibles de gasificarse mediante los procesos de tratamiento, y los no volátiles, constituidos por minerales.

La contaminación biológica orgánica se ve reflejada en sus principales constituyentes como los compuestos de carbono y nitrógeno, se mide principalmente como la demanda de oxígeno que ocasiona la degradación de estos compuestos hasta convertirlos en materiales que se sedimentan (lodos) o en gases (N y CO₂). El parámetro más utilizado es la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO. Otros parámetros de contaminación orgánica son la concentración de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo en sus diversas formas, y las de ciertos microorganismos que actúan como indicadores, tales como coliformes, virus, bacterias, protozoos y helmintos.

La contaminación inorgánica está representada por elementos y compuestos minerales tanto alcalinos como ácidos, de metales livianos como azufre, calcio, magnesio, potasio y fósforo entre otros, los cuales tienen un importante papel en el desarrollo de los organismos que realizan el tratamiento biológico, y de metales pesados que son generalmente tóxicos, pero también pueden ser micronutrientes en concentraciones muy bajas.

Los contaminantes mencionados pueden originar las siguientes propiedades turbiedad, color, olor y pH. La temperatura es un parámetro aportado por las aguas residuales y por los procesos de tratamiento. Todas estas propiedades tienen importantes funciones en estos procesos, y en los usos del agua tratada. La conductividad es un parámetro relacionado con las concentraciones de sales en agua y se utiliza para estimar la concentración de éstas.

2.3 Programa de monitoreo

El programa de monitoreo debe tener claramente definido el objetivo para el cual se realiza, el cual puede desarrollarse para el establecimiento de la línea base para diseño de Ptar, seguimiento al permiso de vertimientos, seguimiento de la operación, seguimiento a las disposiciones incluidas en licencias ambientales o al plan de manejo ambiental, entre otros objetivos.

Una vez definido el objetivo, se definirán las variables de análisis y frecuencia de medición, determinación de los recursos humanos y financieros para llevar a cabo dichas labores, y la identificación de los laboratorios acreditados por el IDEAM, que realicen los análisis de las variables requeridas.

Para cumplir con los objetivos del programa de muestreo, los datos recogidos deben ser (Metcalf y Eddy, 2003):

- Representativos: deberán reflejar las condiciones de las aguas residuales a muestrear.
- Reproducibles: los datos obtenidos deben ser reproducibles por otros, como consecuencia del muestreo y protocolos analíticos mismos.
- Defendibles: La documentación debe estar disponible para validar los procedimientos de muestreo, los datos deben tener un grado conocido de exactitud y precisión.
- Útiles: Los datos pueden ser utilizados para cumplir los objetivos del plan de seguimiento.

En línea con lo anterior, para la realización de la caracterización de aguas residuales, es necesario seguir los lineamientos establecidos en la Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Subterráneas el Instructivo para la Toma de Muestras de Aguas Residuales del IDEAM, así como lo dispuesto en la resolución 959 de 2018 por la cual se adopta la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para aguas superficiales continentales.

2.4 Toma de muestras y metodologías de aforo

Para realizar la caracterización de aguas residuales o del cuerpo receptor, es necesario tener en cuenta el tipo de muestra, las cuales pueden ser puntuales, compuestas o integradas, en la siguiente tabla se resumen las características de cada una de ellas.

Tabla 2 Tipo de Muestras

Tipo de Muestra	Descripción
Muestra puntual	Se toma en un lugar representativo, en un determinado instante y no tiene en cuenta las variaciones temporales ni el caudal.
Muestra compuesta	Se integran varias muestras puntuales de una misma fuente, tomadas a intervalos programados y por períodos determinados, las cuales pueden tener volúmenes iguales o ser proporcionales al caudal durante el período de muestras.
Muestra integrada	Se forma por la mezcla de muestras puntuales tomadas de diferentes puntos simultáneamente, o lo más cerca posible.

De otra parte, el muestreo puede realizarse de forma manual o automática. El muestreo manual se utiliza para obtener muestras puntuales, cuando se tienen sitios de fácil acceso o aquellos que por medio de ciertas adaptaciones puedan facilitar la toma de muestras. La ventaja de este tipo de muestreo es permitir al encargado de tomar la muestra, observar los

cambios en las características del agua en cuanto a sustancias flotantes, color, olor, aumento o disminución de caudales, etc. (ANDI, 1997).

Los muestreadores automáticos se utilizan para tomar muestras en intervalos frecuentes, cuando se requiere una muestra continua o cuando los sitios son de difícil acceso. Tiene como ventaja sobre el muestreo manual una mayor precisión en la toma de muestras y como desventaja la complejidad de su montaje y calibración, además de que requieren revisiones continuas para evitar atascamientos u otras fallas (ANDI, 1997).

En este tipo de muestreo se debe tener en cuenta (i) el material de los tubos: por ejemplo, se recomienda tubos de vinilo para metales pesados, DBO y SST, y tubos de teflón para cualquier muestra exceptuando muestras orgánicas de parámetros orgánicos no volátiles; (ii) condiciones de limpieza tanto del muestreador como de los tubos; (iii) condiciones de limpieza para los recipientes; (iv) reutilización de recipientes según su material.

Para la toma de muestras, debe antes conocerse el tipo de material de los recipientes que puede ser utilizado en dicha recolección. Estos materiales se especifican en la “Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas” del IDEAM, donde además se especifica cómo debe hacerse su limpieza, y los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3 Aspectos para la limpieza de envases

Parámetro a determinar	Pretratamiento	Detergente	Observaciones antes del enjuague final	Enjuague
Metales (excepto cromo VI) y sulfatos	Abundante agua del grifo.	Biodegradable neutro al 5% (en agua fría)	Sumergir en HNO ₃ al 10% por treinta (30) minutos	Agua destilada o desionizada
DBO, coliformes, Tensoactivos (SAAM), alcalinidad, cromo VI, sulfuros, cianuros, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, análisis biológico, pH, conductividad eléctrica	Abundante agua del grifo. El material de DBO y coliformes debe haberse esterilizado previamente.	Biodegradable neutro al 5% en agua ligeramente caliente (50° C)	No pasar por ácido	Agua destilada o desionizada
Grasas, aceites e hidrocarburos	Para contaminación específica por grasa, utilizar una solución de hidróxido de sodio, luego sumergir en solución de HNO ₃ al 10%, por un tiempo mínimo de 30 minutos.	Biodegradable neutro al 5% en agua ligeramente caliente (50°C)	No pasar por ácido	Agua destilada o desionizada y posterior enjuague con n-hexano grado reactivo analítico
Fósforo total y fósforo soluble	Abundante agua del grifo.	Biodegradable al 5% libre de fósforo (en agua fría)	Sumergir en HCl al 10% por treinta (30) minutos.	Agua destilada o desionizada

Compuestos nitrogenados (Nitrógeno total, Nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos) y DQO	Abundante agua del grifo	Biodegradable neutro al 5% (en agua fría)	Sumergir en H ₂ SO ₄ al 10% por treinta (30) minutos	Agua destilada o desionizada
PCBs, pesticidas	Descontaminación previa con acetona grado técnico	Biodegradable neutro al 5% (en agua fría)	No pasar por ácido.	Agua destilada o desionizada. En caso de análisis por cromatografía de gases, enjuagar con acetona grado reactivo, y finalmente con el solvente orgánico que se va a utilizar en el análisis (acetona, n-hexano, éter del petróleo, etc.)

Fuente: IDEAM, 2003.

Los equipos utilizados también deben ser lavados antes de su uso con el fin de evitar alteraciones en la muestra a tomar. La tubería de vinilo no puede ser reutilizada luego de un muestreo, mientras que la tubería de la bomba debe ser esterilizada ya que ésta no debe contener material de tipo orgánico.

Esta tubería debe lavarse con agua caliente por dos minutos utilizando un detergente, por ejemplo, el Liqui-Nox, Alconox, Citranox o el equivalente apropiado. Los tubos de teflón deben enjuagarse dos veces con agua del grifo y, de ser necesario, utilizar un cepillo (Greeley, 2003).

Otro aspecto que debe tenerse en cuenta para las campañas de muestreo es la realización de mediciones de caudal de las descargas por lo menos en tres jornadas de medición horaria durante las 24 horas del día y en cada uno de los emisarios que se consideren representativos. Se debe tener en cuenta lo determinado en el PSMV para cada vertimiento.

Deben efectuarse mediciones para determinar la cantidad de agua de infiltración y otros caudales afluentes asociados a conexiones erradas al sistema de alcantarillado. Deben encontrarse factores para caudales de infiltración (en términos de área o de longitud de la red L/s/ha ó L/s/km) de modo que se pueda proyectar el caudal esperado. Se deben realizar mediciones tanto en periodos de tiempo seco como durante periodos de lluvia.

Se recomiendan las siguientes metodologías de aforo para la elaboración de muestreos. (Para mayor detalle ver la “Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas” del IDEAM).

Tabla 4 Metodologías de Aforo

MÉTODO DE AFORO	DESCRIPCIÓN
Anemómetros (molinete)	Este dispositivo es de gran utilidad para el aforo de conductos de gran diámetro que trabajan a presión o en corrientes naturales. Del conocimiento de la distribución de velocidades en la sección se puede determinar la velocidad media, el caudal y algunos coeficientes de corrección.
Vertederos:	Los vertederos pueden usarse en corrientes naturales con caudales relativamente pequeños, en cuyo cauce pueda instalarse el vertedero. En corrientes con caudales mayores, el vertedero puede ser una estructura hidráulica permanente para medición continua de caudales. Los vertederos deben calibrarse antes de ser utilizados.
Tubo Pitot	Su mayor aplicación se encuentra en la medición de velocidades en flujo a presión. Sin embargo, también se utiliza en la medición de velocidades en pequeñas corrientes naturales. Permite medir la velocidad de la corriente a diferentes profundidades, por lo cual se puede conocer la velocidad media en la sección y el caudal de la corriente.
Volumétrico	El aforo volumétrico consiste en recolectar en un tiempo específico un volumen determinado. Es útil para el aforo de vertimientos puntuales y caudales pequeños.
Equipos electrónicos de aforo	Aquellos que sirven para medir el caudal utilizando sensores electrónicos del tipo Efecto Doppler para conductos parcialmente llenos, o sensores ultrasónicos de nivel, en el caso de canales abiertos
Aforo con trazadores, fluorescentes o colorantes	Se basan en la inyección de una sustancia detectable, colorante o sustancia radiactiva que es medida aguas abajo del punto de inyección. Dentro de los trazadores químicos más utilizados se encuentran el Cloruro Sódico, el Dicromato Sódico y la Rodamina B. Dentro de los trazadores radiactivos se destacan el Sodio 24, el Fósforo 32, el Cromo 51 y el Bromo 82.
Aforo con Canaleta Parshall:	Este medidor es una especie de tubo Venturi abierto, el cual dispone de una garganta que produce una elevación de nivel en función del caudal. Está formado por una sección de entrada de paredes verticales convergentes y fondo a nivel, una garganta o estrechamiento de paredes paralelas y fondo descendiente y una sección de salida con paredes divergentes y fondo ascendente. Las Canaletas Parshall se definen por el ancho de la garganta. Para la determinación del caudal se precisa de la medición de la altura del líquido, la cual se puede realizar de forma instantánea con una medición puntual de altura
Fuente: Adaptado de IDEAM, 2003	

2.5 Caracterización de vertimientos a la red de alcantarillado

El muestreo realizado en una red de alcantarillado puede ser de tipo puntual o compuesto, dependiendo del objetivo del programa de monitoreo.

Los muestreos en la red de alcantarillado se llevan a cabo en los pozos de inspección, para su selección deberán tenerse en cuenta los siguientes aspectos (Technical Learning College, 2009):

- i. Las muestras se deben tomar en los puntos de flujo turbulento para asegurar una buena mezcla y evitar la sedimentación de sólidos.
- ii. El punto de muestreo debe ser de fácil acceso.
- iii. Si se requiere un estudio de caudales o un muestreo proporcional al caudal, éste debe realizarse en una sección donde la tubería no tenga curvas, caídas o cualquier obstrucción.

Las muestras deben ser tomadas por personal acreditado y los laboratorios que realicen el análisis deben estar acreditados por el IDEAM.

Las mediciones de cantidad y calidad de aguas residuales y pluviales en redes de alcantarillado deberán realizarse de acuerdo con lo establecido en el Título D del RAS.

2.6 Caracterización en la planta de tratamiento de aguas residuales

Deberá realizarse de acuerdo con lo establecido en el artículo 217 de la resolución 330 de 2017, Tabla No. 45, como mecanismo de control y seguimiento de la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales, se deben realizar monitoreos de la calidad del agua antes y después de las operaciones unitarias que la conforman.

Tabla 5 Caracterización en plantas de tratamiento de aguas residuales

Proceso unitario	Lugar de muestreo	Parámetros	Muestra		
			Uso	Frecuencia	Tipo
Lodos activados	Efluente primario	ST	CP	D	MC
		SV	CP	D	MC
		DBO	RP	D	MC
		SST	RP	D	MC
		pH	CP	D	MP
	Licor mezclado	OD	CP	D	MP
		Temperatura	CP	D	MP
		SST	CP	D	MC
		SSV	CP	D	MC
		NO ₃	CP	M	MP
		DBO	RP	D	MC
		SST	RP	D	MC

	Efluente final del tanque sedimentador	Coliformes fecales	RP	D	MP
		Cloro residual	RP	D	MP
		pH	RP	D	MP
		TKN	RP	M	MP
		NH ₃	RP	M	MP
		NO ₂	RP	M	MP
		NO ₃	RP	M	MP
Digestor anaerobio	Canal del digestor	ST	RP	D	MC
		SV	RP	D	MC
		pH	CP	D	MP
		Alcalinidad	CP	M	MP
	Contenido del digestor	Temperatura	CP	D	MP
		Ácidos volátiles	CP	M	MP
		Alcalinidad	CP	M	MP
		pH	CP	D	MP
		Metales pesados	CP	M	MP
Sistemas Lagunares	Afluente	DBO	RP	Q	MC
		SST	RP	Q	MC
		pH	CP	D	MP
		NO ₃	CP	Q	MP
	Efluente	DBO	RP	Q	MC
		SST	RP	Q	MC
		pH	RP	D	MP
		Coliformes fecales	RP	Q	MP
		NO ₃	CP	Q	MP

RP: rendimiento de la planta. CP: control del proceso. D: diario. S: semanal. Q: Quincenal, M: mensual. MC: muestra compuesta. MP: muestra puntual

2.7 Caracterización del vertimiento a la fuente receptora

La toma de muestras de aguas residuales tratadas se puede realizar de forma puntual o compuesta y su elección dependerá de los objetivos definidos en el programa de monitoreo; Sin embargo, se recomienda que en este caso del vertimiento a la fuente receptora se realice un muestreo compuesto que permita conocer las características y fluctuaciones del cuerpo de agua durante un tiempo determinado, por ejemplo 24 horas, tomando muestras puntuales cada una, dos, cuatro o seis horas.

El sitio de muestreo será el punto de descarga antes de la incorporación al cuerpo de agua.

Las caracterizaciones del efluente del sistema de tratamiento de agua residual se deben realizar con la frecuencia de muestreo y análisis que se muestre en la Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM o aquella que se elabore y adopte en cumplimiento del Decreto 3930 de 2010, incluido en el Decreto 1076 de 2015 único del sector ambiente, o la norma que la modifique o sustituya.

Los parámetros que como mínimo deben ser medidos en el efluente del sistema de tratamiento de agua residual son los establecidos en las resoluciones 631 de 2015, 883 de 2018 y la 699 del 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS o aquellas normas que las modifiquen o sustituyan, para vertimientos a fuentes de agua superficial, al mar y al suelo respectivamente.

Particularmente la Resolución 631 de 2015 del MADS, establece los valores límites máximos que deben cumplir los vertimientos de aguas residuales de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de agua superficiales, según si se trata de:

1. Aguas residuales domésticas de las soluciones individuales de saneamiento de viviendas unifamiliares o bifamiliares (AR1)
2. Aguas residuales Domésticas y No Domésticas de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de agua superficiales con una carga menor o igual a 625 Kg/día DBO₅(AR2)
3. Aguas residuales Domésticas y No Domésticas de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de agua superficiales con una carga mayor a 625 Kg/día DBO₅ y menor o igual a 3000 Kg/día DBO₅(AR3)
4. Aguas residuales Domésticas y No Domésticas de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de agua superficiales con una carga mayor a 3000 Kg/día DBO₅(AR4)

Tabla 6 Parámetros mínimos que deben medirse en vertimientos puntuales. Res631/2015

No	Parámetro	Unidades	AR 1	AR 2	AR 3	AR 4
1	pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00

2	Demanda química de oxígeno DQO	mg/L O ₂	200,00	180,00	180,00	150,00
3	Demanda bioquímica de oxígeno DBO ₅	mg/L O ₂		90,00	90,00	70,00
4	Sólidos suspendidos totales SST	mg/L	100,00	90,00	90,00	70,00
5	Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	5,00	5,00	5,00	5,00
6	Grasas y aceites	mg/L	20,00	20,00	20,00	10,00
7	Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L		(*1)	(*1)	(*1)
8	Hidrocarburos totales	mg/L		(*1)	(*1)	(*1)
10	Ortofosfatos	mg/L		(*1)	(*1)	(*1)
11	Fosforo total	mg/L		(*1)	(*1)	(*1)
12	Nitratos (N - NO ₃ ⁻)	mg/L		(*1)	(*1)	(*1)
13	Nitritos (N - NO ₂ ⁻)	mg/L		(*1)	(*1)	(*1)
14	Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L		(*1)	(*1)	(*1)
15	Nitrógeno Total (N)	mg/L		(*1)	(*1)	(*1)
(*1) Análisis y reporte						

En caso de que a la red de alcantarillado se encuentre conectada una o varias industrias, deberán revisarse concentraciones de sustancias que se presuman resultantes de los procesos específicos del tipo de industria conectada. El tipo de industria deberá identificarse dentro del articulado de la Resolución 631 de 2015, para establecer las características y sus valores máximos permisibles a la red de alcantarillado para tomar las acciones necesarias que permitan dar cumplimiento a lo establecido en la mencionada Resolución.

2.8 Caracterización de emisarios submarinos

Es necesaria la realización de muestreos de calidad del agua de la zona marítima como parte de un programa de monitoreo, antes de instalar un sistema de emisarios submarinos, con el fin de identificar y estimar la magnitud del impacto ambiental que puede causar. La

definición de los puntos de medición debe estar soportada en estudios básicos sobre líneas de corrientes, morfología, profundidad, condiciones hidráulicas de la zona donde se pretende realizar la descarga. Se recomienda efectuar campañas de monitoreo incluyendo la toma de muestras en estaciones ubicadas estratégicamente desde el área de descarga hasta 300 metros aguas afuera de las playas más cercanas con un elevado uso para recreación (CEPIS, 2000).

Los parámetros que deberán medirse, así como los valores máximos permisibles, están establecidos en la Resolución 883 de 2018 o aquella que la modifique o sustituya. Del mismo modo, del artículo 17 sobre *recopilación de la información de los resultados de los parámetros*, se deduce que la frecuencia de medición de los mencionados es anual.

2.9 Estudios de tratabilidad

Para seleccionar e implementar un sistema para el tratamiento de aguas residuales, se recomienda que se realicen estudios conducentes a determinar capacidades de remoción, rendimiento y parámetros de diseño de las posibles tecnologías a emplear, a través de la realización de estudios de tratabilidad, los cuales permiten conocer los valores de ciertos parámetros necesarios para el tratamiento de aguas residuales, con el fin de estimar su eficiencia.

Las pruebas de toxicidad deben realizarse según la norma GTC 31, "Guía para la realización de pruebas de toxicidad", del Icontec.

Dependiendo de la información disponible y de la tecnología a implementar, se describen a continuación los tres niveles de estudios de tratabilidad existentes (EPA, 1996).

- Prueba preliminar de laboratorio: Es el nivel de estudio más rápido y económico. Se aplica con el fin de obtener las características del agua a tratar y así determinar la tecnología que se implementará. Requiere de un programa de monitoreo con el fin de determinar la tecnología más apropiada para el cumplimiento de la normatividad.
- Prueba de laboratorio a pequeña escala: se realiza con el fin de determinar si con la tecnología escogida, se puede llegar a cumplir con los parámetros de calidad establecidos para los vertimientos. Requiere datos de caracterización del agua a tratar y las posibles tecnologías a implementar de acuerdo con lo obtenido en la prueba preliminar de laboratorio, para obtener Información sobre la eficacia y costos del sistema de tratamiento.
- Estudio piloto de tratabilidad: se recomiendan para sistemas con un grado de complejidad alto y se utilizan para establecer objetivos de eficacia, costo y coherencia de la técnica de tratamiento. Por lo general se utilizan una vez se hayan llevado a cabo las dos pruebas anteriores, con el fin de obtener los parámetros de diseño de la tecnología seleccionada. Estas pruebas piloto deben realizarse cuando se deban probar



nuevos procesos, predecir el rendimiento del proceso, optimizar el diseño del sistema, para simulación de otros procesos, cumplimiento de las exigencias de la autoridad ambiental en cuanto a calidad del agua residual a verter en un cuerpo receptor de agua con objetivos de calidad definidos. Para esto debe conocerse la complejidad del proceso y realizar protocolos de prueba, que permitan seguir un proceso ordenado (Metcalf y Eddy, 2003)

Debe tenerse en cuenta que los estudios tienen dependencia entre sí, ya que el desarrollo de uno conduce a otro; por ejemplo, si se desea realizar una prueba de laboratorio a pequeña escala, antes deberá haberse realizado una prueba preliminar de laboratorio; y si se desea realizar un estudio piloto de tratabilidad deberán haberse surtido los dos estudios anteriores.

3 DESARROLLO DE UN PROYECTO DE AGUAS RESIDUALES

El desarrollo de cada una de las etapas de un proyecto de tratamiento de aguas residuales debe llevar a que los componentes del sistema permitan alcanzar los objetivos para los cuales fueron planteados. Los profesionales que desarrollen las etapas deben cumplir con los requisitos mínimos establecidos en el capítulo 1 de la Resolución 330 de 2017, modificada por la Resolución 799 de 2021 y lo establecido en el párrafo 3 del artículo 42 del Decreto 3930 de 2010⁶.

Para mayor desarrollo y comprensión, se sugiere consultar el capítulo de ciclo de proyectos del manual de buenas prácticas de ingeniería título A: Aspectos generales y tener en cuenta los siguientes aspectos de importancia, criticidad y particularidades de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

3.1 Etapa de conceptualización y planificación

Según lo mencionado en el título A, los resultados de esta etapa deben recogerse en un informe con el alcance establecido en el artículo 18 de la Resolución 330 de 2017 y de acuerdo con lo establecido para la gestión documental de proyectos de los artículos 239 a 241 de la mencionada resolución.

3.1.1 Articulación de los proyectos con los planes o esquemas de ordenamiento territorial, los planes ambientales, regionales y sectoriales

Son muchos los planes que debe conocer tanto el diseñador como el operador del sistema para ubicar el o los sistemas de tratamiento de aguas residuales y establecer las implicaciones que el sistema de tratamiento de aguas residuales o cualquiera de sus componentes tendría dentro de la dinámica del desarrollo urbano.

De los planes o esquemas de ordenamiento territorial que definen los usos de la tierra dentro de la jurisdicción de un municipio, se extrae la información correspondiente a lo que tiene que ver con los posibles sitios de ubicación de estos sistemas y lo relacionado con la

⁶ Decreto 3930 de 2010 - Artículo 42. Requisitos del permiso de vertimientos. El interesado en obtener un permiso de vertimiento, deberá presentar ante la autoridad ambiental competente, una solicitud por escrito que contenga la siguiente información:

...

Parágrafo 3. Los estudios, diseños, memorias, planos y demás especificaciones de los sistemas de recolección y tratamiento de las aguas residuales deberán ser elaborados por firmas especializadas o por profesionales calificados para ello y que cuenten con su respectiva matrícula profesional de acuerdo con las normas vigentes en la materia. Parágrafo 3. Los estudios, diseños, memorias, planos y demás especificaciones de los sistemas de recolección y tratamiento de las aguas residuales deberán ser elaborados por firmas especializadas o por profesionales calificados para ello y que cuenten con su respectiva matrícula profesional de acuerdo con las normas vigentes en la materia.

localización y distribución espacial de la población actual y futura, así como la densidad de saturación de la región o municipio objeto del diseño.

