



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Eficiencia energética en el tratamiento de
aguas residuales en Colombia**
**Metodología para la selección de alternativas en
pequeñas y medianas poblaciones**

Andrés Felipe Dimas Turmequé

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Manizales, Colombia
2022

Eficiencia energética en el tratamiento de aguas residuales en Colombia

Metodología para la selección de alternativas en pequeñas y medianas poblaciones

Andrés Felipe Dimas Turmequé

**Trabajo de profundización presentado como requisito parcial para optar al título de:
Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos.**

Director:

Ph. D Freddy Leonardo Franco Idarraga

Línea de Profundización:

Ingeniería Hidráulica y Ambiental

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Manizales, Colombia**

2022

Dedicatoria

A la memoria de mi abuelita Raquel Guerrero, por su amor y compañía durante mi vida.

A mi mamá que, en su incansable lucha y apoyo, ha hecho de mi un hombre íntegro. Ella es el centro de mi mundo.

A mi familia por ser parte de mi crecimiento personal y profesional.

A mis amigos por todos los momentos de alegría y enseñanza.

Agradecimientos

Al profesor Freddy Leonardo Franco Idarraga, docente de la Universidad Nacional de Colombia, por su acompañamiento y recomendaciones en el desarrollo del trabajo de grado, ¡gracias!.

A Iván Alexander Buitrago León, Ingeniero Mecánico, excelente amigo y tutor en mi crecimiento profesional y el campo de la ingeniería hidráulica.

Compañeros y amigos WARP SAS.

Resumen

Eficiencia energética en el tratamiento de aguas residuales en Colombia – Metodología para la selección de alternativas en pequeñas y medianas poblaciones

Se desarrolla una propuesta metodológica para la selección de alternativas para las Plantas de Tratamiento de Agua Residual Doméstica -PTARD-, enfocada en la eficiencia energética; implicó el análisis de cuatro metodologías -norteamericana, mexicana, brasilera y boliviana-, reconociendo los diferentes criterios de evaluación, destacando similitudes y diferencias. A partir de los cuales se definieron los criterios de evaluación de eficiencia energética para PTARD contextualizados a Colombia que serán usados como instrumento metodológico de evaluación, obteniendo así una herramienta propuesta de guía para diseñadores y/o evaluadores de proyectos de PTARD para pequeñas y medianas poblaciones en nuestro país.

Palabras clave: Eficiencia energética – Agua residual – Metodología de selección – Pequeñas y Medianas Poblaciones – Sistemas de tratamiento.

Abstract

Energy efficiency in wastewater treatment in Colombia - Methodology for the selection of alternatives in small and medium-sized populations

It was developed a methodical proposal to select alternatives on the Wastewater Treatment Plant - WWTP-, this proposal is focused on energetic efficiency; it implied the review of four different methodologies -American, Mexican, Brazilian and Bolivian, recognizing the variety on the evaluation method and also highlighting the similarities and the differences. From that point it was possible to identify the evaluation criteria for energetic efficiency for WWTP in the Colombian context that will be used as a methodical guidance tool for designers and evaluators of WWTP projects that will be executed on small and middle populations in our country.

Keywords: Energy Efficiency - Wastewater – Selection Methodology - Small and Medium-Sized Populations.

Contenido

	Pág.
1	Introducción. ....20
2	Objetivos.....23
3	Justificación.....25
4	Estado del arte.....31
4.1	Investigaciones en eficiencia energética en PTARS. ....31
4.2	Metodología de evaluación de alternativas para PTARD.....38
5	Marco teórico. ....41
5.1	Sistemas tratamiento de agua residual.....41
5.1.1	Tanque Imhoff. ....41
5.1.2	Filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) .....43
5.1.3	Lagunas anaerobias.....43
5.1.4	Lagunas facultativas.....44
5.1.5	Lagunas aireadas.....45
5.1.6	Reactor UASB (del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket) .....46
5.1.7	Reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP). ....47
5.1.8	Lodos activados convencional. ....48
5.1.9	Reactores de lecho bacteriano – roca.....49
5.1.10	Reactores de lecho bacteriano de alta tasa – Plástico.....50
5.1.11	Otras tecnologías.....51
5.1.12	Compilación de eficiencias.....53
5.2	Cálculo teórico del consumo energético en PTARD.....56
5.2.1	Bombeo.....56
5.2.2	Rejillas.....57
5.2.3	Desarenador.....58
5.2.4	Sedimentación - primaria y secundaria.....59
5.2.5	Sistema de aireación para oxidación biológica.....61
5.2.6	Espesamiento del lodo.....62
5.2.7	Estabilización del lodo.....63
5.2.8	Deshidratación mecánica del lodo.....65
5.2.9	Energía hidráulica.....68
5.3	Gases de efecto invernadero en PTARS (Metodología IPCC).....69
5.3.1	Tier 1.....69
6	Análisis de las metodologías de selección .....71
6.1	Metodología norteamericana.....71
6.1.1	Metodología de decisión de alternativas e innovación.....72
6.1.2	Criterios de aplicación mejorados.....76
6.2	Metodología Brasileira .....77
6.2.1	Secuencia de las fases de evaluación del modelo de selección.....77
6.3	Metodología Mexicana.....81
6.3.1	Fase I - Descripción del tratamiento y sus tecnologías .....82
6.3.2	Fase II – Preguntas para la selección de la tecnología .....82
6.3.3	Fase III – Evaluación y selección de tecnologías.....87
6.4	Metodología Boliviana.....89
6.4.1	Instrumento de análisis para la evaluación y selección de las alternativas .....91
6.5	Comparación de las metodologías.....95

7	Criterios para Colombia en la evaluación de las PTARD en función de la eficiencia energética. .	99
7.1	Consumo energético.....	99
7.2	Eficiencia energética	99
7.3	Tecnología eficiente en remoción de materia orgánica y nutrientes.....	101
7.4	Costo efectividad.....	101
7.5	Reducción de GEI.	103
7.6	Incentivos tributarios.....	103
8	Propuesta metodológica para la selección de alternativas de tratamiento de agua residual en pequeñas y medianas ciudades colombianas, enfatizando en criterios de eficiencia energética.....	107
8.1	Aplicación de la matriz de evaluación.....	108
8.1.1	Link de descarga de la matriz	110
8.2	Validación de los criterios y la matriz de evaluación	110
9	Conclusiones	117
10	Bibliografía.....	119
11	Anexos	127

Lista de tablas	Pág.
Tabla 1. Utilización de energía por etapas en el ciclo municipal del agua (%)	27
Tabla 2 Reducción de costos e inversión por tipo de medida	33
Tabla 3 Producción de agua residual.	37
Tabla 4 Principales metodologías para la selección de alternativas.....	39
Tabla 5 Tiempo de retención en función de la temperatura.	46
Tabla 6 Velocidades de flujo ascendente.....	46
Tabla 7 Carga Volumétrica según la temperatura.....	47
Tabla 8 Tiempo de retención	47
Tabla 9. Parámetros de diseño típico para procesos de lodos activados.	48
Tabla 10. Parámetros de diseño reactores de lecho bacteriano.	49
Tabla 11 Parámetros de diseño para reactores de lecho bacteriano o filtro percolador.	50
Tabla 12 Eficiencia de remoción por tecnologías – MVCT y diversos autores.....	53
Tabla 13 Valores de v_r y v_t según la literatura.	60
Tabla 14. Rubros o criterios en la matriz de decisión	87
Tabla 15 Matriz de decisión.....	90
Tabla 16 Líneas de tratamiento y sus abreviaturas	91
Tabla 17 Ponderación de los criterios de selección.	93
Tabla 18 Tabla resumen de selección de alternativas.	94
Tabla 19 Matriz de análisis metodología norteamericana y brasilera	96
Tabla 20 Matriz de análisis metodología mexicana y boliviana.	97
Tabla 21 Valores de las alternativas hipotéticas.	110
Tabla 22 Evaluación alternativa hipotética 1.....	111
Tabla 23 Evaluación alternativa hipotética 2.....	111
Tabla 24 Evaluación alternativa hipotética 3.....	112
Tabla 25 Resumen de análisis de alternativas hipotéticas.	112
Tabla 26 Pruebas de independencia.....	113
Tabla 27 Resumen Estadístico 1	113
Tabla 28 Resumen Estadístico 2.....	113

Tabla 29 Resultado de segregación de datos.	135
Tabla 30 Concentraciones típica de agua residual doméstica – DBO ₅	138
Tabla 31 Eficiencia mínimas y máximas – DBO ₅	139
Tabla 32 cálculo de emisiones tCO ₂ e/año	154
Tabla 33 Factor de corrección de metano para el tratamiento o sitio de descarga del agua servida.	156
Tabla 34 Factor de emisión.....	156
Tabla 35 Factor de emisión de la red eléctrica.....	157
Tabla 36 Factor de corrección de metano para el sistema de tratamiento o disposición del lodo.....	158

Lista de figuras

Pág.

Figura 1 Evolución del consumo de energía primaria en el mundo entre 1850 y 2010.	25
Figura 2 Diagrama del Balance energético de Colombia 2015 (kTEP/año).	26
Figura 3 Energía usada en procesos del sector agua.	28
Figura 4 Consumo energético típico en el tratamiento del agua residual doméstica	28
Figura 5 Distribución energética en un sistema de lodos activados convencional.....	34
Figura 6 Variación de consumo energético en diferentes tipos de procesos de tratamiento biológico.	35
Figura 7 Análisis de escenarios en PTAR en el 2017.	35
Figura 8 Numero de sistemas de tratamiento de agua residual en Colombia.....	38
Figura 9 Tanque Imhoff.....	42
Figura 10 Filtro anaerobio de flujo ascendente.....	43
Figura 11 Laguna anaerobia - PTAR de chíá.....	44
Figura 12 Laguna Facultativa	45
Figura 13 Inyección de aire en sistemas lagunares	45
Figura 14 reactor UASB	46
Figura 15 reactor RAP.....	47
Figura 16 Reactor de lodos activados	48
Figura 17 Reactor de lecho bacteriano o Filtro Percolador.....	50
Figura 18 MBR.....	51
Figura 19 MBBR	52
Figura 20 Tecnología Nereda®	53
Figura 21 Sistema de bombeo.....	56
Figura 22 Cribado mecánico.....	57
Figura 23 Desarenador Aireado	58
Figura 24 Barrelos circular	59
Figura 25 Sistema de inyección de aire - Reactor de Lodos Activados	61
Figura 26 Espesador gravitacional.....	62
Figura 27 Digestor anaerobio	63
Figura 28 Filtro prensa.....	65
Figura 29 Filtro Banda.....	66

Figura 30 Centrifuga.....	67
Figura 31 Sistema de generación eléctrica en tuberías	68
Figura 32 Manual de la EPA.....	72
Figura 33 Contenido de los capítulos 2, 3 y 4 del manual.	72
Figura 34 Clasificación generalizada de la innovación y tecnologías alternativas.	73
Figura 35 Metodología de decisión de la innovación y tecnologías alternativas.	74
Figura 36 Secuencia de las fases de evaluación del modelo PROSEL -I.....	77
Figura 37 Diagrama de bloques para la preselección de la tecnología.	85
Figura 38 Aspectos conceptuales de prediseño.....	86
Figura 39 Diagrama de la metodología de decisión propuesta.	91
Figura 40 Esquema del proceso de matrices de selección aplicado en proyectos de sanemiento basico.....	95
Figura 41 Procesos de tratamiento de agua residual doméstica.	101
Figura 42 Incentivos tributarios.....	104
Figura 43 Etapas del proyecto y la aplicación del incentivo.....	105
Figura 44 Matriz de selección de alternativas.....	108
Figura 45 Matriz de selección de alternativas - Columna A y B.	109
Figura 46 Calificación de las matrices.....	109
Figura 47 Matriz de selección de alternativas – Columna C, D y E.	110
Figura 48 Diagrama de barras.....	114
Figura 49 Gráfico de mosaico.....	114
Figura 50 Gráfico de rascacielos.	115
Figura 51 Metodología de búsqueda bibliográfica.	128
Figura 52 Publicaciones realizadas del tema: Methodology of selection.	130
Figura 53 Publicaciones realizadas del tema: Methodology of selection y sinónimos.	131
Figura 54 Publicaciones realizadas del tema: Energy Efficiency.	132
Figura 55 Publicaciones realizadas del tema: Energy Efficiency y sinónimos.....	133
Figura 56 Primer análisis de Pareto	135
Figura 57 Segundo análisis de Pareto.	136
Figura 58 Eficiencias mín. y máx. - Reactor UASB.....	140
Figura 59 Eficiencias mín. y máx. – Laguna Facultativas	141
Figura 60 Eficiencias mín. y máx. – Laguna aireadas	142
Figura 61 Eficiencias mín. y máx. – Reactor anaerobio RAP.....	143
Figura 62 Eficiencias mín. y máx. – Filtros anaerobios.....	144
Figura 63 Eficiencias mín. y máx. – Lodos Activados	145
Figura 64 Eficiencias mín. y máx. – Filtros percoladores de alta tasa - Roca.....	146

Figura 65 Eficiencias mín. y máx. – Filtros percoladores de alta tasa - Plástico	147
Figura 66 Eficiencias mín. y máx. – Lagunas aireadas + Lagunas facultativas.....	148
Figura 67 Eficiencias mín. y máx. – f. percoladores de alta tasa – plástico + Lodos activados.....	149
Figura 68 Eficiencias mín. y máx. – R. anaerobio RAP + F. percoladores de alta tasa – plástico.....	150
Figura 69 Eficiencias mín. y máx. – R. UASB + F. percoladores de alta tasa – plástico	151
Figura 70 Eficiencias mín. y máx. – R. UASB + Lodos activados (convencionales).....	152

Lista de abreviaturas

- DBO: Demanda Biológica de Oxígeno.
- DBO5: Demanda Biológica de Oxígeno medida a 5 días.
- DNP: Departamento Nacional de Planeación.
- DQO: Demanda Química de Oxígeno.
- F/M: En inglés “*Food/Microorganism*”.
- FNCE: Fuentes No Convencionales de Energía.
- G&A: Grasas y Aceites.
- GEI: Gases de Efecto Invernadero.
- IPCC: En inglés “Intergovernmental Panel on Climate Change”.
- KWh: Kilovatio hora.
- MBBR: En inglés “Moving Bed Biofilm Reactor”.
- MBR: En inglés “Membrane Bio Reactor”.
- MDL: Mecanismos de Desarrollo Limpio.
- MLSS: Concentración de licor mezcla.
- OMM: Organización Meteorológica Mundial.
- PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- PTAR: Planta de Tratamiento de Agua Residual.
- RAP: Reactor Anaerobio a Pistón.
- RCRA: En inglés “Resource Conservation and Recovery Act”.
- SBR: En inglés “Sequencing Batch Reactor”.
- SST: Solidos Suspendidos Totales.
- UASB: En inglés “Upflow Anaerobic Sludge Blanket”.
- WWTP: En inglés “Wastewater treatment Plant”.

1 Introducción.

El análisis de la eficiencia energética en los sistemas de tratamiento de aguas residuales es necesario; puesto que en proyectos realizados, alternativas seleccionadas y decisiones tomadas, los criterios energéticos no han sido considerados, y en consecuencia, se han construido plantas de tratamiento de aguas residuales de elevados consumos energéticos, en municipios y poblaciones con bajos recursos, llevándolas a un incorrecto funcionamiento o directamente no ser utilizadas por los altos costos de operación.

Esto ha hecho que, desde el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, se trabaje en blindar futuros proyectos de tratamiento de aguas residuales; viendo necesario el desarrollo de una metodología que a la hora de aprobar los estudios y diseños que son implementados por parte de los entes territoriales, incluya el análisis energético en la selección de la alternativa más viable para el tratamiento de los efluentes líquidos de pequeñas y medianas poblaciones colombianas.

El presente documento aborda el análisis de la eficiencia energética en los sistemas de tratamiento de agua residual doméstica, empleando lineamientos nacionales e internacionales sobre dichos consumos en proyectos municipales de saneamiento básico; para ello evalúo el comportamiento y gasto energético de los procesos de depuración de aguas residuales -preliminar, primario, secundario- considerando desde el diseño la energía consumida por los equipos y cómo esto impacta en su operación, mantenimiento y administración.

Trabajo que corresponde al trabajo final de Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y que inició con la recopilación del estado del arte, resaltando la importancia que algunos países le han dado a los procesos de tratamiento de agua desde el punto de la eficiencia energética y cómo la visión de esta ha cambiado más hacia la planificación de lo nuevo que a la optimización de lo existente. Para todo esto, se revisó la normativa técnica colombiana vigente: Resolución 0330 de 2017 y Resolución 0799 de 2021 sobre sistemas de tratamientos y se analizaron metodologías de selección de alternativas de tratamiento de agua residual empleadas en Norteamérica, México, Brasil y Bolivia; cotejando los diferentes criterios y buscando identificar las mejores opciones en cuanto a consumos energéticos, cuidando que al ser aplicadas a nuestro entorno fueran adaptables a fin de obtener una metodología objetiva y clara, que compare y evalúe diversos procesos de tratamiento, enfatizando en la eficiencia energética.

Finalmente, se plantearon los criterios técnicos de evaluación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales desde la dimensión de las estructuras, la eficiencia de remoción de carga contaminante y el consumo energético de los equipos electromecánicos necesarios, tomando como referencia de análisis las unidades de tratamiento descritas en la norma técnica colombiana.

En resumen, este documento plantea una guía para que diseñadores y evaluadores de proyectos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales - PTAR en pequeñas y medianas poblaciones colombianas, soporten desde el punto de vista de consumo energético, el requerimiento descrito en el artículo 14 de la resolución ministerial sobre la necesaria “comparación de alternativas y selección de alternativa viable”

2 Objetivos.

Objetivo general.

- Desarrollar una metodología que con criterios de eficiencia energética apoye la selección del tratamiento de las aguas residuales de pequeñas y medianas poblaciones en Colombia.

Objetivos específicos.

- Comparar las metodologías: estadounidense, mexicana, brasilera y boliviana, para la selección del tratamiento de las aguas residuales, según las condiciones y contexto colombiano.
- Definir criterios de eficiencia energética para la selección de alternativas de tratamiento de agua residual en Colombia.
- Proponer una metodología de selección de tratamiento de agua residual para pequeñas y medianas poblaciones en Colombia, con énfasis en la eficiencia energética del proceso.

3 Justificación.

Las actividades humanas se han incrementado en los últimos dos siglos gracias al uso de las denominadas “energías no renovables”: madera, petróleo y carbón mineral, sin embargo, en las últimas décadas los países miembros de la ONU, adelanta estrategias para afrontar cambios positivos y necesarios como lo están encaminados Los Objetivos de Desarrollo Sostenible – ODS- (2015) objetivo 7 de la ODS “Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna” donde uno de sus mecanismos evalúa el progreso a los países miembros en la eficiencia energética y el uso energía renovable como un impulso al desarrollo sostenible y sustentable; razón por la cual una de estas estrategias es el aumento del uso de fuentes de energías renovables (ver figura 1), a la par que se implantan programas para la eficiencia energética y se trazan estrategias para disminuir consumos, siempre teniendo en cuenta el aumento de la población, es decir oferta vs demanda.

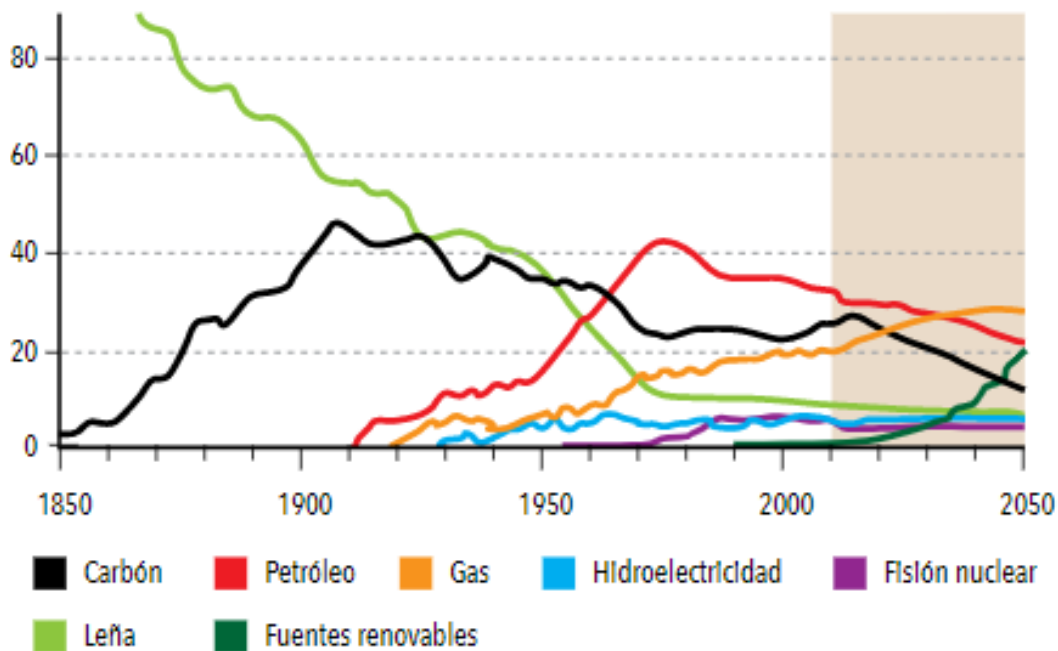


Figura 1 Evolución del consumo de energía primaria en el mundo entre 1850 y 2010.