Es necesario incluir dentro de la revisión de la ubicación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, las variables ambientales críticas que traen los planes ambientales tales como las zonas de protección y los objetivos de calidad definidos para los posibles cuerpos receptores. Esto determinará tanto la ubicación como el alcance del tratamiento que se debe implementar para lograr la reducción de los contaminantes a las metas exigidas para cada cuerpo de agua en particular.

3.1.2 Problemas, objetivos y metas

De acuerdo con lo establecido en el artículo 11 de la Resolución 330 de 2017, modificado por la Resolución 799 de 2021, es necesario desarrollar proyectos de tratamiento de aguas residuales, cuando existen problemas de salud pública y saneamiento básico, problemas relacionados con el deterioro del medio ambiente, los recursos hídricos, los ecosistemas naturales, mejoramiento de la calidad de vida de la población, aumentando la resiliencia ante eventos climáticos.

Los objetivos, en concordancia con los problemas identificados se deben formular en términos de: inversiones que tengan un efecto positivo y manifiesto en la salud pública de los habitantes y del medio ambiente, calidad de agua en las fuentes receptoras, tratamiento de aguas residuales, necesidades de rehabilitación y/o reposición y mitigación de riesgos relacionados con la prestación de estos servicios públicos.

A su vez, cada objetivo tiene asociadas una o varias metas, atendiendo a resolver las necesidades y problemas planteados.

Los proyectos asociados pueden incluir el diseño de un sistema completamente nuevo en un área identificada dentro del plan o esquema de ordenamiento territorial del municipio, rehabilitación o la adecuación del sistema de tratamiento de aguas residuales existente, la ampliación de la capacidad del sistema existente por aumento en la densidad poblacional, o por finalización del período de diseño o la de procesos que permitan mejorar la calidad del agua y dar cumplimiento a los objetivos de calidad del cuerpo receptor.

En caso de ser una expansión del sistema de tratamiento existente, se recomienda revisar los siguientes aspectos, (*Department of Environmental Protection*, 2001):

- Oportuna planificación, diseño y construcción de instalaciones de aguas residuales necesarias para proporcionar el tratamiento adecuado y la reutilización o la eliminación de aguas residuales domésticas y de gestión de residuos y subproductos del tratamiento de aguas residuales domésticas.
- Comparación de los caudales a ser tratados en el sistema de tratamiento de aguas residuales con la capacidad de tratamiento de la planta, los residuos y la reutilización.

- Cuando realizado el análisis de caudales en la interfase alcantarillado planta de tratamiento, se concluya que la capacidad de la planta será desbordada en un periodo de 3 años.

3.2 Planeación de proyectos por etapas

Normalmente, los proyectos de tratamiento de aguas residuales se realizan por etapas por cuanto exigen recursos importantes tanto en inversión inicial como en la operación y mantenimiento. El planteamiento del proyecto por etapas tiene en cuenta el crecimiento de la población o la complementación de los tratamientos requeridos para lograr el cumplimiento de la norma ambiental. Es muy importante para un proyecto de tratamiento de aguas residuales reservar las áreas previstas para lograr las construcciones futuras y mantener las distancias con respecto a la población para evitar problemas ambientales de mitigación de molestias hacia la comunidad.

Deben respetarse los aislamientos de la infraestructura de tratamiento de aguas residuales según las distancias mínimas establecidas en el artículo 183 de la Resolución 0330 de 2017. Estas distancias se miden desde el borde exterior del predio en el que se ubicará la planta hasta el borde exterior de la vivienda más cercana al mencionado predio. En el caso de que el proyecto de construcción nueva, optimización o ampliación integre diferentes tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, para el distanciamiento se debe tomar el valor más restrictivo de los que se habla en la tabla 28 del artículo 183.

Cuando la ejecución del proyecto de tratamiento de aguas residuales sea planificada por etapas, éstas deben quedar claramente establecidas en los diseños, en la evaluación financiera y socioeconómica de alternativas y en la presentación final del proyecto. Las ampliaciones del sistema deben ajustarse al aumento poblacional y para definir las etapas se utiliza la metodología de costo mínimo de expansión de capacidades.

3.3 Etapa de planeación de los proyectos de tratamiento de aguas residuales

3.3.1 Actividades preliminares de la planeación

En armonía con la Resolución 330 de 2017, los pasos a seguir están descritos de manera general en el Título A. Además, es importante también para profundizar en un tema técnico en particular, se revisen los títulos del RAS tales como el G: componente de geotecnia, el I: componente Ambiental y el k: componente de gestión del riesgo.

Las siguientes son las particularidades a tener en cuenta en un proyecto de tratamiento de aguas residuales.

1. Diagnóstico detallado de la situación del o los municipios
2. Determinación de la población afectada.
3. Características socio-culturales de la población y participación comunitaria.
4. Cuantificación de la demanda y/o necesidades.
5. Diagnóstico y evaluación del sistema existente.
6. Definición del alcance de las intervenciones.

Estas primeras seis etapas están orientadas al conocimiento de la región y de los sistemas existentes donde se va a instalar el sistema de tratamiento. Es importante recoger información de las variables requeridas para seleccionar la alternativa final que debe entrar en diseño. Además, permiten conocer las actividades que deban realizarse para poner a tono el sistema de alcantarillado de forma que permita lograr las metas del Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, tanto la disminución de vertimientos como la remoción de contaminantes antes de su vertimiento.

1. Diagnóstico detallado de la situación del municipio.

Como primera instancia se deberá realizar un diagnóstico sobre las condiciones actuales en materia de salud pública, del estado de los recursos naturales y del bienestar social. Se debe describir las condiciones físicas, económicas y sociales del municipio y del área objeto de intervención. De igual forma, se deberá presentar un diagnóstico sobre el estado general de la prestación de los servicios públicos, en relación con la cobertura, continuidad, eficiencia y calidad.

La descripción general de la situación del municipio permitirá identificar dentro de este paso de diagnóstico del área, las variables en términos de cantidad y calidad de agua residual para posteriormente identificar las soluciones. Es necesario revisar el tipo de usuarios residenciales, industriales, comerciales, que permitan clasificar el agua residual en doméstica y no doméstica y las fuentes de ingresos para prever la conformación de una tarifa, según las diferentes tecnologías que sean posibles implementar.

En relación con el sistema de alcantarillado, precisar si se trata de un alcantarillado combinado o separado o, el nivel de conexiones erradas.

Por otro lado, deben identificarse y buscar información sobre el estado de los cuerpos receptores y de los recursos naturales que puedan incidir en la formulación y posterior selección de las diferentes alternativas de tratamiento que generen el menor impacto ambiental.

Para efecto de formulación y análisis de alternativas también debe conocerse si los municipios vecinos cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales y si eventualmente tendrían la capacidad de recibir para tratamiento las aguas residuales de la población.

Cuando los sistemas se pueden regionalizar, o son metropolitanos, es necesario realizar el diagnóstico para cada uno de los municipios que vayan a intervenir en el proyecto.



2. Determinación de la población afectada.

En el caso de los sistemas de tratamiento de aguas residuales la población beneficiada es diferente de la población afectada que se encuentre aguas abajo de la descarga, para lo cual se debe tener en cuenta tanto los objetivos de calidad del cuerpo receptor, que se definen en función de los usos aguas abajo del mismo, como las distancias a las bocatomas que se encuentren sobre el mismo cuerpo receptor de las aguas residuales.

La población beneficiada se debe calcular con información del DANE, proyectada a 25 años, de acuerdo con el artículo 40 de la Resolución 330. La línea base del DANE tiene en cuenta los censos realizados y las tasas de crecimiento a nivel municipal, cabecera y resto. Esta información debe corroborarse con información secundaria de entidades oficiales relacionadas con el tema: Departamento Nacional de Planeación, otras entidades de servicios públicos, etc.

Adicionalmente, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

Este tipo de obras son de gran magnitud para el municipio, por lo que se debe aplicar el párrafo del artículo 40 en cuanto a soportes de la información finalmente adoptada.

Se debe analizar la información del prestador de los servicios de acueducto y alcantarillado en lo que tiene que ver con el tipo de suscriptor y sus consumos.

De acuerdo con la vocación del municipio, se debe tener en cuenta la población flotante y hacer la conversión a población equivalente, debidamente soportados.

3. Características socio-culturales de la población y participación comunitaria.

El desarrollo de este tipo de proyectos debe contar con una estrategia de participación comunitaria significativa, teniendo en cuenta los conflictos que se pueden generar, tanto por la ubicación del sistema de tratamiento como los beneficios y problemas que pueden causar, según la percepción que se tiene de la tecnología o del tipo de proyecto. Otros aspectos claves de decisión en el planteamiento del proyecto, son los relacionados con costumbres, creencias, arraigo al paisaje y a los recursos naturales, entre otros, que puedan incidir sobre la aceptación y la sostenibilidad del proyecto.

4. Cuantificación de la demanda y/o necesidades.

Para este tipo de proyectos se deben revisar las demandas actuales y futuras del sistema conforme con el respectivo plan maestro y en su defecto con el plan o esquema de ordenamiento territorial, el plan de saneamiento y manejo de vertimientos – PSMV y/o demás herramientas de planeación, con el objetivo de estimar la capacidad necesaria de las obras por construirse y las expansiones futuras que requerirá cada uno de los componentes. Se recuerda que el PSMV debe traer identificados los puntos de vertimiento y las remociones que deben lograrse en el tiempo para cumplir la norma y los objetivos de calidad.

5. Diagnóstico y evaluación del sistema existente.

En armonía con el numeral 5 del artículo 8 de la resolución 330 de 2017, modificado por la resolución 799 de 2021, se debe evaluar el sistema existente, tanto de la infraestructura de alcantarillado como de tratamiento de aguas residuales, buscando obtener información sobre su estado físico, sobre su funcionamiento general, la capacidad máxima real, la condición tecnológica, la eficiencia y los criterios operacionales, con el fin de hacer un diagnóstico sobre el funcionamiento conjunto alcantarillado – sistema de tratamiento, elementos deficitarios en cuanto a capacidad o la posibilidad de mejorar los niveles de eficiencia del sistema de tratamiento para dar cumplimiento a los valores máximos exigidos por la norma.

Paso 1. Recolección y análisis de información.

En el caso de sistemas existentes, es necesario revisar si existen reportes de alertas de los sistemas de monitoreo y seguimiento sobre el sistema de tratamiento de aguas residuales. Se debe recoger información técnica sobre el funcionamiento de cada módulo del sistema, sus eficiencias de remoción de contaminantes. También se requiere información sobre la forma como se operan los módulos y tener acceso al manual de operación del sistema que en su momento debió entregar el diseñador. Igualmente es necesario conocer los costos de administración, operación y mantenimiento, en lo posible desagregados para efectos de evaluación posterior.

Paso 2. Análisis de los sistemas.

En un primer lugar se tendrá el análisis de la forma como está operando el sistema en su conjunto y posteriormente se recomienda entrar en el detalle de aquellos módulos o procesos que estén presentando problemas.

Los problemas de conjunto pueden ser de tipo hidráulico, estructural o del tipo de carga que están manejando. Se recuerda que los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas, por lo general son biológicos por lo que la carga contenida al principio del sistema o de cada proceso puede verse afectada por dilución debido a la presencia de aguas lluvias o por toxicidad, debido a cargas contaminantes que la población microbiológica no puede manejar. Detectar este tipo de problemas, permite tomar medidas sobre los módulos previos al sistema de tratamiento para acondicionar las aguas residuales para su ingreso o sobre el sistema de alcantarillado para mejorar su desempeño de transporte de las aguas residuales municipales.

Una vez se identifiquen los problemas, se revisa si los módulos están funcionando acorde con lo esperado. Esta fase considera la investigación detallada en las áreas con problemas – según el manual de funcionamiento, cada módulo debe operarse de una determinada manera y dentro de unos rangos de las variables que lo gobiernan para obtener unas eficiencias de remoción de contaminantes dado, la realización de inspecciones que permitan determinar con precisión los tramos defectuosos y los tipos de daño de la infraestructura (deterioro por uso, daños visibles, daños que comprometen el funcionamiento).

PASO 3. Formulación del plan de rehabilitación de la infraestructura existente.

Con el diagnóstico sobre la infraestructura, se deberán plantear acciones de rehabilitación, reposición, optimización y/o ampliación, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Implementar modelos de envejecimiento de la infraestructura según el deterioro observado de la infraestructura y los equipos con el fin de apoyar las decisiones a partir de un sistema de gestión patrimonial y gestión del riesgo.
- La incidencia de factores externos tales como decisiones del agente regulador, o los ministerios relacionados. En este sentido se mencionan las disposiciones sobre economía circular o la necesidad de realizar seguimiento sobre otras variables de interés sanitario, entre otras.

Las acciones y trabajos definidos para la rehabilitación del sistema existente se incluyen como parte de la alternativa tecnológica para el proyecto que finalmente se seleccione, y como tal, se debe identificar los plazos, alcance de los trabajos y presupuestos, consecución de equipos y servicios, y realización de contrataciones.

6. Definición del alcance de las intervenciones.

Con respecto a los proyectos de tratamiento de aguas residuales domésticas, la definición del alcance de las intervenciones se trata en el numeral 3.1.2 sobre Problemas, objetivos y metas.

3.3.2 Etapa de selección de las alternativas tecnológicas dentro del proceso de planeación

Para llegar a la etapa de selección de las alternativas, se deben seguir los siguientes pasos de la planeación de proyectos, una vez se identifiquen las problemáticas, continuando en el numeral 7 del artículo 7 de la Resolución 330 de 2017:

7. Estudios básicos de las alternativas.
8. Formulación y priorización de proyectos
9. Formulación y análisis de alternativas de proyectos.
10. Comparación de alternativas y selección de alternativa viable.

Tomando para tratamientos centralizados los artículos 10 y 181 de la Resolución 330 de 2017, modificados por la resolución 799 de 2021, los estudios mínimos requeridos para un proyecto de tratamiento de aguas residuales son los siguientes:

1. Condiciones generales.
2. Disponibilidad de agua y balance hídrico - Características de las fuentes receptoras.
3. Geología, geomorfología, suelos y geotecnia.

4. Estudios fotogramétricos, topográficos y trabajos de campo.
5. Infraestructura existente de otros servicios.
6. Disponibilidad de energía eléctrica y de comunicaciones.
7. Vías de acceso.
8. Disponibilidad de mano de obra y de materiales de construcción
9. Estudios Socioeconómicos
10. Evaluación del Impacto Social

Los requerimientos para profundizar a nivel de estudios básicos permitirán el análisis de las variables que soportan las decisiones, obras y costos del sistema. En estas primeras etapas del ciclo de proyecto debe ser suficiente a nivel de prediseño, el levantamiento de la información y la identificación de estudios que deban profundizarse si la alternativa tecnológica es seleccionada.

Los estudios previos hechos en la zona brindan información importante sobre condiciones técnicas, sociales, institucionales, económicas, ambientales particulares que deban tenerse en consideración para el desarrollo del proyecto, para verificar en campo, profundizar en los estudios requeridos o identificar diferencias entre las alternativas de solución para su comparación posterior.

De manera particular, se resalta en la Resolución 330 de 2017 los siguientes estudios básicos de las alternativas de sistemas de tratamiento de aguas residuales, mencionados en los artículos 171 para sistemas descentralizados y 181 para sistemas centralizados:

Tabla 7 Estudios básicos específicos solicitados

Estudios básicos específicos solicitados		
Artículo de la Resolución 330 de 2017	No. 171	No. 181
Visita de campo	identificar aguas superficiales cercanas, edificaciones y límites de la propiedad	Identificar límites de los predios para los sistemas, su aislamiento con respecto a sectores habitados, la localización de cuerpos de agua en el entorno del proyecto, incluyendo el punto de descarga de los efluentes tratados, los sistemas de manejo de agua de suministro, y la existencia de infraestructura vial y redes de suministro de energía, entre otros aspectos.
Topografía	localización del sistema de tratamiento en planta y en perfil	Realizar levantamientos planimétricos y altimétricos con el grado de detalle necesario
Localización	del sistema y del tratamiento	Ver visita de campo

	complementario del efluente, o postratamiento	
características del terreno / Estudio de suelos	elevaciones máximas del nivel freático y, cuando sea necesario, establecer la capacidad de infiltración del subsuelo	humedad, permeabilidad, granulometría, conductividad hidráulica saturada, nivel freático y estudios de infiltración
Autorizaciones y permisos	Definir trámites y obtener autorizaciones ambientales (ver artículo 243 de la Resolución 330 de 2017 y el RAS Título I: componente ambiental)	Definir trámites y obtener autorizaciones ambientales (ver artículo 243 de la Resolución 330 de 2017 y el RAS Título I: componente ambiental)
Hidrometereológicos		Dependiendo del sistema de tratamiento: Precipitación, evapotranspiración, evaporación, dirección y velocidad del viento, humedad relativa, radiación solar, temperatura ambiente y temperatura del agua residual que se va a tratar.
Vulnerabilidad		Vulnerabilidad sísmica. Vulnerabilidad frente a riesgos de desastres y variabilidad climática relacionados con la prestación de los servicios.
Requerimientos de las descargas		A cuerpos de agua, al alcantarillado, al suelo o al mar, según normatividad debe tenerse en cuenta límites máximos de los contaminantes presentes en los vertimientos ⁷ .
Reúso del agua tratada		Según Resolución 1256 de 2021 de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible o aquella que la modifique o sustituya ⁸ .
Uso de la fuente receptora		Según la normatividad y las disposiciones de las autoridades ambientales.

⁷ Resoluciones del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 631 de 2015, 883 de 2018 y 699 del 2021, o aquellas normas que la modifique o sustituyan, para vertimientos a fuentes de agua superficial, al mar y al suelo respectivamente.

⁸ La Resolución 1207 de 2014 fue derogada mediante Resolución 1256 de noviembre 23 de 2021 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Los sistemas descentralizados correspondientes a la vivienda unifamiliar dispersa son tratados en el Título J.

Se recomienda también realizar un estudio sobre la posibilidad de utilizar los subproductos resultantes de cada alternativa tecnológica. Según el potencial de esta opción, se tendría que incluir las necesidades de ahondar en más estudios para determinar aspectos administrativos, financieros, de requerimientos de áreas, control y monitoreo de procesos, entre otros. A nivel de prefactibilidad se debe explorar el potencial para realizar una gestión de subproductos. Si la alternativa en análisis es finalmente seleccionada, se tendría ya identificado que debe considerarse en un estudio de detalle sobre este tema también.

3. Formulación y priorización de proyectos

A través de una metodología multicriterio, deberá evaluarse la priorización de proyectos, considerando como mínimo las siguientes variables:

- Objetivos y metas a los que responde cada proyecto.
- Porcentaje de contribución de cada proyecto a cada objetivo y meta establecida.
- Grado de urgencia de las metas planteadas.
- Costos de inversión.
- Costos de operación y mantenimiento
- Gradualidad (Artículo 9. *Planeación de proyectos por etapas*)
- Análisis de riesgos

La solución de saneamiento dando manejo adecuado a las aguas residuales de una población, tiene en cuenta no solo la construcción de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales sino también actividades dentro del sistema de alcantarillado y de conocimiento de los vertimientos que realizan los usuarios al mismo, buscando que todas las aguas residuales sean tratadas y vertidas en condiciones que cumplan con la normatividad ambiental para la fuente de agua definida como receptora. Como parte de este ejercicio, es necesario revisar también el saneamiento de los cuerpos de agua, quebradas, humedales y lagunas que atraviesan o se encuentran en las zonas urbanas, buscando su protección frente a la contaminación por descargas directas y llevando todas las aguas residuales a los puntos de tratamiento mediante interceptores.

La infraestructura para el tratamiento de aguas residuales puede ser construida por etapas o proyectos que correspondan a trenes de tratamiento funcionales, teniendo en cuenta un desarrollo gradual y permanente del sistema.

Tabla 8 Aspectos en la determinación de los proyectos de aguas residuales

aspecto/alcance	
Número de sistemas	Depende de la reducción del número de vertimientos, definido por aspectos topográficos y de contribución de la calidad de aguas residuales tratadas al cumplimiento de los objetivos de calidad del cuerpo receptor.
Nivel de tratamiento (artículo 184 de la Resolución 330)	Pretratamiento Tratamiento primario Tratamiento secundario Desinfección

Modulación de la planta	Según procesos para conformar el tren de tratamiento Según crecimiento de la población
Manejo de subproductos	Agua residual tratada Lodos y biosólidos Biogas

Una vez se definan estos aspectos y se prioricen los proyectos, se deberá seguir el orden establecido para el cumplimiento de las metas propuestas.

4. Formulación y análisis de alternativas de proyectos.

En esta etapa, se formulan dos o más alternativas viables, predimensionando los componentes y estimando los costos de inversión, operación y mantenimiento, para un horizonte de planeación de mínimo 25 años.

De acuerdo con la sección 6, artículo 214 *Requisitos mínimos de las áreas para una PTAR*, que remite al artículo 182 *Selección de sitios para los sistemas centralizados*, las alternativas deben considerar el tren de procesos, vías y edificios requeridos para dar cumplimiento a las necesidades que demande el sistema de tratamiento conceptualizado.

Se considera que deben ser viables: se entiende que no tiene restricciones desde el punto de vista de riesgo o de tipo ambiental. Así mismo, debe revisarse la parte de predios que deben adquirirse, en el caso que resulte seleccionada la alternativa en estudio y las servidumbres que se deben tramitar, así como las autorizaciones y permisos que se requieran.

5. Comparación de alternativas viables y selección de la mejor alternativa.

El planificador deberá seleccionar la mejor alternativa con base en criterios de sostenibilidad, a partir de la evaluación de los aspectos económicos, técnicos, ambientales y sociales de conformidad con lo establecido en el artículo de la Resolución 330 de 2017, modificada por la Resolución 799 de 2021.

La definición de variables y los valores de ponderación en la selección de la alternativa más favorable deberá evaluarse mediante el empleo de matrices de selección multicriterio.

En el Anexo 1 se presenta un ejemplo de selección de alternativas tecnológicas para sistemas centralizados utilizando matrices multicriterio.

Finalmente, se comparan las alternativas, teniendo presente los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento y demás costos asociados, proyectados para un periodo de tiempo de mínimo 25 años. A manera de ejemplo indicativo, se presenta la siguiente tabla:

Tabla 9 Análisis de costos para cada alternativa

Análisis Costos para cada alternativa				
ítem	Alternativa 1	Alternativa 2	...	
Costo Inicial				
Estudios y Diseños				
Materiales				
Mano de Obra				
Maquinaria				
Equipos/ dispositivos				
Interventoría				
Permisos de construcción				
Gestión predial				
Trámite de concesiones				
Gestión de residuos de construcción				
Total, Inicial				
Operación y Mantenimiento (Mensual)				
Personal*				
Maquinaria //equipos*				
Insumos químicos				
Equipos de laboratorio				
Materiales y repuestos**				
Transporte				
Energía/ combustibles				
Servicios especializados				
Tasas Ambientales				

Gestión de residuos de construcción				
Total, Operación y Mantenimiento				

Este tipo de proyectos, tienen asociados costos ambientales, tales como valores a cancelar a la autoridad ambiental competente por concepto de estudios de evaluación y seguimiento de permisos o licencias ambientales, tasas retributivas y por vertimientos a las fuentes hídricas, costos del manejo de lodos y otros sub-productos resultantes del tratamiento de aguas, entre otros, que deben ser incorporados ya sea dentro de la solución básica o como un costo adicional por el tipo de tecnología. Como ejemplo, para efectos de la comparación de alternativas, se mencionan los costos por concepto de licenciamiento ambiental. Si la población a atender es superior a los 200.000 habitantes, estos costos se deben incluir para todas las alternativas, lo que se constituiría en un costo básico; mientras que, si algunas de las alternativas son de tipo anaerobio, se generan gases para los cuales su manejo puede implicar tanto recursos financieros como económicos, por lo que los costos netos asociados si pueden convertirse en un factor diferenciador a la hora de seleccionar una tecnología.

Adicionalmente, según la magnitud y escala de las soluciones, puede ser importante realizar estudios de evaluación social y económica completos, verificando tanto los beneficios como los costos económicos de las soluciones propuestas. Esto querría decir que no solo se debería incorporar una evaluación financiera, sino también una evaluación económica en la toma de decisiones final.

3.3.3 Etapa final del proceso de planeación

Consiste en los siguientes pasos de la planeación de proyectos, definidos en los artículos 15, 16 y 17 de la Resolución 330 de 2017:

1. Elaboración del plan de obras
2. Determinación de costos de proyectos
3. Formulación del cronograma de implementación del proyecto

3.4 Etapa de diseño de los proyectos de tratamiento de aguas residuales

El diseño de cualquier proyecto de tratamiento de aguas residuales domésticas como todo proyecto debe seguir lo establecido en los artículos 20 al 24 de la Resolución 330 de 2017, modificada por la Resolución 799 de 2021, para lo cual, además de la norma, se puede consultar el título A.

De conformidad con el artículo 23 de la Resolución 330 de 2017, todos los proyectos deben contar con un documento consolidado con la descripción de todos los pasos seguidos, las

memorias de cálculo, los planos de detalle para la construcción y las especificaciones de diseño definitivas, siguiendo los lineamientos del Título 3 sobre gestión documental.

El diseñador debe prestar especial atención a la definición de los protocolos de pruebas que deben establecerse desde esta etapa y que deben llevarse a cabo en el momento de la puesta en marcha del sistema, una vez finalizada su construcción y realizado el recibo de la obra por parte de la persona prestadora del servicio.

La elaboración de los diseños detallados de cada proyecto debe seguir los siguientes pasos, establecidos en el artículo 22 de la Resolución 330 de 2017, modificado por el artículo 7 de la Resolución 799 de 2021:

- PASO 1. Definición y localización de cada uno de los componentes del proyecto a diseñar.
- PASO 2. Reconocimientos de campo, investigación predial inicial.
- PASO 3. Levantamientos topográficos.
- PASO 4. Investigación de suelos y geotecnia.
- PASO 5. Selección de alternativas.
- PASO 6. Diseño geométrico y análisis de interferencias.
- PASO 7. Diseño hidráulico.
- PASO 8. Diseño geotécnico.
- PASO 9. Diseño estructural.
- PASO 10. Obras complementarias.
- PASO 11. Definición de especificaciones técnicas de construcción.
- PASO 12. Fichas de adquisición predial y declaratoria de utilidad pública.
- PASO 13. Permisos, licencias y autorizaciones.
- PASO 14. Determinación del presupuesto y cronograma de obras.

Los proyectos de aguas residuales como obras puntuales requieren un terreno suficiente para contener la infraestructura, tanto la secuencia de los procesos iniciales, como las ampliaciones para atender mayor población o para agregar procesos que permitan dar cumplimiento a la normatividad ambiental. Así mismo, se recuerda que además del tratamiento de las aguas residuales se debe contar con espacio para el tratamiento de los subproductos del tratamiento, lodos y gases que se pueden producir según la tecnología. Todo lo anterior, teniendo como objetivo, contar con una infraestructura que cumpla con la reglamentación ambiental, que busque el aprovechamiento de estos subproductos provenientes del tratamiento de las aguas residuales y que sea más resiliente frente al cambio climático, en cumplimiento del artículo 213 de la Resolución 330 de 2020, modificado por el artículo 61 de la Resolución 799 de 2021.

Ver artículo 182 *Selección de sitios para los sistemas centralizados* de la Resolución 330 de 2017, modificado por el artículo 52 de la Resolución 799 de 2021, para revisar los aspectos que deben tenerse en consideración a la hora de buscar y definir sitios para sistemas de tratamiento. Tanto los aspectos de revisión de las condiciones de ordenamiento territorial como las de tipo ambiental son importantes además para prever afectaciones a las comunidades por olores y a ecosistemas especiales por vertimientos.



Aspectos mencionados para la selección del área donde se va a construir el sistema de tratamiento tienen incidencia en el diseño y sus correspondientes costos. Entre ellos se mencionan la conexión entre el sistema de tratamiento con el alcantarillado y las fuentes receptoras, los balances entre excavaciones y rellenos y el nivel de riesgos por amenazas naturales como los sismos, los fenómenos de remoción en masa o las inundaciones.

Cuando ya se encuentre en diseño de detalle, el terreno debe estar definido, así como la propiedad del mismo, dado que en esta etapa ya deben ubicarse espacialmente las diferentes unidades que formarán parte del sistema de tratamiento. Se recuerda que, a esta altura del desarrollo de un proyecto, debe haber un prediseño y por lo tanto, los procesos y las dimensiones de los componentes se conocen.

En la medida en que la etapa de planeación se haya adelantado con rigurosidad y responsabilidad, para el inicio de la etapa de diseño de detalle, el diseñador contará con un prediseño que debe incluir la parte conceptual, las principales características a considerar y las alternativas propuestas para el diseño final. Por lo anterior, los pasos 1 al 5 del diseño, se centrarán en la información que se suministre del proceso de planeación para contar en el paso 5 con la alternativa finalmente seleccionada.

Los pasos 6 al 10 corresponden a los diferentes diseños que deben realizarse, pensando en los aspectos que aseguren la operación y mantenimiento de la infraestructura. Estos diseños son:

- PASO 6. Diseño geométrico y de análisis de interferencias.
- PASO 7. Diseño hidráulico.
- PASO 8. Diseño geotécnico.
- PASO 9. Diseño estructural.
- PASO 10. Obras complementarias: eléctricas, mecánicas, arquitectónicas, instrumentación y control, protección frente a riesgos por amenazas naturales y socionaturales, entre otras).

PASO 11 - Definición de especificaciones técnicas de construcción

Una vez definido y aprobado por la interventoría el diseño final del sistema de tratamiento de aguas residuales, se deben preparar todas las especificaciones técnicas con su respectiva unidad de medida de obra que permitan y complementen la construcción, puesta en marcha y operación del mismo, de acuerdo con los diseños, los protocolos de pruebas y los manuales de operación y mantenimiento preventivo y correctivo.

PASO 12. Fichas de adquisición predial y declaratoria de utilidad pública.

Desde el principio del ciclo de proyecto, en la etapa de planeación, debe contemplarse, así sea de manera general, la identificación de predios requeridos para la construcción de la infraestructura de tratamiento, así como las servidumbres requeridas para el paso de las tuberías de alcantarillado y el emisario final con las aguas residuales tratadas, de forma que cuando se seleccione la alternativa tecnológica a diseñar, la adquisición o legalización de predios esté muy avanzado, de tal forma que se pueda hacer el proyecto de viabilización sin inconvenientes de predios y servidumbres.

PASO 13. Permisos, licencias y autorizaciones.

Del mismo modo, desde el principio del ciclo de proyecto, en la etapa de planeación, debe contemplarse, así sea de manera general, la identificación de los permisos, licencias y autorizaciones requeridos para la construcción de la infraestructura de tratamiento. Ya cuando se seleccione la alternativa tecnológica a diseñar, se deben iniciar los trámites identificados para dicha alternativa, buscando disminuir tiempos entre la elaboración de los diseños y la aprobación de los mismos.

PASO 14 – Determinación del presupuesto y cronograma de obras

A partir de los planos de diseño y las especificaciones técnicas, deben calcularse de manera detallada las cantidades de obra y los recursos materiales y humanos necesarios para ejecutar el proyecto y con éstos se prepararán los análisis de precios unitarios de todos y cada uno de los ítems incluidos en el proyecto y en el presupuesto general respectivo. El diseño debe incluir la propuesta de cronograma de ejecución de las obras.

3.5 Etapa de construcción

Cuando dentro del desarrollo del proyecto de tratamiento de aguas residuales exista un proceso de contratación de su construcción, éste deberá someterse a la normatividad colombiana vigente.

Los procesos de construcción e interventoría de construcción y de puesta en marcha de un sistema de tratamiento de aguas residuales deben ajustarse a los requisitos mínimos establecidos en la Resolución 330 de 2017, modificada por la Resolución 799 de 2021, y consultar las buenas prácticas de ingeniería, los aspectos ambientales y los de gestión del riesgo y análisis de vulnerabilidad establecidas en los Títulos I y K del RAS.

Antes de poner en funcionamiento la infraestructura, se deben realizar pruebas de estanqueidad de las cámaras, tanques, conductos y otras estructuras. En caso de comprobarse las filtraciones hacia estas estructuras, o desde estas estructuras, éstas deberán ser corregidas.

3.6 Puesta en marcha

De acuerdo con el artículo 216 *Arranque y estabilización de las plantas de tratamiento de agua residual* de la Resolución 330 de 2017, para el arranque de una PTAR se deben tener presentes los siguientes factores:



1. En el momento del arranque del sistema de tratamiento, se debe contar con los manuales de operación y mantenimiento, ajustados durante la etapa de construcción a las condiciones reales de funcionamiento de la planta.
2. Los equipos electromecánicos deben estar en correctas condiciones de operación.
3. La cantidad y la adaptación del inóculo depende de cada tipo de proceso.
4. Iniciar el tratamiento con una fracción del caudal afluente previsto en el diseño (1/3 a 1/4) e ir aumentando este valor de forma paulatina. Para sistemas aerobios, la operación normal de planta debe lograrse en un período del orden de dos meses y para sistemas anaerobios de 4 a 6 meses.
5. Escoger puntos bien definidos de muestreo y evaluar el funcionamiento de las diferentes unidades. Considerar la entrada y la salida de los distintos procesos y sitios de toma de muestras, que sean fácilmente accesibles.
6. En caso de dificultades en el arranque, se debe revisar que no haya presencia de sustancias tóxicas.

Todas las medidas técnicas concernientes a la verificación de la puesta en marcha de los sistemas de tratamiento de aguas residuales o de algunos de sus componentes, deberán contemplar aspectos particulares para cada tecnología de tratamiento y contar con la supervisión necesaria para asegurar los siguientes objetivos:

- Ajuste a los diseños realizados y a sus especificaciones técnicas tanto de suministros como de obra, o a los cambios que hayan sido debidamente sustentados técnica y económicamente por el propietario del proyecto, la interventoría y las partes interesadas.
- Realización de las gestiones de calidad, medio ambiente, salud y seguridad del personal establecidas previamente.
- Realizar una gestión que optimice los recursos de tiempo y costos según los indicadores de seguimiento propuestos, de tal forma que el proyecto se desarrolle dentro de los presupuestos y los cronogramas establecidos.
- Dar cumplimiento a la normatividad legal, y a los compromisos realizados con las autoridades, comunidad vecina y las partes interesadas.

Para asegurar la ejecución de las anteriores gestiones, se recomienda la realización de comités de obra semanalmente, con los siguientes propósitos;

- Reunir a directivos de la obra, interventores, partes interesadas, técnicos y asesores externos para analizar el desarrollo de la obra, sus problemas y las posibilidades de mejora.
- Examinar las no conformidades y otros aspectos relativos a la calidad de la obra, los costos y tiempos, la salud y seguridad y el medio ambiente de acuerdo con los indicadores definidos para cada tema.
- Examinar los diagnósticos y propuestas de solución o de mejora presentadas por el equipo técnico o por asesores externos.
- Tomar decisiones sobre no conformidades y posibilidades de mejora.
- Asignar tareas, recursos y responsabilidades para el cumplimiento de dichas decisiones.

- Establecer y verificar el cumplimiento de compromisos de comités anteriores.

Es necesario definir las responsabilidades de quienes participan en la planificación, construcción, interventoría y puesta en marcha en la etapa de arranque y ajuste, y en el desempeño del sistema de tratamiento de aguas residuales. Debe tenerse en cuenta durante la etapa de planeación que el tratamiento de aguas residuales no es una ciencia exacta, y las etapas de arranque y ajuste pueden tener mayor duración y conllevar sobrecostos, debido a factores tales como el clima y la calidad del efluente. El desempeño final del sistema de tratamiento también puede estar afectado por estos factores, y en este caso puede necesitarse el diseño y la ejecución del plan de cumplimiento del Sistema de Control y Vigilancia de Vertimientos.

3.7 Etapa de operación y mantenimiento

Los procedimientos y medidas pertinentes a la operación y el mantenimiento de los diferentes componentes de un sistema de tratamiento de aguas residuales deben seguir los requerimientos generales establecidos en los artículos 29 a 33 de la Resolución 330 de 2017, modificada por la Resolución 799 de 2021, los aspectos particulares mencionados en los artículos 217 *Caracterización operativa de los sistemas de tratamiento de aguas residuales* y 219 *Control de Vectores* de la misma resolución y aquellos particulares mencionados para cada tecnología de tratamiento en las fichas técnicas.

Dado que en los sistemas de tratamiento de aguas residuales se debe eliminar o minimizar cualquier impacto ambiental negativo que se genere, es necesario que se cumpla con lo establecido en la normatividad ambiental. En particular, en sistemas de tratamiento para poblaciones superiores o iguales a 200.000 habitantes con lo establecido en la licencia ambiental otorgada. Para los sistemas que no requieren de licencia ambiental, es recomendable generar un plan de protección de los recursos naturales y el medio ambiente, siguiendo como guía lo señalado en el Título I del RAS.

3.8 Planos y memorias de cálculo

Los requisitos para la presentación de los planos y las memorias de cálculo relacionados con los procesos de diseño y de realización de planos de construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales se deben establecer de acuerdo con lo establecido en el título 3. Gestión documental de la Resolución 330 de 2017 que adopta el RAS, modificada por la Resolución 799 de 2021.

4 TRATAMIENTOS DESCENTRALIZADOS

4.1 Objetivo

Cuando no es posible construir un sistema centralizado de alcantarillado, se requiere remover la carga contaminante de las aguas residuales domésticas para dar cumplimiento a lo exigido en la normatividad ambiental y poder realizar la disposición de estas aguas residuales ya tratadas.

Las soluciones para la vivienda rural dispersa, definida en los términos del Decreto 1232 de 2020⁹ como *“la unidad habitacional localizada en el suelo rural de manera aislada que se encuentra asociada a las formas de vida del campo y no hace parte de centros poblados rurales ni de parcelaciones destinadas a vivienda campestre”*, están incluidas en el RAS Título J: alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural.

En este caso de soluciones descentralizadas, se debe configurar un tren de tratamiento que permita remover contaminantes hasta obtener valores por debajo de los valores límites máximos permisibles de parámetros generales, de acuerdo con el Decreto 3930 de 2010 y las Resoluciones del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 631 de 2015, 883 de 2018 y la 699 del 2021, o aquellas normas que las modifiquen o sustituyan, para vertimientos a fuentes de agua superficial, al mar y al suelo respectivamente.

Los siguientes valores límites son tomados de la Tabla del artículo 8 de la Resolución 631 de 2015, para cuando se realizan vertimientos a fuentes de agua superficial:

Tabla 10 Parámetros y valores máximos permisibles - ARD De las soluciones individuales de saneamiento de viviendas unifamiliares y bifamiliares (Res 631/2015)

Parámetros generales	Unidades	Aguas Residuales Domésticas – ARD De las soluciones individuales de saneamiento de viviendas unifamiliares y bifamiliares
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno	mg/L O ₂	200
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L O ₂	
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	100,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	5,00
Grasas y aceites	mg/L	20,00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	

⁹ Decreto 1232 de 2020 "Por medio del cual se adiciona y modifica el artículo 2.2. 1. del Título 1, se modifica la Sección 2 del Capítulo 1 del Título 2 y se adiciona al artículo 2.2.4.1.2.2 de la sección 2 del capítulo 1 del Título 4, de la Parte 2 del Libro 2 del Decreto 1077 de 2015 Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, en lo relacionado con la planeación del ordenamiento territorial"

Una vez al año también se deberán realizar los respectivos análisis y reportes de los siguientes parámetros: Sustancias activas al azul de metileno (SAAM), Hidrocarburos totales (HTP), Ortofosfatos ($P-PO_4^{3-}$), Fósforo (P), Nitratos ($N-NO_3^-$), Nitritos ($N-NO_2^-$), Nitrógeno Amoniacal ($N-NH_3$) y Nitrógeno Total (N).

4.2 Procesos Tecnológicos descentralizados

Son dos las soluciones que se pueden utilizar como sistemas de tratamiento descentralizados: los sistemas sépticos y las unidades sanitarias secas. La conformación de los procesos secuenciales y una operación y mantenimiento acorde con lo establecido para la tecnología permite obtener eficiencias de remoción, dando cumplimiento a la normatividad ambiental en materia de valores límites máximos permisibles de parámetros según el tipo de cuerpo receptor. Se recuerda que el vertimiento del efluente de las aguas residuales servidas debe realizarse preferiblemente a los cuerpos de agua superficial antes que disponerlos al suelo. Se recuerda también que cada estructura que forma parte de las soluciones debe ser estanca para tener un control sobre los procesos que se llevan a cabo dentro de él y para evitar la contaminación del suelo.

En la tabla se presentan los procesos que forman parte del sistema séptico.

Tabla 9 Procesos sistema séptico

Clasificación	Proceso de la solución séptica
Pretratamientos	Trampas de grasa
Tratamientos	Tanques sépticos Filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA)
Post tratamientos	Campos de infiltración Pozos de absorción o infiltración Filtros intermitentes Humedales Artificiales

La descripción de cada uno de sus procesos se encuentra en las respectivas fichas técnicas en el Anexo 2.

De acuerdo con lo establecido en la Resolución 330 de 2017, modificada por la Resolución 799 de 2021 (artículo 50), Cuando los tanques sépticos sean utilizados en sistemas individuales de saneamiento, deberán ir acompañados de una trampa de grasas al inicio del tren de tratamiento y un filtro anaeróbico. En caso de ser necesario se deberá implementar un sistema de tratamiento complementario.

En el caso de tanques sépticos prefabricados, estos deben cumplir con la Resolución 501 de 2017 en lo que tiene que ver con la resistencia química de los materiales y la información actualizada del rotulado y del manual técnico.

Ambas soluciones tienen como subproductos la producción de lodos y biogás, para los cuales también debe realizarse un tratamiento y una disposición segura, según lo establecido en este título.

En todos los casos es importante la capacitación de los usuarios de los sistemas en su funcionamiento, su utilización y manejo diario, así como en el mantenimiento que debe darse a las soluciones.

En los numerales siguientes se encuentran las variables que permiten seleccionar una alternativa o la otra, así como el desarrollo de las soluciones.

4.3 Clasificación de las soluciones

Se debe tener presente las diferentes reglas establecidas para las soluciones descentralizadas de tratamiento de aguas residuales domésticas:

1. Cuando se trata de viviendas rurales dispersas unifamiliares (Decreto 1232 de 2020)
2. Viviendas o entornos rurales dispersas y pequeños centros poblados rurales

4.3.1 Cuando se trata de viviendas rurales dispersas unifamiliares

El artículo 279 de la Ley 1955 de 2019, del Plan Nacional de Desarrollo, estableció la competencia del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio para definir lo que se entiende por asentamientos humanos rurales y viviendas rurales dispersas; dispuso también que las viviendas rurales dispersas, están autorizadas para autoabastecerse de agua para consumo humano y doméstico y para el manejo de sus aguas residuales domésticas, siempre y cuando cuenten con soluciones individuales de agua y saneamiento diseñadas bajo los parámetros definidos en el reglamento técnico del sector de agua y saneamiento básico.

Esta autorización sustituye a la concesión de aguas y al permiso de vertimientos, pero exige que el uso del agua y de las soluciones individuales de saneamiento se inscriba en el registro de usuarios del recurso hídrico.

Estas disposiciones fueron reglamentadas por los Decretos 1210 de 2020¹⁰, 1232 de 2020¹¹ y 1688 de 2020¹².

¹⁰ Decreto 1210 del 2 de septiembre de 2020 *Por el cual se modifica y adiciona parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario de Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico, se reglamenta parcialmente el artículo 279 de la Ley 1955 de 2019 y se dictan otras disposiciones.*

¹¹ Decreto 1232 del 14 de septiembre de 2020 *Por medio del cual se adiciona y modifica el artículo 2.2. 1. del Título 1, se modifica la Sección 2 del Capítulo 1 del Título 2 y se adiciona al artículo 2.2.4.1.2.2 de la sección 2 del capítulo 1 del Título 4, de la Parte 2 del Libro 2 del Decreto 1077 de 2015 Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, en lo relacionado con la planeación del ordenamiento territorial*

¹² Decreto 1688 del 17 de diciembre de 2020 *Por el cual se modifican unos artículos y se adiciona una Sección al Capítulo 1, del Título 7, de la Parte 3, del Libro 2 del Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, Decreto 1077*

En este caso, los diseños de la solución individual de saneamiento básico deben adecuarse a los caudales necesarios en la vivienda para la cual se construirán, y para ello, se deben remitir a la Resolución MVCT 844 de 2018 – acceso a agua para consumo humano y doméstico - artículos 34, 35 y 36; manejo de aguas residuales domésticas – artículos 44, 45, 46 y 47; y a la Resolución 330 de 2017 - sección 3. Tratamientos descentralizados, artículos 171 al 180¹³.

Se debe aportar el diseño del sistema individual de saneamiento básico, con la tecnología que se haya elegido, y la información sobre el predio que permita establecer que el sistema cuenta con un área suficiente para acomodar los diferentes componentes que lo integran.

Se sugiere consultar lo correspondiente en el manual de buenas prácticas de ingeniería Título J: Alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para la zona rural, en donde se plantean y desarrollan los dos tipos de solución: las soluciones sépticas y las unidades sanitarias secas para una vivienda rural dispersa unifamiliar.

4.3.2 Viviendas o entornos rurales dispersos y pequeños centros poblados rurales

Este tipo de sistemas requieren tramitar el permiso de vertimientos, para lo cual se sugiere consultar el manual de buenas prácticas de ingeniería Título I: Componente Ambiental de los sistemas de agua y saneamiento básico.

A nivel de tecnologías básicamente se cuenta con las mismas soluciones mencionadas en el numeral 4.2; sin embargo, su diseño debe ser más robusto teniendo en cuenta el escalamiento en cuanto a población atendida, áreas requeridas y un mayor soporte suministrado a través de los estudios básicos requeridos y la documentación necesaria para tramitar el permiso de vertimientos.

4.4 Estudios básicos requeridos

De acuerdo con el artículo 171 de la Resolución 330 de 2017, se deben realizar los siguientes estudios:

Antes de proceder a implantar un sistema de tratamiento en el sitio, debe buscarse información sobre estudios previos que se hayan hecho en la zona y tener claridad como mínimo de los siguientes aspectos:

1. Visita de campo para identificar aguas superficiales cercanas, edificaciones y límites de la propiedad.

de 2015, reglamentando parcialmente el artículo 279 de la Ley 1955 de 2019 en lo relacionado con la dotación de infraestructura de agua para consumo humano y doméstico o de saneamiento básico en zonas rurales y su entrega directa a las comunidades organizadas beneficiarias, de acuerdo con los esquemas diferenciales definidos por el Gobierno nacional

¹³ Los artículos 172, 173 y 174 de la Resolución 330 de 2017, fueron modificados por la Resolución 799 de 2021.

2. Topografía que indique la localización del sistema de tratamiento en planta y en altura. Importante determinar la pendiente.
3. Localización del sistema y del tratamiento complementario del efluente, o postratamiento.
4. Información secundaria si existe, de los cuerpos de agua de la zona para efectos del vertimiento.
5. Determinación de las características del terreno: elevaciones máximas del nivel freático y, cuando sea necesario, establecer la capacidad de infiltración del subsuelo.
6. Revisión de amenazas naturales, principalmente inundaciones, dado que si el terreno en donde están ubicadas las soluciones se inunda pueden presentarse dos problemas: se rebosa, se infiltra y se contamine el suelo y el agua o la infraestructura puede flotar, por lo que debe tomarse las medidas necesarias para evitarlo. La vulnerabilidad sísmica también debe tenerse en cuenta en el diseño, según lo establecido para las soluciones de agua y saneamiento dentro del código de construcciones sismo resistentes.
7. Definir los trámites de requisitos ambientales según la normativa ambiental vigente, y obtener las autorizaciones ambientales que se requieran.