Fuente: (Departamento Nacional de Planeación, 2017)

Colombia desarrolló su estudio sobre demanda energética, realizando un balance entre los diferentes suministros primarios y su transformación (derivados del petróleo y electricidad) para finalmente llegar a los principales sectores de consumo energético (Departamento Nacional de Planeación, 2017), (ver figura 2).

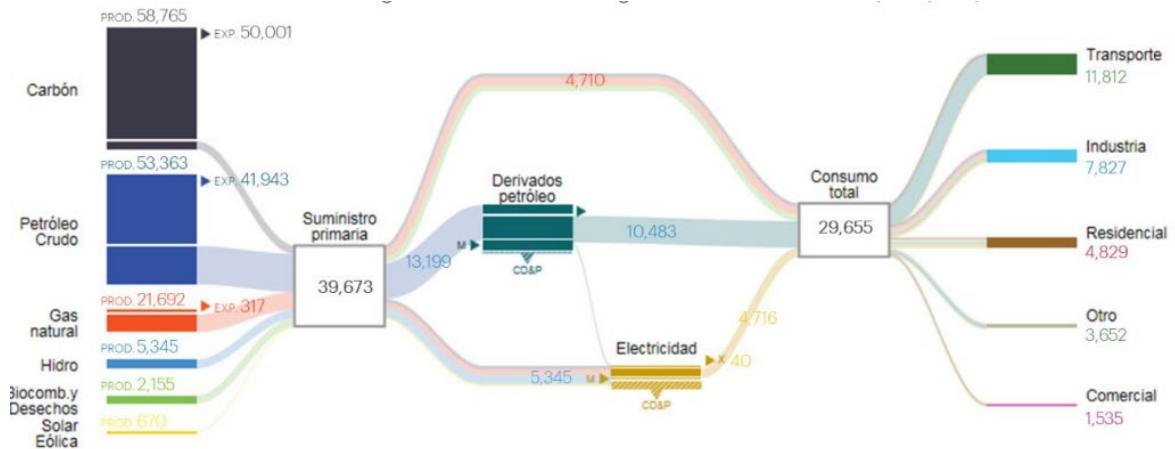


Figura 2 Diagrama del Balance energético de Colombia 2015 (kTEP/año).
Fuente: (Departamento Nacional de Planeación, 2017)

En este balance no figura directamente el sector de agua potable y saneamiento básico; pero se sabe que a nivel general en Latinoamérica los gastos de electricidad en los servicios públicos de agua y alcantarillado representan entre el 5 y 30% de los costos totales de operación, llegando, en algunos casos al 40%. De allí que se afirme que en América Latina el costo del abastecimiento de agua potable podría reducirse entre un 10 y 40% implementando nuevas tecnologías y un mejor uso de la hidráulica. Mientras que el costo del tratamiento del agua residual doméstica aumenta hasta un 75% según la tecnología y la calidad deseada a verter, de forma tal que cualquier estrategia de reducción energética en el tratamiento de los efluentes líquidos se traduciría directamente en disminución de costos de operación (Ferro & Lentini, 2015).

Por ejemplo, en Australia para la distribución de agua potable en los años 2016-2017 se empleó entre 0.09 a 1.92 kWh/m³ y para tratamiento de las aguas residuales entre 0.45 y 1.13 kWh/m³, pero el consumo energético en el sector varía dependiendo de condiciones específicas como: calidad del líquido, distancias de bombeo, topografía y en todo caso en la depuración de aguas residuales se depende del tamaño de la planta, tipo de proceso y eficiencia deseada; considerando además que los sistemas anaerobios de tratamiento de lodos recuperan energía en forma de biogás, el cual procesado y empleado como combustible reduciría el consumo neto de energía, incluso dándose casos de tener excedentes energéticos para los que podrían formularse estrategias de venta de energía a la red como

ya se ha visto en algunos proyectos de saneamiento de aguas y de residuos sólidos. En la tabla 1 se presentan porcentajes aproximados de consumo energético en esta área de trabajo.

Tabla 1. Utilización de energía por etapas en el ciclo municipal del agua (%)

Etapa		Proporción de energía consumida en cada etapa	Proporción de energía consumida en todo el ciclo	Comentarios
Abastecimiento de agua	Captación y conducción de agua bruta	10 (superficial) a 30 (subterránea)	7 (superficial) a 20 (subterránea)	Dependiendo de la distancia, la gravedad y la profundidad de la fuente
	Potabilización	10 (superficial) a 1 (subterránea)	7 (superficial) a 1 (subterránea)	Dependiendo de la gravedad y la calidad de la fuente
	Bombeo para transporte y distribución de agua potable	80 (superficial) a 69 (subterránea)	52 (superficial) a 45 (subterránea)	Dependiendo de la gravedad y la distancia
	Total	100	65	-
Alcantarillado	Recolección de aguas residuales	10	4	Dependiendo de la gravedad y la distancia
	Tratamiento de aguas residuales	55	19	Dependiendo de la calidad del tratamiento y la gravedad
	Disposición de lodos	35	12	Puede producirse energía en el tratamiento de los lodos
	Total	100	35	-

Fuente: (Ferro & Lentini, 2015)

Según un documento emitido por la *International Energy Agency* (iea) (2016) el consumo energético del sector en la mayoría de los países de primer mundo se da en el proceso de suplir agua potable

por desalinización y en el tratamiento de las aguas residuales, en la figura 3 pueden observarse dichos consumos aproximados para diferentes procesos.

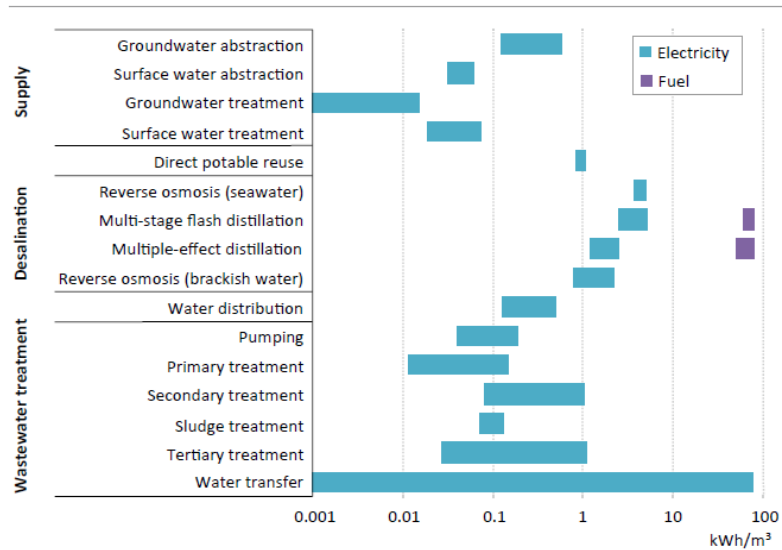


Figura 3 Energía usada en procesos del sector agua.

Fuente: (iea, 2016)

Resaltando los consumos energéticos del tratamiento de agua residual, se observa que los mayores se dan en los procesos biológicos secundarios, seguido de bombes, tratamientos primarios y luego procesos en lodos (no se consideran los terciarios); de acuerdo con el informe deben generarse acciones para disminuir estos consumos o hacerlos más eficientes económica y ambientalmente.

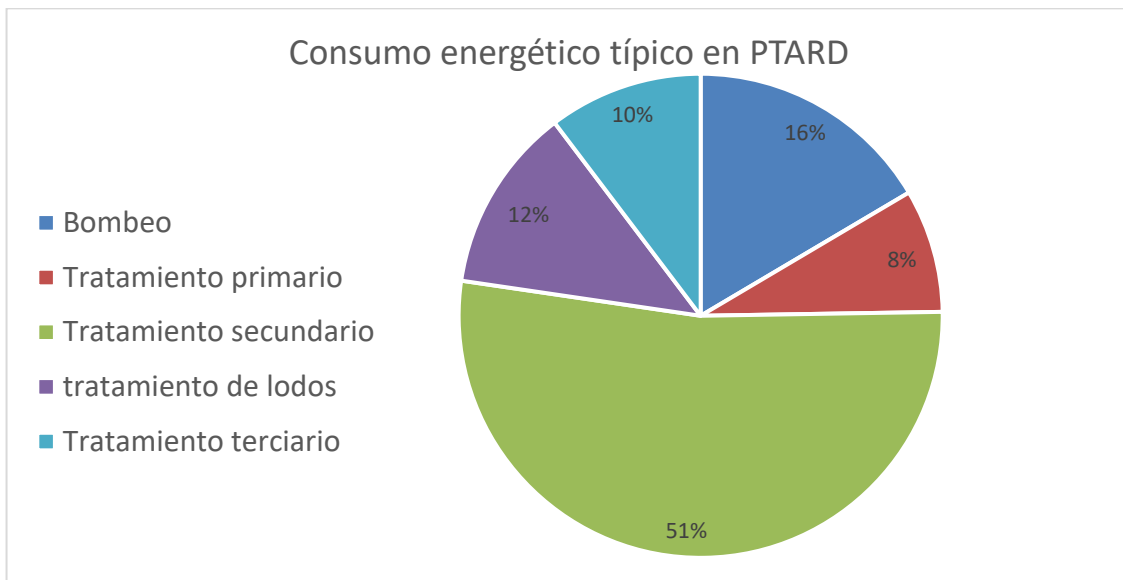


Figura 4 Consumo energético típico en el tratamiento del agua residual doméstica

Fuente: (iea, 2016)

Siendo el consumo de energía un factor decisivo en los proyectos de infraestructura de agua potable y saneamiento básico, y, dado que Colombia está encaminada a la eficiencia energética al haber adoptado lineamientos de desarrollo bajos en carbono, trazando estrategias de planeación sectorial y formulando planes de mitigación y reducción de CO₂ donde se incluyen la gestión y tratamiento de aguas residuales (Departamento Nacional de Planeación, 2017); diseñar una metodología que considere -desde la planificación- la reducción del consumo energético al momento de escoger las estrategias y sistemas de depuración de líquidos, propendería por el mejoramiento de la eficiencia energética del país en la futura construcción, operación y mantenimiento de tan necesarios y largamente esperados proyectos de infraestructura.

4 Estado del arte.

En este capítulo se recopilan informes realizados por diferentes autores, que según el análisis de documentación existente (ver Anexo: Metodología para la planificación de la búsqueda de información.), se han realizado sobre eficiencia energética, metodologías de selección de alternativas y tratamiento de agua residual doméstica en diversas partes del mundo; logrando a que en los sistemas de potabilización de agua y tratamiento de residuos líquidos domésticos, el consumo energético sea significativo.

4.1 Investigaciones en eficiencia energética en PTARs.

Por ejemplo, se estima que en Estados Unidos entre el 3% y 4% de la energía es usada en el movimiento y tratamiento del agua potable o residual. Como estrategia de gestión a sistemas existentes, por ejemplo: el departamento de energía NREL realizó en 2012 una auditoria energética a los sistemas de tratamiento de *Crested Butte* (Colorado), proporcionando a los gestores las herramientas para generar oportunidades de mejora, fortalecer las actividades de rastreo, evaluación y toma de acciones de disminución del consumo energético con el fin de reducir su uso y obtener ahorros financieros a la población. (Daw, Hallett, DeWolfe, & Venner, 2012).

Venkatesh y Rashid Abdi (2013), se enfocaron en la problemática del no aprovechamiento de los subproductos de las PTAR (p.e. biogás proveniente de los digestores) y sus efectos en el cambio climático global, proponiendo una metodología económica y ambiental para su recuperación y aprovechamiento; tras diferentes escenarios planteados, concluyeron que cualquiera alternativa que se plantee para el aprovechamiento energético de subproductos tiene incidencia en los objetivos globales de lucha contra el cambio climático.

En el año (2014) una investigación para implementar equipos convencionales en los procesos de pretratamiento del lodo que ingresa a digestión -buscando aumentar la eficiencia en la producción de biogás y mejorar la calidad de lodo en la salida- concluyó que los sistemas de acondicionamiento que retienen sólidos difícilmente biodegradables y retiran humedad antes de la digestión, favorecen la producción de biogás; llegando en el estudio en cuestión a un aumento del 21% al 31% en la

producción específica de metano, en los sistemas de tratamiento de agua residual (Ruffino, y otros, 2014).

En el mismo año la agencia norteamericana de protección ambiental, EPA (por sus siglas en inglés) informó que solo el 10% de las PTAR doméstica en Estados Unidos usan el biogás de digestores como combustible renovable, pues, en la gran mayoría solo es producido, filtrado y quemado, sin considerar que su uso proporcionaría auto eficiencia energética, una considerable disminución en gastos y un menor impacto en la producción de gases de efecto invernadero - GEI. Acotando que, si bien, estos sistemas no lograrían mantener el paso al acelerado ritmo de la demanda energética, implementar buenos sistemas de digestión y mejorar su rendimiento es un reto para el estado, las universidades y las empresas privadas; para que, al planificar los procesos, el biogás se emplee al menos para la auto eficiencia energética. (Shen, Linville, Urgun-Demirtas, Mintz, & Snyder, 2015). De acuerdo con la CEPAL en el año (2015) el problema de la eficiencia energética en acueductos y alcantarillados en Latinoamérica y específicamente en Colombia se encuentra abordado desde el punto de vista de producción y demanda, donde las iniciativas y esfuerzos se enfocan en regulación y el control, generando indicadores para que desde las auditorias se tenga mayor control, generando cambios de dirección hacia la eficiencia energética. Por otra parte, resaltan que la noción de la eficiencia energética es netamente ingenieril y puede entrar en conflicto con la eficiencia económica, de esta manera las estrategias planteadas deben buscar una combinación más apropiada que no afecte lo económico ni lo ingenieril. (Ferro & Lentini, 2015)

Los mismos autores resaltan que el consumo energético en el ciclo es: 10% en recolección de aguas residuales, 55% en tratamiento y 35% en manejo y disposición de lodos; argumentando que la energía empleada en el tratamiento del agua residual supera ampliamente a la consumida en los procesos de captación, tratamiento y distribución de agua potable. (Ferro & Lentini, 2015)

El resultado de la implementación de equipos eficientemente energéticos realizado en dos proyectos (Perú y El Salvador) evidenció que el costo de inversión para el mantenimiento, cambio y/o uso de energía renovable, genera un impacto positivo en recuperación de la inversión, como se evidenció en la sustitución de bombas recuperadas en solo 0.76 años, obteniendo una importante reducción de costos. Ver Tabla 2

Pratima Singh y Arun Kansal (2016), estudiaron la huella de energía y la producción de GEI en la infraestructura de tratamiento de agua residual de la ciudad de Delhi, al analizar los consumos energéticos y de producción en las fases operativa, transporte y tratamiento, evidenciaron que el mayor consumo proviene del transporte (debido a efectos topográficos y a variables del proyecto que afectan directamente el consumo). Desde la toma de decisiones en planificación sobre si hacer un tratamiento centralizado o varios descentralizados se influye en la disminución del consumo energético y directamente en la generación de GEI.

Tabla 2 Reducción de costos e inversión por tipo de medida

Medida	Reducción de costos	Inversión	Recuperación (años)
	Miles de dólares al año		
Sustitución de bombas	4972	3776	0,76
Tarifas de la electricidad	451	407	0,90
Otros	7770	8875	1,14
Mantenimiento	1419	1793	1,26
Optimización del factor de potencia	481	784	1,63
Variadores de velocidad	1581	3209	2,03
Sustitución de motores	2176	8605	3,95
Uso de biogás	1044	4605	4,41
Total	19894	32054	

Fuente: (Ferro & Lentini, 2015)

El análisis en la India proporciona una idea para las entidades que participan en la planificación y toma de decisiones sobre si son mejores los sistemas centralizados o descentralizados de tratamiento de aguas residuales como parte fundamental del crecimiento urbanístico de la ciudad y como a su vez influyen en la huella energética y en la generación de GEI. Se resalta que el diseño de sistemas modulares es capaz de atender el aumento de población y favorecer escenarios de compensación entre ahorro de energía y la reducción de contaminación. Sin embargo, Singh y Kansal también dijeron que los sistemas centralizados favorecen el ahorro energético y el uso eficiente del biogás producido para un menor impacto en la emisión de GEI; pero desde el punto de vista del reúso, los sistemas descentralizados son mejores opciones, evitando el transporte a largas distancias. (Singh & Kansal, 2016)

Torregrossa, Schutz, Cornelissen, Hernández & Hansen (2016), desarrollaron una metodología para analizar datos de los sistemas de tratamiento y favorecer la toma de decisiones de operación; relacionaron carga contaminante (parámetros de calidad del agua) a la entrada del sistema y energía consumida en equipos electromecánicos, para ajustar el comportamiento de estos y mejorar su consumo energético; comparando a su vez el rendimiento en diferentes tipos de plantas en función de las cargas de entrada. Así, mediante el uso de algoritmos lograron optimizar el consumo energético diario de operación y si bien para los autores, la cantidad de datos es una limitante en esta metodología, el éxito es el uso de equipos de medición de calidad y de consumo, pues entre más datos tenga el algoritmo, más acertado será en la decisión y la disminución de consumo energético. (Torregrossa, Schutz, Cornelissen, Hernández, & Hansen, 2016).

Según Petros Gikas (2016), la huella de carbono en los sistemas de tratamiento ha venido en aumento en los últimos años, donde los lodos activados pueden consumir hasta el 60% de los requisitos totales

de un planta; de esta manera, los esfuerzos deben darse en evitar los procesos de aireación (en caso que sea posible) enfocándose en mejorar procesos de remoción de sólidos primarios, mediante procesos avanzados de filtración y microfiltración con el fin de obtener porcentajes aproximados de remoción del 80 al 90% de SST y 60 al 70% de DBO5; luego, un filtro percolador como unidad biológica para disminuir la materia orgánica soluble y el nitrógeno restante. Los sólidos resultantes podrían ser enviados a un filtro prensa para obtener un lodo con 55% de sólidos y luego ser secados térmicamente logrando un 80% de sólidos, para finalmente ser transportarlos a un gasificador para producción de energía térmica a ser usada en el secado de los biosólidos. Mediante este proceso en aguas residuales domésticas, el autor logró disminuir el consumo energético en casi 85% respecto a la tecnología convencional de lodos activados. Sin embargo, la producción energética para autosuficiencia sigue estando por debajo de la necesaria y es inevitable alimentar el sistema con energía eléctrica de la red.

La Figura 5 muestra que el 60% del consumo energético en un PTARD convencional se emplea en los lodos activados; es decir como en otros estudios, el foco central de consumo se da en el sistema biológico como mayor demandante de energía y si bien los objetivos de calidad del agua son un claro punto en la selección de la tecnología, en la Figura 6 se ve que el cambio de esta influye en el consumo de la PTAR. (Gua, y otros, 2017)

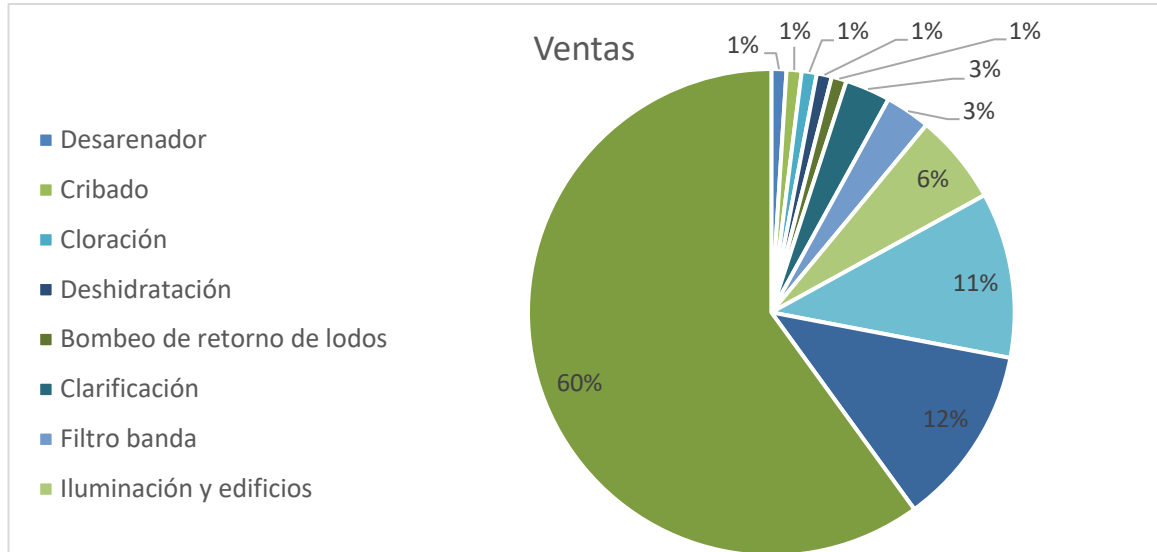


Figura 5 Distribución energética en un sistema de lodos activados convencional.