Si la disposición de las aguas residuales tratadas se va a realizar sobre el terreno, se debe profundizar en los siguientes estudios:

1. De suelos: humedad, permeabilidad, granulometría, conductividad hidráulica saturada
2. Hidrológicos: precipitación (promedio máximo mensual), evapotranspiración y evaporación (promedio mensual)

Un sistema individual de saneamiento, trátase de un sistema séptico o de unidades sanitarias secas, debe ubicarse en la parte del predio que asegure el mínimo impacto ambiental y la protección de la salud.

Se recomienda observar las siguientes condiciones:

Tabla 102 Distancias mínimas a sistemas sépticos

Descripción	Distancia mínima
Distancia mínima entre viviendas, pensando en la ubicación y largo del sistema de tratamiento	100 m
Distancia mínima a fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano (pozos)	60 m
Distancia mínima a edificaciones (cimientos)	5 m
Distancia mínima a corrientes de agua	30 m ¹⁴

¹⁴ Distancia mínima a corrientes de agua de 30 m, medida a partir de la cota máxima de inundación (Decreto 1449 de 1997)

4.5 Selección de las alternativas tecnológicas

Una vez identificada la necesidad de emplear soluciones individuales, debe elegirse entre los sistemas sépticos y las unidades sanitarias secas, analizando entre otros los temas ambientales, sociales, de sostenibilidad y vías de comunicación.

Para esta selección debe tenerse en cuenta lo siguiente:

A. Niveles freáticos

En la mayoría de los casos, será posible construir sistemas sépticos. Sin embargo, cuando el nivel freático es alto o está sujeto a inundaciones, no es posible implementar esta solución, por lo que se puede construir la unidad sanitaria seca ya que esta solución va a estar siempre por encima del terreno. En cualquiera de los dos casos, será necesario prever los niveles máximos que puedan presentarse con el agua.

Además, para los sistemas sépticos, deben tomarse precauciones cuando el nivel freático sea alto, para evitar que el sistema flote o sea desplazado cuando esté vacío. Se recuerda que todas las estructuras que componen estos sistemas deben ser estancas para evitar contaminación al suelo.

B. Disponibilidad de agua para el diseño de sistemas con arrastre.

El sistema séptico depende de la suficiencia de agua para la descarga. Cuando el agua disponible es insuficiente, se debe preferir la construcción de unidades sanitarias secas.

C. Eficiencias de remoción y cumplimiento de normas

A excepción de las viviendas rurales dispersas unifamiliares¹⁵, en donde la carga a remover se puede lograr con el sistema de pozos sépticos con filtros anaeróbicos, para soluciones descentralizadas tales como escuelas, centros de salud, pequeñas agrupaciones de vivienda, éstos procesos unitarios deben ir acompañados de otros procesos de tratamiento complementarios para el cumplimiento de la normatividad ambiental, según lo establecido en la Resolución 330 de 2017, modificada por la Resolución 799 de 2021.

Se debe preferir la disposición de las aguas residuales tratadas a las fuentes superficiales de agua y dar cumplimiento a la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Sin embargo, si la disposición se va a realizar al suelo, se debe dar cumplimiento a las exigencias del Decreto 50 de 2018 sobre vertimientos al suelo, las cuales están reglamentadas en la Resolución la 699 del 2021.

¹⁵ Ver definición en el artículo 1 del Decreto 1232 de 2020

En el Anexo 2, se encuentran las fichas correspondientes a los procesos que conformarían las tecnologías descentralizadas de tratamiento de aguas residuales.

5 TRATAMIENTOS CENTRALIZADOS

La implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales se realiza con el objetivo de remover la totalidad o parte de la carga contaminante contenida en el vertimiento a generar sobre los cuerpos de agua, como medida de prevención y conservación del recurso agua, acatando el conjunto de reglas, acciones, procedimientos y medios dispuestos para facilitar el cumplimiento de la normatividad¹⁶ y demás requisitos exigidos por las Autoridades Ambientales Competentes.

La remoción de carga contaminante mediante el tratamiento de aguas residuales genera subproductos, entre ellos, los lodos que deben ser tratados, almacenados, aprovechados y dispuestos de forma tal que no genere impactos negativos sobre el medio ambiente, así como biogás cuando se escogen tratamientos anaerobios, para los cuales se debe realizar la evaluación sobre la posibilidad de su aprovechamiento o la quema.

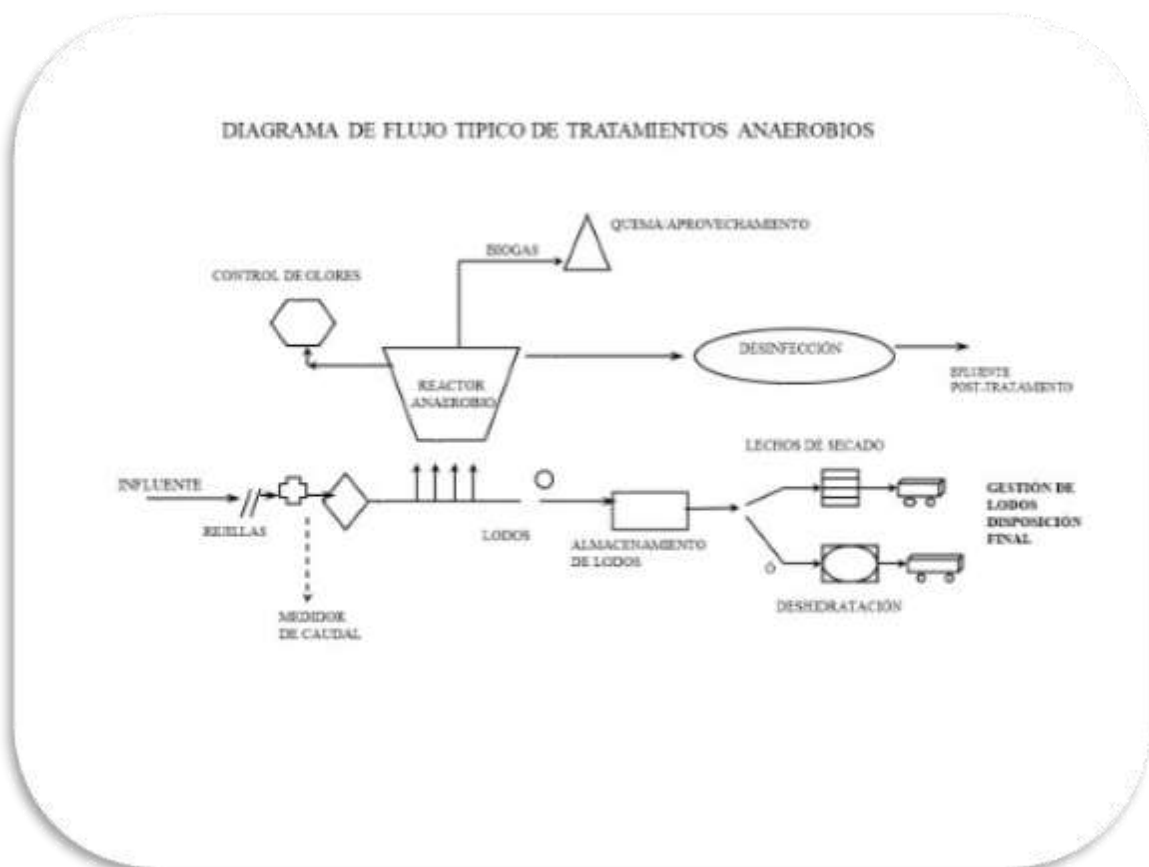
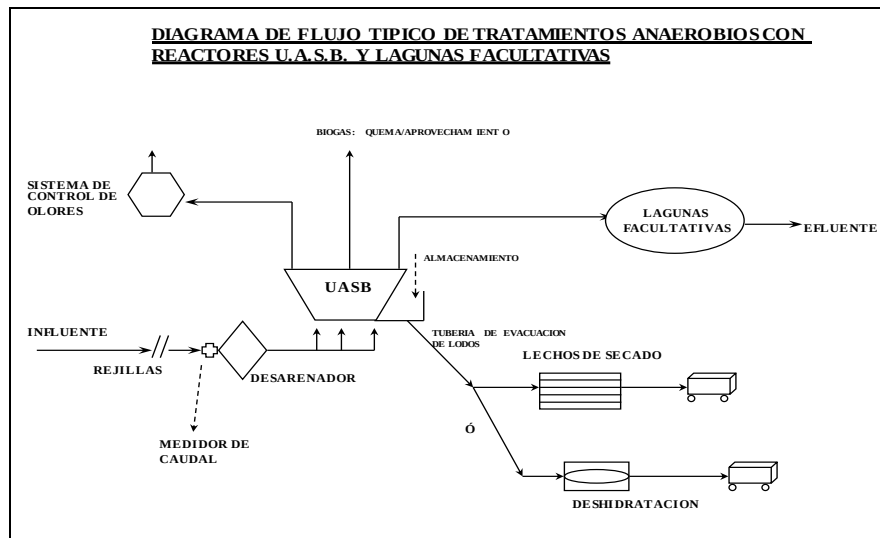
La descripción de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales y los sistemas de tratamiento para los lodos, se realiza a través de fichas técnicas que se presentan en los Anexos 2 y 3 y cada una de ellas contiene generalidades, sistemas de pretratamiento necesarios, aplicabilidad, ventajas y desventajas, aspectos de diseño, rendimiento esperado, aspectos particulares de operación y mantenimiento y bibliografía que puede ser consultada en caso de que el usuario quiera profundizar en el tema.

De conformidad con el artículo 184 de la Resolución 330 de 2017, modificado por la Resolución 799 de 2021, las diferentes tecnologías de tratamiento de aguas residuales se clasifican en pretratamientos, tratamientos primarios, tratamientos secundarios y desinfección, con las cuales y según las necesidades de lograr eficiencias de remoción se conforma un tren de tratamiento que permita cumplir la norma ambiental.

En las figuras se muestran algunos ejemplos de trenes de tratamiento normalmente empleados para sistemas anaerobios y lagunas.

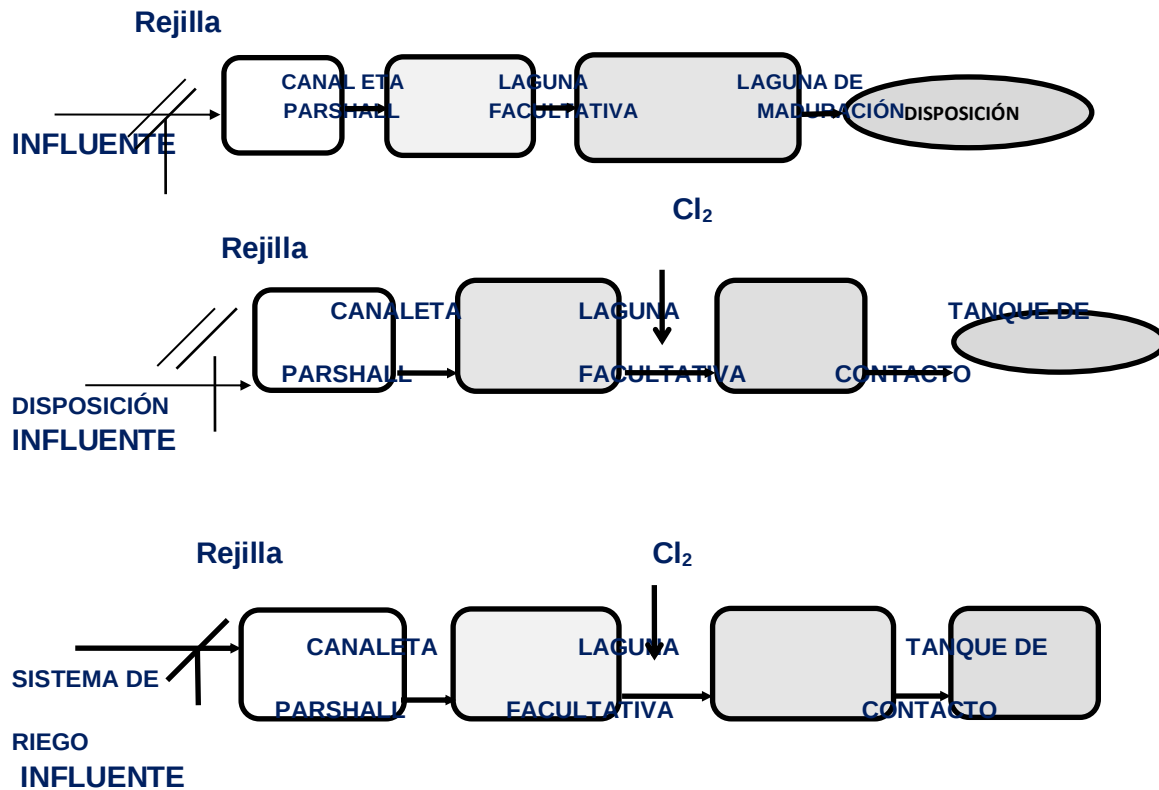
¹⁶ Decreto 3930 de 2010

Resolución 631 de 2015 “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”





DIAGRAMAS DE FLUJO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN



PROCESOS DE TRATAMIENTO

5.1 Selección de sistemas de tratamiento de aguas residuales

Para realizar la evaluación y selección del sistema de tratamiento a implementar, existen modelos de selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas, que permiten seleccionar y jerarquizar las alternativas tecnológicas sostenibles, teniendo en cuenta sus características, el rendimiento de los procesos o de la PTAR frente a los objetivos de calidad para la fuente receptora, según los usos; los objetivos de tratamiento, el enfoque de producción más limpia, los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento así como las características socioeconómicas de las ciudades.

El modelo conceptual permite realizar la selección de tecnologías viables y sostenibles, filtrándolas según se van analizando las siguientes temáticas:

- 1) priorización y factibilidad del proyecto,
- 2) rendimiento de procesos o del sistema frente a objetivos ambientales,
- 3) aspectos socioculturales,
- 4) aspectos tecnológicos,
- 5) aspectos ambientales,
- 6) reutilización y aprovechamiento de subproductos,
- 7) manejo de lodos,
- 8) costos de inversión, administración, operación y mantenimiento, y
- 9) tarifas, capacidad y disponibilidad a pagar.

En aguas residuales domésticas municipales las tecnologías apropiadas se refieren a aquellas que integran los siguientes tres atributos básicos:

- 1) Relación costo – efectividad. Integrando criterios de costo mínimo y de eficacia, acorde con los objetivos -de caudal y calidad del cuerpo receptor.
- 2) Administración y operación del sistema sostenible en el tiempo, integrando elementos de simplicidad en la operación y de necesidades de mantenimiento acordes con las posibilidades técnicas y económicas de la municipalidad
- 3) Apropiación social, de manera que por sus ventajas y beneficios directos y colaterales sea de alta apropiación por parte de las comunidades beneficiadas.

Las tecnologías apropiadas para el tratamiento de aguas residuales se aplican a procesos comprobados, de bajos costos de inversión y especialmente, de bajos costos de operación y mantenimiento, simples de operar y con capacidad de generar la calidad efluente requerida, caracterizándose por no utilizar equipos sofisticados y procurando siempre emplear materiales locales de construcción.

Se recuerda que las alternativas que se estudien deben ser viables, en el sentido de dar cumplimiento a las características exigidas por parte de la autoridad ambiental competente, según lo dispuesto en las resoluciones del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 631 de 2015, 883 de 2018 y la 699 del 2021, o aquellas normas que las modifiquen o sustituyan, para vertimientos a fuentes de agua superficial, al mar y al suelo respectivamente. Así mismo, deben cumplirse las disposiciones de la autoridad ambiental competente frente a los objetivos de calidad de los cuerpos receptores.

Del mismo modo, todas las alternativas viables propuestas deben cumplir con los criterios de selección de sitios para los sistemas centralizados enumerados en el artículo 182 de la Resolución 330 de 2017, modificado por el artículo 52 de la Resolución 799 de 2021, principalmente, en lo que tiene que ver con el uso del suelo permitido, verificación de zonas de amenaza sísmica, riesgos geotécnicos y de inundaciones o hábitats especiales o dentro del área de influencia del cono de aproximación de las aeronaves a los aeropuertos.

Para tomar la decisión sobre la alternativa viable con más puntos a favor en cuanto a la tecnología a seleccionar de tratamiento de aguas residuales municipales, se debe considerar lo siguiente:

- Requerimientos de área para el sistema. Dimensiones y forma topográfica disponible en el municipio, cumpliendo las expectativas de planes de ordenamiento territorial.
- Tipo de recursos físicos y humanos requeridos para el mantenimiento, para determinar el grado de complejidad del sistema, teniendo en cuenta el nivel de avance tecnológico de la región.
- Disponibilidad de recursos físicos y humanos para la construcción en la zona con el fin de tomar la decisión sobre el sistema a implementar.
- requerimiento energético de la tecnología a implementar.

Una vez establecidos los aspectos generales y de disponibilidad de recursos de la zona, se procede a determinar las ventajas y desventajas de cada una de las alternativas de tratamiento.

Inicialmente es importante tener en cuenta las condiciones técnicas y de eficiencia para posteriormente clasificarlas y continuar con el análisis de los costos asociados de cada una de ellas a fin de seleccionar la más viable y costo-eficiente en el rango de prioridades del municipio.

Como la selección de la mejor alternativa se realiza a nivel de predimensionamiento, los costos deben determinarse con información secundaria. Con base en las funciones o curva de costos, éstos se pueden determinar en el proceso de planeación para la construcción y operación de cada una de las tecnologías propuestas.

De conformidad con el artículo 14 de la Resolución 330 de 2017, la selección de tecnologías debe realizarse teniendo en cuenta un análisis multicriterio que recoja las variables arriba mencionadas. En el capítulo 3 de gestión de proyectos de tratamiento de aguas residuales se presenta de manera particular las consideraciones que deben tenerse presente en el análisis multicriterio para las plantas de tratamiento de aguas residuales y en el Anexo No. 1 se presenta de manera indicativa un ejemplo de selección de tecnologías utilizando variables y pesos dentro de la matriz multicriterio.

5.2 Información básica para el diseño de sistemas centralizados:

Como información necesaria para realizar el diseño se debe tener en cuenta lo establecido en la Resolución 330 de 2017: artículos 10 estudios básicos y 181 estudios básicos para sistemas centralizados, modificados por la Resolución 799 de 2021, según lo mencionado en el capítulo sobre gestión de proyectos de tratamiento de aguas residuales. Se resalta aquí la siguiente:

- Población a servir (No. de habitantes). Aquí se incluye información de caudales de lluvia, caudales industriales, etc.
- Cantidad, calidad del agua residual y objetivos de calidad de la fuente receptora.
- Temperatura (media mensual y anual).
- Uso de la tierra.
- Zonificación.
- Prácticas agrícolas.
- Requerimientos de calidad para descargas superficiales y subsuperficiales.
- Información de los cuerpos de agua de la zona.
- Caudal medio diario, caudal máximo horario, caudal máximo diario, caudal máximo mensual, caudal mínimo horario y caudal mínimo diario.

La información mínima que se requiere está presentada en el capítulo sobre el ciclo del proyecto, mencionándose de manera general lo siguiente:

Tabla 13 Información básica específica solicitada - Artículo 181 de la Resolución 330 de 2017¹⁷

Estudio básico	Información básica
Visita de campo Inspección visual	Identificar límites de los predios para los sistemas, su aislamiento con respecto a sectores habitados, la localización de cuerpos de agua en el entorno del proyecto, incluyendo el punto de descarga de los efluentes tratados, los sistemas de manejo de agua de suministro, y la existencia de infraestructura vial y redes de suministro de energía, entre otros aspectos. Descripción de la infraestructura existente. Disponibilidad de recursos (mano de obra, materiales de construcción, energía). Vías de acceso y comunicaciones.
Evaluación del Impacto Social	Características socioeconómicas de la población.

¹⁷ Modificado por el artículo 51 de la Resolución 799 de 2021, expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Topografía	Realizar levantamientos planimétricos y altimétricos con el grado de detalle necesario – Curvas de nivel
Localización	Ver visita de campo
características del terreno / Geología / Estudio de suelos	humedad, permeabilidad, granulometría, conductividad hidráulica saturada, nivel freático y estudios de infiltración
Autorizaciones y permisos	Definir trámites y obtener autorizaciones ambientales (ver RAS Título I: componente ambiental)
Hidrometereológicos	Dependiendo del sistema de tratamiento: precipitación (promedio máximo mensual), evapotranspiración y evaporación (promedio mensual), dirección y velocidad del viento, humedad relativa, radiación solar, temperatura ambiente y temperatura del agua residual que se va a tratar.
Vulnerabilidad	Vulnerabilidad sísmica. Vulnerabilidad frente a riesgos de desastres y variabilidad climática relacionados con la prestación de los servicios.
Requerimientos de las descargas	A cuerpos de agua, al alcantarillado, al suelo o al mar, según normatividad debe tenerse en cuenta límites máximos de los contaminantes presentes en los vertimientos.
Reúso del agua tratada	Según Resolución 1256 de 2021 ¹⁸ del Ministerio de Ambiente o aquella que la modifique o sustituya.
Uso de la fuente receptora	Según las disposiciones de las autoridades ambientales.

¹⁸ La Resolución 1256 de noviembre 23 de 2021 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible derogó la Resolución 1207 de 2014.

6 LODOS Y BIOSOLIDOS

6.1 Tratamiento de lodos

Para la selección de cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales, la generación de lodos como subproducto de los procesos unitarios de tratamiento se convierte en factor a tener en cuenta; esto partiendo del principio que parte de la carga contaminante que ingresa al sistema finalmente será transformada en lodos.

Con el tratamiento del agua residual, los lodos provenientes de los diferentes procesos que se realizan en el tren de tratamiento también deben ser tratados, para buscar su aprovechamiento y disposición de forma que no generen impacto sobre los recursos naturales, para ello se deben conocer sus características físicas, químicas y biológicas.

Los lodos están compuestos por elementos que se han sedimentado en los procesos de tratamiento, que generalmente son sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables o que han sido floculados por procesos físicos, químicos y biológicos. Dependiendo de los procesos de tratamiento, estos lodos pueden estar en condiciones aeróbicas o anaeróbicas, y su concentración en el agua varía significativamente. Las características de dichos lodos varían según su procedencia (ver Tabla 14)

Tabla 14 Generación de lodos en las etapas de tratamiento de aguas residuales

Tratamiento	Características físicas de los lodos generados
Pretratamiento	Lodo constituido principalmente por arenas y productos no disueltos con alto contenido de materia orgánica en estado inicial de descomposición.
Tratamiento primario	Lodos de consistencia limosa y color marrón a gris. Se vuelven sépticos con gran facilidad
precipitación química	Lodos de color negro y generación de olores.
tratamiento secundario	Lodos de color marrón generalmente cuando están aireados, pero si ocurre lo contrario su color oscurece y producen fuertes olores
lodos digeridos	Su color varía entre marrón oscuro y negro y contienen concentraciones elevadas de gas.

Fuente: Hernández, 2001

En la siguiente tabla se presentan las características típicas de los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.

Tabla 115 Composición característica de lodos urbanos

Parámetro	Primarios	Secundarios (F.A.)	Digeridos (mezcla)
Sólidos Suspendidos –SS (g/Hab-día)	30-36	18-29	31-40
Contenido de agua (%)	92-96	97.5-98	94-97
Sólidos Suspendidos Volátiles (% SS)	70-80	80-90	55-65
Grasas (% SS)	12-16	3-5	4-12
Proteínas (% SS)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (% SS)	8-10	6-8	5-8
pH	5.5-6.5	6.5-7.5	6.8-7.6
Fósforo (P) (% SS)	0.5-1.5	1.5-2.5	0.5-1.5
Nitrógeno (N) (% SS)	2-5	1-6	3-7
Bacterias patógenas (N por 100 ml)	10 ³ -10 ⁵	100-100	10-100
Organismos parásitos (N por 100 ml)	8-12	1-3	1-3
Metales pesados (% SS) (Zn, Pb, Cu)	0.2-2	0.2-2	0.2-2

Fuente: Hernández, 2001

Para el diseño de las conducciones y tratamiento de lodos, se debe estimar el volumen de lodo producido y a retirar, programación de purga de lodos, relación entre fase sólida y líquida y producción de lodos como materia seca.

La cantidad de lodos extraídos puede calcularse como la suma de los sólidos sedimentables que entran a la planta, y los sólidos suspendidos volátiles generados dentro de ésta. Si los procesos de decantación no son eficientes, parte de estos sólidos salen con el efluente y deben restarse del cálculo anterior.

La producción de lodos de los diferentes tratamientos varía considerablemente. La más alta se encuentra en procesos de lodos activados en los cuales no hay procesos anóxicos para desnitrificación, digestión anaeróbica o aireación extendida. La menor producción de lodos se encuentra en procesos anaeróbicos, que puede ser de menos de 20% respecto al anterior.

Todos los lodos crudos contienen sólidos hasta el 6% del volumen total, por esta razón y su pequeño contenido de sólidos requiere el manejo de un gran caudal de lodos.

Para el cálculo de la pérdida de carga en los conductos por transporte de lodo debe tenerse en cuenta un factor multiplicador sobre los valores calculados de acuerdo con las ecuaciones para el caso del flujo de agua, el cual depende del porcentaje de sólidos contenidos en los lodos.



Se recomienda que las tuberías de conducción de lodos con concentraciones mayores de 3% de sólidos tengan un diámetro de 150 mm o mayor, para evitar taponamientos. En casos de lodos demasiado viscosos, que contengan grasas, o que puedan presentar deposiciones que obstruyan las tuberías, deben implementarse facilidades de limpieza, generalmente mediante chorros a presión o dispositivos mecánicos. Las tuberías se deben diseñar para presiones que tengan en cuenta el lavado hidráulico, y la mayor concentración de sólidos que usualmente ocurre al inicio del bombeo.

Entre las bombas más usadas para impulsar lodos en PTAR se señalan las bombas tipo émbolo, cavidad progresiva, centrífuga no atascante, flujo rotativo, diafragma, Tornillo de Arquímedes, pistón de alta presión y lóbulo rotativo. En la selección del tipo de bomba se deben tener en cuenta aspectos tales como densidad y viscosidad de los lodos, y la presencia de materiales ácidos o cáusticos que puedan ocasionar corrosión, de arenas o sólidos que puedan ocasionar abrasión, y de gases que puedan ocasionar cavitación.

Los procesos de tratamiento de lodos están orientados a los siguientes objetivos fundamentales: La reducción del contenido de agua, la degradación de la materia orgánica, y la adecuación para, en lo posible darles valor económico para su uso, principalmente en la fertilización y acondicionamiento de suelos con fines agrícolas y forestales, o para facilitar su disposición final.

6.1.1 Biosólidos

Son materiales no fluidos, producto del tratamiento de lodos, estabilizados y aptos para su uso o su disposición final.

Artículo 2.3.1.1.1. del Decreto 1077 de 2015. Definición 62

Biosólidos. Producto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales municipales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten su uso.

(Decreto 1287 de 2014, art. 3).

No son biosólidos las escorias y cenizas producto de la oxidación o reducción térmica de lodos, así como los residuos que se retiran de los equipos e instalaciones de la fase preliminar del tratamiento de aguas residuales, ni los provenientes de dragados o de limpieza de sumideros.

Con la deshidratación de lodos se reduce el volumen de éstos, además se obtienen consistencias pastosas o granulares que facilitan su manejo y disposición final, y se evitan o mitigan olores debido a que el aire penetra dentro de estos lodos deshidratados, reduciendo las condiciones sépticas que los producen.

La degradación de la materia orgánica tiene por objeto el control de sustancias tales como el anhídrido sulfuroso y el amoníaco, que pueden generar malos olores y afectar la flora y fauna de los suelos y las aguas que tengan contacto con los biosólidos.

La adecuación de los biosólidos para usos agropecuarios se puede mejorar con la adición de elementos tales como cal y zeolitas, o mediante lombricompostaje que añade enzimas y microorganismos útiles al suelo a la vez que elimina los patógenos.

6.1.2 Tecnologías de tratamiento de lodos

El artículo 211 de la resolución 0330 del 2017, indica los requisitos mínimos de diseño para procesos de manejo de lodos en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, por otra parte, en el Anexo 3 se muestran las siguientes fichas técnicas para las diferentes tecnologías de tratamiento de lodos:

- 1.L Deshidratación de lodos con equipos electromecánicos
- 2.L Digestión aeróbica de lodos
- 3.L Digestión anaeróbica de lodos
- 4.L Espesador de lodos por gravedad
- 5.L Espesamiento de lodos por flotación con aire disuelto
- 6.L Estabilización alcalina de lodos
- 7.L Lechos de secado de lodos
- 8.L Compostaje de lodos
- 9.L Lombricompostaje de lodos

Según las necesidades del proyecto, el profesional conformará los trenes de tratamiento de agua apropiados, así como el tren de lodos requerido. El artículo 211 de la resolución 0330 de 2017, expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio dicta los requisitos mínimos de diseños para el manejo de lodos de acuerdo al proceso empleado en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. También debe considerarse la resolución 799 de 2021, en particular el artículo 57 que adiciona el artículo 206A a la resolución 330 de 2017.

“ARTÍCULO 206A. Gestión de subproductos en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Para todos los sistemas de tratamiento de aguas residuales, el formulador del proyecto deberá analizar las alternativas disponibles para la gestión de los subproductos resultantes del proceso de tratamiento de aguas residuales según los lineamientos de esta resolución. Para los lodos generados en los procesos del tratamiento se deberá realizar su estabilización mediante el uso de procesos e infraestructura destinada para tal fin. Su disposición final o aprovechamiento deberá sujetarse a la normativa ambiental vigente, una vez realizado el análisis previsto en el artículo 212 (aprovechamiento de los subproductos) de la presente resolución. En el caso de los lodos generados en los procesos del tratamiento se deberá realizar su estabilización mediante el uso de procesos e infraestructura destinada para tal fin.”

La utilización de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en el país está reglamentada por el Decreto 1287 de 2014 o aquel que lo modifique o sustituya. En él se dan las variables que deben caracterizarse, los valores máximos permisibles de categorización de biosólidos para su uso, la tasa máxima anual de aplicación en el suelo y las alternativas y restricciones de uso de los biosólidos.

6.2 Caracterización de lodos y biosólidos

El artículo 207 de la resolución 0330 del 2017, expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, brinda los lineamientos para la caracterización de lodos y biosólidos del tratamiento de aguas residuales bien sea con propósitos operativos, de aprovechamiento y disposición final, así como seguimiento por parte de las autoridades ambientales. Con el fin de obtener muestras representativas, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Lugar de la muestra.
- Instalación del muestreo (permanente o temporal).
- Presencia de condiciones de riesgo (Gases de carácter explosivo)
- Condiciones hidráulicas (flujo a presión, canales abiertos, etc.).
- Naturaleza del lodo o biosólido a muestrear (completamente mezclado, estratificado, etc.).
- Dosificación del flujo (Ej: volumétrico).
- Tipo de análisis (patógenos, metales, pH, nutrientes).
- Período de muestreo (horario, diario, semanal).
- Método preservación de la muestra (refrigeración o químico).
- La caracterización de los parámetros que es necesario medir debe incluir como mínimo, cadmio, cromo total, cobre, plomo, mercurio, níquel, zinc, molibdeno, arsénico, selenio, coliformes fecales, huevos de helmintos viables, salmonella sp y virus entéricos.
- La frecuencia de muestreo está relacionada con la cantidad de biosólidos producidos en la planta de tratamientos de aguas residuales, como se ilustra en la Tabla 18:

Algunas opciones de muestreo pueden ser:

- Retirar volúmenes iguales de la muestra de cada una de las múltiples corrientes de lodo para crear una muestra compuesta.
- Tomar la muestra de acuerdo al flujo de agua residual tratada, teniendo en cuenta los valores típicos de generación de lodos. Sin embargo, factores tales como tasas de carga desigual, las diferencias en los mecanismos de recogida de lodos, etc., pueden afectar las tasas de eliminación de los sólidos y los índices de generación de lodos. Esta opción se aplica especialmente a situaciones en que no existen datos del flujo de lodos o sólidos.

- Tomar la muestra en las corrientes individuales sobre la base de datos de flujos de lodo o sólidos, el cual dependerá de los parámetros que se deseen medir.
- En cumplimiento de los procedimientos establecidos por el sector ambiente, mediante el Decreto 1287 del 2014 o aquel que lo modifique o sustituya, para el muestreo de biosólidos que proyectan el uso en actividades agropecuarias, deberán seguir los métodos de análisis definidos por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).
- Para el muestreo de biosólidos, para efectos de vigilancia por las autoridades ambientales competentes, se podrán tomar como referencia los métodos de muestreo y análisis reconocidos internacionalmente, las Normas Técnicas Colombianas (NTC), ISO, IEC y los métodos que para estos casos se hayan establecido por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM. .

Las muestras deben obtenerse de los puntos donde el lodo se encuentre completamente mezclado, ya que algunos parámetros a medir se encuentran asociados con la fracción de sólidos (en particular precipitados de metales), mientras que otros se encuentran asociados con la fracción de líquido (fracción orgánica disuelta), para esto debe tenerse en cuenta que:

- En los trenes de tratamiento de lodos, las muestras en la descarga de las bombas deben estar bien mezclados ya que la circulación en este punto en el sistema es turbulenta, con una separación de sólidos dentro de la corriente de flujo.
- Si la muestra se extrae de un tubo que contiene lodos, en un punto que se distancia de las bombas de lodos, la velocidad media de flujo a través de la tubería debe ser superior a 2 m/s ya que a velocidades menores afectan el contenido de sólidos y no sería una muestra representativa.

De acuerdo con el documento guía de la EPA para el muestreo y análisis de lodos “POW Sludge Sampling And Analysis Guidance Document”, los puntos para el muestreo de lodos son los siguientes:

Tabla 16 Puntos de muestreo de lodos

Tipo de lodo	Punto de muestreo
Digeridos anaeróbicamente	En la descarga de las bombas de desplazamiento positivo.
Digeridos aeróbicamente	En las líneas de descarga de las bombas. Si se utiliza la digestión de lote debe tomarse directamente desde el digestor.
Lodos espesados	En la descarga de las bombas de desplazamiento positivo.
Tratamiento térmico	En la descarga de las bombas de desplazamiento positivo después de decantación. El muestreo en este tratamiento causa: (1) Alta tendencia a la separación sólidos por la presencia de altas temperaturas (2) Puede causar problemas con algunos envases de muestra debido al enfriamiento y la contracción subsiguiente de gases arrastrados.

Deshidratados, secos, compostados o térmicamente reducidos	Muestra en transportadores de recogida de materiales y contenedores a granel. Muestra de muchos lugares dentro de la masa de lodo y a varias profundidades.
Deshidratados	Muestreo en la correa del filtro prensa, centrífuga y filtro prensa de vacío: Muestra de la tolva de descarga de lodos. Muestreo de lodos de Prensa (placa y marco): Muestra de la bandeja de almacenamiento; se seleccionan cuatro puntos dentro de la bandeja de almacenamiento, se recoge la misma cantidad de muestra de cada punto y se combinan. Muestreo en lechos de secado: debe dividirse la cama en cuatro partes y tomar la misma cantidad de la muestra desde el centro de cada una. Luego se combinan formando una sola muestra. Cada muestra debe incluir toda la profundidad de los lodos.
Compostados	Muestreo en camas de compostaje: Muestra directamente de cargador frontal.

Fuente: EPA, 1989

Para la preservación de muestras, de acuerdo con el documento guía de la EPA para el muestreo y análisis de lodos “*POW Sludge Sampling And Analysis Guidance Document*”, los recipientes que deben ser utilizados, los métodos de preservación y volúmenes son los siguientes.

Tabla 17 Preservación de muestras en el muestreo y análisis de lodos

Parámetro	Recipientes de boca ancha	Preservantes	Tiempo máximo de almacenamiento	Volumen mínimo de la muestra
<u>Compuestos Inorgánicos</u>				
Asbestos	Plástico	Ninguno	Ninguno	2000 ml
<u>Metales</u>				
Cromo VI	Plástico, Vidrio	Refrigeración a 4 °C	24 horas	300 ml
Mercurio	Plástico, Vidrio	HNO ₃ a pH<2	28 días	500 ml
Metales, excepto cromo VI y mercurio	Plástico, Vidrio	HNO ₃ a pH<2	6 meses	1000 ml
<u>Compuestos orgánicos</u>				
Extraíbles (como los ftalatos, nitrosaminas, nitroaromáticos, isoforona, HC aromáticos polinucleares, haloéteres, HC clorados y TCDD),	Vidrio Plástico para dioxinas y furanos únicamente	Refrigeración a 4 °C 0.008% Na₂S₂O₃	7 días antes de la extracción 40 días después de la extracción	1000 ml

Extraíbles (fenoles)	Vidrio	Refrigeración a 4 °C 0.008% Na ₂ S ₂ O ₃ H ₂ SO ₄ a pH<2	7 días antes de la extracción 40 días después de la extracción	1000 ml
Halocarbonos y aromáticos	Vidrio	Refrigeración a 4 °C 0.008% Na ₂ S ₂ O ₃ HCL a pH 2	7 días sin conservantes 14 días en la oscuridad	>20 ml
Acroleína y acrilonitrilo	Vidrio	Refrigeración a 4 °C 0.008% Na ₂ S ₂ O ₃ pH a 4 o 3	14 días	>20 ml
Pesticidas y PCBs	Vidrio	Refrigeración a 4 °C 0.008% Na ₂ S ₂ O ₃	7 días antes de la extracción 40 días después de la extracción	1000 ml

Fuente: EPA, 1989

Por otra parte, deben considerarse los siguientes aspectos durante la toma y preservación de muestras de lodos:

- Limpiar todo el equipo cada vez que se realice un muestreo, para evitar contaminación cruzada. La limpieza debe realizarse con un detergente de laboratorio, un lavado minucioso con agua del grifo y al menos tres enjuagues con agua destilada.
- Las alícuotas de la muestra debe ser envasados directamente en los contenedores de la muestra.
- La toma de muestras para el análisis de grasas y aceites debe realizarse directamente en el recipiente de la muestra ya que el aceite y la grasa tienden a adherirse a las superficies.
- Para la toma de muestras de compuestos volátiles orgánicos o semivolátiles, debe verse cuidadosamente el líquido en el recipiente con el fin de evitar la formación y retención de burbujas de aire. Debe comprobarse que no queden burbujas de aire girando el recipiente boca abajo y golpeando la tapa, luego se debe abrir el recipiente y llenar con muestra adicional.
- Para la toma de muestras de dioxinas/furanos, se debe llenar el recipiente a 4/5 para permitir la expansión de las muestras cuando están congeladas.
- Para la toma de muestras de plaguicidas/PCB/herbicidas, metales y parámetros no convencionales, debe llenarse el recipiente dejando entre 1 cm y 1.5 cm de espacio libre en la parte superior con el fin de permitir la expansión.

La frecuencia de muestreo está relacionada con la cantidad de biosólidos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales y debe realizarse de acuerdo a la frecuencia establecida en el artículo 207 de la resolución 0330 del 2017, expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Tabla 18 Frecuencia de muestreo de biosólidos

Producción de biosólidos Toneladas/año de biosólido (base seca)	Frecuencia de muestreo
Menor de 300	Anual
Entre 301 y 1500	semestral
Entre 1501 y 15000	Trimestral
mayor de 15000	Mensual

Fuente: Res 0330 del 2017

Para el proceso de caracterización fisicoquímica del producto, no está permitido realizar diluciones con material de complemento para el biosólido y/o el material orgánico estabilizado. La caracterización se realizará sobre el producto obtenido en el proceso de estabilización.

La autoridad ambiental competente podrá disminuir la frecuencia de monitoreo para los parámetros, si los valores de éstos se mantienen estables por un tiempo de tres (3) años consecutivos y con operación del sistema en continuo.

De igual manera, la autoridad ambiental competente podrá exceptuar la realización de los análisis de laboratorio para determinados parámetros, si su presencia se encuentra por debajo de los límites de detección analítica o aumentar la frecuencia de monitoreo para los parámetros, si el comportamiento de éstos es errático y disperso.

El programa de monitoreo de lodos también debe incluir, de acuerdo con los parámetros a muestrear la frecuencia intramuestral, la duración del muestreo y el tipo de muestra a recoger, de acuerdo con la tabla que se muestra a continuación.

Tabla 19 Frecuencia de muestreo de lodos

Parámetro	Frecuencia de muestreo y análisis	Tipo de muestra
Metales Pesados	un muestreo mensual	Puntual
Coliformes Fecales	una muestra por semana	Muestra compuesta resultante de 12 muestras tomadas del flujo de lodos
pH	una muestra por semana	Muestra compuesta resultante de 12 muestras tomadas del flujo de lodos
Sólidos Totales	una muestra por semana	Muestra compuesta resultante de 12 muestras tomadas del flujo de lodos
Sólidos Fijos	una muestra por semana	Muestra compuesta resultante de 12 muestras tomadas del flujo de lodos.

Sólidos Volátiles	una muestra por semana	Muestra compuesta resultante de 12 muestras tomadas del flujo de lodos
--------------------------	------------------------	--

Fuente: Ministerio de Comercio e Industrias, 2007

Los factores que deben tenerse en cuenta para el análisis de resultados son:

- A medida que aumenta el flujo del afluyente, aumenta la variabilidad de los lodos, al igual que el volumen de salida.
- Contribuciones de aguas industriales, ya que éstas harán que la composición de los lodos varíe de acuerdo a los insumos utilizados en sus sistemas productivos.
- Características de la planta de tratamiento, teniendo en cuenta tiempos de retención y mezcla.

Un documento que puede ser consultado es la norma UNE-EN ISO 5667-13:1998. Calidad de agua. Muestreo. Parte 13: Guía para el muestreo de lodos procedentes de aguas residuales y de las instalaciones de tratamiento del agua (ISO 5667-13: 1997).

Dentro de los parámetros que deben medirse en lodos, debe incluirse la prueba de toxicidad TCLP (EPA TCLP: *Toxicity Characteristic Leaching Procedure and Characteristic Wastes* (D-codes)), con el fin de establecer si el lodo es o no de carácter peligroso y con esto establecer el tipo de tratamiento y disposición que se realizará.

Los parámetros a medir deben incluir pH, Humedad, Temperatura, Porcentaje de sólidos, Porcentaje de nitrógeno, Porcentaje de nitrógeno amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$), Porcentaje de nitrógeno, nitrato, fósforo, potasio, cadmio, cromo total, cobre, plomo, mercurio, níquel, zinc, molibdeno, boro, PCBs, arsénico, selenio.

Es importante identificar las características fisicoquímicas de los lodos con el fin de establecer su tratamiento y disposición final, para esto existen tres tipos de análisis que pueden realizarse:

- Análisis de componentes: se puede realizar a través de un balance de masa del proceso generador del lodo utilizando la información de la calidad de materia prima utilizada.
- Análisis de lixiviados TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure and Characteristic Wastes*): método utilizado por la USEPA, el cual consiste en determinar a través de una prueba de lixiviación si el residuo contiene una o más de las sustancias, elementos o compuestos presentados en la tabla 3 del Decreto 4741 de 2005 o la norma que la modifique o sustituya.
- Análisis de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico infecciosos (CRETIB) del lodo, para determinar el tipo al que corresponde.

6.2.1 Clasificación de los Biosólidos

Los biosólidos se clasifican en las categorías A y B, según el cumplimiento de los valores de los parámetros incluidos en la siguiente tabla que trae el Artículo 2.3.1.4.4. *Valores máximos permisibles para la categorización de los biosólidos* del Decreto 1287 del 2014, Compilado en el Decreto 1077 de 2015, o la norma que lo modifique o sustituya.

La mezcla de biosólidos con materiales de complemento, deberán cumplir con los valores máximos permisibles para la categorización de los biosólidos establecidos arriba. Los materiales de complemento deberán caracterizarse antes de mezclarse con los biosólidos (Artículo 11, Decreto 1287 de 2014).

6.2.2 Materiales Orgánicos Estabilizados

Mediante el proceso de deshidratación y estabilización de los biosólidos se obtiene el Material Orgánico Estabilizado, que es un producto orgánico sólido, generalmente granular, que tiene mejores condiciones para su almacenamiento y transporte.

A continuación, se presentan los requisitos para este material.

Tabla 20 Parámetros Fisicoquímicos para los Materiales Orgánicos Estabilizados

Parámetro	Categoría A Valor de Referencia	Categoría B Valor de Referencia
Contenido de humedad (%)	$\leq 20,0$	≤ 25
Contenido de cenizas (%)	$< 60,0$	
Contenido de carbono orgánico oxidable total (%)	$> 15,0$	
Capacidad de intercambio catiónico (meq/100g)	$> 30,0$	> 20
Capacidad de retención de humedad (%)	$> 100,0$	> 100
pH (Unidades)	$4,0 < \text{pH} < 9,0$	$4,0 < \text{pH} < 9,0$
Densidad real (g/cm^3 Base Seca)	$< 0,6$	$< 0,6$
N total, P_2O_5 y K_2O (%)	Declararlos si cada uno es $> 1,0$	

Los valores de eficiencia de la actividad de separación de la fracción orgánica de los residuos sólidos en las plantas para el tratamiento y aprovechamiento de residuos sólidos para uso diferente del agrícola son los siguientes:

Tabla 21 Eficiencia de la actividad de separación de la fracción orgánica

Periodo de Operación		Eficiencia de Separación Diaria	
Etapas	Duración de la Etapa (meses)	% en peso (base húmeda)	% en volumen (base húmeda)
Operación de Inicio	$0,0 < t < 6,0$	$\geq 75,0$	$\geq 70,0$
Operación Estable	$6,0 \leq t \leq 18,0$	$\geq 85,0$	$\geq 80,0$
Operación de Optimización	$> 18,0$	$\geq 95,0$	$\geq 90,0$

Contenidos de Materiales Inertes. El productor de Materiales Orgánicos Estabilizados de cualquier categoría cumplirá además de los valores de los parámetros establecidos, con los siguientes para los contenidos de materiales inertes:

Tabla 22 Contenidos de Materiales Inertes

Parámetro	Tamaño de Partícula (mm)	Valor de Referencia (% en peso base seca)
Plástico, metal, caucho	Tamaño $> 2,0$ mm	$< 0,20$
Vidrio	$2,0 \text{ mm} < \text{Tamaño} < 16,0 \text{ mm}$	$< 0,02$
	Tamaño $\geq 16,0$ mm	Ausente
Piedras	Tamaño $> 5,0$ mm	$< 2,00$

6.3 Alternativas de uso de los Biosólidos.

El Decreto 1077 de 2015 (Decreto 1287 de 2014) o aquel que lo modifique o sustituya reglamenta los usos que se le pueden dar a los biosólidos, según si es categoría A o B, así como las restricciones. En la siguiente tabla se presenta el respectivo articulado:

Tabla 23. Articulado dentro del Decreto 1077 de 2015 relacionados con el uso de los biosólidos

Artículos del Decreto 1077 de 2015 (Decreto 1287 de 2014)	Contenido
2.3.1.4.7	se definen los usos a los cuales pueden destinarse los biosólidos para las categorías A y B.
2.3.1.4.8	establecen las restricciones para el uso del suelo en el cual se apliquen biosólidos categoría B.
2.3.1.4.9	Inaplicación de los biosólidos en el suelo – Relación de sitios en donde no está permitido la aplicación de los biosólidos

Los biosólidos que no cumplan con los valores máximos permisibles establecidos para su clasificación en las Categorías A y B, podrán usarse en:

- En la operación de rellenos sanitarios como cobertura diaria.
- En la disposición conjunta con residuos sólidos municipales en rellenos sanitarios y de manera independiente en sitios autorizados.
- En procesos de valorización energética.

Los biosólidos que no se usen de acuerdo con lo dispuesto en el Decreto 1287 de 2014, deberán disponerse o ser tratados hasta cumplir con los valores establecidos en las categorías A y B para viabilizar su uso.