Fuente: (Gua, y otros, 2017)

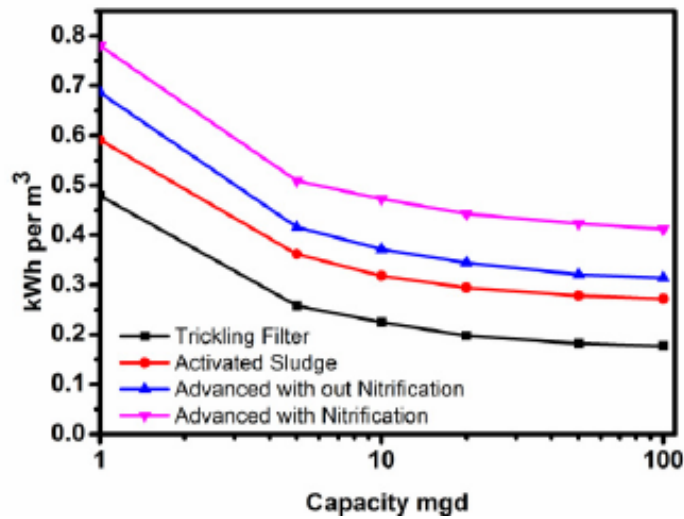


Figura 6 Variación de consumo energético en diferentes tipos de procesos de tratamiento biológico.

Fuente: (Gua, y otros, 2017)

Jin Xu & Yue Li (2017) se enfocaron en la viabilidad de la autosuficiencia energética, planteando dos caminos paralelos -reducción de consumo de energía (escenario A) y aumento de la conversión de las aguas residuales en energía utilizable (escenario B) adicionalmente analizaron la implementación de energía fotovoltaica (escenario C) y la combinación de todo (escenario D) para obtener un panorama más amplio de análisis.

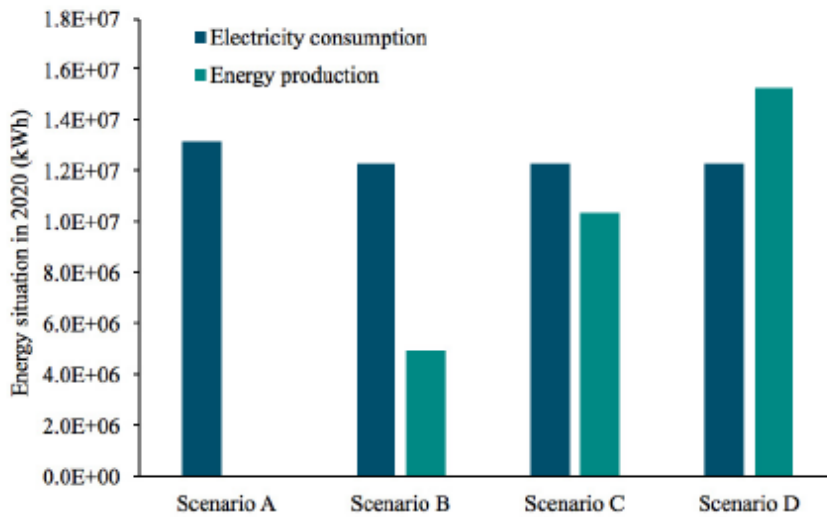


Figura 7 Análisis de escenarios en PTAR en el 2017.

Fuente: (Xu , Li, Wang, Wu , & Wan, 2017)

Concluyeron que la mejora en la eficiencia energética es un punto clave, pero el uso de tecnologías de ahorro y producción de energía renovable es una tendencia a nivel mundial en este tipo de proyectos. Sin embargo, resaltan que futuras investigaciones deben contemplar el consumo de productos químicos para llegar a la real autosuficiencia en las PTARS. (Xu , Li, Wang, Wu , & Wan, 2017)

En este sentido, la EPA en (2017) desarrolló una herramienta para la instrumentación, gestión y análisis de datos energéticos, resaltando que tener datos es el primer paso para mejorar la toma de decisiones energéticas en las PTARS, enfatizando en su manejo y en los beneficios de estos como herramienta para operadores en la toma acelerada de decisiones de ahorro en función del consumo energético.

Sin embargo (Gua, y otros, 2017) se cuestionan sobre si es factible establecer la auto eficiencia en las PTARD, los desafíos que esto implica, las barreras tecnológicas, de inversión y en particular el problema de aplicar estos conceptos en países en vía de desarrollo.

Torregrosa et al. (2018) evaluando diecinueve plantas en Valencia (España), identificaron que caudal y la concentración de los contaminantes son proporcionales al consumo energético y propusieron una metodología para identificar condiciones críticas de utilización energética; donde la falta de coincidencia entre diseño y construcción, operación y no disponibilidad de información para toma de decisiones genera costos adicionales. Así, consideran planificación y datos como herramientas a ser usadas por diseñadores, operadores y gerentes en toma de decisiones.

Gurung et al. (2018) propusieron un método de análisis estadístico del consumo de energía unitaria en veintidós PTAR de Finlandia, estimando un consumo promedio de 0,49 kWh/m³ (desviación de 0,197), confirmando que el consumo energético está en función de la carga de entrada al sistema y la producción de lodos, que en el caso de estudio se confirmó en 0,11KWh/ kg DQO. Para su disminución, propusieron optimizar los sistemas de tratamiento con tecnologías emergentes, neutras en consumo energético o sistemas para aprovechar al máximo el contenido energético en las aguas residuales: p.e. un biorreactor anaerobio fluidizado por etapas (SAF-MBR) con eliminación de nitrógeno y codigestión de lodos con residuos de alimentos orgánicos. Mencionan que los potenciales procesos donde se podría ahorrar energía son, en orden: tratamiento secundario, desbaste, desarenado y estaciones de bombeo, logrando ahorros significativos en los procesos existentes.

Experiencias en Colombia.

En el año 2011 en Bogotá, se estudió la actualización y ampliación de la PTAR Salitre con un tratamiento secundario de remoción de materia orgánica. Para mejorar su eficiencia, se evaluaron tecnologías empleando tres criterios de selección (Hazen and Sawyer, 2011)

1. Requisitos mínimos de confiabilidad para alcanzar estándares de calidad del efluente secundario.
2. Requisitos de área.
3. Experiencia demostrada a gran escala.

A partir de esta revisión documental y según las variables definidas, se realizó un análisis de alternativas, escogiendo y desarrollando el pre-dimensionamiento de estructuras, estimación de producción de lodo, etc. para de esta manera reconocer las ventajas y desventajas del comportamiento del sistema. (Hazen and Sawyer, 2011)

Por otro lado, una investigación en 2018 sobre el aprovechamiento de biomasa para producción de biogás en Colombia; resaltó entre todos los sectores, al urbano como el mejor, estimando la producción proveniente de las PTAR de las ciudades más grandes (de las cuales se tiene información), ver Tabla 3. (Grupo de investigación en procesos químicos y bioquímicos de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia., 2018)

Tabla 3 Producción de agua residual.

Sector	Departamento	Aguas Residuales m ³ /s	%
PTAR	Bogotá	16,5	37%
	Medellín	5,1	11%
	Cali	4,9	11%
	Barranquilla	2,5	6%
	Cartagena	2	4%
	Cúcuta	1,3	3%
	Soledad	1,3	3%
	Ibagué	1,1	2%
	Bucaramanga	1,1	2%
	Soacha	1,1	2%

Fuente: (Grupo de investigación en procesos químicos y bioquímicos de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia., 2018)

El estado actual del saneamiento básico en el país arroja que se ha triplicado el número de PTARS, pasando de ser 237 en 2004 (Ortiz, 2014) a 682 en 2017 (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018) y un último estudio dice que son 715 PTARS en el año 2021 (Superintendencia de servicios publicos, 2020) lo cual implica un aumento del caudal de agua tratada en el país, por ende producción de lodos y potencial de producción de biogás energético.

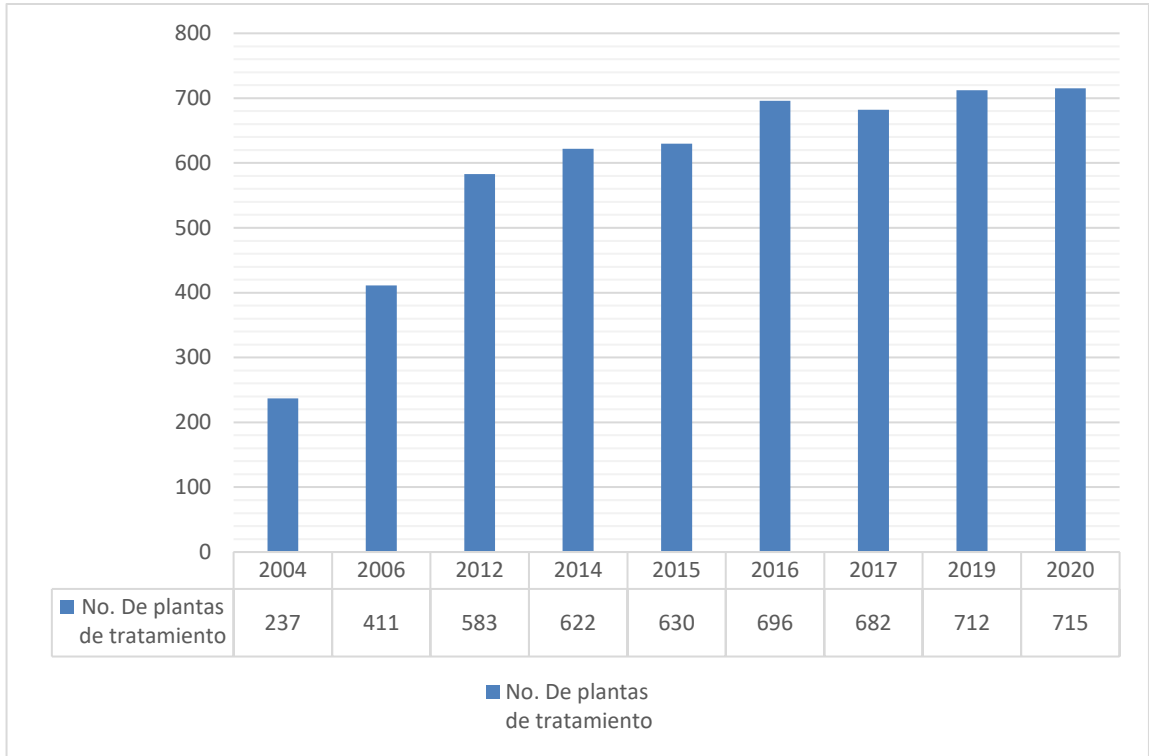


Figura 8 Numero de sistemas de tratamiento de agua residual en Colombia.

Fuente: (Ortiz, 2014) y (Superintendencia de servicios publicos, 2020)

4.2 Metodología de evaluación de alternativas para PTARD.

El ingeniero Marco Antonio Almeida de Souza realizo una revisión documental de las metodologías de selección de alternativas para el tratamiento del agua residual doméstica, compilando a varios autores con sus diferentes propuestas y aplicaciones en la siguiente Tabla 4. (Almeida de Souza,, ordeiro Netto,, & Lopes Júnior, 2000)

Como se observa, las metodologías desarrolladas están enfocadas al análisis económico y eficiencia de los sistemas propuestos. Adicionalmente, se resalta que los modelos de evaluación de tecnología utilizan una serie de criterios predefinidos para evaluar alternativas, los cuales no son necesariamente los mismos para todos los modelos. Así, que su aplicación dependerá del contexto desarrollado por los autores.

Tabla 4 Principales metodologías para la selección de alternativas de tratamiento en agua residual doméstica

Metodología	Aplicación	Método abordado	Referencias
EPA - Bechtel	Tratamiento de aguas residuales	Analítica, uso de criterios económicos de mínimo costo	VAN NOTE et al. (1975)
CAPDET	Tratamiento de aguas residuales (incluidos lodos)	Analítica, uso de criterios económicos de mínimo costo	CULLINAME (1980) COE-EPA (1981)
Arora y Colaboradores	Tratamiento de aguas residuales	Experimental, utilizando solo criterios de eficiencia técnica	ARORA et al. (1980)
EXEC - OP	Tratamiento de aguas residuales (incluida recirculación de flujos laterales)	Analítica, uso de combinaciones de criterios técnicos y económicos	ROSSMAN (1980)
MAPMAT	Abastecimiento de aguas y saneamiento (para países en desarrollo)	Analítica, usando criterios de eficiencia en un enfoque de la tecnología apropiada	ARNOLD (1982)
Câmara	Tratamiento de aguas residuales (incluidos lodos)	Analítico, utilizando un enfoque de rentabilidad	CÂMARA ((1982)
USAID-REID	Tratamiento de aguas y saneamiento (para países en desarrollo)	Analítico, utilizando un enfoque tecnológico	REID & DISCENZA (1975 y 1976) REID & COFFEY (1978) REID (1982)
WBANK (Banco Mundial)	Saneamiento de bajo costo	Analítico, utilizando criterios técnicos y económicos en un enfoque tecnológico	KALBERMATTEN et al. (1982 ^a y 1982 ^b) PRATT & BOYDEN (1985)
Newman	Saneamiento de bajo costo	Enfoque analítico similar al modelo WBANK	NEWMAN (1987)
Wolf	Tratamiento de aguas residuales	Analítica, usando variables de decisión en el enfoque de tecnología apropiada	WOLF (1987)
Teclé y colaboradores	Tratamiento de aguas residuales (incluido tratamiento)	Analítica, utilizando criterios de eficiencia para medir grados de tecnología apropiada	TECLE at al. (1988)
PROSEL-I	Tratamiento de aguas residuales	Analítica, utilizando criterios de eficiencia para medir grados de tecnología apropiada	SOUZA (1992)
Silveira	Tratamiento de aguas residuales (industria de carnes)	Analítico, utilizando un enfoque de rentabilidad	SILVEIRA (1999)

Fuente: (Almeida de Souza,, ordeiro Netto,, & Lopes Júnior, 2000) de acuerdo con las citas que se encuentran dentro de la tabla.

5 Marco teórico.

Según lo mencionado en el estado del arte, junto con el transporte de aguas residuales (bombeos), los procesos secundarios de la PTARD (caso particular la aireación de sistemas biológicos) son los de mayor consumo de energía; por lo cual, antes de abordar acciones de optimización de los sistemas, se debe analizar desde la eficiencia energética la adecuada implementación de estas tecnologías. A manera de contextualización, en este capítulo se tratarán conceptos teóricos y normativos de las tecnologías disponibles de los sistemas secundarios -biológicos- para el procesamiento del agua residual, como apoyo para posteriormente desarrollar la propuesta que se lleva a cabo en el presente documento.

Por tanto, se empleará la normatividad colombiana vigente, en la cual se encuentran diferentes tipos de tecnologías para el tratamiento primario y secundario de las aguas residuales domésticas de pequeñas a medianas poblaciones, añadiendo al final algunas de las nuevas técnicas de tratamiento que se están implementando a nivel mundial y que, si bien no han sido probadas en Colombia, dados sus rendimientos, no debe descartarse su implementación en nuestro país.

5.1 Sistemas tratamiento de agua residual

A continuación, se indican los procesos primarios y biológicos usados para el tratamiento de aguas residuales municipales y se realiza una descripción general del sistema y sus principales parámetros de diseño.

5.1.1 Tanque Imhoff.

Es un sistema de tratamiento para comunidades inferiores a 5000 habitantes, compuesto por tres cámaras (sedimentación, digestión de lodos y área de ventilación-acumulación de natas), en las que se da un proceso de: recepción de las aguas para su clarificación, es decir flotar grasas y sedimentar sólidos, los cuales permanecen en el fondo del tanque en digestión anaerobia. (Gamarra, Tratamiento de Aguas residuales en Pequeñas comunidades. Capítulo II Tanque Imhoff., 2013).

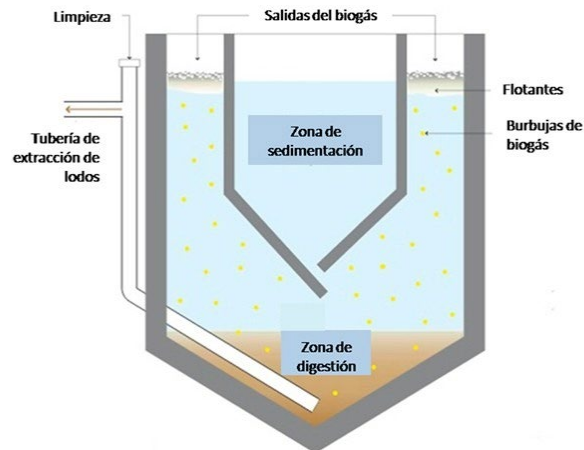


Figura 9 Tanque Imhoff

Fuente: (Iagua, 2008)

Los principales parámetros de diseño del tanque Imhoff son: (Organización Panamericana de la Salud, 2005) :

Cámara de sedimentación:

- El fondo de la cámara será de sección transversal en forma de V y la pendiente de los lados respecto a la horizontal tendrá entre 50° y 60°.
- La abertura situada en el fondo del sedimentador deberá tener de 15 a 20 cm entre sus bordes. Uno de los lados deberá prolongarse para evitar el paso de los gases al sedimentador; prolongación que deberá tener una proyección horizontal 0,15 a 0,20 m.
- La longitud del compartimiento no debe exceder de 30 m, longitudes moderadas facilitan la buena distribución del lodo.
- La velocidad del escurrimiento no deberá exceder de un pie por minuto.

Cámara de digestión:

- La altura máxima de los lodos deberá estar 0,50 m por debajo del fondo del sedimentador.
- El fondo de la cámara de digestión tendrá la forma de un tronco de pirámide invertido (tolva de lodos), para facilitar el retorno de los lodos digeridos. Las paredes laterales de esta tolva tendrán una inclinación de 15° a 30° con respecto a la horizontal.
- Para quitar los lodos e impedir la acumulación de gases, se colocará un tubo de hierro fundido de 200 mm. de diámetro, en posición aproximadamente vertical, con su extremo inferior abierto a unos 15 cm por encima del fondo del tanque.
- La pendiente hidráulica para asegurar el escurrimiento del lodo de un tanque Imhoff, no deberá ser menor de 12 a 16%.

Área de ventilación:

- El volumen de esta zona deberá ser aproximadamente igual a la mitad del volumen de la cámara de digestión.
- El área de la superficie de la cámara de espumas expuesta a la atmósfera deberá ser del 25 al 30% de la proyección horizontal de la parte superior de la cámara de digestión.

5.1.2 Filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA)

Es un sistema anaerobio para remoción de materia orgánica mediante biopelícula fija en un medio (rocas, medios plásticos, etc.); siendo su principal característica el funcionar inundado, al hacer que el agua circule por los espacios intersticiales del medio en uno de dos sentidos de flujo (ascendente o descendente), promoviendo con ello la generación de biomasa bacteriana alimentada con los elementos presentes en el agua residual. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales)

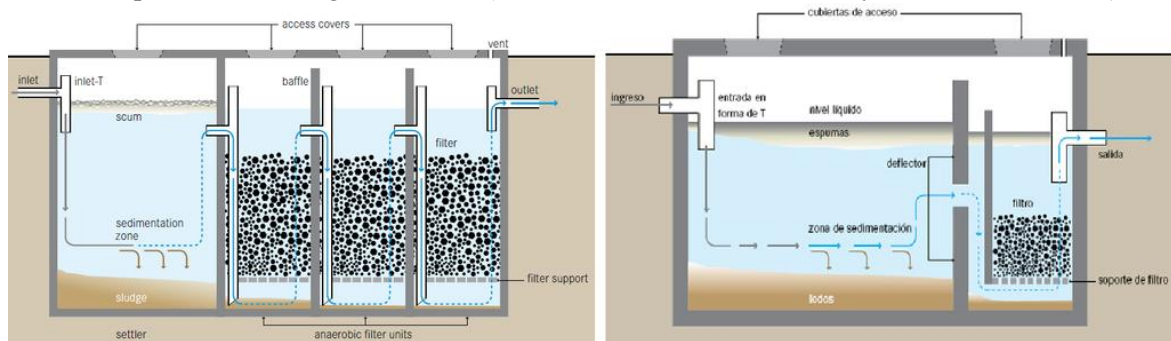


Figura 10 Filtro anaerobio de flujo ascendente

Fuente: (González, 2015)

Los principales parámetros de diseño del filtro anaerobio son:

- Tiempo de residencia hidráulica de 4 a 10 horas.
- Carga orgánica volumétrica 0.15 a 0.5 Kg DBO/m³ - Día.
- Carga hidráulica superficial de 6 y 15 m³/m² - día.
- Altura de medio de empaque entre 0.8 a 3 metros.

5.1.3 Lagunas anaerobias.

Los sistemas lagunares anaerobios son una alternativa de degradación de la materia orgánica presente en el agua residual que a través de microorganismos (bacterias anaerobias) en una primera fase (acidogénica) generan ácidos orgánicos mixtos y en una segunda fase (metanogénica) los transforman en metano, dióxido de carbono, agua, amonio, etc. Producción de compuestos que obviamente dependerá de la DBO suministrada. (Arthur, 1986).



Figura 11 Laguna anaerobia - PTAR de chía

Fuente: (EMSERCHIA AAA ESP, 2020)

Principales parámetros de diseño del sistema de lagunas anaerobias son:

- Con temperaturas alrededor de 12°C trabajan a una carga de 0.1 Kg DBO5 /m³- día.
- Con temperaturas entre 12°C y 30°C trabajan a una carga de 0.4 Kg DBO5 /m³- día.
- La altura de la lámina de agua debe ser de al menos 4 m.