Los materiales de complemento y mezcla para los Biosólidos, deben cumplir los valores de referencia estipulados en los parámetros de metales pesados para cada una de las categorías establecidas.

Sobre el productor de biosólidos el decreto 1077 de 2015 trae lo siguiente:

Tabla 24. Articulado dentro del Decreto 1077 de 2015 relacionados con los productores de los biosólidos.

artículos del Decreto 1077 de 2015 (Decreto 1287 de 2014)	Contenido
2.3.1.1.1. Definición 69.	Definición de productor de biosólidos.
2.3.1.4.12	Obligaciones de los productores.
2.3.1.4.13	Registro de productor y/o distribuidor de biosólidos como insumo agrícola.

2.3.1.4.14	Registro de productor de biosólidos para usos ambientales.
2.3.1.4.15	Ficha técnica e instructivo para biosólidos en usos diferentes al agrícola
2.3.1.4.5. Parágrafo 2	Tasa Máxima Anual de Aplicación (TMAA). El productor de biosólidos, deberá establecer en la ficha técnica la Tasa Anual de Aplicación de Biosólidos (TAAB) para no exceder la Tasa Máxima Anual de Aplicación (TMAA). El procedimiento para determinar la Tasa Anual de Aplicación de Biosólidos (TAAB) se establece en el Anexo 2 del mencionado decreto.

En términos generales, las disposiciones del Decreto 1077 de 2015 trae lo siguiente:

Se entiende por "productor de biosólidos", la persona prestadora del servicio público domiciliario de alcantarillado, que, en su sistema de tratamiento, realiza procesos de estabilización de lodos generados en los diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales.

Son obligaciones del productor y/o comercializador de los Biosólidos, las siguientes:

- Caracterizar por lotes los biosólidos de acuerdo con los métodos certificados internacionales, nacionales y reglamentaciones técnicas vigentes.
- Tener a disposición de las autoridades competentes, información detallada sobre la caracterización y las cantidades de biosólidos producidos y entregados.
- Contar con un plan de prevención y gestión del riesgo. Cuando se detecte la presencia anómala de sustancias de interés sanitario en las aguas residuales afluentes, se aplicarán las medidas previstas en el plan de prevención y gestión del riesgo.
- Reportar al Sistema Único de Información -SUI- la información sobre cantidades generadas y caracterizaciones de los mismos de acuerdo con lo que determine la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

En el Numeral 6.2 del presente Título se presenta la forma como debe llevarse a cabo la caracterización de biosólidos.

La caracterización de los biosólidos debe realizarse en un laboratorio acreditado por el IDEAM, en aquellos casos en los cuales la información de éstos vaya dirigida a las autoridades ambientales competentes para el ejercicio de sus funciones.



En aquellos casos en los cuales la información vaya dirigida a las autoridades agropecuarias, dicha caracterización debe realizarse en un laboratorio acreditado por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia ONAC.

Establecer y aplicar un mecanismo de correlación entre la caracterización de las aguas residuales afluentes y la caracterización de los biosólidos.

Cuando los biosólidos se destinen al uso agrícola se debe realizar el registro de Productor y/o Distribuidor de biosólidos como insumo agrícola ante el ICA, de conformidad con las normas vigentes sobre la materia, cumpliendo los parámetros, criterios de calidad, requerimientos, valores máximos permisibles y valores límites definidos en el Decreto 1287 de 2014.

El registro del productor de biosólidos para los usos ambientales deberá realizarse ante la autoridad ambiental competente.

- e. Obtener previamente de la autoridad ambiental competente, las autorizaciones, permisos, concesiones y licencias a que haya lugar, según lo establecido en las normas ambientales, como condición para el uso, aprovechamiento y/o afectación de los recursos naturales renovables, durante el proceso de producción de los Biosólidos.
- f. Informar a la autoridad competente, las modificaciones que puedan ocasionar cambios en la categoría, calidad del producto y/o en el registro.
- g. Adoptar medidas y programas de protección personal de los trabajadores y del medio ambiente acordes con la categoría de éstos y su peligrosidad. Entre las entidades que brindan información sobre estos aspectos se encuentran las agencias estatales norteamericanas Centros de Control y Prevención de Enfermedades (CDC por sus siglas en inglés), Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), y el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacionales (NIOSH, por sus siglas en inglés)



7 BIOGÁS

Cada vez más cobra relevancia el manejo de las aguas residuales para la protección del medio ambiente, donde los tratamientos biológicos presentan ventajas no solo de tipo económico, sino también en su implementación. Dada la capacidad de biodegradar los compuestos contaminantes en la etapa de tratamiento, se propicia el aprovechamiento energético y de subproductos, trayendo beneficios en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la utilización de tecnologías adecuadas y sostenibles, y la salud pública.

En el marco de la economía circular y las estrategias frente al cambio climático, se busca que las aguas residuales tengan una utilización como fuente de energía y nutrientes, estimulando a las personas prestadoras a avanzar en el tratamiento y a la vez contribuir al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

La literatura documenta ampliamente el uso del biogás y la posibilidad de convertir la energía química en eléctrica, térmica, e incluso el aprovechamiento para el autoconsumo de la PTAR y el calentamiento de los digestores de lodos, con el fin de tener procesos más eficientes en la digestión anaerobia, secar o reducir el volumen de los lodos digeridos antes de disponerlos definitivamente. Por otro lado, puede utilizarse también como combustible vehicular, industrial o residencial (López et al., 2017).

En el proceso de tratamiento de aguas residuales se puede dar la digestión anaerobia, que es la degradación biológica de materia orgánica en ausencia de oxígeno y que tiene como subproducto principal una mezcla de gases conocida como biogás. El biogás está constituido esencialmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) con trazas de otros elementos.

Este capítulo desarrolla la utilización del biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales, bien sea para su quema o aprovechamiento, conforme con la normativa vigente, las tecnologías para su gestión, la caracterización y monitoreo.

7.1 Normatividad

De acuerdo con la Ley 1715 de 2014, el biogás es una fuente no convencional de energía renovable en Colombia, capaz de ofrecer soluciones energéticas de gas combustible y electricidad. El Ministerio de Minas y Energía reglamentó las condiciones de calidad, seguridad, y tarifarias para desarrollar la prestación de servicios domiciliarios de gas combustible con biogás (Resolución CREG 240 de 2016).

Conforme con la Resolución CREG 240 de 2016, el biogás representa en el mundo soluciones ambientales, ya que utiliza fuentes de combustible residuales disponibles, locales y es una energía renovable con numerosos beneficios asociados como son: la reducción de

la emisión de GEI, sustitución de combustibles fósiles, generación de fertilizantes minerales y presenta una alternativa para la disposición de residuos potencialmente dañinos para el ambiente.

En el año 2018 se expidió el documento CONPES 3934, *Política de Crecimiento Verde*, donde se establece una línea de acción dirigida al desarrollo de herramientas para el fortalecimiento de la gestión del sector de agua potable y saneamiento a nivel regional. El documento contempla la incorporación en la reglamentación técnica de lineamientos para el uso de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales y el aprovechamiento de subproductos y energía, como el biogás.

En ese mismo sentido, el CONPES 4004 de 2020, *Economía circular en la gestión de los servicios de agua potable y manejo de aguas residuales*, busca enfocar esfuerzos en el control de vertimientos y el tratamiento y reúso de aguas residuales. El objetivo es mejorar las capacidades institucionales y de gobernanza, implementar un modelo de economía circular y desarrollar mecanismos de gestión de la información, con el fin de promover la oferta de agua en el largo plazo y la prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado en condiciones de calidad y continuidad. El CONPES se alinea con la visión del país en materia de aprovechamiento de sus recursos y con los compromisos internacionales para la implementación de los ODS, específicamente para el objetivo 6, *Agua limpia y saneamiento*.

En el mismo sentido, el MVCT formuló el Plan Integral de Gestión de Cambio Climático Sectorial - PIGCCS el cual fue adoptado mediante la Resolución 431 de 2020, presentando la gestión de las aguas residuales domésticas como una de las líneas estratégicas, donde se integran la gestión y promoción de sistemas de captación conducción y quema de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales y su posterior aprovechamiento como energía eléctrica. Así mismo, esta medida de mitigación de GEI prevé la reducción de emisiones a través del aumento en cobertura en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

En consecuencia, el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio expidió la Resolución 799 de 2021 que modifica la Resolución 330 de 2017, que en la sección 5 establece sobre el tratamiento y/o aprovechamiento de biogás en las PTAR:

- a) se deberá como mínimo quemar la porción no aprovechada del biogás, con el fin de transformarlo en CO₂. Lo anterior, debido al alto potencial de efecto invernadero del metano contenido en el biogás producido, ya sea proveniente de los reactores anaerobios o de los sistemas digestores de lodos, primarios o secundarios.
- b) Recomienda el aprovechamiento del biogás por su poder calorífico y contribución en la disminución de GEI para el cumplimiento de objetivos de mitigación sectorial, siempre y cuando el costo beneficio del proyecto de aprovechamiento sea favorable, caso en el que deben incluir estudios de alternativas de gestión de biogás generado durante la depuración de aguas residuales y/o lodos, considerando como mínimo el volumen de biogás producido, contenido de metano, precio de la energía eléctrica,

emisiones de línea base y emisiones reducidas con cada alternativa, beneficios o costos por ahorro, exportación o consumo de energía, mercado, cobeneficios ambientales, costos de inversión inicial, operación y mantenimiento.

- c) contempla que se deberán aprovechar los subproductos del tratamiento del agua residual como el biogás, mediante una evaluación económica y cumpliendo con la normatividad vigente.

De todas maneras, el aprovechamiento de subproductos del tratamiento de agua residual se debe alinear con la medida de mitigación de GEI de la línea estratégica de gestión de aguas residuales domésticas priorizada en el PIGCCS.

Asimismo, se define que para el tratamiento de aguas residuales y adaptación a la variabilidad y cambio climático, las nuevas plantas o la optimización de las existentes deberán tener en cuenta como mínimo los siguientes aspectos cuando apliquen y una vez se desarrollen los estudios sobre la viabilidad para su implementación: i) Mejoramiento de los procesos para la mitigación de GEI, ii) Desarrollo del aprovechamiento de las aguas residuales tratadas, y iii) Aprovechamiento del biogás como opción energética en la operación y mantenimiento de las plantas, iv) Evaluación del potencial de mitigación de GEI como aporte a la reducción de emisiones, v) Incorporación de planes de seguimiento con el fin de cuantificar la generación, uso y/o aprovechamiento del biogás, y vi) Realización de análisis ambientales, sociales y económicos en donde se identifiquen cobeneficios del aprovechamiento de subproductos del tratamiento de aguas residuales.

7.2 Tecnologías para la gestión del biogás

7.2.1 Procesos de tratamiento de aguas residuales y generación de GEI

En los procesos de tratamiento biológico de aguas residuales existen microorganismos que degradan la materia orgánica. Para una degradación eficiente se deben controlar las condiciones fisicoquímicas a través de reactores. Estos microorganismos requieren de energía, carbono y nutrientes obtenidos del efluente que llega a la PTAR, del medioambiente o de aportes al sistema de tratamiento. Se encuentran tres tipos de microorganismos: aerobios, facultativos y anaerobios, estos últimos que se dan en ausencia de oxígeno, generan biogás y lodos (Nolasco, 2010).

El proceso de digestión anaerobia ha llegado a ser una tecnología competitiva gracias a la implementación de sistemas que separan el tiempo de retención hidráulico (TRH) del tiempo de retención celular (TRC), los cuales han sido denominados reactores de alta tasa. El TRH y velocidad de carga orgánica se refiere al volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor. Este valor tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de



retención (30 a 40 días en Colombia), dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención.

El mecanismo de degradación anaerobia comprende tres pasos básicos: Hidrólisis, Fermentación y Metanogénesis (esta última es realizada por microorganismos anaerobios denominados metanógenos), los cuales se dividen en dos clases: los acetoclásticos (degradan el acetato a metano y dióxido de carbono) y los utilizadores de hidrógeno (generan metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono). El desarrollo de los organismos metanogénicos se ve inhibido en presencia de oxígeno disuelto (Nolasco, 2010).

En la digestión anaerobia, los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorias y, de esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que abandona el sistema como subproductos del tratamiento de aguas residuales.

El biogás generado se compone de metano en 55 – 70 % según la materia orgánica del efluente a tratar y la cantidad de esa materia que entra al reactor anaerobio. El metano es un gas inflamable, lo que le permite ser aprovechado para generar energía eléctrica o calorífica. Además, al quemarlo se transforma en CO_2 , reduciendo su potencial de calentamiento global. De acuerdo con el 5o Informe de Evaluación del IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) de 2014, el potencial de calentamiento global del CH_4 en un horizonte temporal de 100 años es de 28, en relación con el CO_2 .

El tipo de tecnología a utilizar en cada planta de tratamiento dependerá de muchos factores como el tamaño, la calidad deseada y los costos. El potencial de generación de energía generalmente es mayor a los requerimientos de la planta, aproximadamente es de 35 KWh/(p.e. x año) de energía eléctrica (Nolasco, 2010).

Entre los procesos de tratamiento de aguas residuales y generación de metano se encuentran las lagunas facultativas, reactores anaerobios, reactores UASB y digestores de lodos, los cuales se especifican en el Anexo 3 *Ficha Técnica del Biogás*.

7.3 Caracterización y monitoreo del biogás

El biogás, producto de la digestión anaerobia en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, es una mezcla gaseosa de metano, dióxido de carbono y una variedad de gases contaminantes de baja concentración como sulfuro de hidrógeno y otros compuestos sulfurados, vapor de agua, siloxanos, amoníaco y compuestos orgánicos volátiles (COV), cuya concentración depende del sustrato del cual fue generado (López et al., 2017).

La composición del biogás estará en función del sustrato que se someta a digestión anaerobia, que para el caso de la PTAR será la materia orgánica contenida en el agua residual y el lodo.

En lo expuesto por López et al. (2017), el biogás puede algunas veces contener siloxanos, que son compuestos formados a partir de la degradación anaerobia de materiales encontrados en cosméticos, desodorantes, aditivos de alimentos y jabones. Durante la combustión de biogás, el contenido de siloxanos puede formar depósitos minerales que deben ser removidos mediante métodos físicos, químicos o mecánicos (Chernicharo y Stuetz, 2008) para evitar incrustaciones.

El biogás emitido por una unidad de tratamiento anaerobia está compuesto por diversos gases, los cuales se mencionan en la siguiente tabla:

Tabla 24 Compuestos del biogás

COMPOSICIÓN	
Metano (CH ₄)	55 – 70%
Dióxido de carbono (CO ₂)	30 – 45%
Monóxido de carbono (CO)	0 – 0,3 %
Nitrógeno (N ₂)	1 – 5 %
Hidrógeno (H ₂)	0 – 3 %
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	0,1 – 0,5 %
Oxígeno (O ₂)	Trazas
Contenido energético	6.0 – 6.5 kWh m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	75 – 89 bar
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Fuente: Deublein & Steinhauser, 2011 y Nolasco, 2010

Los componentes son caracterizados con el fin de ejercer actividades de monitoreo y control en el proceso, permitiendo determinar su poder calorífico y controlar la eficiencia de la digestión en función de las características del biogás. Los parámetros que deben ser medidos mediante muestreos diarios puntuales son: gas metano (CH_4), anhídrido sulfuroso (H_2S), dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua.

El “Informe de Inventario Nacional de GEI de Colombia” del IDEAM (2018), expone que según la metodología de estimación de emisiones GEI del IPCC (Directrices 2006), el factor principal para determinar el potencial de generación de CH_4 de las aguas residuales es la cantidad de materia orgánica degradable contenida en las aguas. Los parámetros usuales para medir el componente orgánico de las aguas residuales son la Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO) y la Demanda Química de oxígeno (DQO). Normalmente, la DBO se emplea más a menudo para el caso de las aguas residuales domésticas, mientras que la DQO se utiliza de preferencia para las aguas residuales industriales. Partiendo de esto, la metodología propone que el factor de emisión de metano dependerá de dos parámetros principalmente, del potencial máximo de producción de metano y el factor de corrección de metano, este último en función del tipo de tecnología del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Colombia, en el marco de la estimación de emisiones de GEI reportados en los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), emplea la metodología del IPCC 2006. La categoría de tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas (4D1) emplea las siguientes ecuaciones:

Ecuación ajustada basada en la Ecuación 6.1: Emisiones totales de CH_4 procedentes de las aguas residuales domesticas tratadas por PTAR. (IPCC – 2006, volumen 5, capítulo 6)

$$\text{Emisión } \text{CH}_4 = [(((P_j * \text{DBO} * I) - S)) * \text{EF}_j] - R$$

Dónde:

Emisiones de CH_4 = Emisiones de CH_4 durante el año del inventario. [kg. de CH_4 /año]

DBO = Materia orgánica per cápita (Valor por defecto 110 = 14.6). [kg. de DBO/persona/año]

S = Componente orgánico separado como lodo (Valor por defecto = 0). [kg. de DBO/año]

P_j = Población que utiliza cada sistema

j = Cada vía o sistema de tratamiento/eliminación

EF_j = Factor de emisión. [kg. de CH_4 /kg. de DBO] R = cantidad de CH_4 recuperada durante el año del inventario. [kg. de CH_4 /año]

I = factor de corrección para DBO industrial adicional eliminado en alcantarillado (si es recolectado el valor por defecto es 1.25, si no es recolectado el valor por defecto es 1).

$$\text{EF}_j = B_o * \text{MCF}_j$$

Dónde:

EF_j = factor de emisión. [kg de CH_4 /kg de DBO]

j = cada vía o sistema de tratamiento y/o eliminación

B_o = capacidad máxima de producción de CH_4 , (0.6). [kg de CH_4 /kg. de DBO]

MCF_j = factor corrector para el metano. [Fracción]

Por su parte, la Resolución 330 de 2017, modificada por la resolución 799 de 2021, presenta los parámetros que deben ser medidos para la gestión de biogás: CH_4 , H_2S , CO_2 , COV y vapor de agua, por lo menos cada tres meses para plantas con caudal medio de diseño igual o superior a 100 L/s; para plantas de caudal inferior, la frecuencia será de por lo menos una vez cada seis meses. De igual forma, establece que se deberá llevar registro de las cantidades de biogás, contenido de metano, fracción quemada y/o aprovechada, eficiencias de operación de los sistemas de gestión biogás, y generación de energía (en caso de ocurrir), entre otros.

De otro lado, López et al. (2017) sugiere la medición de parámetros relevantes que deben determinarse a fin de supervisar la producción de biogás en una PTAR, los cuales son mostrados en la *Ficha Técnica del Biogás*.

Respecto a las medidas de cambio climático, el PIGCCS prioriza el manejo del metano proveniente de la gestión de las aguas residuales y lodos de PTAR para el desarrollo de proyectos de mitigación de GEI que aporten al desarrollo bajo en carbono del sector agua y saneamiento y que a su vez aporten al cumplimiento del Acuerdo de París; en este último, Colombia se compromete a reducir las emisiones de GEI en un 51 % para el año 2030¹⁹.

En tal sentido, es importante resaltar que el MVCT es responsable de la reglamentación del proceso de Monitoreo Reporte y Verificación de la reducción de emisiones de GEI expresadas en Ton de CO_2 eq para el cumplimiento de metas sectoriales de mitigación, así como del Sistema para la Reducción de Emisiones y el Programa Nacional de Cupos transables en el ámbito sectorial.

7.4 Utilización del biogás

La utilización del biogás como portador de energía es el más adecuado teniendo en cuenta aspectos ambientales y económicos. El poder calórico inferior (PCI) de un biogás “típico” es de 21.5 MJ/Nm^3 , similar al del gas natural de 37.5 MJ/Nm^3 . En consecuencia, se debe optar por su aprovechamiento y evitar su pérdida o su quema, a menos que no se tenga otra alternativa de uso (López et al., 2017).

El metano (componente principal del biogás) es considerado como un gas que produce efecto invernadero, y mediante su quemado este efecto se reduce sustancialmente. Al ser un gas inflamable, el metano generado puede capturarse y utilizarse para la generación de

¹⁹ Como parte de su meta de mitigación Colombia se compromete a emitir como máximo 169.44 millones de ton CO_2 eq en 2030 (equivalente a una reducción del 51% de las emisiones respecto a la proyección de emisiones en 2030 en el escenario de referencia), iniciando un decrecimiento en las emisiones entre 2027 y 2030 tendiente hacia la carbono-neutralidad a mediados de siglo.

energía calórica o eléctrica, o puede quemarse para transformarlo en CO_2 . El CH_4 es el segundo gas que más contribuye en el efecto invernadero después del CO_2 , y se considera que es responsable de una tercera parte del calentamiento global. Acorde con el IPCC, el potencial de calentamiento del metano es 28 veces superior al CO_2 , lo que fortalece su potencial aporte a la reducción de GEI.

El sector de agua potable y saneamiento básico tiene un aporte importante en la emisión de GEI, principalmente del metano que se produce por la gestión de los residuos sólidos y de las aguas residuales²⁰. En este sentido, los quemadores de biogás son indispensables en todas las plantas de tratamiento de aguas residuales que cuentan con un proceso anaerobio. La instalación de un quemador de biogás tiene como objetivo la seguridad del sistema, la reducción del impacto ambiental y de malos olores.

Los principales usos que se le pueden dar al biogás son como combustible sustitutos en calderas, hornos y estufas, generación de electricidad para uso interno o entrega a la red eléctrica, generación de energía térmica, cogeneración de electricidad y calor, como combustible alternativo en la línea de gas natural o para vehículos y para captura y quema de metano.

La mayor utilización del biogás es como fuente de calor en procesos de combustión realizados en quemadores. También puede ser utilizado para accionar motores de combustión interna, pero para ello es necesario remover el agua y al anhídrido sulfuroso, a fin de obtener una pureza de alrededor del 95%. No obstante, el gas generado por los sistemas de tratamiento de aguas residuales debe ser incluido en un programa de monitoreo, con el fin de determinar sus efectos nocivos como GEI. La mayor o menor producción de metano es función de diferentes factores: nivel de biodegradabilidad de la materia orgánica que entra al reactor, temperatura dentro del reactor y volumen de mezcla completa real dentro del reactor. En general, cuanto mayores son estos parámetros, más aumenta el contenido del metano en el biogás; sin embargo, toxicidad, cortocircuitos hidráulicos, régimen de operación discontinua, solubilidad del metano, entre otros factores, reducen el porcentaje de metano en el biogás (Nolasco, 2010).

En la actualidad, los proyectos de reducción de emisiones de GEI se enfocan principalmente en el gas metano. De acuerdo con Nolasco (2010), la emisión de óxido nitroso en plantas de tratamiento, a pesar de ser un gas de efecto invernadero de gran importancia en sistemas que nitrifican/denitrifican (potencial de calentamiento global 310 veces superior al del CO_2), aún no se encuentra incluida en la mayoría de las metodologías aprobadas de la UNFCCC.

Para el aprovechamiento del gas, este es transportado y almacenado en tanques, para luego ser usado en procesos de combustión y/o para la obtención de energía eléctrica por medio de los generadores por combustión. Sin embargo, el biogás que no es utilizado ocasiona

²⁰ En particular, en el año 2020 el sector residuos emitió 8,26 millones de toneladas de CO_2 equivalente que podrá ascender a 12,6 millones de toneladas en el 2030 (MVCT, 2021), identificando un gran potencial en la mitigación de GEI.

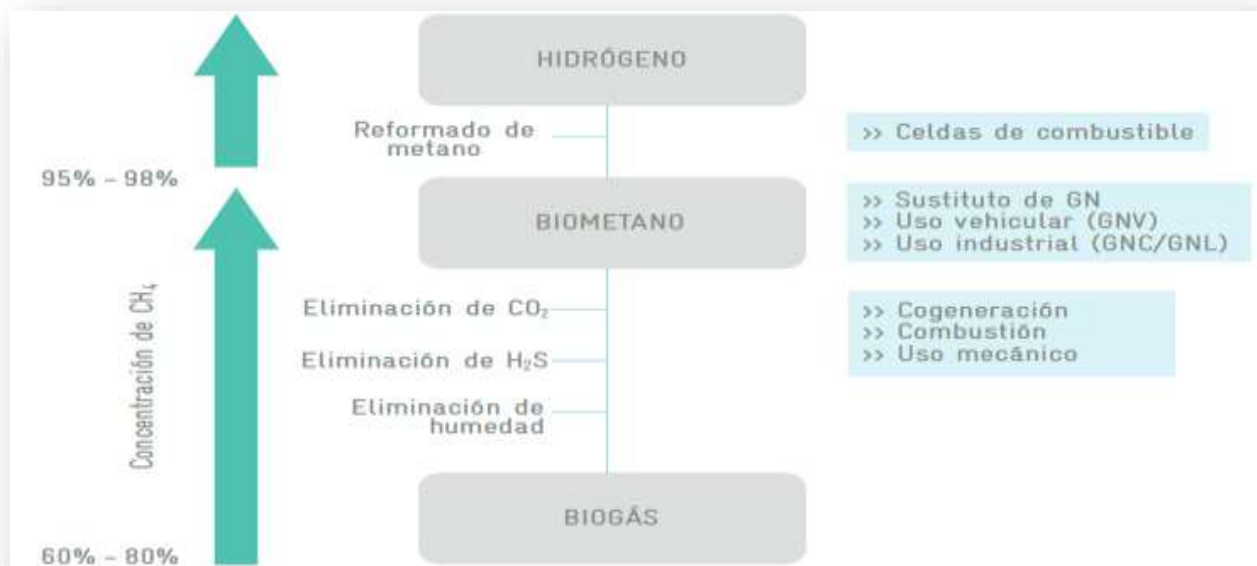
que los tanques se llenen con rapidez y se haga necesario eliminar el gas para obtener espacio. Si se libera este biogás directamente a la atmósfera se generaría una contaminación adicional al medio ambiente por las emisiones de metano, por lo cual debe ser quemado antes de liberarse.

En este sentido, el MVCT priorizó en el PIGCCS una línea estratégica dirigida a la reducción del metano, producto de la gestión de las aguas residuales domésticas, con miras al cumplimiento de objetivos de mitigación de gases de efecto invernadero y la transición hacia la carbono neutralidad.

7.4.1 Métodos de tratamiento del Biogás

La tecnología seleccionada para el aprovechamiento de biogás debe analizar el poder calorífico y su composición, y otras características como la presencia de humedad, presión, contaminantes, gases inertes y gases ácidos, estos últimos causantes de una posible corrosión de equipos y emisión de contaminantes. En consecuencia, si la calidad del biogás crudo no cumple los requisitos para su aprovechamiento energético, es requerido un tratamiento adicional, desde una combustión directa en la que se remueven condensados, hasta sistemas complejos para la obtención de biometano, resultado de una purificación más rigurosa y después de ser comprimido y almacenado puede ser utilizado como sustituto del gas natural vehicular (GNV). En la figura 1 se observa el tipo de tratamiento conforme con el uso final (López et al., 2017).

Figura 1 Necesidad del tratamiento del biogás según el uso final



Fuente: López et al., 2017 (pág. 112) tomado de Valente (2015)

Los métodos de tratamiento que se le debe dar a la gestión del biogás incluyen la remoción de sulfuro de hidrógeno, eliminación de humedad, remoción de gas carbónico, de siloxanos, de oxígeno, nitrógeno y compuestos orgánicos halogenados, y de ácido sulfhídrico. Estos métodos son descritos en la *Ficha Técnica del Biogás*.

7.4.2 Quema de Biogás

El origen de las antorchas se dio con la realización de procesos industriales y para las plantas de tratamiento de aguas residuales son necesarios los quemadores de biogás que tengan un proceso anaerobio, ya sea en reactores UASB o en digestores de lodos. Si en la PTAR no se cuenta con aprovechamiento energético, el quemador de biogás se utiliza para la seguridad del sistema, eliminando el riesgo de explosión e incendio por el metano que contiene el biogás; asimismo, se usa para la reducción del impacto ambiental al tener que quemar las emisiones de gases combustibles como el metano, y también para destruir los malos olores.

En las PTAR que generan energía a partir del biogás, el quemador debe considerarse un elemento de seguridad que debe ser instalado en caso de no consumirse la producción completa de biogás, o por paros del equipo temporales debido a fallas en la operación, trabajos de mantenimiento o disminución del consumo de biogás. De esta manera, el quemador debe operar continuamente para oxidar el metano hasta convertirlo en CO_2 , gas de menor impacto ambiental en cuanto a la emisión de GEI. Al respecto, el artículo 210 de la Resolución 330 de 2017, modificado por la Resolución 799 de 2021, establece que se deberá como mínimo quemar la porción no aprovechada del biogás, con el fin de transformarlo en CO_2 .

Conforme con lo presentado por López et al. (2017), los quemadores deben dimensionarse para mantener una capacidad equivalente al volumen máximo de biogás generado, con factor de seguridad de más 10 % (RIRDC, 2008). Frente a los tipos de quemadores, se describen tres: cerrado, semicerrado o híbrido, y abierto, los cuales son explicados en la *Ficha Técnica del Biogás*.

En el mes de marzo de 2021, el MVCT en conjunto con ANDESCO realizó el Taller “Manejo de subproductos del tratamiento de aguas residuales servidas” dirigido a los prestadores del servicio de alcantarillado, en el cual se pudo identificar las siguientes tecnologías para la quema del biogás utilizadas por prestadores en Colombia:

- Campanas recolectoras de metano en reactor UASB, sistema biofiltro para limpiar gas sulfhídrico, tubería de conducción a tea, quema de biogás por tea de combustión
- Laguna anaerobia con geomembrana para captura de gases y dirigirlos a quemadores.
- Reactor anaerobio de flujo ascendente UASB, con campanas donde se almacenará el biogás, transportadas hasta el quemador de gas, el cual cuenta con una tea, tanque de condensación, atrapallamas, cheque y válvula de alivio.

Dados los compromisos internacionales en materia de mitigación de GEI ratificados por Colombia especialmente en el Acuerdo de París, será necesario determinar las condiciones de adicionalidad²¹ de los proyectos de reducción de emisiones de GEI que apunten al cumplimiento de metas sectoriales, las cuales serán establecidas por el MVCT como cabeza de sector; al mismo tiempo estos proyectos podrán aportar a la NDC²² (Contribución Determinada a Nivel Nacional por sus siglas en inglés), cumpliendo con las reglas de contabilidad establecidas a nivel nacional.

7.4.3 Aprovechamiento de Biogás

Una forma de aprovechamiento en plantas de tratamiento de aguas residuales es a través del biogás que se obtiene como subproducto en la digestión anaerobia de los lodos. En plantas de gran tamaño, se pueden obtener extensos beneficios derivados del aprovechamiento del biogás. Su uso como fuente de energía no es un concepto nuevo y está ganando importancia debido a los beneficios ambientales (reducción de GEI) y económicos (fuente de energía alternativa). El biogás generado puede producir entre 50 y 100% de la energía requerida en un tratamiento biológico convencional.

Adicionalmente, la tecnología ofrece opciones más eficientes y accesibles que hacen viable implementar dichos sistemas, optimizar recursos y reducir costos de operación. Todos estos factores hacen que la utilización de biogás sea considerada como parte integral del proceso en una planta de tratamiento de aguas residuales. Los posibles usos del biogás son resumidos en la *Ficha técnica del Biogás*, como anexo de este Título.

De otra parte, en cuanto al potencial de generación de biogás, la “Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas en México” toma como referencia técnica en las PTAR de tipo municipal, una capacidad mayor a los 300 L/s en términos de flujo volumétrico, o bien, 7.5 tonDBO/d en términos de flujo másico influente, con factibilidad técnico-económica para producción de energía. La generación de energía eléctrica está sujeta en gran medida a la materia orgánica real que ingresa en la PTAR, el flujo promedio tratado y la eficiencia del proceso de digestión de lodos de la PTAR, sin embargo, de conformidad con estudios de factibilidad económica realizados en Brasil, podría ser viable la generación a partir de 100.000 habitantes, lo que equivale a 5 tonDBO/d (López et al., 2017).

Frente a los avances en Colombia, en el Taller “Manejo de subproductos del tratamiento de aguas residuales servidas” realizado en marzo de 2021 por el MVCT y ANDESCO, se

²¹ Se consideran adicionales aquellas reducciones de emisiones o remociones de GEI para las que el titular del Proyecto Sectorial de Mitigación de GEI demuestre que no hubiesen ocurrido en ausencia de la iniciativa de mitigación de GEI, y que generen un beneficio neto a la atmósfera, respecto a su línea base (Proclima, 2020).

²² Define las metas y medidas para la gestión del cambio climático, incorporando tres componentes: i) mitigación de GEI, ii) adaptación al cambio climático, y iii) medios de implementación como componente instrumental de las políticas y acciones para el desarrollo bajo en carbono, adaptado y resiliente al clima.

identificaron las siguientes tecnologías para el aprovechamiento del biogás utilizadas por prestadores en el país. En algunas PTAR se aprovecha el 100% del biogás:

- El biogás generado como subproducto del tratamiento de lodos se almacena y posteriormente se aprovecha para realizar cogeneración de energía eléctrica con motogeneradores,
- El biogás es utilizado como combustible para proporcionar la mezcla al interior de las calderas y calentar los lodos recirculados a través de digestores, compresores de biogás, calderas, gasómetro y quemador de excesos.

De otra parte, el biogás presenta un potencial de riesgo que puede afectar la salud. Los riesgos son listados en la *Ficha Técnica del Biogás*.

7.4.4 Oportunidades en la gestión del Biogás

La captura, quema y aprovechamiento del biogás presenta impactos ambientales que deben tenerse en cuenta en la toma de decisiones para el manejo de subproductos. Dentro de los aspectos positivos podemos mencionar:

- La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero
- La sustitución de combustibles fósiles por un combustible renovable dentro de la operación de la PTAR, lo que se traduce a su vez en reducción de costos en consumos energéticos
- Aportar a los esfuerzos nacionales y sectoriales para el cumplimiento de compromisos internacionales a la lucha frente al cambio climático
- Apalancamiento de recursos de fuentes de financiación orientados a proyectos ambientales tanto nacionales como internacionales, por ejemplo, la Taxonomía Verde Colombia²³
- La posibilidad en la participación en los mercados de carbono, según la capacidad de generación de reducciones GEI

En ese sentido, y tras la consolidación del Acuerdo de París y su ratificación por el gobierno de Colombia bajo ciertas condiciones, se contempla la transacción de los CER (Certificado de Reducción de Emisiones por sus siglas en inglés), en mercados nacionales e internacionales con el objetivo de apalancar esfuerzos del país para el cumplimiento de la NDC y al mismo tiempo, cumplir objetivos de mitigación de gobiernos de otros países interesados. Los mercados de metano son iniciativas de carácter internacional orientadas a recuperar este gas de una serie de fuentes tales como las actividades en las plantas de

²³ Busca facilitar la identificación de proyectos con objetivos ambientales, desarrollar los mercados de capitales verdes, e impulsar la movilización efectiva de recursos privados y públicos hacia inversiones que permitan cumplir con los compromisos del país priorizados en el Plan Nacional de Desarrollo, el Acuerdo de París, el Convenio Marco de Diversidad Biológica y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, entre otros (Documentos técnicos de la Construcción de la Taxonomía Verde Colombia, 2021. <https://www.irc.gov.co/webcenter/portal/TaxonomiaVerdeColombia>)

tratamiento de aguas residuales, a fin de ser usado como una fuente segura de energía y para reducir sus efectos como gas de invernadero.

En el desarrollo de un proyecto de reducción de emisiones de GEI se deben tener en cuenta ciertos costos como: evaluación y diseño del proyecto, transacción durante las distintas etapas, inversión inicial, operación y mantenimiento del nuevo sistema. Igualmente, este tipo de proyectos pueden generar beneficios por la venta de los CER, por ahorro de energía si el proyecto contempla generación a partir de biogás, y en aspectos socioambientales como la creación de empleos y la mejora de la calidad ambiental en la zona donde se implementa el proyecto (Nolasco, 2010). Así mismo, los proyectos de reducción de emisiones de GEI generan oportunidades para la transición hacia la economía circular, el desarrollo bajo en carbono y la resiliencia de la infraestructura sectorial. En tal sentido, este tipo de proyectos ha despertado el interés de cooperantes internacionales por su aporte a la mitigación del calentamiento global y el desarrollo de fuentes de energía alternativas para la diversificación de la red eléctrica nacional.

8 REÚSO DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

La Resolución 1256 de 2021²⁴ define reúso como la utilización de las aguas residuales por parte de un Usuario Receptor, para un uso distinto al que las generó.

Así mismo, la mencionada resolución define recirculación como el uso de las aguas residuales en operaciones y procesos unitarios dentro de la misma actividad económica que las genera y por parte del mismo Usuario Generador, sin que exista contacto con el suelo al momento de su uso, salvo cuando se trate de suelo de soporte de infraestructura.

En el marco de la incorporación de la economía circular en la prestación de los servicios de agua y saneamiento básico, el reúso del agua residual tratada se convierte en un mecanismo para la adaptación a los efectos de variabilidad y cambio climático, reducir la presión en las fuentes hídricas y optimizar el uso del agua con miras a la mitigación de los efectos de la escasez del agua en algunas regiones, así como el aprovechamiento de las potenciales características de las aguas residuales tratadas como fuentes nutrientes.

Sin embargo, la aplicación en el sector exige retos importantes, y su aplicación debe responder a las necesidades ambientales, sociales y económicas particulares de cada región, y su uso debe realizarse cumpliendo con los estándares de calidad para garantizar que no se generen problemas al medio ambiente y a la salud. A continuación, se describe el marco normativo para el reúso de las aguas residuales tratadas, y los aspectos metodológicos para el establecimiento de un proyecto de reúso.

8.1 Normatividad

La Ley 373 de 2007, incorpora el reúso como una práctica de uso eficiente y ahorro del agua.

Son fundamentales en cuanto a las orientaciones de política los conpes 3934 de 2018 “*Política de crecimiento verde*”, y el Conpes 4004 de 2020 “*Economía Circular en la Gestión de los Servicios de Agua Potable y Manejo de Aguas Residuales*” que solicita el desarrollo de lineamientos para el uso de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales

²⁴ Definiciones tomadas de la Resolución 1256 del 23 de noviembre de 2021 “*Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones*”, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible:

- Aguas Residuales: Son las aguas utilizadas o servidas, de origen doméstico o no doméstico.
- Usuario Generador: Es la persona natural o jurídica que genera las Aguas Residuales.
- Usuario Receptor: Es la persona natural o jurídica que usa las Aguas Residuales.
- Suelo de soporte de infraestructura: Es el suelo en el cual se localiza infraestructura de la actividad económica, esto es, las edificaciones operativas, de almacenamiento de fluidos y sólidos, de insumos y materias primas, vías y locaciones.

y el aprovechamiento de subproductos y energía, como el agua residual tratada, los biosólidos y el biogás.

La Resolución 1256 de 2021, que deroga la Resolución 1207 de 2014, adopta disposiciones relacionadas con la recirculación y el reúso de aguas residuales tratadas, uso agrícola e industrial, en los términos de los artículos 2.2.3.3.2.5²⁵ y 2.2.3.3.2.8²⁶ del Decreto 1076 de 2015 o la norma que la modifique o sustituya y los criterios de calidad o el conjunto de parámetros físico, microbiológicos y químicos del agua residual, con sus respectivos valores límites máximos permisibles establecidos para un uso definido y el procedimiento para la obtención y/o ajuste de la concesión de agua y/o del permiso de vertimientos²⁷.

Finalmente, la Resolución 330 de 2017, modificada por la Resolución 799 de 2021, señala en el artículo 181 que dentro de los estudios previos para sistemas centralizados debe disponerse como mínimo de información de reúso del agua tratada, según la Resolución del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 1256 de 2021. Adicionalmente en el artículo 212 señala que se deberá contemplar el aprovechamiento de los subproductos del tratamiento del agua residual, incluido en ellos el agua tratada, mediante una evaluación económica y cumpliendo con la normatividad vigente.

8.2 Aspectos metodológicos para la planificación de un proyecto de reúso

El reúso del agua residual tratada ha sido implementado en diferentes países y aplicado en la agricultura, la acuicultura, uso industrial, recarga de acuíferos, entre otros; sin embargo, para el desarrollo de un proyecto de reúso se requiere realizar un análisis detallado que permita identificar las oportunidades ambientales, sociales y económicas para su implementación.

En este sentido es importante realizar un análisis preliminar que permita inferir la potencialidad de adelantar un proyecto de reúso, teniendo en cuenta la oferta hídrica disponible, demanda potencial y condiciones particulares de la cuenca que incentiven el desarrollo de este tipo de proyectos.

Una vez, se haya realizado este análisis preliminar, se podrá adelantar un análisis detallado que incluya un análisis de oferta y demanda, análisis de las alternativas para el reúso,

²⁵ ARTÍCULO 2.2.3.3.2.5. del Decreto 1076 de 2015: Uso agrícola. Se entiende por uso agrícola del agua, su utilización para irrigación de cultivos y otras actividades conexas o complementarias.

²⁶ ARTÍCULO 2.2.3.3.2.8. Uso industrial. Se entiende por uso industrial del agua, su utilización en actividades tales como: 1. Procesos manufactureros de transformación o explotación, así como aquellos conexas y complementarios. 2. Generación de energía. 3. Minería. 4. Hidrocarburos. 5. Fabricación o procesamiento de drogas, medicamentos, cosméticos, aditivos y productos similares. 6. Elaboración de alimentos en general y en especial los destinados a su comercialización o distribución.

²⁷ Los detalles de cada uno de los aspectos aquí descritos deberán ser consultados en la resolución 1256 de 2021.

análisis económico y de ingeniería para las posibles alternativas, análisis financiero y definición del plan de negocio y/o hoja de ruta para la implementación de dicha iniciativa.

A continuación, se describe el proceso metodológico para la planificación e implementación de un proyecto de reúso.

8.2.1 Información general

Esta etapa consiste en la recopilación de información primaria y/o secundaria que permita caracterizar el área de estudio. Esto incluye el análisis hidrológico de las condiciones de oferta hídrica en la zona de estudio (superficial o subterránea), identificación y estimación de la demanda para las diferentes actividades productivas que se desarrollan en el área de estudio, este análisis permite identificar los usos potenciales en el área de estudio para el agua residual tratada.

Finalmente, analizar la relación entre la oferta y la demanda, el cual permite identificar si las condiciones de oferta (superficial y subterránea) es suficiente para cubrir las necesidades de agua en el área de estudio en todos los meses del año o si por el contrario existe un déficit de agua que motive el reúso del agua residual tratada y/o si se requiere incentivar el reúso con el fin de reducir la presión sobre el recurso hídrico.

8.2.2 Diagnóstico

Este análisis, consiste en la realización del balance hídrico, que permita establecer la relación entre la oferta hídrica y la demanda asociada al sistema de tratamiento de aguas residuales. Hacen parte de esta fase las siguientes actividades:

- Identificación de los caudales actuales y proyectados del sistema de tratamiento de aguas residuales y caracterización de la calidad del efluente del tratamiento.
- Identificación del uso actual y/o usos potenciales del agua residual tratada (agrícola o industrial) y caracterización de los usuarios (Nombre, tipo de empresa, tipo de uso, demanda estima actual y futura)
- Balance Hídrico del agua residual tratada: a través de este análisis se compara la demanda contra la oferta existente, en lo relativo a caudales medios, caudales mensuales, calidad del agua y ubicación de la PTAR en relación con la demanda relevante. Con lo anterior se obtendrá el déficit de cantidad y calidad para atender la demanda y los requerimientos de inversión en infraestructura para la entrega del agua al usuario receptor.

Es importante resaltar, que el artículo 6 *De la Prevención* de la Resolución 1256 de 2021, señala que, para efectos del otorgamiento de la concesión de uso de las aguas residuales, el Usuario Receptor deberá presentar a la Autoridad Ambiental, la siguiente información técnica para el manejo y la prevención de los riesgos asociados al uso de las aguas residuales:

1. *Balance Hídrico del sistema de reúso por parte del Usuario Receptor donde contemple el volumen entregado por el Usuario Generador.*
2. *Identificación de los riesgos potenciales a los recursos naturales renovables derivados del uso de las Aguas Residuales.*
3. *Medidas preventivas que se deben aplicar para evitar los riesgos potenciales identificados, con sus respectivas actividades para seguimiento.*
4. *Para el uso agrícola, evaluación de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, a escala 1:25.000 o de mayor detalle.*
5. *Para el uso agrícola, un plan de monitoreo y seguimiento de la calidad y cantidad del agua residual empleada en el reúso, el cual identifique entre otros elementos el Punto de Control y el Punto de Entrega. La Autoridad Ambiental definirá la frecuencia del monitoreo de calidad en el acto administrativo mediante el cual se pronuncie. Para el uso industrial, un plan de monitoreo y seguimiento de la cantidad del agua residual empleada en el reúso, el cual identifique entre otros elementos el Punto de Control y el Punto de Entrega. La Autoridad Ambiental definirá la frecuencia del monitoreo en el acto administrativo mediante el cual se pronuncie.*
6. *Para el uso agrícola, se deberá demostrar mediante mediciones in situ, la velocidad de infiltración en el suelo u otros procedimientos técnicamente establecidos por la ciencia y la técnica, que las cantidades de agua y los tiempos de aplicación en los diferentes períodos estacionales, satisfacen los requerimientos de agua del suelo y/o del cultivo y que no se generan cantidades excedentes de la misma como escorrentía o percolación.*

En este sentido para el uso agrícola, las tasas de aplicación (m³/día-ha) y el tiempo de aplicación (días/año) del agua residual no deben ocasionar cambios en la salinidad, sodicidad y toxicidad del suelo que limiten, restrinjan o impidan los usos agrícolas actuales y potenciales del área de aplicación, teniendo como directrices por tipo de cultivo las establecidas por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MADR o las de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO.

Por lo tanto, los análisis aquí realizados servirán como base para adelantar los tramites que se requieren ante la Autoridad Ambiental.

8.2.3 Análisis de alternativas de solución y selección

Una vez, analizada la oferta y demanda potencial del agua residual tratada se deberá formular las alternativas para el proyecto de reúso. En este análisis de deberá identificar la capacidad necesaria para atender la demanda, y las necesidades de inversión en infraestructura para poder entregar el agua residual según la necesidad del que hará el reúso, tanto en el corto como a mediano y largo plazo, para los usos propuestos, con el fin de realizar la entrega del agua residual tratada con oportunidad y con la calidad requerida.

Una vez identificadas las alternativas, se deberá realizar la selección de alternativas a través de un análisis comparativo, que incluya como mínimos los criterios de sostenibilidad económica, sostenibilidad técnica, sostenibilidad ambiental, gestión de riesgos y

sostenibilidad social, establecidos en el artículo 14 de la resolución 330 de 2017, modificado por la Resolución 799 de 2021.

Nuevamente se recuerdan las siguientes definiciones que trae la Resolución 1256 de 2021 y que permiten identificar claramente las responsabilidades frente al cumplimiento de la normativa de recirculación y reúso de aguas residuales a la hora de estudiar proyectos de uso de aguas residuales domésticas tratadas por parte del “usuario generador” e este caso las personas prestadoras y del “usuario receptor”:

Aguas Residuales: Son las aguas utilizadas o servidas, de origen doméstico o no doméstico.

Punto de Entrega: Lugar donde el Usuario Generador entrega al Usuario Receptor las Aguas Residuales.

Punto de Control: Lugar técnicamente definido y acondicionado por el Usuario Receptor para el monitoreo de las Aguas Residuales, que permite verificar el cumplimiento de los criterios de calidad para el uso de dichas aguas, que se encuentra localizado posterior al punto de entrega e inmediatamente anterior al sitio donde se realizará el reúso.

Suelo de soporte de infraestructura: Es el suelo en el cual se localiza infraestructura de la actividad económica, esto es, las edificaciones operativas, de almacenamiento de fluidos y sólidos, de insumos y materias primas, vías y locaciones.