5.1.4 Lagunas facultativas.

Las lagunas facultativas, como sistemas secundarios de tratamiento de aguas residuales domésticas, implican tres estratos (Gamarra, 2013)

1. Una zona superficial con bacterias aerobias y algas.
2. Una zona intermedia, aerobia-anaerobia poblada por bacterias facultativas que llevan a cabo la degradación de compuestos orgánicos.
3. Una zona inferior anaerobia donde se descomponen los sólidos sedimentados (estabilización del lodo) por acción de bacterias anaerobias.

Existen diferentes criterios según autores para el dimensionado de lagunas facultativas, p.e.: Modelo de Mara, Modelo de Gloyna, Método de equilibrio continuo (Maris & Shaw), Modelo de IMTA, Modelo de McGarry & Pescod. Según el diseñador y su experiencia se justificando el modelo más apropiado, pero los principales parámetros de diseño son (Arthur, 1986) :

- Temperatura media mensual de aire (°C).
- Caudal del afluente (m³/día).
- DBO5 del afluente (mg/L).
- Carga orgánica (Kg DBO5 /m³- día).
- Altura de lámina de agua entre 1 a 1.8 m.



Figura 12 Laguna Facultativa

Fuente: (Comisión Nacional del Agua, 2015)

5.1.5 Lagunas aireadas.

Como los sistemas de lagunaje anteriores, pero en este caso se suministra oxígeno de manera mecánica, partiendo de que el disuelto en el agua es insuficiente para llevar a cabo una correcta oxidación de la materia orgánica. Los principales parámetros de diseño del sistema de lagunas aireadas son: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021)

- Sólidos (SST) en reactor: 100 – 400 mg/L
- Edad de lodos: 3 – 6 días
- Retención hidráulica: 3 – 6 días
- Profundidad: 2 -5 m
- K de remoción de DBO: 0.5 – 1.5
- Régimen de mezcla: Mezcla parcial
- Potencia mínima: 5-8 KW 1000 m KW 1000 m³
- Manejo de lodos: Sedimentador



Figura 13 Inyección de aire en sistemas lagunares

Fuente: (AK Envipure, 2019)

5.1.6 Reactor UASB (del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

Es un sistema anaerobio donde el flujo de agua asciende junto con un “manto de lodo” anaerobio granular que permanece suspendido; una buena mezcla asegurada por la velocidad y el flujo ascendente del agua residual en procesamiento permitirá que las bacterias degraden la materia orgánica y generen biogás. En la parte superior de la estructura un separador gas - líquido – sólido, impide la salida de los sólidos granulares, pero permite el flujo del agua clarificada y la salida del biogás.

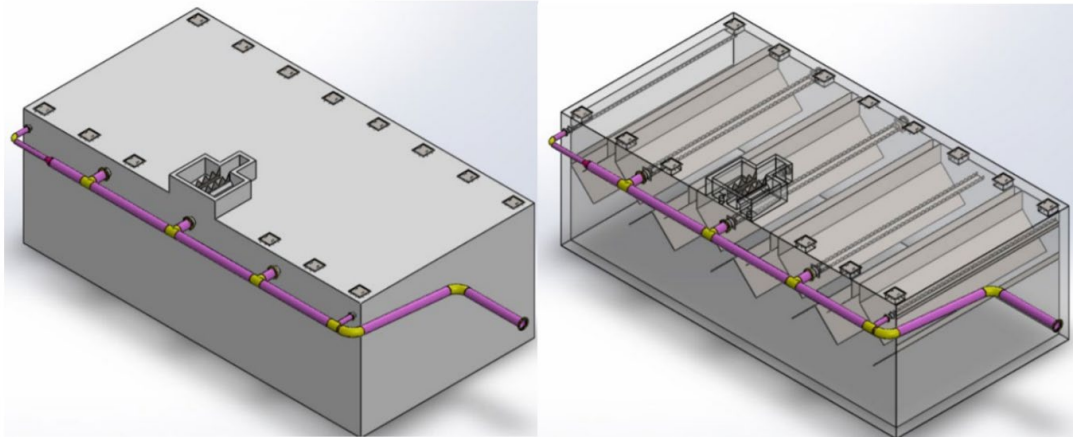


Figura 14 reactor UASB

Fuente: (Dimas & Mesa, 2019)

Los principales parámetros de diseño del UASB son: (Metcalf & Eddy, 2014)

- Masa de sólidos en el sistema (SRT) 30 días.
- Velocidad ascensional entre 0,8 a 1,0 m/h.
- Altura del reactor entre 4,5 a 6 m pueden ser usados.

Tabla 5 Tiempo de retención en función de la temperatura.

Temperatura (°C)	Tiempo de retención (horas)
16 a 19	10 – 14
20 a 26	6 – 9
>26	>6

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021)

Tabla 6 Velocidades de flujo ascendente

Caudal influente	Velocidad ascendente (m/h)
Caudal medio	0,5 – 0,7
Caudal máximo	0,9 – 1,1
Caudal pico temporal (entre 2 y 4 horas)	<1,5

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021)

5.1.7 Reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP).

Es una variación del anterior sistema anaerobio que emplea pantallas o “baffles” para inducir un flujo pistón ascendente-descendente en las diferentes cámaras, en algunos casos se usa un medio de contacto (rocas, medios plásticos, etc.) para favorecer la fijación de microorganismos en el medio (biopelícula) y una buena formación de gránulos. En la última cámara se ubica un sistema de separación de gas - sólido - líquido para una mejor eficacia.

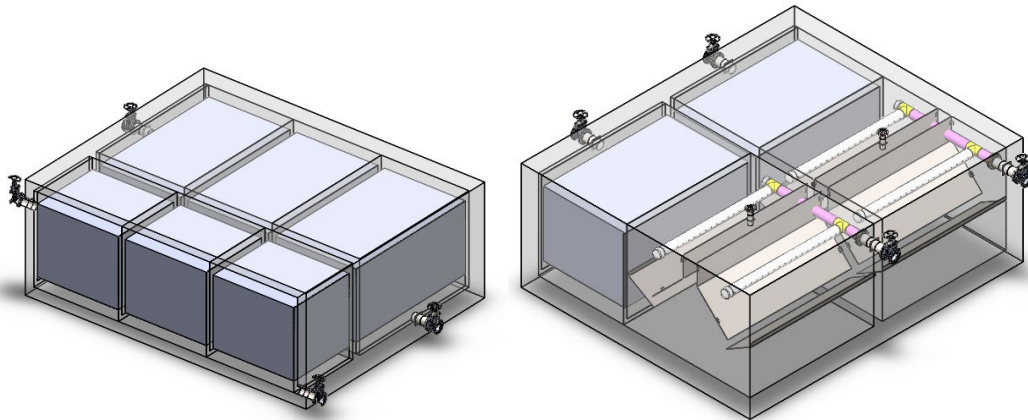


Figura 15 reactor RAP

Fuente: (Dimas & Mesa, 2019)

Los principales parámetros de diseño del sistema RAP son la carga volumétrica, el tiempo de retención y que la altura de lámina de agua recomendada del sistema: 2.7 m.

Tabla 7 Carga Volumétrica según la temperatura.

Temperatura (°C)	Carga Volumétrica (Kg DQO/m ³ -Día)
15	2-4
20	4-6
25	6-12
30	10-18
35	15-24
40	20-32

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)

Tabla 8 Tiempo de retención

Temperatura (°C)	Tiempo de retención (horas)
16 – 19	10 – 14
22 – 25	7 – 9
>25	4 - 5

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)

5.1.8 Lodos activados convencional.

El más conocido de los sistemas aerobios de tratamiento secundario para el agua residual doméstica, en este la presencia de oxígeno disuelto (disponible por agitación de turbinas o aireadores), permite que los microorganismos entren en contacto con la materia orgánica presente, a través de procesos de oxidación/reducción produzcan energía y se reproduzcan. Este proceso implica tres pasos:

1. Un reactor con condiciones controladas para que los microorganismos encargados del tratamiento se encuentren aireados y en suspensión.
2. Una unidad para la separación de sólidos-liquido (sedimentador secundario).
3. Retorno del lodo sedimentado al reactor para mantener elevadas concentraciones de sólidos (microorganismos) en el sistema.

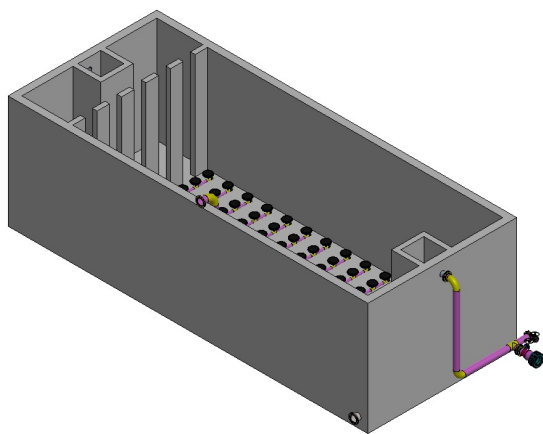


Figura 16 Reactor de lodos activados

Fuente: (Dimas & Mesa, 2019)

A continuación, se encuentra los parámetros de diseño según el tipo de reactor de lodos activados.

Tabla 9. Parámetros de diseño típico para procesos de lodos activados.

Proceso	F/M (Kg DBO/ kg MLVSS - d)	Carga volumétrica (kg DBO/m ³ -d)	Tiempo de retención td (h)	Edad de lodos θc (d)	Sólidos de licor de mezcla MLSS (mg/L)
Convencional	0,2-0,4	0,3-0,7	4-8	3-15	1000-3000
Completamente mezclado	0,2-0,6	0,3-1,6	3-5	3-15	1500-4000
Aireación escalonada	0,2-0,4	0,7-1	3-5	3-15	1500-4000
Alta tasa	1,5-2	1,2-2,4	1,5-3	0,5-2	200-1000
Estabilizador por contacto: Contacto estabilización	0,2-0,6 N/A	1-1,3	0,5-1 N/A	5-10 N/A	1000-3000 6000-10000

Proceso	F/M (Kg DBO/ kg MLVSS - d)	Carga volumétrica (kg DBO/m ³ -d)	Tiempo de retención td (h)	Edad de lodos Θc (d)	Sólidos de licor de mezcla MLSS (mg/L)
Aireación extendida	0,04-0,1	0,1-0,3	20-30	20-40	2000-5000
Zanjón de oxidación	0,04-0,1	0,1-0,3	15-30	15-30	3000-5000
Reactores secuenciales por tantas (SBR)	0,04-0,1	0,1-0,3	15-40	10-30	2000-5000
Oxígeno puro	0,5-1	1,3-3,2	1-3	1-4	2000-5000

Fuente: (Metcalf & Eddy, 2014)

Para dimensionar el reactor hay fórmulas empíricas desarrolladas en estudios de campo; pero en los últimos años, se han venido implementando modelos de simulación cinética para predecir el comportamiento del sistema. El diseñador deberá justificar el uso de estos modelos para el cumplimiento de los parámetros de diseño expuestos en literatura y la normatividad colombiana.

5.1.9 Reactores de lecho bacteriano – roca.

Los reactores de lecho bacteriano o filtro percolador es un proceso en el que se generan condiciones para el crecimiento de una biopelícula sobre un material de relleno o en este caso piedras. el agua residual con sus contaminantes se “riega” sobre el reactor mediante un sistema distribuidor - encargado de mantener la carga hidráulica en el sistema- entrando así en contacto con el medio y la biopelícula en donde se da la oxidación/reducción de la materia orgánica soluble gracias a la acción de los microorganismos (bacterias, protozoarios, rotíferos, hongos).

Tabla 10. Parámetros de diseño reactores de lecho bacteriano.

Características de diseño	Baja tasa	Tasa intermedia	Alta tasa Roca
Tipo de lecho	Roca	Roca	Roca
Carga hidráulica m ³ /m ² -día	1-4	4-0	10-40
Carga orgánica Kg DBO /m ³ día	0,07 - 0,22	0,24 - 0,48	0,4- 2,4
Relación de recirculación	0	0-1	1-2
Moscas de filtro	Muchas	Varias	Pocas
Desprendimientos	Intermitentes	Intermitentes	Continuos
Profundidad, m	1,8-2,5	1,8-2,5	1,8-2,5
Remoción DBO (%)	80 - 90	50-80	65-90
Consumo energético, KW/10 3 m ³	2-4	2-8	6-10

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)

Es necesario que el sistema cuente con ventilación ya sea natural o mecánica, porque gracias a la presencia de aire y por ende oxígeno en el sistema, se hace posible la biodegradación de la materia orgánica e implica recirculación de agua decantada para mejorar la carga hidráulica.

5.1.10 Reactores de lecho bacteriano de alta tasa – Plástico.

Sigue los mismos principios del anterior proceso, pero la diferencia es que el material de relleno es plástico; con este por su menor peso y mayor superficie específica, se pueden lograr mayores profundidades y mejores eficiencias en la remoción de la materia orgánica, ver Tabla 11.

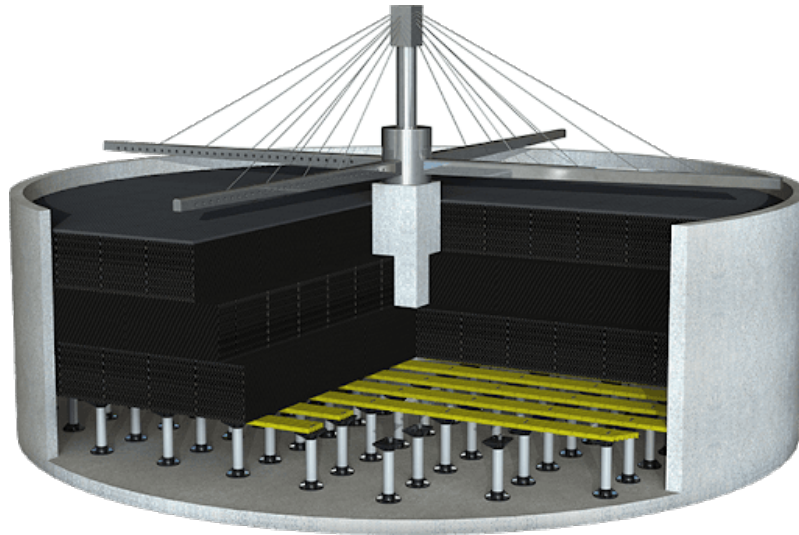


Figura 17 Reactor de lecho bacteriano o Filtro Percolador

Fuente: (Brentwood industries, 2021)

En la siguiente tabla se encuentra los principales parámetros de diseño que se deben tener en cuenta para el dimensionamiento del reactor de lecho bacteriano.

Tabla 11 Parámetros de diseño para reactores de lecho bacteriano o filtro percolador.

Características de diseño	Alta tasa Plástico	Tratamiento Grueso
Tipo de lecho	Plástico	Roca/plástico
Carga hidráulica m ³ /m ² -día	10-75	40-400
Carga orgánica Kg DBO /m ³ día	0,6- 3,2	>1,5
Relación de recirculación	1-2	0-2
Moscas de filtro	Pocas	Pocas
Desprendimientos	Continuos	Continuos
Profundidad, m	3-12,2	0,9-6

Características de diseño	Alta tasa Plástico	Tratamiento Grueso
Remoción DBO (%)	75-95	40-70
Calidad del efluente	Sin nitrificación	Sin nitrificación
Consumo energético, KW/10 3 m3	6-10	10-20

Fuente (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)

5.1.11 Otras tecnologías.

El desarrollo de nuevas tecnologías en el tratamiento del agua residual ha logrado avances que por ahora se ven en países desarrollados con excelentes resultados de calidad de agua, estos implican una alta inversión inicial, en operación y mantenimiento. A continuación, se presentan algunas:

MBR – Membrane Bioreactor

Es un proceso aerobio en el que se sumergen membranas en el tanque de aireación de un sistema de lodos activados, no requiere un sedimentador secundario para obtener un efluente bien clarificado. Las membranas favorecen la acumulación de biomasa en el reactor por lo que la carga orgánica en el sistema es mayor y el volumen del reactor se puede disminuir con respecto al sistema convencional de lodos activados.

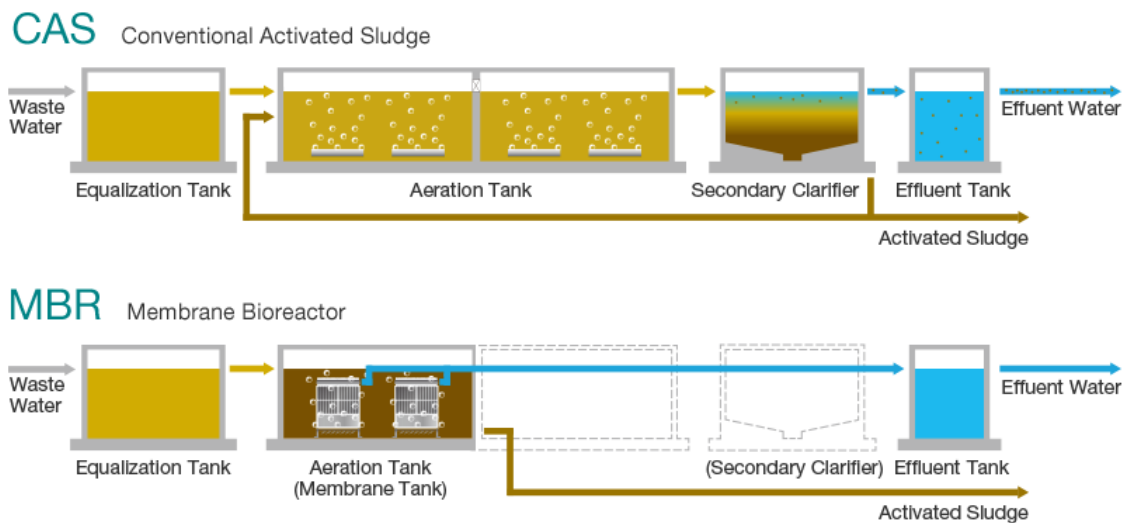


Figura 18 MBR

Fuente: (Kubta Membrane Europe, 2021)

Las membranas operan como sistema de microfiltración o ultrafiltración y el efluente es de gran calidad, haciendo innecesario el sedimentador secundario e impactando directamente en una menor área de implantación (Metcalf & Eddy, 2014). Algunos de los parámetros de diseño de sistema MBR:

- Flux (L/m^2 -día): Valor dado por el fabricante.
- Temperatura del agua residual ($^{\circ}C$).
- Área de permeado (m^2): valor dado por el fabricante.
- Sólidos de licor de mezcla (MLSS) entre 8000 a 12000 mg/L valores de diseño.

MBBR - Moving-Bed Biofilm Reactor

Con su traducción reactor de biopelícula de lecho móvil, son un sistema biológico aerobio basado en los lodos activados, pero en el que se usa un soporte plástico (*carriers*) que permanece en suspensión para generar allí una biopelícula, siendo bueno en remoción de DBO y nitrógeno y flexible en cuanto a picos de carga, pero requiere de un sedimentador secundario para clarificar el efluente (Water Environmental Federation, 2010).

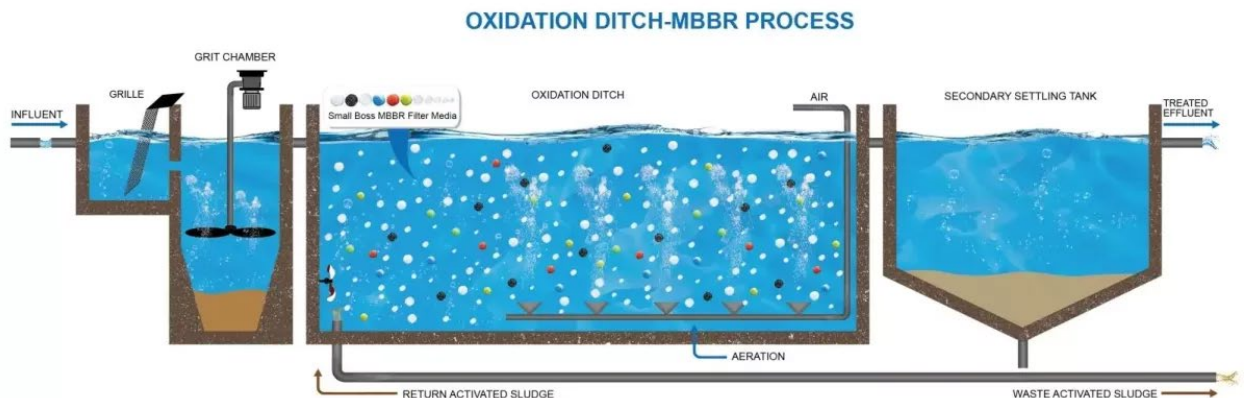


Figura 19 MBBR

Fuente: (China-Biomedica, 2021)

Algunos parámetros de diseño son: (Metcalf & Eddy, 2014):

- Área superficial del Carriers (m^2/m^3): el área dependerá del seleccionado por el diseñador y será suministrado por el proveedor.
- Carga orgánica entre 7 a 10 g DBO₇/m² día a 10°C (Water Environmental Federation, 2010)

Tecnología Nereda®:

También derivado de los lodos activados pero empleado en “gránulos” en un reactor secuencial por tandas “*batch*” que favorece la degradación de la materia orgánica y el nitrógeno, mejorando la sedimentabilidad del lodo por lo que se obtienen un agua clarificada de mejor calidad que en un proceso convencional de lodos activados. (Giesen & Thompson , 2013)



Figura 20 Tecnología Nereda®
Fuente: (Nerada, 2019)

5.1.12 Compilación de eficiencias.

A continuación, a manera de resumen, la Tabla 12 compila las eficiencias (incluso rangos) de remoción de contaminantes del agua residual doméstica según los diferentes procesos que pueden darse en una planta de tratamiento. Valores que dependen de la Resolución 330 del 8 de junio de 2017 del MVCT (capítulo 5) -en resaltado- complementados con datos bibliográficos provenientes de diversos autores.

Tabla 12 Eficiencia de remoción por tecnologías – MVCT y diversos autores

Nivel de tratamiento		Eficiencia de remoción (%)							Cita
		SST	DBO ₅	DQO	N NH3	N ORG0	N TOTAL	P TOTAL		E. COLI
Tratamiento primario	Cribado								(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021)
	Desarenador								(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021)
		0-10	0-5	0-5					(Metcalf & Eddy, 2014)
	Trampa de grasas								(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021)
	Sedimentador primario								(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
		50-65	30-40	30-40					(Metcalf & Eddy, 2014)
		50-65	30-40	30-40		10-20		10-20	
		40-70	25-40	20-35					25-75	(Fair, 1986)
	50-70	25-40						25-75	(Yañez, 1995)
Tanque Séptico	50-70	40-62				<10	<10	<60	(Batalha, 1989)
Tanque Séptico - Filtro		70-90				10-25	10-20	60-90	(Von Sperling, 1996)

Nivel de tratamiento	Eficiencia de remoción (%)								Cita
	SST	DBO 5	DQO	N NH3	N ORG0	N TOTAL	P TOTAL	E. COLI	
Tanque Imhoff	50-70	25-40	15-30						(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
	50	40							(Tchobanoglous, 2000)
	70-90	50-85						40-80	(Yañez, 1995)
	73-84	46-70				<30	10-20	80-90	(Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015)
Filtro anaerobio	60-70	65-80	60-80				30-40		(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
			75-85						(Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015)
UASB	60-70	65-80	60-80						(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
	60-80	60-70				10-25	10-20	60-90	(Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015)
			55-78						(Lettinga, 1991)
UASB - Laguna Facultativa	84	88							(Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015)
UASB - Lodos activados	85-95	85-95				15-15	10-20	70-95	(Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015)
UASB - Lodos activados SBR	84-86	87-93				20-90	23-72		(Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015)
Reactor anaerobio de flujo a pistón - RAP	60-70	65-80	60-80				30-40		(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
Reactor anaerobio de contacto			75-90						(Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015)
Reactor anaerobio de lecho fluidizado			80-85						(Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015)
Lodo activado convencional	80-90	80-95	80-95		15-20		10-25		(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
	85-98	70-98						95-98	(Yañez, 1995)
	55-95	55-95	50-80					90-98	(Fair, 1986)
	80-90	85-93				30-40	30-45	60-90	(Von Sperling, 1996)
Lodo activado - SBR	80-90	85-95				30-40	30-45	60-90	(Von Sperling, 1996)
Lodo activado - aireación prolongada	80-90	93-98				15-30	10-20	65-90	(Von Sperling, 1996)
Filtros percoladores de alta tasa - Roca	60-85	65-90	55-70						(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)

Nivel de tratamiento	Eficiencia de remoción (%)								Cita
	SST	DBO ₅	DQO	N NH ₃	N ORG ₀	N TOTAL	P TOTAL	E. COLI	
Filtros percoladores de alta tasa - Roca	65-85	75-95	60-80						(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
Filtro percolador alta tasa	70-90	90-85						90-95	(Yañez, 1995)
	60-85	65-80	60-80	8-15		15-30	8-12	90-95	(Metcalf & Eddy, 2014)
	85-95	80-93				30-40	30-45	60-90	(Von Sperling, 1996)
Filtro percolador super tasa	65-85	65-85	65-85	8-15	15-50		8-12		(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
Lagunas aireadas		80-95	60-70						(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
Laguna aerobia		60-80							(Ferrer, 2008)
Laguna anaerobia	20-60	50-70						90-99,99	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
		30-70							(Arceivala, 2007)
		50-85							(Mara, 1997)
Lagunas aireadas	85-95	80-95						90-99,99	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
		50-60							(Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015)
		80-95							(Mara, 1997)
Lagunas facultativas	63-75	80-90					30	90-99,99	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
	85-95	90-95	70-80					95-98	(Fair, 1986)
	90-99	75-95						98-99,102	(Yañez, 1995)
Laguna de maduración	85-95	60-80						90-99,99	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
		80-95							(Mara, 1997)
Laguna anaerobia - Humedal	87-93	80-90				37-48	45-50		(Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015)
Biodiscos		85-95							(Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015)
	85-95	85-93				30-40	30-45	60-90	(Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015)
	80-85	80-85	80-85	8-15		15-20	10-25		(Metcalf & Eddy, 2014)
Desinfección	Rayos UV							100	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
	Cloración							100	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)
	Laguna de maduración							99.99	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)

Fuente: Elaborado por (Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015) según las citas de la tabla, adicionalmente se incluyen las eficiencias de la resolución 0330 de 2017 y la resolución 0799 de 2021.

5.2 Cálculo teórico del consumo energético en PTARD.

Surgen entonces las siguientes inquietudes ¿cuál(es) de estos procesos escoger?, ¿con que criterio(s)?, ¿qué consumos energéticos tienen? Para esto último, a continuación, se presentan las ecuaciones que sirven de base para el cálculo del consumo energético aproximado de los procesos que usualmente componen los sistemas de tratamiento de agua residual doméstica, buscando ser un instrumento que aproxime al evaluador a un mejor análisis del sistema y por ende a una mejor toma de decisiones.

5.2.1 Bombeo.

Una buena parte del consumo energético de los sistemas de tratamiento se da en el transporte y/o elevación mecánica, ya sea del agua residual o del lodo; factor implícitamente afectado por la topografía, el tipo y llegada del colector a la planta, etc. Algunos de los procesos en donde el bombeo es requerido son: (Bertanza & Canato, 2013)

- Estaciones elevadoras de agua o de lodo.
- Bombeo de producto químico.
- Sistemas de recirculación mediante bombeo (usados en varios sistemas biológicos).
- Alimentación de sistemas de deshidratación de lodo.
- Procesos especiales (sistemas de filtración, de manejo de olores, etc.).

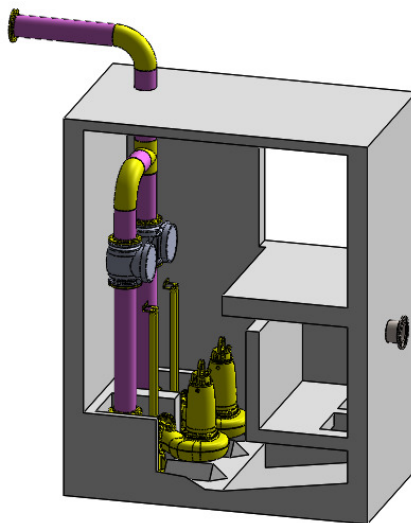


Figura 21 Sistema de bombeo

Fuente: (WARP SAS, 2020)

La siguiente ecuación expresa el consumo energético necesario en el bombeo de agua residual o lodo en una PTAR; sin embargo, excluye el bombeo de dosificación de producto químico.

Consumo energético – bombeo

$$W_b [kW] = \frac{\gamma \cdot Q \cdot \Delta H}{102 \cdot (\eta_p \cdot \eta_m)} \quad [1]$$

Donde:

- W_p : potencia requerida por el eje del motor [kW]
- γ : peso específico del fluido [kg/m^3]
- Q : caudal del fluido [m^3/s].
- η_p : rendimiento hidráulico de la bomba [-]
- η_m : rendimiento del motor eléctrico de la bomba [-]
- ΔH : altura total del bombeo [m]

Fuente: (Bertanza & Canato, 2013)

5.2.2 Rejillas.

El sistema de cribado mecánico es muy variable desde el punto de vista energético, al depender de equipos suministrados por el mercado, que ofrecen una amplia variedad de soluciones dependientes del diseño de la rejilla seleccionada, tipología, operación continua o intermitente, etc. por lo que el aporte en el gasto energético puede ser significativo. (Bertanza & Canato, 2013)

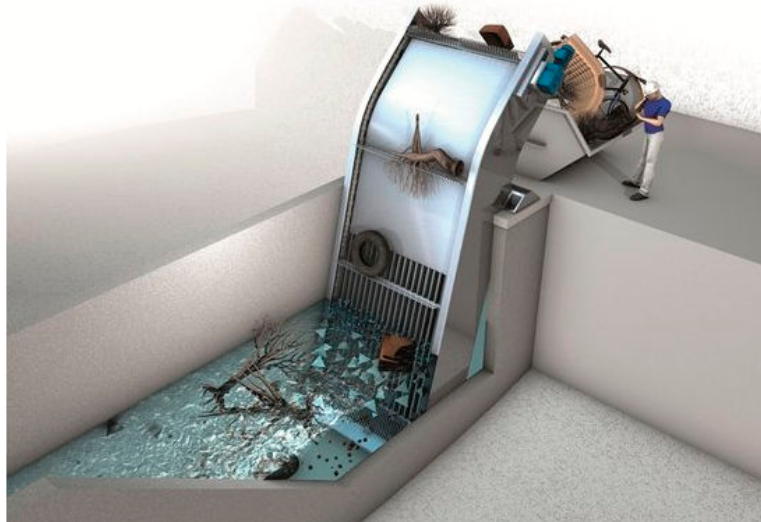


Figura 22 Cribado mecánico

Fuente (HUBER TECHNOLOGY, 2021)

Según Bertanza & Canato (2013), la fórmula para estimar el consumo energético de un sistema de cribado mecánico en plantas de gran caudal llevará a valores aproximados de consumo de energía, pero en plantas de caudal pequeño proporcionan valores prudentes o en exceso.

Consumo energético - rejillas

$$W_r [kWh/año] = 435 \cdot Q_{24}^{0,2} \quad [2]$$

Donde:

- W_r : potencia requerida [kWh/año]
- Q_{24} : caudal medio horario [m³/h]

Fuente: (Bertanza & Canato, 2013)

5.2.3 Desarenador.

Bertaza y Canato (2013) según los diferentes tipos de desarenador para agua residual doméstica determinaron el consumo energético estimado:

- Desarenador rectangular sin aireación: el consumo energético solo es para la extracción de las arenas.
- Desarenador Vortex: desarenador de flujo tangencial, el consumo energético proviene de la inyección de aire para poder extraer las arenas.
- Desarenador rectangular con inyección de aire: el principio es la rotación del fluido mediante la inyección de aire para la precipitación de las arenas y flotación de grasas, el consumo energético proviene de la inyección de aire y la extracción de las arenas.

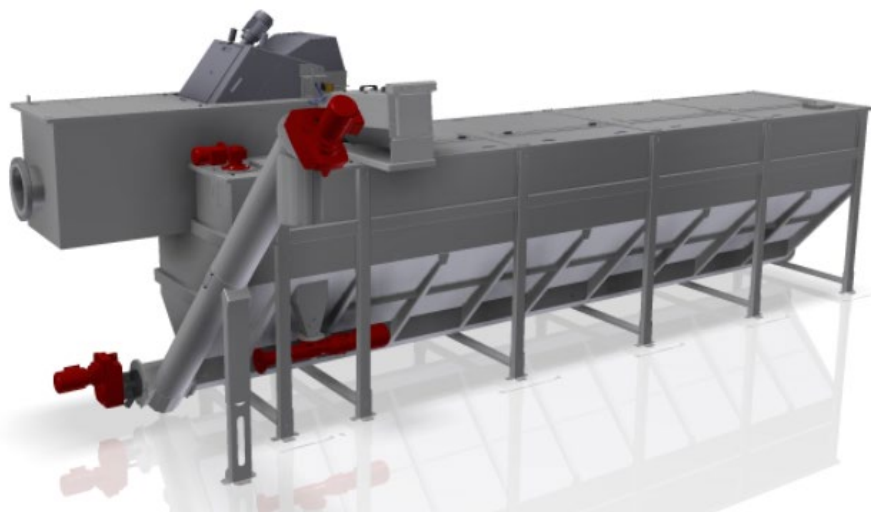


Figura 23 Desarenador Aireado

Fuente: (NORDIC WATER, 2021)

Consumo energético – desarenador

$$W_d[kWh/año] = \alpha \cdot V^{0.23} \quad [3]$$

Donde:

- W_d : potencia requerida del desarenador [$kWh/año$]
- V : Volumen de la estructura [m^3]

Fuente: (Bertanza & Canato, 2013)

El cálculo del volumen de la estructura debe realizarse con el caudal máximo horario y los factores de corrección (α) dependen del tipo de desarenador usado:

- α : (380) estructura no aireada.
- α : (7920) estructura con inyección de aire o tipo Vortex.

5.2.4 Sedimentación - primaria y secundaria.

Desde el punto de vista del consumo energético, los consumos del proceso de sedimentación se dan en el equipo *Barrelos*; sean sedimentadores circulares con equipo radial que direcciona y acumula el lodo en la parte central de la estructura o en sedimentadores rectangulares que direccionan el lodo a un extremo de la estructura para su almacenamiento. (Bertanza & Canato, 2013)



Figura 24 Barrelos circular

Fuente: (Ventrat, 2021)

Método 1 para el consumo energético del sedimentador

Recomendado para el cálculo del consumo energético del barrelos en sedimentadores de tipo rectangular o circular

$$W_s [kWh/año] = \alpha \cdot f \cdot \sqrt{S} \quad [4]$$

Donde:

- W_s : potencia requerida en el sedimentador – barrelos- [kWh/año]
- α : coeficiente de velocidad de la cuchilla rascadora [m/s]
- f : coeficiente de fricción del sistema [N/m]
- S : área del sedimentador en planta [m²]

Fuente: (Bertanza & Canato, 2013)

Coefficiente de resistencia

$$f \left[\frac{N}{m} \right] = 64 + 57,6 \cdot x \quad [5]$$

Donde:

- x : porcentaje de sólidos en suspensión concentrados en el sedimentador (1%)

Para el cálculo de α los siguientes coeficientes según el tipo de sedimentar implementado.

- α : $48,44 \cdot v_r$ (sedimentadores circulares)
- α : $42,93 \cdot v_t$ (sedimentadores rectangulares)

Donde:

- v_r velocidad perimetral del equipo rascador del sedimentador expresada en [m/s],
- v_t velocidad longitudinal del rascador, expresada en [m/s].

Tabla 13 Valores de v_r y v_t según la literatura.

Referencia	v_r	v_t
Degremont (1972)	0.03 – 0.06	0.02 – 0.05
Calvert (1973)	0.03 – 0.04	0.02
Masotti (2011)	0.03 – 0.08 (0.09) *	

* El valor en paréntesis indica la velocidad máxima del rascador según la norma ATV-DVWK (ATV-DVWK, 2002)

Fuente: (Bertanza & Canato, 2013)

Método 2 para el consumo energético del sedimentador

Recomendado solo para el cálculo del consumo energético del barrelos en sedimentadores de tipo circular.

$$W_s [kWh/día] = 24 \cdot (9.81) \cdot \frac{R^2 \cdot k \cdot 2\pi \cdot v_r}{60 \cdot 1000} \quad [6]$$

Donde:

- W_s : potencia requerida por el sedimentador [$kWh/año$]
- R : radio de la cuchilla rascadora [m].
- v_r : velocidad radial de la cuchilla [rpm].
- k : Coeficiente de resistencia de fricción por unidad de longitud [kg/m].
El valor de K puede ser igual a 50 Kg/m
- 9.81: aceleración de la gravedad.

Fuente: (Bertanza & Canato, 2013)

5.2.5 Sistema de aireación para oxidación biológica.

El consumo energético se da por el movimiento de los motores que toman el aire atmosférico requerido para suministrarse al reactor biológico y generar las condiciones deseadas; considerando que el volumen de aire que se calcula es generalmente el requerido para la oxidación biológica y no el flujo de aire necesario para mantener el lodo en suspensión -usualmente un volumen mayor-. (Bertanza & Canato, 2013)



Figura 25 Sistema de inyección de aire - Reactor de Lodos Activados

Fuente: (Spena Group, 2021)

Potencia absorbida por el equipo de aireación

$$W_{ox} [kWh/día] = h \cdot \frac{Q_a \cdot R \cdot T_1}{29,7 \cdot n \cdot e} \left[\frac{(P_{out})^{0,283}}{P_{in}} - 1 \right] \quad [7]$$

Donde:

- W_{ox} : potencia requerida [$kWh/día$]
- h : horas diarias de suministro de aire al sistema [24 h].
- Q_a : caudal de masa de aire suministrado al sistema en condiciones estándar [Kg/s].
- R : constante de gases [$8,314 \text{ KJ Kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$].
- T_1 : temperatura del aire en el conducto de alimentación [K].
- P_{in} : presión absoluta en la línea de succión [atm].
- P_{out} : presión absoluta en la tubería de suministro [atm], incluidas las caídas de presión.
- 29,7: constante de conversión.
- n : constante 0,283 para aire
- e : eficiencia de los compresores [ej: 0.8]

Fuente: (Metcalf & Eddy, 2014)

5.2.6 Espesamiento del lodo.

Usualmente los procesos de espesamiento de lodo en la PTARD se dan por:

- Espesamiento gravitacional.
- Flotación con aire disuelto.
- Centrifugas.

El espesamiento gravitacional es generalmente el más usado, siendo la estructura muy similar a la de un sedimentador circular con un motor el cual hace girar un rascador o barrelos para direccionar los fangos al centro de esta, por lo que pueden usarse las ecuaciones de la sección 5.2.4:



Figura 26 Espesador gravitacional

Fuente: (Estruagua, 2021)

- Ecuación [4] - Método 1 de consumo energético – sedimentador.
- Ecuación [6] - Método 2 del consumo energético – sedimentador.

Para el espesamiento mediante aire disuelto el consumo energético se puede calcular mediante la siguiente expresión.

Consumo energético – espesamiento

$$W_{Esp}[kWh/día] = 12200 \cdot S^{0.9} \quad [8]$$

Donde:

- S : Área superficial del espesador por aire disuelto [m^2]

Fuente: (Bertanza & Canato, 2013)

Según la expresión anterior el consumo de un sistema de espesamiento por aire disuelto va a ser siempre mayor que uno a gravedad. En el caso de un espesamiento por centrifugación ver la sección Centrifuga en 5.2.8

5.2.7 Estabilización del lodo.

Digestión anaerobia

En el proceso de estabilización biológica del lodo, el principal consumo energético de los digestores se da por el movimiento del lodo dentro del reactor, la expresión para su cálculo se basa en la concentración de sólidos en suspensión, la densidad del lodo y el volumen del digestor.



Figura 27 Digestor anaerobio

Fuente: (EPM, 2020)

Consumo energético – digestión anaerobia

$$W_{Mez-DA} [kWh/día] = 0,190 \cdot 10^4 \cdot V \cdot \left(\frac{SS}{\rho}\right)^3 \quad [9]$$

Donde:

- SS: concentración de sólidos en suspensión [kgSS/m³]
- ρ : densidad del lodo [kg/m³]
- V: volumen del digestor [m³]

Fuente: (Bertanza & Canato, 2013)

Otra expresión para el cálculo del consumo energético en la digestión anaerobia es:

Consumo energético – digestión anaerobia

$$W_{Mez-DA} [W/m^3] = 7,9 \cdot 10^4 \cdot x_{S,D}^3 \quad [10]$$

Donde:

- $x_{S,D}$: Es la fracción del peso de sólidos en el digestor.

Fuente: (Bertanza & Canato, 2013)

Nota: La selección de la ecuación del consumo energético del sistema de digestión de lodos, deberá ser evaluada por el diseñador en función de la información existente y/o el tipo de proyecto.

Digestión aerobia

El consumo energético en la digestión aerobia es función de la cantidad de oxígeno necesario para mantener las condiciones deseadas, para esto se puede usar la **Ecuación 7 Potencia absorbida por el equipo de aireación**, de la sección 5.2.5; sin embargo, el oxígeno suministrado es mucho mayor que en el proceso de lodos activados y se puede tener una aproximación al consumo energético suponiendo la transferencia de oxígeno de manera aproximada:

- 0.9 kg O/KWh en aireadores mecánicos.
- 0.54 kg O/KWh para los difusores.

Pero al determinar el consumo energético se debe tener en cuenta la capacidad de mezcla dentro del reactor, debido a que la potencia requerida es mayor para la mezcla que para la oxidación aerobia.

5.2.8 Deshidratación mecánica del lodo.

Filtro prensa

Los equipos más usados en la deshidratación mecánica de fangos son los filtros prensa, estos consisten en un equipo que bombea el lodo a alta presión hacia las cavidades (placas) para luego presionarlas mediante un gato hidráulico. En el cálculo se considera la resistencia generada por el filtrado, resaltando el aumento de esta en el transcurso de la operación.



Figura 28 Filtro prensa

Fuente: (ANDRITZ GROUP)

Consumo energético – filtro prensa

$$W_{\text{filtro prensa}} [\text{kWh/año}] = \frac{0,0251 \cdot S_f \cdot V \cdot \rho_f \cdot H}{S_i \cdot \eta \cdot (t_f + t_0)} \quad [11]$$

Donde:

- ρ_f : densidad del lodo deshidratado [kg/m^3].
- V : volumen del filtro prensa [m^3].
- H : presión de la bomba de alimentación del lodo [mca].
- S_i : fracción ponderada de sólidos en la alimentación.
- S_f : fracción ponderada de sólidos en la torta.
- η : rendimiento global de la bomba.
- t_f : tiempo de filtración [h].
- t_0 : tiempo de secado [h].