Usuario Generador: Es la persona natural o jurídica que genera las Aguas Residuales.

Usuario Receptor: Es la persona natural o jurídica que usa las Aguas Residuales.

8.2.4 Elaboración del plan de obras

En esta fase, deberá desarrollarse un análisis detallado de las obras de ingeniería requeridas para suplir la demanda en calidad y cantidad, para el corto, mediano y largo plazo. Esto incluye el diseño de la infraestructura nueva y/o optimización de la existente, obras complementarias para el transporte y entrega del agua residual tratada.

8.2.5 Determinación de costos del proyecto

En esta etapa, deberá realizarse La valoración de las obras e inversiones requeridas para adelantar el proyecto de reúso, y deberán considerarse todos los costos directos e indirectos, en los que sea necesario incurrir para el logro de los objetivos planteados.

8.2.6 Formulación del Plan de Negocios y/o hoja de ruta para la implementación del proyecto

El plan de negocios y/o hoja de ruta define las acciones requeridas para la implementación del proyecto de reúso, desde el punto de vista legal, técnico, económico y financiero, los cuales incluyen entre otros los siguientes aspectos:



- Aspectos Legales: Trámites ambientales ante la Autoridad Ambiental competente asociados con la obtención y/o modificación de la concesión de aguas, o la modificación de la Licencia Ambiental o del Plan de manejo ambiental cuando estos instrumentos incluyan la Concesión de aguas; y la obtención y/o actualización del permiso de vertimientos. Adicionalmente, se deberá definir el mecanismo que oriente la relación entre el operador del sistema de tratamiento y el usuario receptor.
- Técnico: infraestructura adicional, mejoramiento y/o optimización de la infraestructura existente, obras complementarias, otros
- Económico y Financiero: financiamiento de las inversiones y sostenibilidad del proyecto

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Administración Local. 1999. Reglamento Municipal del Servicio de alcantarillado y desagüe de aguas residuales. Brasil.

Alidadi H., et al. 2005. *Combined Compost and Vermicomposting Process in the Treatment and Biocomversion of Sludge*. Iranian J Env Health Sci Eng. Irán.

Ambrosio J. 2005. Reducción Simultánea de DBO(C), NH₄⁺, y Desnitrificación en un Reactor de Biopelícula. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y ambiental. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Perú.

American Water Works Association. 1999. Tratamiento del agua por procesos de membrana: principios, procesos y aplicaciones. 1ª Mc Graw Hill. España.

ANDI – BID. 1997. Manual de Caracterización de Aguas Residuales Industriales. Medellín - Colombia

Arango J. 2003. Evaluación Ambiental del Sistema Tohá en la Remoción de Salmonella en Aguas Servidas Domésticas. Universidad de Chile. Chile.

Araujo D. 2008. *Anaerobic treatment of wastewater from the household and personal products industry in a hybrid bioreactor*. Brazilian Journal of Chemical Engineering. Brasil.

Arthur J. 1983. *Notes on the design and operation of waste stabilization ponds in warm climates in developing countries*. World Bank Technical paper. Estados Unidos.

Ashok J., et al. 1995. *To Drink Without Risk: The Use of Ultraviolet Light to Disinfect Drinking Water in Developing Countries*. Center for Building Science. Lawrence Berkeley Laboratory. Estados Unidos.

Ayres R., y Mara D. 1996. Análisis de las aguas residuales para su uso en la agricultura. OMS. Estados Unidos.

Barbusinski K., y Filipec K. 2002. *Aerobic Sludge Digestion in the Presence of Hydrogen Peroxide and Fenton's Reagent*. Polish Journal of Environmental. Estados Unidos.

Bazaldúa R., et al. Operación de un proceso discontinuo secuencial (SBR) adicionado con carbón activado granular para la biodegradación de compuestos fenólicos. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Bergamasco R., et al. 1997. *The Use of Bioreactors Coupled With Membranes for the Treatment of Effluents*. Brazilian Journal of Chemical Engineering. Brasil.

Bermúdez R., Rodríguez S., Martínez M. & Terry A. 2015. *Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogas*. Centro de Estudios de Biotecnología Industrial, Universidad de Oriente. Cuba.

BIOAQUA Ltda. 2006. Determinación de dosis optima de CaO para la estabilización de lodos de PTAR`s. Chile.

Bircher K., et al. UV Experience *for Inactivating Cryptosporidium in Surface Water Plants*”. *Calgon Carbon Corporation*. Pittsburgh. Estados Unidos.

Blasco A. 2001. Biomembranas. Ed 2ª Asecorp On-Line. www.asecorp-online.com.

Bradfer, J. F. 2008. Obtención de bonos de carbono mediante estaciones de combustión de biogás de fabricación chilena. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, 1(4).

Bravo P. 2004. Las tesinas de Belgrano. Utilización de adsorbentes para la eliminación de contaminantes en aguas y efluentes. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Belgrano. Argentina.

Brix H. y Arias, C.A. 2005. *The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines*. *Ecological Engineering*. Estados Unidos.

Buitrón G., et al. 2005. Control Óptimo de Biorreactores Aerobios para el Tratamiento Biológico de Aguas Residuales Industriales Inhibitorias. Instituto de Ingeniería, UNAM. México.

California Department of Public Health. Regulations Related to Recycled Water. [Accedido Noviembre 3, 2009].<http://www.cdph.ca.gov/certlic/drinkingwater/Documents/Lawbook/RWregulations-01-2009.pdf>. California.

Cardoso A., et al. 2004. Mejoramiento de la Calidad de Lodos Anaerobios. Influencia de la Adición de Cloruro Férrico. *Revista de Ingeniería Univalle*. Colombia.

Carrión Y. 2006. Los Emisarios Submarinos, Una Alternativa Viable para el Manejo Ambiental de las Aguas Residuales en las Zonas Costeras. 1ª Universidad del Bosque. Colombia.

Castillo E., et al. Determinación de Parámetros de Diseño de un Tratamiento Físicoquímico de Aguas Residuales. Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería. México.

Congreso de Colombia. 2004. Ley 905. Por medio de la cual se modifica la Ley 590 de 2000 sobre promoción del desarrollo de la micro, pequeña y mediana empresa colombiana y se dictan otras disposiciones. Colombia.

Consejería de Medio Ambiente, Agricultura y Agua. 1999. Decreto No.16 sobre Vertidos de Aguas Residuales Industriales al Alcantarillado. España.

Consejo de las Comunidades Europeas. 1991. Directiva 91/271/CEE, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Unión Europea.

Consejo de las Comunidades Europeas. 1976. Directiva 76/464 CEE, de 4 de mayo de 1976, relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad. Unión Europea.

Consejo de las Comunidades Europeas. 2008. Directiva 2008/1/CE, relativa a la prevención y al control, integrados de la contaminación. Unión Europea.

DeCarolís J., et al. 2007. *Cost Trends of MBR Systems for Municipal Wastewater Treatment* Water Environment Foundation. WEFTEC. Estados Unidos.

Department of Environmental Protection Florida. 2009. *Drinking water and domestic wastewater treatment plant operators*. Estados Unidos.

Department of Health and Families. 2001. *Code of practice for small on-site sewage and sullage treatment systems and the disposal or reuse of sewage effluent*. Government of Western Australia. Australia.

Department of Health and Families. 2001. *Code of Practice for the Reuse of Greywater in Western Australia*. Government of Western Australia. Australia.

Devine D. , et al. 2001. *Ultraviolet disinfection with a novel microwave-powered device*. Journal of Applied Microbiology. Estados Unidos.

Dirección de intereses marítimos y medio ambiente acuático. 2007. Emisarios submarinos en Chile. Directemar. Chile.

Ecosystems S.A. 2002. Tratamiento de las Aguas Residuales Mediante "Electrocoagulación". Chile.

Elmitwalli T. 2003. *Decentralised treatment of concentrated sewage at low temperature in a two-step anaerobic system: two upflow-hybrid septic tanks*. IWA Publishing. Egipto.

Ernest W. y Terence J. 1981. "Abastecimiento de Agua y Alcantarillado". Gustavo Gill. España.

Escobar J. Tratamiento Primario Avanzado (TPA) de Aguas Residuales – Diagramas de Coagulación – Floculación y Variables Operativas. PTAR- Cañaveralejo - Empresas Municipales de Cali. California.

Fonfría S. et al. 1989. Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos. Ed. 1ª Marcombo Alfaomega Grupo Editor. España.

Gerber, M. 2010. Thermodynamik. Obtenido de Modelling of material and energy balance of biogas production process: http://www.gerg.eu/public/uploads/files/publications/academic_network/2010/2b_Gerber.pdf. Alemania.

Giraldo E. 2007. *Anaerobic Sewage Treatment Technology in Latin-America: A Selection of 20 Years o Experiences*. Water Environment Foundation WEFTEC. Estados Unidos.

Grajales S., et al. 2006. Programa de Manejo Integral de los Lodos Generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira. Scientia et Technica Año XII. Colombia.

Greeley. 2003. *Wastewater sampling procedures [online]*. <http://www.greeleygov.com/Water/wastewater.aspx>. (Accedido Julio 7, 2009).

Henze M. 2002. *Wastewater treatment: biological and chemical processes*. Ed. 3ª Hardcover. Estados Unidos.

Hernández M., Aurelio. 2001. Depuración y desinfección de aguas residuales. Ed. 5ª Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos. España.

IDEAM. 2003. Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Colombia.

International Organization for standarization. 2003. ISO 5667-18. Gestión Ambiental. Calidad del Agua. Muestreo. Muestreo de Aguas Subterráneas en Sitios Contaminados. ISO. Colombia.

Ishak A. 2001. *Modeling And Control Studies of Wastewater Neutralization Process. Proceeding to Brunei International Conference on Engineering & Technology*. Estados Unidos.

Izrail T. *Technological Improvements for the Aerobic Digestion of Sludge*. Water & Wastes Digest. Estados Unidos.

Kadlec R.H., y Wallace, S. *Treatment Wetlands*. Ed. 2ª CRC. Estados Unidos.

Kirkham C. 2006. *Efficacy of Advanced Oxidation Processes for Elimination of Objectionable Contaminants from Wastewater Effluent*. Water Environment Foundation. WEFTEC. Estados Unidos.

Lannigan K. 2005. *Particulate-biofilm, expanded-bed technology for high-rate, low-cost wastewater treatment: nitrification*. Department of Biological Sciences, Faculty of Science and Engineering, Manchester Metropolitan University. Gran Bretaña.

Legall J., et al. 2005. Manual Básico de Lombricultura para Condiciones Tropicales. Escuela de Agricultura y Ganadería de Estelí. Nicaragua.

Leslie G. 1999. Hardcover. Ed.2ª Hardcover. Estados Unidos.

Libhaber. 2004. *Wastewater Treatment in Developing Countries: Use of Physico-Chemical Processes for Achieving Affordable Disposal Schemes*, The World Bank, Munich wastewater technical seminar. Colombia.

Lindberg M., Y Deutsch J. 2006 . *Comparison of Sludge Digestion Methods for High Organic Hanford Tank*. Hanford Group, Inc. And the U.S. Department of Energy. Hanford Group. Estados Unidos.

López M. 2007. El Reactor Anaeróbico Tipo Easa: Nuevo Reactor Híbrido de Flujo Ascendente. Easa Consultores S.A. Costa Rica.

Lorenzo Y. & Obya MC. 2005. *La digestión anaerobia, Aspectos teóricos Parte I*. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. XXXIX, núm. 1, 2005, pp. 35-48. Cuba.

Lothar M. 1999. Acondicionamiento y Desaguado. Filtraciones al Vacío. Filtros Prensas. Lechos de Secado. CEPIS. Colombia.

Mamta, Tomar. 1999. *Quality Assessment of Water and Wastewater*. Lewis Publishers. Estados Unidos.

Mantilla Morales, G. 2016. Revisión y actualización del potencial de biomasa para generación de energía eléctrica a partir de plantas de tratamiento de aguas residuales presentado en el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE). México.

Mara D. 1989. *Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture: Measures for public health protection*. OMS. Estados Unidos.

Max L. Acondicionamiento y Desaguado. Filtraciones al Vacío. Filtros Prensas. Lechos de Secado. www.cepis.org.pe/bvsacd/scan2/05862/05862-18.pdf. Brasil.

McQuarrie J., et al. 2007. *The Expanded Bed Biofilm Reactor (EBBR) – An Innovative Biofilm Approach for Tertiary Nitrification*. Water Environment Foundation. WEFTEC. Estados Unidos.

Metcalf y Eddy. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Ed.4ª AECOM Press & McGraw Hill Professional. Estados Unidos.

Metcalf y Eddy. 2007. *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. AECOM Press & McGraw Hill Professional. Estados Unidos.

Ministerio de Vivienda. 2006. Reglamento Nacional de edificaciones. Título II.3 Obras de Saneamiento. Incluye plantas de tratamiento de aguas residuales – Norma OS.090. El Peruano. Perú.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2008. Estudios conducentes a determinar las tecnologías para tratamiento de aguas residuales municipales, aplicables a poblaciones menores de 300.000 habitantes. Consorcio HIMEC–ESSERE. Colombia.

Ministerio de Comercio e Industrias. 2007. Resolución No 011. Sobre aguas residuales. Panamá.

Ministerio de Desarrollo Económico, Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. 2000. RAS-Título D “Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Pluviales”. Colombia.

Ministry for the environment. 2003. Guidelines For The Safe Application Of Biosolids To Land In New Zealand. Water and Wastes Association. Nueva Zelanda.

Ministry for the environment. 2005. Oxidation Ponds Guidelines. Water and Wastes Association. Nueva Zelanda.

Mollah M. 2001. *Electrocoagulation (EC) – Science and applications. Journal of Hazardous Materials.* Estados Unidos.

Moore L. *Enhancing the Performance of Oxidation Ditches. University of Memphis.* Estados Unidos.

Moscoso C. 1998. Tecnologías apropiadas para el tratamiento y uso de las aguas residuales: La experiencia Peruana. OPS/CEPIS. Perú.

National Biosolids Partnership. 2005. Good Practice For Biosolids. NACWA, WEF, EPA. Estados Unidos.

Nerenberg R. 2005. *Membrane Biofilm Reactors for Water and Wastewater Treatment. Borchardt Conference: A Seminar on Advances in Water and Wastewater Treatment. Conference Proceedings.* Estados Unidos.

New York State Energy Research y Development Authority. 2004. Evaluation Of Ultraviolet (UV) Radiation Disinfection Technologies For Wastewater Treatment Plant Effluent. NYSERDA. Estados Unidos.

Nolasco D. 2010. *Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales.* Nota técnica. Banco Interamericano de Desarrollo.

Noya A., et al. Digestion Anaerobia Termófila de Lodos de Desecho para la Producción de Biosólidos Clase A. www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/tinaje.pdf. Estados Unidos.

Paradowska M. 2004. *Tailored chemical oxidation techniques for the abatement of bio-toxic organic wastewater pollutants: An experimental study*. Departament d'Enginyeria Química. Universitat Rovira i Virgili. Tarragona. España.

Parvaresh A., et al. 2004. *Vermistabilization of Municipal Wastewater Sludge with Eisenia fetida*. Dept of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Iran. Iran.

Patrick G., et al. 2006. *21 Years of O&M Experience with Hybrid Anaerobic Treatment*. Water Environment Foundation. WEFTEC. Estados Unidos.

Perez M. 2002. Remoción de Fósforo y Nitrógeno en Aguas Residuales Utilizando un Reactor Discontinuo Secuencial (SBR)". XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún. México.

Petter L. 2007. *Quantifying Sludge Production in Municipal Treatment Plants*. WEFTEC. Estados Unidos.

Presidencia Municipal del H. Ayuntamiento de San Martín de Hidalgo. 2003. Reglamento para el sistema de agua potable, alcantarillado y saneamiento del H. Ayuntamiento de San Martín de Hidalgo. México.

Ramírez E., et al. 2006. Transformaciones en la Digestión Alcalina de Lodos Residuales Municipales". XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Brasil.

Reiff F. 2002. Emisarios submarinos de pequeño diámetro de polietileno de alta densidad. CEPIS. Colombia.

Reséndez A. 2005. Origen, importancia y aplicación de vermicomposta para el desarrollo de especies hortícolas y ornamentales. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México.

Rezaei M., y Movahedi S. 2009. *Kinetics of Potassium Desorption from Loess Soil, Soil Mixed with Zeolite and the Cinnamylolite Zeolite as Influencer by Calcium and Ammonium*. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

Rittmann B. 2006. *The Membrane Biofilm Reactor: The Natural Partnership of Membranes and Biofilm*. Arizona State University. Estados Unidos.

Rodríguez A. 1992. Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. Capítulo 4. Radiación Ultravioleta. CEPIS. Perú.

Rodríguez F. 2004. Adsorbentes en la solución de algunos problemas ambientales. CYTED. España.

Rodríguez A., et al. 2006. Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Industriales. Colección dirigida por José de la Sota Ríos y coordinada por la Fundación para el conocimiento CEIM. España.

Rodríguez J., et al. 2007. Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. Ed.1ª Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua. España.

Rojas C. 2002. Consideraciones sobre diseño, arranque, operación y mantenimiento de filtros anaeróbicos de flujo ascendente. Scientia et technica. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.

Romero R., Jairo. 2002. Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño. Ed.2ª Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia.

Romero R., Jairo. 2000. Purificación del Agua. Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia.

Salas, Henry. 2000. Emisarios submarinos enfoque general, conceptos básicos de diseño y requerimiento de datos para América Latina y el Caribe. CEPIS. Perú.

Salveson, A. 2007. *Media Filtration, Membranes, Ozone, and UV. A Comparison of Disinfection Performance and Cost for Various Process Combinations To Disinfect Reclaimed Water.* Water Environment Foundation. WEFTEC. Estados Unidos.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 1996. Norma oficial mexicana NOM-001-ECOL, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. México.

Secretaría Distrital de Ambiente. 2009. Resolución No.3957, Por la cual se establece la norma técnica para el control y manejo de los vertimientos a la red de alcantarillado público del Distrito Capital. Colombia.

Seoanez, M. 2005. Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo. Ed.1ª Mundi-Prensa Libros. España.

Servicio de Información para la Agricultura Familiar Campesina. 2005. La Lombricultura como Filtro. INDAP. Chile.

Shubhr, J. 2007. *Use of Ultraviolet Disinfection and Advanced Oxidation Process for Reclaimed Water Treatment of Microcontaminants*. WaterEnvironmentFoundation. WEFTEC. Estados Unidos.

Soto, E. 2009. Optimización del Proceso de Remoción de Metales Pesados de Agua Residual de la Industria Galvánica por Precipitación Química. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas. México.

Steel, E. y McGhee J. 1981. Abastecimiento de Agua y Alcantarillado. Gustavo Gili. Lima.

Tilley, E., et al. 2008. *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*, Dübendorf, Switzerland. Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Estados Unidos.

Torove L. y Hallvard O. 2005. The development of a biofilm membrane bioreactor. Norwegian University of Science and Technology. *Elsevier*. Noruega.

Tsukamoto R. 2005. Tratamiento Primario Avanzado: El Paradigma Moderno de Tratamiento de Aguas Residuales Sanitarias. Perú.

Unatsabar. 2005. Guía Para El Diseño De Tanques Sépticos, Tanques Imhoff Y Lagunas De Estabilización. OPS, CEPIS. Lima.

Umaña Espinosa, G. A., & Navia Figueroa, F. 2006. Manual de operación y mantenimiento a el calentador de agua por combustión de biogás y quemador de biogás y manual de mantenimiento para los instrumentos de medición de caudal de la Planta PTAR C (Bachelor's thesis, Universidad Autónoma de Occidente). Colombia.

United States Environmental Protection Agency. 2008. *The EPA TCLP: Toxicity Characteristic Leaching Procedure and Characteristic Wastes (D-codes)*. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 1994. *A Plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule*. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 1989. *POW Sludge Sampling And Analysis Guidance Document*. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 2007. *40 CFR 503*. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 2000. 832-F-00-064. Folleto informativo de tecnología de biosólidos: aplicación de biosólidos al terreno. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 2000. 832-F-00-067. Folleto informativo de tecnología de biosólidos: Control de olores en el manejo de biosólidos. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 2000. 832-F-00-067. Folleto informativo de sistemas descentralizados Sistemas de tanque séptico para aplicaciones de alto caudal. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 1999. 832-F-99-031. Folleto informativo de operación y mantenimiento del alcantarillado Limpieza e inspección de tuberías. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 1999. 832-F-99-032. Folleto informativo de operación y mantenimiento del alcantarillado: Rehabilitación sin zanjas de colectores del alcantarillado. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 1999. 832-F-99-039. Folleto informativo de O/M del desborde de drenajes combinados: Métodos apropiados de operación y mantenimiento (O/M). EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 1999. 832-F-99-062. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Desinfección con cloro. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 1999. 832-F-99-063. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Desinfección con ozono. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 1999. 832-F-99-064. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Desinfección con luz ultravioleta. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 1999. 832-F-99-066. Folleto de tecnología del uso eficiente del agua: Inodoros de compostaje. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 1999. 832-F-99-067. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Filtros intermitentes de arena. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 1999. 832-F-99-068. Folleto informativo de sistemas descentralizados: Tratamiento y disposición de residuos sépticos. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 1999. 832-F-99-075. Folleto informativo de sistemas descentralizados: Tanque séptico - sistemas de absorción al suelo. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 1999. 832-F-00-013. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Zanjas de oxidación. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency 1999. 832-F-00-019. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Extracción de amoníaco por arrastre con aire. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 2000. 832-F-00-023. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Humedales de flujo subsuperficial. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 2000. 832-F-00-024. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Humedales de flujo superficial. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 2000. 832-F-00-031. Folleto informativo de sistemas descentralizados: Tratamiento aeróbico. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 2000. 832-F-00-038. Folleto informativo de sistemas descentralizados: Alcantarillado por gravedad de diámetro reducido. EPA. Estados Unidos.

United States Environmental Protection Agency. 2000. 832-F-99-073. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Reactores secuenciales por tandas. EPA. Estados Unidos.

Universidad Nacional, TECSOL. 2018. Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento. Colombia.

USEPA. 2000. *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters EPA/625/R-99/010. DIANE Publishing.* Estados Unidos.

Vaca M., et al. 2006. Fertilización dosificada con biosólidos acondicionados. Universidad Autónoma Metropolitana. México.

Valencia G. 2000. Digestión Aeróbica. CEPIS. Colombia.

Varnero Moreno, M. T. 2011. Manual de biogás. Santiago de Chile: FAO. Chile.

Venkata S. 2006. *Low-biodegradable composite chemical wastewater treatment by biofilm configured sequencing batch reactor (SBBR).* Elsevier. Estados Unidos.

Virginia Department of Environmental Quality. 2005. *Sample Locations, Parameters, and Frequencies To Characterize Municipal Dischargers' Influent Wastewater and Plant Performance for the Interim Optimization Plan and Basis of Design Report.* Estados Unidos.

Wagener C. 2003. Evaluation of Static Low Density Media Filters For Use in Domestic Wastewater Treatment. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. Estados Unidos.

Water Environment Federation. 2007. Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants 6ª McGrawHill. Estados Unidos.

Water Environment Federation. 2007. Cost trends of mbr systems for municipal wastewater treatment. Estados Unidos.



Wheaton F. *Biological Filtration: Design and Operation*. Agricultural Engineering Department, The University of Maryland. Estados Unidos.

Wik T. 1999. *On Modeling the Dynamics of Fixed Biofilm Reactors. With focus on nitrifying trickling filters*. Chalmers University of Technology. Estados Unidos.

Winkler M. 2007. *Tratamiento biológico de aguas de desecho*. Limusa. México.

Wu Q. 2003. *Mathematical modeling analysis of floating bead biofilter. Applications to domestic wastewater treatment*. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. Estados Unidos.

Zoltán G. y László T. *Reinforced Concrete Sludge Digester*. http://fib.bme.hu/news/cikk/v00_en_full/cikk_00en-3.htm. Estados Unidos.

Zuconi P., et al. 2005. *Optimizing the Operational Conditions of a Membrane Bioreactor Used for Domestic Wastewater Treatment*. Brazilian Archives of Biology and Technology. Brasil.