Fuente: (Bertanza & Canato, 2013)

Nota: el tiempo de secado usualmente para este tipo de lodo y según experiencia del autor es de 0.5 h.

El tiempo de filtrado se puede calcular según la siguiente expresión:

Tiempo de duración del proceso de filtración.

$$T[S] = b \cdot \left(\frac{S_f \cdot \rho_f \cdot A \cdot d}{2 \cdot S_i} \right) \quad [12]$$

Donde:

- ρ_f : densidad del lodo deshidratado [g/cm³].
- A : área de filtración [cm²].
- d : espesor del panel [cm].
- b : pendiente de la línea en un diagrama (tiempo de filtración/volumen del filtro) vs (volumen del filtro).

Fuente: (Bertanza & Canato, 2013)

Filtro banda

El filtro banda es un sistema mecánico que permite que el lodo drene libre para luego efectuar un prensado progresivo mientras este es transportado por las bandas, obteniéndose como resultado la deshidratación deseada del lodo. Para el cálculo del consumo energético de la operación del filtro banda se trabaja con los siguientes valores recomendados:

- Tracción de la lona: 20 %.
- Bomba de vacío 25% (solo si la sección es compuesta por un equipo al vacío).
- Bomba de lavado de agua 54%.
- Compresión de aire 1%.



Figura 29 Filtro Banda

Fuente: (Filtros Banda Muddy)

De acuerdo con lo anterior, el cálculo del consumo energético se da de la siguiente manera:

Consumo energético – filtro banda

$$W_{\text{filtro banda}}[\text{kWh/año}] = 23600 \cdot Q_f^{0.74} \quad [13]$$

Donde:

- Q_f : Caudal de lodo [m^3/h].

Fuente: (Bertanza & Canato, 2013)

Centrifuga

En las centrifugas un tambor de forma cilíndrocónica gira y al lograr la velocidad deseada se forma una capa concéntrica en la pared del tambor y los sólidos contenidos en el equipo son concentrados allí por efecto de la fuerza centrífuga, adicionalmente un tornillo sinfín que gira a una velocidad diferencial a la del tambor va transportando los sólidos depositados hacia la parte cónica final del tambor, para ser evacuados y de allí continuar el proceso.

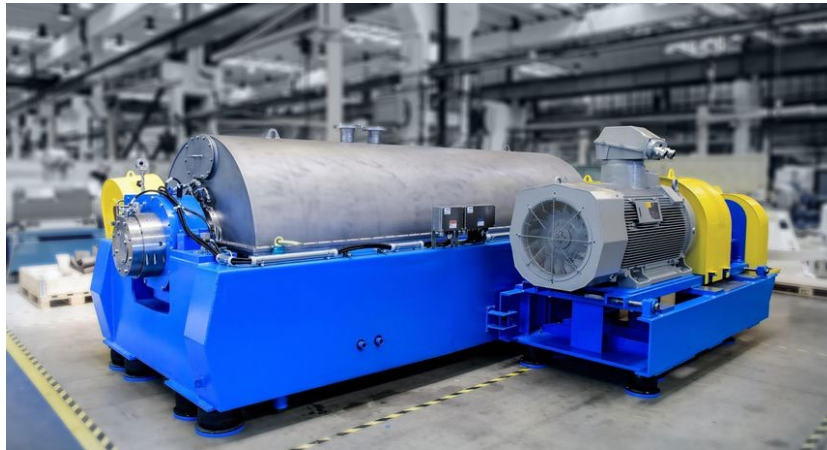


Figura 30 Centrifuga

Fuente: (ANDRITZ GROUP)

El cálculo del consumo energético del equipo deshidratador centrifugo se encuentra en función de la cantidad de lodo que ingresa al equipo, la expresión para su cálculo es la siguiente:

Consumo energético – centrifuga.

$$W_{\text{centrifuga}}[\text{kWh/año}] = 36,5 \cdot h \cdot SS^{0.374} \quad [14]$$

Donde:

- SS: Velocidad de entrada del lodo seco [tSS/h].
- H: funcionamiento de la maquina [hora/año].

Fuente: (Bertanza & Canato, 2013)

5.2.9 Energía hidráulica.

Dentro de la industria se ha venido proponiendo el uso de tecnologías para el aprovechamiento de la energía producida por el movimiento de agua; generar energía en tuberías en línea es una alternativa tecnológica que permite usar caídas de agua en equipos a la entrada o entre estructuras del sistema de tratamiento o en la entrega del agua tratada, aprovechando la energía cinética del fluido para reincorporarla al sistema y ahorrar energía en la operación de la PTAR.

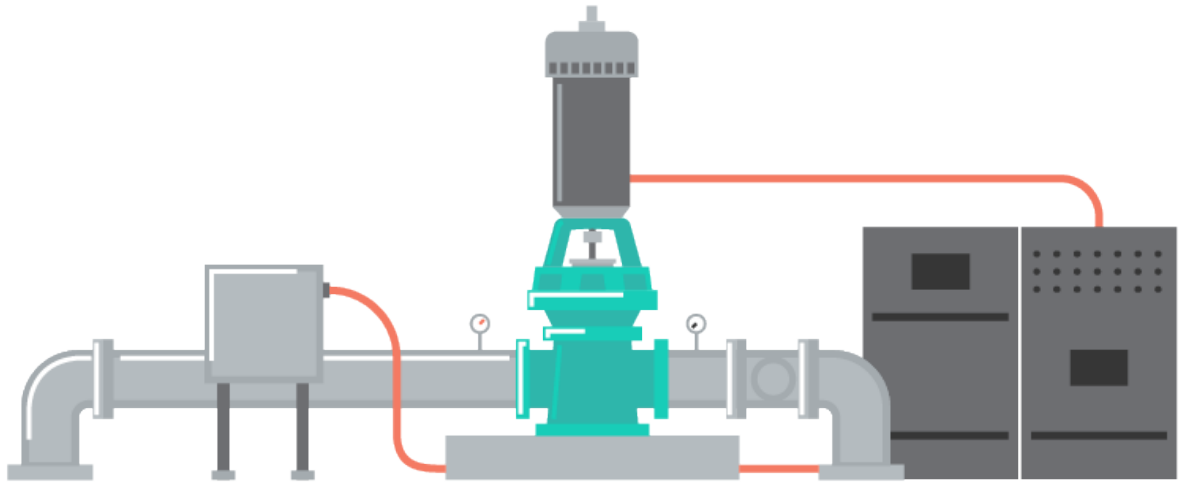


Figura 31 Sistema de generación eléctrica en tuberías

Fuente: (SOARHYDRO, 2022)

Según Cabrera y Quezada una estimación de la potencia que puede generar un sistema de generación de energía hidráulica se puede calcular con la siguiente ecuación.

Potencia teórica de una turbina

$$P = 9.8 \times \eta \times Q \times H \quad [15]$$

Donde:

- P: Potencia en KW de la turbina
- 9.8 es el peso específico del agua
- Q: Caudal de agua en m³/s
- H altura del salto en m
- η : Rendimiento estimado de los equipos (turbina generadora)

Fuente: (Criollo Cabrera & Quezada Damian, 2011)

5.3 Gases de efecto invernadero en PTARS (Metodología IPCC)

Dadas las problemáticas generadas por el cambio climático, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en 2006 dio un paso adelante en sus directrices al presentar una metodología para abordar la estimación de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero (GEI) de los sistemas de tratamiento de agua residual doméstica, haciendo así necesario que los países y la comunidad internacional revisara sus inventarios. (IPCC, 2006).

Así, el evaluador - diseñador debe realizar un análisis de generación de GEI en la PTARD, como instrumento para implementar estrategias de disminución y aprovechamiento como estrategia energética. (Cristancho Montenegro, Gámez Posada, Guerra Alfaro, & Dueñas Escudero, 2019)

5.3.1 Tier 1

Según (Cristancho Montenegro, Gámez Posada, Guerra Alfaro, & Dueñas Escudero, 2019), para estimar los GEI se deben tener en cuenta las directrices del procedimiento Tier 1, midiendo el contenido total de carbono orgánico degradable en las aguas servidas y así obtener la variable para el cálculo de las emisiones de CH₄

Paso 1: Cálculo de la materia orgánica degradable en aguas residuales:

Total de materia orgánica en las aguas residuales

$$TOW = P * DBO * 0.001 * I * 365 \quad [16]$$

Donde:

- TOW: total de materia orgánica en las aguas residuales al año del inventario kg de DBO/año.
- P: población del país en el año del inventario; DBO.
- DBO per cápita específico del país en el año del inventario, g/persona/día.
- 0,001: conversión de gramos de DBO a kilogramos de DBO.
- I: factor de corrección para DBO*.

* El factor de emisión es una función del potencial máximo de producción (Bo) de CH₄ y del factor de corrección para el metano (MCF) para el sistema de tratamiento y eliminación de aguas residuales” (IPCC, 2006), tomando como resultado la cantidad máxima de CH₄ que puede generarse a partir de las aguas residuales a disposición de las plantas de tratamiento y la carga orgánica tratada.

Paso 2: Factor de emisión de CH₄ para cada vía o sistema de tratamiento y/o eliminación de aguas residuales:

Factor de emisión.

$$EF_j = B_0 * MCF_j \quad [17]$$

Donde:

- EF_j: factor de emisión, kg de CH₄/ kg de DBO.
- B₀: capacidad máxima de producción de CH₄ kg de CH₄/kg de DQO.
- j: cada vía o sistema de tratamiento y/ eliminación.
- MCF_j: factor corrector.

Paso 3: Se plantea la medición de emisiones de CH₄ producto de las aguas residuales:

Emisiones de CH₄.

$$Emisiones\ de\ CH_4 = [\sum_{i,j}(U_i * T_{i,j} * EF_i)](TOW - S) - S \quad [18]$$

Donde:

- TOW = total de materia orgánica en las aguas residuales.
- S = componente orgánico separado como lodo.
- U_i = fracción de la población del grupo de ingresos i.
- T_{i, j} = grado de utilización de vía o sistema de tratamiento y/o eliminación j.
- EF_j = factor de emisión, kg. de CH₄/kg de DBO.
- R = cantidad de CH₄ recuperada durante el año del inventario, kgCH₄/año.

Cabe resaltar que esta es una de varias alternativas que diferentes organizaciones e investigadores recomiendan para definir las emisiones de GEI, en el *IV Anexo: Cálculo de emisiones*. se encuentran los diferentes métodos de análisis de producción de emisiones de los sistemas biológicos, que servirán como instrumento para que el evaluador pueda tomar referencias para su análisis.

6 Análisis de las metodologías de selección

En este capítulo se revisan las metodologías de selección de alternativas para el tratamiento de agua residual empleadas en Estados Unidos, México, Brasil y Bolivia sintetizando las similitudes y diferencias mediante el análisis crítico de los ítems:

- Metodología Norteamericana (EPA, 1980).
- Metodología Brasileira (Almeida de Souza, 1996).
- Metodología Mexicana (Noyola, Morgan Sagastume, & Guereca , 2013)
- Metodología Boliviana (CENTA, 2021)

Cada una tiene como objetivo evaluar y seleccionar tratamiento óptimo según criterios específicos de evaluación. Posteriormente, se precisarán los criterios de evaluación orientados a la eficiencia energética para los sistemas de tratamiento de agua residual doméstica en Colombia según lo estipulado en la resolución 0330 de 2017. Finalizando con la elaboración de una matriz multicriterio y multiobjetivo para evaluar y seleccionar aquellos criterios a ser usados en Colombia.

6.1 Metodología norteamericana

En el año 1979 la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) desarrolló un manual con metodología y evaluación de tecnologías y alternativas de tratamiento de agua residual doméstica (1980), siguiendo los lineamientos de la ley de agua limpia de 1977. Manual destinado a ser informativo en lugar de prescriptivo fue diseñado para el uso de planificadores, ingenieros y analistas involucrados en el desarrollo y revisión de planes para la construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales, enfatizando en: i) Describir e interpretar los reglamentos y directrices de la EPA. ii) Presentar una metodología secuencial de clasificación y selección. iii) Identificar, recopilar y presentar información sobre costos y energía necesaria para juzgar la conformidad de los diseños propuestos con los criterios de calificación aplicables.

Dicho manual aún no ha sido actualizado y lo conforman cuatro capítulos y seis apéndices que presentan procedimientos, metodologías e información básica sobre costos y energía, necesarios para el análisis y evaluación de aplicaciones tecnológicas y alternativas costo eficientes y así poder recibir subvenciones federales bajo las disposiciones de tecnología innovadora y alternativa.

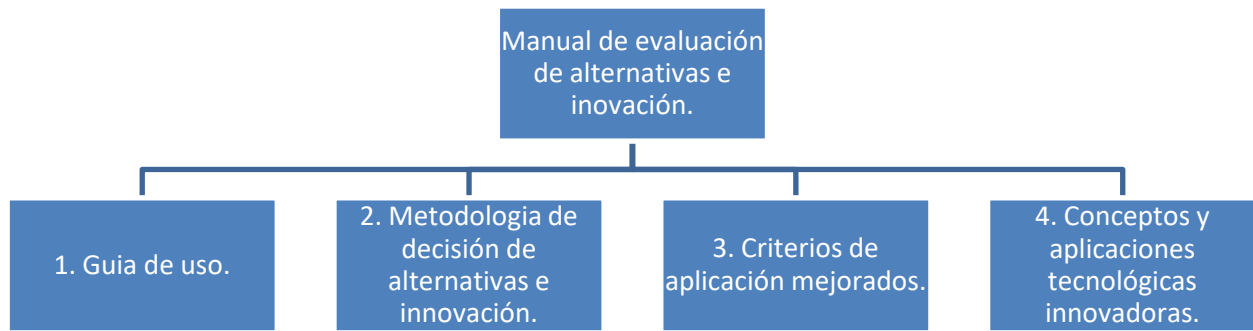


Figura 32 Manual de la EPA

Fuente: (EPA, 1980)

6.1.1 Metodología de decisión de alternativas e innovación

La metodología de decisión básica corresponde a las decisiones que debe tomar el consultor y/o diseñador en la implementación de sistemas convencionales de tratamiento municipal según:

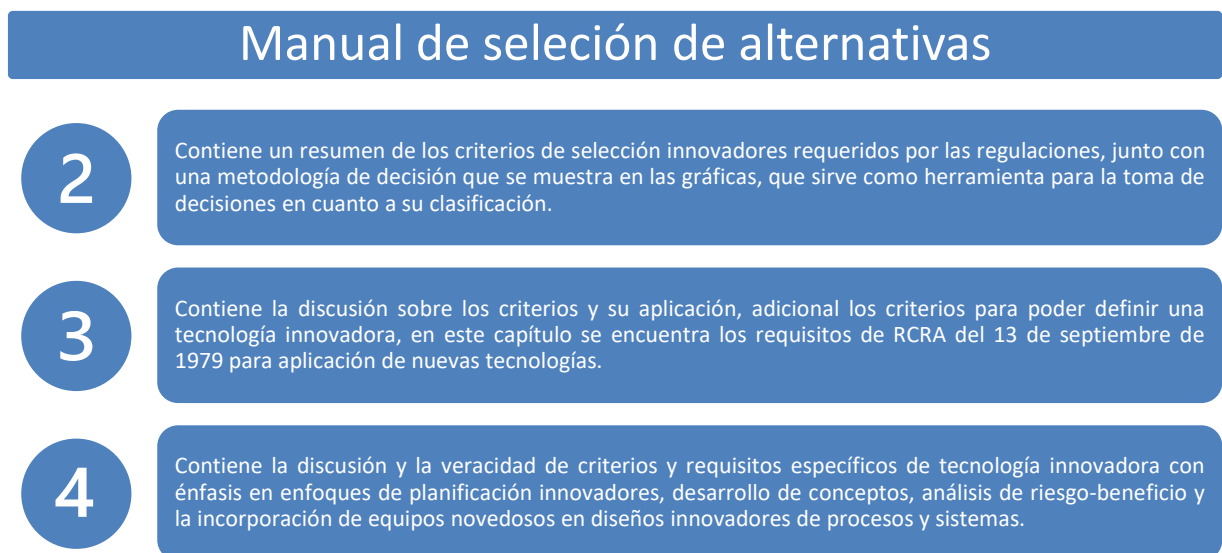


Figura 33 Contenido de los capítulos 2, 3 y 4 del manual.

Fuente: (EPA, 1980)

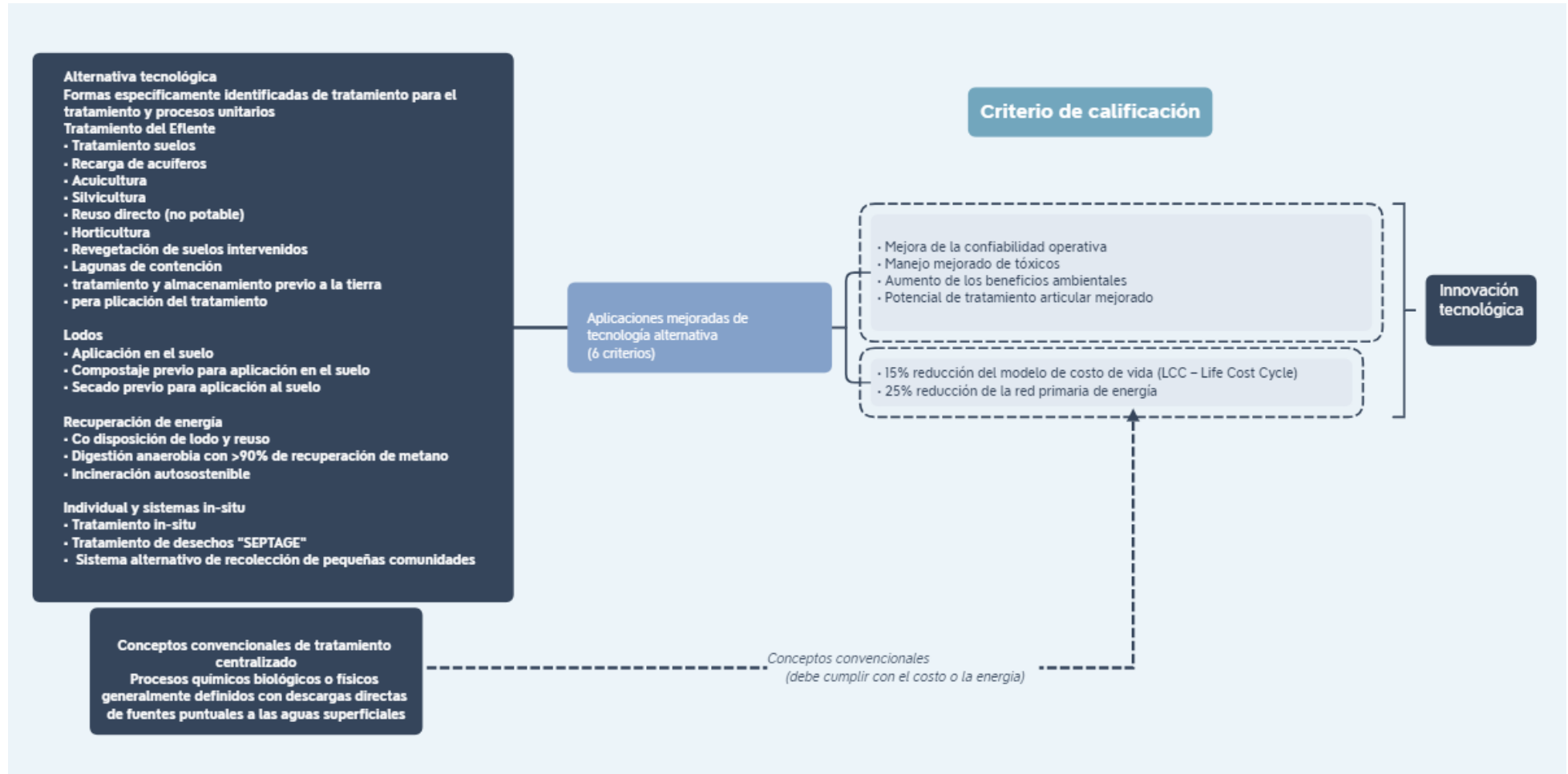


Figura 34 Clasificación generalizada de la innovación y tecnologías alternativas.

Fuente: adaptado de (EPA, 1980)

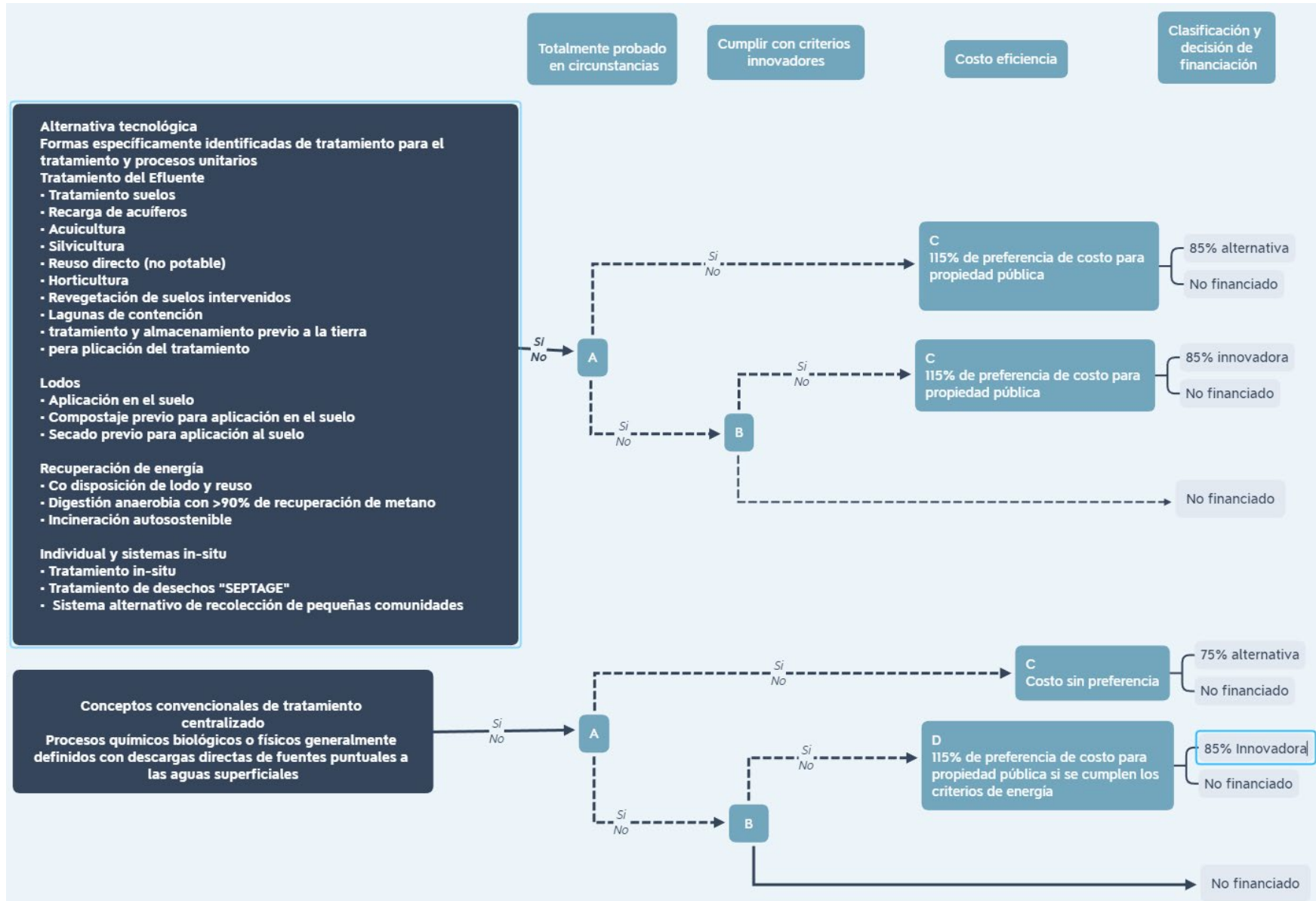


Figura 35 Metodología de decisión de la innovación y tecnologías alternativas.

Fuente: Adaptado de (EPA, 1980)

El procedimiento de uso de la metodología de análisis y evaluación de proyectos de tratamiento de agua residual doméstica se encuentra simplificado en pasos, permitiendo clasificar los proyectos por:

- Alternativa tecnológica de tratamiento

Iniciando en el punto A superior (ver figura 35)

- A. Determinar si el propósito de la alternativa tecnológica ha sido probado en las circunstancias de su uso previsto.
 - Si – Proceda al punto C
 - No – Proceda al punto B
- B. Determinar si la tecnología cumple con alguno de los seis criterios de calificación para la tecnología innovadora que se enumeran a la derecha de la Figura 34.
 - Si – Proceda al punto C
 - No – No financiado
- C. Determinar si el costo de la tecnología está dentro del 115% de la alternativa más costo eficiente.
 - Si – 85% de financiación
 - No – No financiado

- Conceptos convencionales de tratamiento:

Iniciando en el punto A inferior (ver figura 35)

- A. Determinar si el propósito de la alternativa tecnológica ha sido probado en las circunstancias de su uso previsto.
 - Si – Proceda al punto C
 - No – Proceda al punto B
- B. Determine si la tecnología propuesta cumple con el 15% de reducción del costo del ciclo de vida o el 20% de los criterios de reducción neta de energía primaria.
 - Si – Proceda al punto C
 - No – No financiado
- C. Determinar si la tecnología es la alternativa más costo eficiente.
 - Si – 75% de financiación
 - No – No financiado
- D. Para las tecnologías que han cumplido con los criterios energéticos, determine si están dentro el 115% del costo de la alternativa más rentable.
 - Si – 85% de financiación
 - No – No financiado

6.1.2 Criterios de aplicación mejorados

La intención de los seis criterios de aplicación mejorada (ver figura 34):

1. Fiabilidad operativa mejorada.
2. Manejo mejorado de tóxicos.
3. Beneficio ambiental.
4. Mejora del potencial de tratamiento municipal e industrial en conjunto.
5. Reducción de costos y energía
6. Reducción de energía primaria

Es fomentar el uso de aplicaciones nuevas de tecnologías y alternativas probadas como son sistemas de reutilización, recuperación, reciclaje y ahorro de energía que ofrecen ventajas sobre el estado actual de la técnica en uno o más de las categorías anteriores. Difieren de los criterios de costo y energía en que no se han proporcionado niveles objetivo-específicos para juzgar cuantitativamente la conformidad o el nivel de conformidad; sin embargo, la intención es fomentar sistemas alternativos que maximicen los beneficios anteriores. Cada uno de los cuales requiere análisis cualitativos subjetivos para demostrar su cumplimiento, análisis, comparativos sobre la base de las obras o sistemas de tratamiento total, incluidos:

1. Todos los equipos y procesos correspondientes
2. Los procesos y técnicas de manipulación y eliminación de lodos.
3. Los sistemas que se utilizarán como base de comparación deben ser procesos alternativos funcionalmente similares que sean potencialmente rentables según se define en el párrafo 5 (c) de las directrices para el análisis de la eficacia en función de los costos.
4. El período de comparación es el período de planificación del proyecto.

El desarrollo y la formulación de diseños de sistemas de tratamiento municipales innovadores deben satisfacer los requisitos reglamentarios y al mismo tiempo demostrar un progreso hacia el cumplimiento de las metas de mayor rentabilidad, conservación de energía y recuperación de agua y constituyentes de aguas residuales y mejor manejo de materiales tóxicos (EPA, 1980).

6.2 Metodología Brasileira

En Brasil en el año 1992 se desarrolló un modelo de selección de alternativas llamado PROSEL-I (en sus siglas “*Process Selection Model – Version I*”) con el cual pretenden apoyar la selección del proceso(s) de tratamiento de agua residual más apropiado(s) para un caso particular. En el desarrollo del modelo y su validación fue usado un lenguaje de programación -FORTRAN-77- para computadores VAX-11, construyendo una base de datos para el desarrollo de la función o modelo. (Almeida de Souza, 1996)



Figura 36 Secuencia de las fases de evaluación del modelo PROSEL -I

Fuente: (Almeida de Souza, 1996)

6.2.1 Secuencia de las fases de evaluación del modelo de selección.

Fase I - Instrucciones generales

En este paso se seleccionan las posibles opciones de tratamiento en el modelo PROSEL-I, eligiendo archivos de datos existentes o ingresando datos para elegir algunos modelos o métodos alternativos y producir algunos de los datos necesarios. También es posible ingresar los pesos para cada criterio de decisión que se esté considerando o eliminar algunos criterios del análisis.

Fase II - Información necesaria

Los datos requeridos para ejecutar el modelo se dividen en diez grupos:

1. Datos que especifican el caso a estudiar.
2. Datos de las variables de diseño y planificación.
3. Datos sobre las condiciones locales y el terreno donde se instalará la planta de tratamiento de aguas residuales.
4. Datos sobre la capacidad local para suministrar los recursos necesarios.
5. Datos sobre la disponibilidad local de mano de obra.
6. Datos sobre la calidad de las aguas residuales sin procesar (a tratar).
7. Datos de la calidad mínima deseada para el efluente tratado (que será liberado en un cuerpo receptor definido).

8. Datos que caracterizan el “espacio tecnológico”, es decir, el nivel de desarrollo de la comunidad en relación con su capacidad para soportar una tecnología (cultural, social, política y económica).
9. Datos de experiencias previas y comportamiento experimental de los procesos de tratamiento de aguas residuales (que permite descartar alternativas que no se comportan como se espera en las condiciones locales).
10. Pesos para calcular varios índices de "compatibilidad" y "conveniencia" y ponderaciones para los diferentes criterios que se utilizarán en los algoritmos de análisis de decisiones.

Fase III - Preselección técnica

En esta fase el modelo verifica si las alternativas consideradas inicialmente cumplen con las restricciones técnicas que se les imponen dependiendo de las condiciones locales, con un procedimiento de exclusión de restricciones técnicas se conforma el conjunto de alternativas factibles para el caso en estudio. realizando las siguientes acciones:

1. Definir las eficiencias máximas posibles de cada alternativa (que son las eficiencias intrínsecas de la alternativa "j-ésima" al tratar con la característica "i-ésima" calidad del agua).
2. Definición de la calidad de las aguas residuales sin tratar, según los datos introducidos en el modelo (se proporcionan las concentraciones " $C_i (i)$ ", donde "i" significa las diversas características de calidad del agua consideradas por el modelo).
3. Definir los estándares de calidad para el efluente, es decir, las concentraciones máximas permisibles " $C_e (i)$ ", que deben obedecer a las metas de planificación comunitaria, los usos del efluente tratado o las reglas y la legislación para su vertido en el cuerpo receptor (o en el suelo).
4. Cálculo de las eficiencias mínimas aceptables para el caso en estudio, $E (i)$, para la característica "i-ésima" de la calidad del agua estudiada.
5. Exclusión de alternativas no viables según criterio de eficiencia.
6. Lectura de datos informados de las características de calidad mínimas posibles del efluente tratado por cada alternativa; es decir, las concentraciones mínimas que cada proceso de tratamiento es capaz de proporcionar.
7. Exclusión de alternativas que no cumplan con el criterio de concentraciones mínimas posibles para el efluente, descartándose las alternativas cuando la concentración requerida para el caso en estudio sea menor que la mínima posible proporcionada por la alternativa.
8. Lectura de las necesidades de espacio físico de las alternativas (la base de datos contiene valores unitarios del área ocupada según la capacidad de tratamiento).
9. Cálculo de las necesidades de área de las alternativas.

10. Exclusión de alternativas no viables por criterio de ocupación de espacio; es decir, se eliminan las alternativas que requieren más terreno que el área disponible designada por el caso en estudio.
11. Lectura de la clasificación de alternativas según su demanda energética (las alternativas se clasifican según criterios bien definidos, en “demandantes de energía” y “no demandantes energéticamente”).
12. Exclusión de alternativas por el criterio de demanda de energía (cuando el caso en estudio se clasifica como "con fuerte tendencia a no tener oferta energética", según criterios bien definidos por el modelo) las alternativas clasificadas como "demandantes de energía" son eliminadas).
13. Lectura de las pendientes mínimas del terreno requeridas por las alternativas (el modelo contiene esta información en su base de datos).
14. Exclusión de alternativas no viables por criterio de pendiente (cuando el terreno designado para la estación de tratamiento no tiene un desnivel promedio mayor que el mínimo y el lugar aún tiene una “fuerte tendencia a que no haya suministro de energía”).
15. Lectura de las tasas mínimas de percolación en el suelo aceptables por las alternativas (contenidas en la base de datos del modelo).
16. Exclusión de alternativas no viables por el criterio de tasa mínima de percolación requerida (el modelo las excluye cuando el valor promedio de la tasa de percolación en el terreno designado para la construcción de la planta de tratamiento es menor al mínimo requerido por la alternativa).
17. Lectura de las profundidades mínimas del nivel freático aceptable por las alternativas (contenidas en la base de datos).
18. Exclusión de alternativas no viables por el criterio de profundidad mínima aceptable de las aguas subterráneas.
19. Lectura de los valores mínimos de profundidad de la capa impermeable de suelo aceptables por las alternativas (contenidas en la base de datos).
20. Exclusión de alternativas no viables por criterio de profundidad mínima de la capa impermeable del suelo.
21. Lectura de las profundidades (espesores) mínimos de suelo aceptables por las alternativas (contenidas en la base de datos).
22. Exclusión de alternativas no viables por el criterio de profundidad mínima del suelo.
23. Lectura de las condiciones de ocurrencia de rocas que son requeridas por las alternativas (las alternativas se clasifican en la base de datos del modelo en aquellas que "requieren terrenos sin presencia de rocas" y aquellas en las que esta condición no es obligatoria).
24. Exclusión de alternativas inviables por el criterio de presencia de rocas en el suelo.

25. Determinación de si se debe considerar el criterio de experiencia y comportamiento experimental (cuando hay experiencia previa con una alternativa o cuando hay resultados de pruebas en el laboratorio o a escala piloto).
26. Consideración de la experiencia previa o el comportamiento experimental de las alternativas (las alternativas que ya se sabe que no tienen un rendimiento experimental localmente aceptable en el caso son vetadas por el usuario).
27. Exclusión de alternativas no viables por veto en base al criterio de experiencia previa o comportamiento experimental.
28. Los resultados finales del proceso de preselección técnica (solo las alternativas que cumplen todos los criterios al mismo tiempo; es decir, que no han sido excluidas en ninguna etapa o permitieron continuar con el análisis; si no existe una alternativa viable, el modelo termina su análisis en este punto).

Fase IV - Evaluación tecnológica

Si hay más de una alternativa factible, el modelo evalúa la eficiencia con la que cada alternativa factible cumple con algunos criterios preestablecidos de tecnología apropiada para que pueda ser elegida por el usuario o la "comunidad" en cuestión. Para esta evaluación se emplean conceptos de costos, beneficios, idoneidad, compatibilidad y oportunidad, a partir de los cuales se deben medir los factores sociales, culturales, ambientales y económicos de la elección tecnológica.

Fase V - Análisis económico

En esta etapa, el modelo PROSEL-I estima lo que se ha llamado el "Grado de idoneidad" de alternativas viables, que mide cuán apropiados son los requisitos de cada alternativa en el desarrollo tecnológico de la comunidad y del sitio (en el caso en estudio). El modelo hace esto en pasos. Primero, calcula el "nivel tecnológico" de la comunidad-disponibilidad. En segundo lugar, considera los valores de los "requerimientos tecnológicos" de las alternativas contenidos en la base de datos. Finalmente, la disponibilidad local se compara con los requisitos de cada alternativa, produciendo los valores del "Grado de adecuación" de cada alternativa en relación con el caso en estudio. Las consideraciones para respaldar los cálculos del modelo PROSEL-I en esta etapa son:

1. Diversas dimensiones de las tecnologías que han sido reconocidas por varios autores, p. e. dimensiones económicas, sociales y ambientales propuestas por Kaplinsky (1990)
2. La elección la tecnología es un proceso holístico como algunos revisores de los conceptos de tecnología apropiada, p.e. Willoughby, (1990)

3. Para cada dimensión tecnológica es posible elegir y asociar algunos factores determinantes del desarrollo tecnológico de la comunidad, como lo utilizan Reid y Discenza (1982)
4. Correlación entre el nivel tecnológico disponible y los valores de las variables tecnológicas en la comunidad, de manera que las variables pueden actuar como indicadores del "nivel tecnológico" de la comunidad (enfoque similar al utilizado por Reid y Discenza, (1982)
5. El nivel de tecnología requerido por cada alternativa es directamente proporcional al grado en que la alternativa requiere recursos logísticos y material, de manera que este hecho pueda utilizarse para estimar el "requisito de tecnología" de la alternativa.
6. La investigación y desarrollo de alternativas tecnológicas es siempre apoyado por la capacidad tecnológica de esta comunidad para producir, operar y mantener nuevas alternativas tecnológicas; es decir, la creación de alternativas tecnológicas se basa en el "nivel tecnológico" de la comunidad responsable de su creación.

Fase VI - Selección final

El Modelo PROSEL-I forma una matriz de eficiencia que se puede utilizar libremente:

1. Para elegir directamente alternativas considerando o no los diversos criterios de la matriz
2. Para introducir un algoritmo aplicable para realizar el análisis de decisión con multicriterio y multiobjetivo.

El modelo PROSEL-I tiene tres de estos algoritmos disponibles correspondientes a los métodos de "Promedio ponderado" (Goicoechea et al., (1982)), "Programación de compromiso" (Zeleny, (1982), (1974) y (1973); Duckstein y Opricovic, (1980)) y Electre-I (Benayon et al., (1966); ROY, (1971)). Al final, la "comunidad", informada de los resultados del modelo puede tomar una decisión y la alternativa seleccionada es virtualmente la más social, cultural, ambiental y económicamente viable desde el punto de vista de las personas que actúan en la decisión (Souza y Forster, (1996))

6.3 Metodología Mexicana

La Universidad Nacional Autónoma de México – UNAM a través de su Instituto de Ingeniería desarrollo una metodología para la selección de la alternativa de tratamiento de agua residual doméstica, propuesta en tres fases (Noyola, Morgan Sagastume, & Guereca , 2013).

1. Presentar de manera general las diversas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales, la configuración de los trenes de procesos y plantea sus conceptos básicos. Esta

fase busca hacer comprender la base elemental de las tecnologías existentes, las diferencias, similitudes, ventajas y desventajas entre ellas, capacidades, etc. además de los requerimientos técnicos para su correcto funcionamiento según las directrices del lugar del proyecto.

2. Plantea una serie de preguntas en ámbitos: ambiental, técnico, económico y social que permiten descartar tecnologías que no cumplen con criterios establecidos y que deberán ser respondidas por especialistas, representantes de la comunidad, entidades y/o actores del proyecto; “panel de expertos” que se encargará de seleccionar la alternativa o tecnología. Pero, entre más experto sea el grupo de evaluadores en la determinación del peso de los rubros, la matriz tomara mayor validez y confiabilidad en la selección del tratamiento.
3. En esta fase se establece una matriz de decisión que consta de diez criterios de evaluación que calificarán y evaluarán el proyecto específico, criterios muy importantes en el proceso de selección de la alternativa.

6.3.1 Fase I - Descripción del tratamiento y sus tecnologías

Se plantean los aspectos generales del tratamiento de aguas residuales y sus tecnologías, la importancia de proteger la salud pública, el medio ambiente y la reutilización del agua tratada, además de realizar una descripción de los procesos de tratamiento: preliminar, primario, secundario y terciario, del tratamiento de lodos y de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales.

6.3.2 Fase II – Preguntas para la selección de la tecnología

Las preguntas de tipo: ambiental, técnico, económico y social se dan en la fase II y su respuesta define el tipo de tecnología apta para el tratamiento de aguas municipales.

Preguntas de tipo ambiental

1. ¿Puede operar la planta dentro de las fluctuaciones de temperatura del medio ambiente presentes en la región?
2. ¿La dirección del viento dominante es favorable para la ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales en cuanto al transporte de aerosoles o posibles malos olores?
3. ¿Se tiene una estimación de la generación de gases de efecto invernadero por parte del proceso de tratamiento (agua y lodos)?
4. ¿Se cuenta con un estudio de impacto ambiental, incluso preliminar, que valore los impactos de la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales?

Preguntas de tipo técnico

1. ¿Se ha identificado, dentro de lo posible, alguna tecnología aplicable al caso y que haya sido desarrollada o adaptada en la región o en el país?
2. ¿Se puede considerar que el agua residual a tratar es del tipo netamente de agua residual doméstica (DBO₅ total por debajo de los 350 mg/l)?
3. ¿Se está seguro de que no hay descargas industriales de relevancia, o de cualquier otro tipo, que alteren el carácter municipal del agua residual?
4. ¿En la tecnología propuesta se favorece el tratamiento biológico sobre los fisicoquímicos?
5. ¿Se ha considerado dentro del tren de tratamiento del agua, al menos para efectos de comparación y evaluación, un sistema anaerobio?
6. ¿No hay dependencia de productos (enzimas, bacterias o microorganismos de cualquier tipo) que deban agregarse a la planta frecuentemente y generen dependencia económica?
7. ¿Se considera que la planta no requiere personal altamente capacitado? es decir, ¿puede ser operada por un profesional de nivel técnico medio con la capacitación necesaria?
8. ¿El consultor que propone la tecnología puede demostrar experiencia en su diseño y operación?
9. ¿Se reconoce que la planta de tratamiento genera lodos y su cantidad y calidad están determinadas y se ha considerado su manejo?
10. ¿La planta de tratamiento, preferentemente, integra o contempla el tratamiento de lodos por vía biológica?
11. ¿En plantas pequeñas, se ha considerado dentro del tren de manejo de lodos, al menos para efectos de comparación y evaluación, los lechos de secado?
12. ¿Se tiene contemplado cómo disponer adecuadamente los lodos generados?
13. ¿La planta de tratamiento genera lodos susceptibles a ser usados como mejoradores de suelo en la agricultura?
14. ¿La planta de tratamiento integra o contempla el control de olores?
15. ¿El control de olores hace uso de biotecnología o sistemas biológicos como biofiltros de composta?
16. ¿La planta de tratamiento integra o contempla la mitigación del ruido?
17. ¿Se tiene contemplado qué hacer con el agua residual o agua parcialmente tratada durante el arranque de la planta o falla de la misma sin que afecte sosteniblemente al medio ambiente?
18. ¿La planta de tratamiento usa equipamiento de fácil compostura y reposición?
19. ¿Se considera que la tecnología usada en la planta de tratamiento favorece una fácil operación y mantenimiento de esta?

Preguntas de tipo económico

1. ¿La tecnología utilizada en la planta de tratamiento puede contribuir de alguna forma con las actividades económicas de la región?
2. ¿En cuanto a la reparación y/o mantenimiento de los equipos de la planta es posible apoyarse con prestadores de servicios de la región?
3. ¿El costo de operación y mantenimiento de la planta es sostenible considerando las finanzas del municipio o del organismo responsable de su operación?

Preguntas de tipo social - pueden formularse en tiempo futuro

1. ¿Ha sido consultada la población directamente relacionada o posiblemente afectada sobre la construcción de la planta de tratamiento?
2. ¿Se ha hecho consciencia en la población sobre la necesidad y ventajas de contar con la planta de tratamiento de aguas residuales?
3. ¿Se ha definido el esquema de participación ciudadana durante el proceso de toma de decisiones, así como para la adjudicación, construcción y operación?
4. ¿Se considera contratar personal de la comunidad?
5. ¿Se cuenta con un plan de apoyo para la educación de la comunidad (visitas guiadas, museo, servicio social, entre otras acciones)?
6. ¿Se cuenta con un plan de capacitación para los empleados?
7. ¿Se cuenta con un plan de respuesta a emergencias y brigadas de protección civil dentro de la planta?

En la siguiente figura (37) se reproduce el diagrama que los autores (Noyola, Morgan Sagastume, & Guereca , 2013) desarrollaron como apoyo para la preselección de tecnologías de tratamiento preliminar, exponiendo los más adecuados o aplicados en América latina.

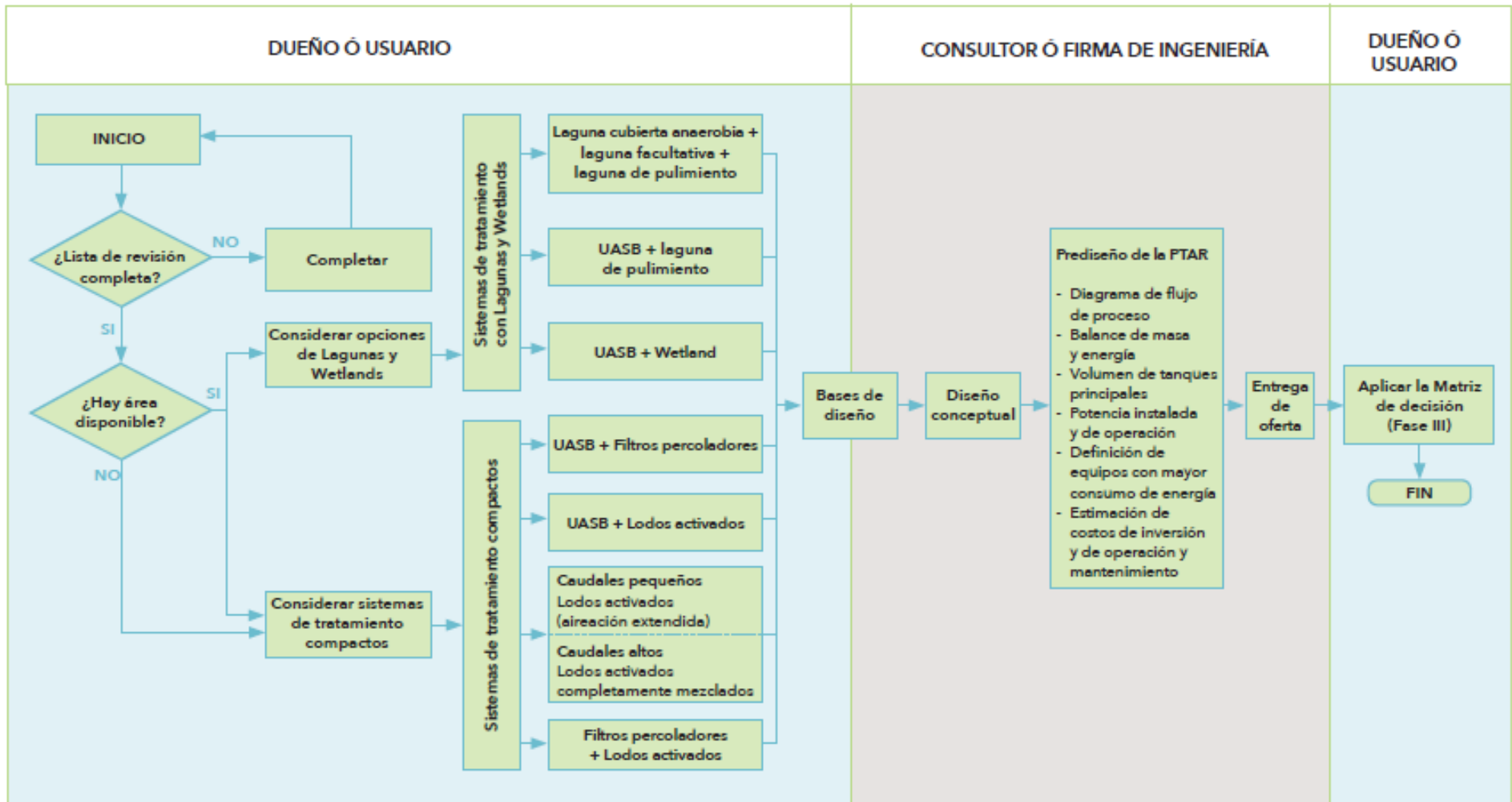


Figura 37 Diagrama de bloques para la preselección de la tecnología.

Fuente: (Noyola, Morgan Sagastume, & Guereca , 2013)

1. Para iniciar el algoritmo de análisis es necesario que las preguntas anteriormente planteadas (33 preguntas) se encuentre completadas.
2. Se continua con el filtrado de tecnologías aplicables al lugar del proyecto, considerando si existe área como para proyectos amplios o compactos -deberá también tenerse en cuenta la topografía y el tipo de suelo- recomiendan en caso de existir una gran área preferir sistemas lagunares o humedales artificiales, en caso de no tenerse área deberán contemplarse sistemas convencionales de tratamiento (p.e. lodos activados, UASB, filtros percoladores, etc.)
3. De entre los trenes de tratamiento usualmente usados en Latinoamérica, deberán ser analizados por el consultor y en caso de no usar los propuestos, aconsejan el desarrollo de una licitación con tecnología abierta para el diseño conceptual y prediseño de la PTAR para entregar oferta.
4. Sea que se establezcan las alternativas fijas o abiertas se deben contemplar como requisitos evaluativos mínimos de las ofertas, los siguientes aspectos:

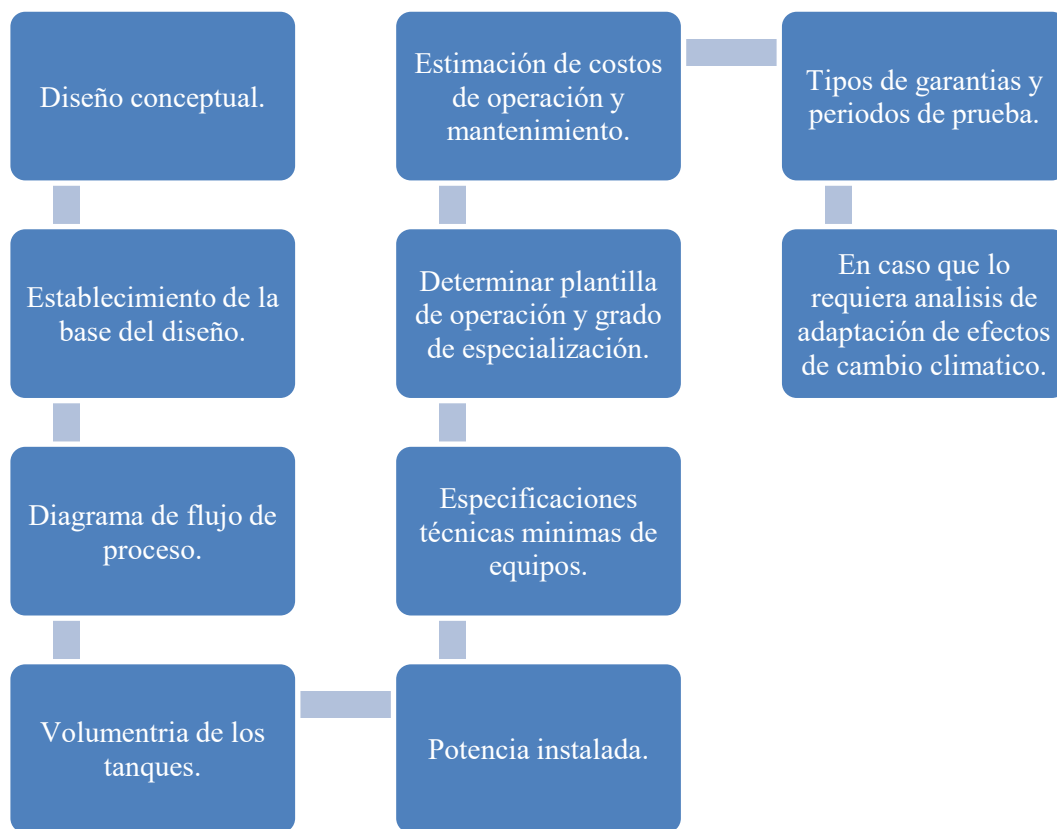


Figura 38 Aspectos conceptuales de prediseño.
Fuente: (Noyola, Morgan Sagastume, & Guereca , 2013)

6.3.3 Fase III – Evaluación y selección de tecnologías

Tal y como se indica en el manual de la UNAM, la metodología de evaluación propuesta se basa en la aplicación de una matriz de decisión. En esta se evalúan distintos aspectos del proceso de tratamiento, calificando según los criterios de los expertos, así:

Funcionamiento de la matriz

A continuación, se sintetiza el funcionamiento de la matriz (5 columnas y 28 renglones):

- En la columna A se representan los valores de ponderación para los criterios a evaluar, identificados en la columna B. La suma de los valores ponderados de la columna A debe ser igual a 100, los valores puestos en la columna A deben ser fijados por acuerdo entre las personas participantes del proyecto, teniendo en cuenta la importancia dentro del proyecto.
- En la columna B están los rubros o criterios a evaluar.
- En la columna C se evaluará cada criterio de la columna B dando valores de: 0 si no aplica, 1 si cumple de forma deficiente, 3 cuando cumple de manera adecuada y 5 cuando cumple en forma muy buena o excelente.
- En la columna D se debe dividir la calificación asignada de la columna C entre la calificación máxima (cinco - 5). Dicho procedimiento se debe hacer en todas las casillas excepto en las casillas de sumatorias: 7.3D, 8.5D, 9.6D y 10.7D.
- En la columna E se debe multiplicar el valor de la columna D con los puntajes de ponderación, columna A, finalmente se suman todos los renglones de la columna E para obtener la calificación global en la casilla 11E del proceso evaluado bajo las condiciones ponderadas de la columna A.

Tabla 14. Rubros o criterios en la matriz de decisión.

	A	B	C	D	E
#	%	Proceso evaluado _____ Rubros o criterios evaluados	Calificación	C/5	D*A
1.0		APLICABILIDAD DEL PROCESO			
2.0		GENERACIÓN DE RESIDUOS			
3.0		ACEPTACIÓN POR PARTE DE LA COMUNIDAD			
4.0		GENERACIÓN DE SUBPRODUCTOS CON VALORES ECONÓMICOS O DE REUSO			
5.0		VIDA ÚTIL			
6.0		REQUERIMIENTOS DE ÁREA			
7.0		COSTO			

	A	B	C	D	E
#	%	Proceso evaluado _____ Rubros o criterios evaluados	Calificación	C/5	D*A
7.1		Inversión			
7.2		Operación y mantenimiento			
7.3		Sumar las casillas 7.1 y 7.2 y dividir entre 10. Anotar el resultado en la casilla 7.3D.			
8.0		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN			
8.1		Criterios de diseño			
8.2		Experiencia del contratista			
8.3		Tecnología ampliamente aprobada			
8.4		Complejidad en la construcción y equipamiento			
8.5		Sumar las casillas 8.1C, 8.2C, 8.3C y 8.4C y dividir el total entre 20. Anotar el resultado en la casilla 8.5D.			
9.0		OPERACIÓN			
9.1		Flexibilidad de operación			
9.2		Confiabilidad del proceso			
9.3		Complejidad de operación del proceso			
9.4		Requerimiento de personal			
9.5		Disponibilidad de repuestos y centros de servicio			
9.6		Sumar las casillas 9.1C, 9.2C, 9.3C, 9.4C y 9.5C y dividir el total entre 25. Anotar el resultado en la casilla 9.6D.			
10.0		ENTORNO			
10.1		Influencia de la temperatura			
10.2		Producción de ruido			
10.3		Contaminación visual			
10.4		Producción de olores ofensivos			
10.5		Generación de gases de efecto invernadero (huella carbono)			
10.6		Condiciones para la reproducción de animales dañinos			
10.7		Sumar las casillas 10.1C, 10.2C, 10.3C, 10.4C, 10.5C y 10.6C y dividir el total entre 30. Anotar el resultado en la casilla 10.7D			
11.0		SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 11E			

Fuente: (Noyola, Morgan Sagastume, & Guereca , 2013)

Definición de los valores de ponderación de los rubros

Cada uno de los criterios tenidos en cuenta dentro de la matriz de decisión son establecidos por el panel de expertos con base en la experiencia de los especialistas en características similares (población, altura sobre el nivel del mar, temperatura, etc.) y son consignadas en el documento de guía desarrollado por la UNAM.

- Aplicabilidad del proceso.
- Generación de residuos.
- Aceptación por parte de la comunidad.
- Generación de subproductos con valor económico o de reúso.
- Vida útil.
- Requerimiento de área.
- Costo.
- Diseño y construcción.
- Operación.
- Entorno.

6.4 Metodología Boliviana

La guía desarrollada por el CENTA (2021) es un instrumento de apoyo a la toma de decisiones de técnicos y planificadores en el sector de saneamiento básico, buscando establecer para cada situación el mejor tratamiento para las aguas residuales generadas; textualmente indica: *“Entendiendo por tratamiento más **adecuado**, aquél que además de ser el óptimo desde el punto de vista técnico, económico, social y ambiental, asegure el funcionamiento eficaz de la instalación durante toda su vida útil.*

Esta guía desarrollada en Bolivia con la colaboración del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana de España, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas - CEDEX y el Banco Interamericano de Desarrollo – BID; propone una metodología sencilla y práctica basada en el conocimiento de los tratamientos y de las condiciones locales, evaluando y seleccionando alternativas a través de la identificación de criterios y la evaluación de los mismos en matrices multicriterio (CENTA, 2021).

A continuación, como lo establece el autor se describen los elementos que constituyen un problema de decisión:

- **Alternativas:** Constituyen los diferentes enfoques para la resolución del problema; en el caso de problemas de decisión multicriterio, las alternativas se definen como el conjunto de soluciones, estrategias, acciones, decisiones posibles que se deben analizar durante el proceso de resolución del problema en consideración. La descripción de cada alternativa debe mostrar de manera clara como resuelve el problema definido y en qué difiere de las otras alternativas. El conjunto de alternativas se designa por $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, donde A_i ($i= 1,2, \dots, m$) son cada una de las posibilidades (CENTA, 2021).
- **Criterios de decisión:** los criterios de decisión $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, se definen como las condiciones o parámetros que permiten discriminar alternativas y establecer las preferencias del decisor. Son elementos de referencia en base a los cuales se realiza la decisión. (CENTA, 2021)
- **Pesos:** los pesos o ponderaciones son las medidas de la importancia relativa que los criterios de decisión -en un caso concreto- tienen para el decisor; asociado con los criterios se asigna un vector de pesos $[P] = [P_1, P_2, \dots, P_n]$, siendo n el número de criterios. El peso P_i refleja la importancia relativa del criterio C_i en la decisión. (CENTA, 2021)
- **Matriz de valoración o de decisión:** una vez establecidos los criterios de decisión y sus pesos asociados, el evaluador es capaz de dar para cada uno de los criterios considerados y para cada alternativa, un valor numérico a_{ij} , que expresa una valoración, o juicio, de la alternativa A_i frente al criterio C_j . Cada columna de la matriz recoge las valoraciones emitidas por el decisor de todas las alternativas respecto al criterio C_i . (CENTA, 2021).

Tabla 15 Matriz de decisión

		CRITERIOS Y PESOS ASOCIADOS					
		C_1	C_2	....	C_j	....	C_n
		P_1	P_2	....	P_j	....	P_n
ALTERNATIVAS	A_1	a_{11}	a_{12}	....	a_{1j}	....	a_{1n}
	A_2	a_{21}	a_{22}	....	a_{2j}	....	a_{2n}

	A_i	a_{i1}	a_{i2}	....	a_{ij}	....	a_{in}
	A_m	a_{m1}	a_{m2}	....	a_{mj}	....	a_{mn}

Fuente: (CENTA, 2021)

6.4.1 Instrumento de análisis para la evaluación y selección de las alternativas

En el diagrama siguiente -propuesto por el documento técnico boliviano- se tiene la metodología de decisión propuesta y se establecen y definen los elementos que componen el sistema de decisión. (CENTA, 2021).

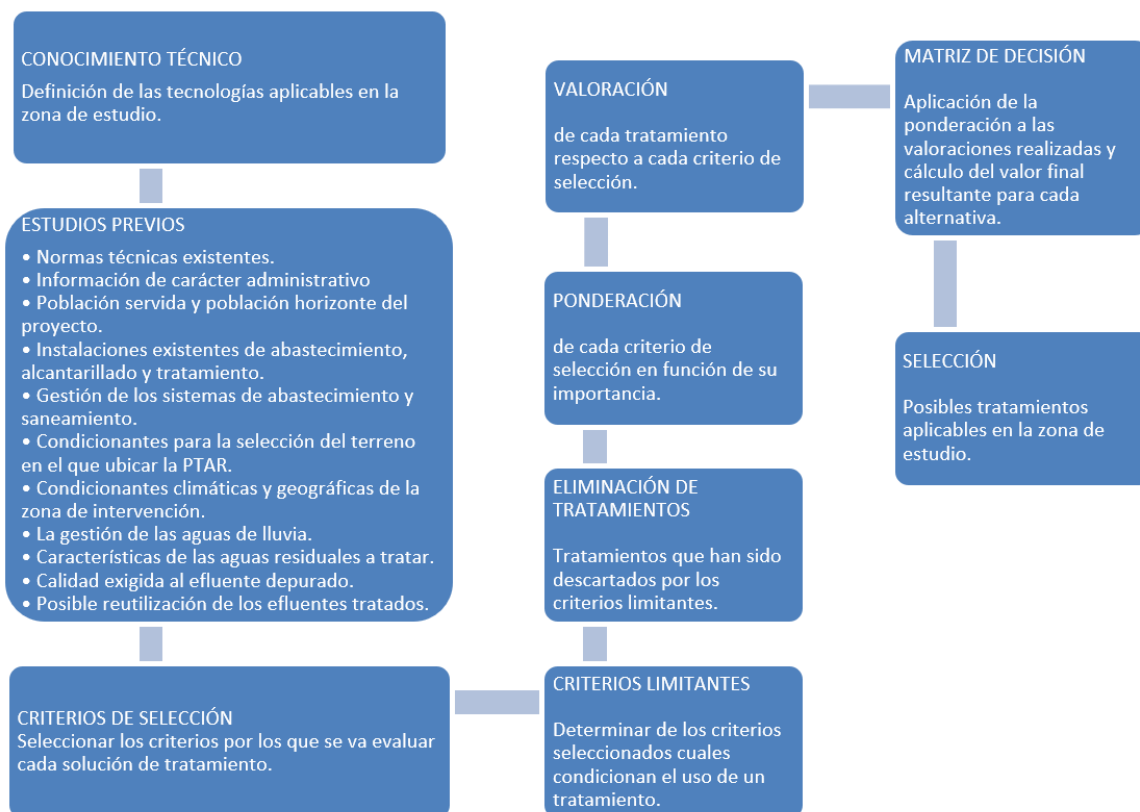


Figura 39 Diagrama de la metodología de decisión propuesta. Fuente: (CENTA, 2021)

A. CONOCIMIENTO TÉCNICO.

Para el análisis de los evaluadores se preestablecen líneas de tratamiento, por ejemplo, como los que se encuentran propuestos por el documento original:

Tabla 16 Líneas de tratamiento y sus abreviaturas

Línea de tratamiento	Abreviatura
Pretratamiento + Tanques Imhoff + Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente + Lagunas Facultativas	Línea 1
Pretratamiento + Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente + Lagunas Facultativas	Línea 2
Pretratamiento + Lagunas Anaerobias + Lagunas Facultativas Línea 3	Línea 3
Pretratamiento + Tanques Imhoff + Humedales Artificiales de Flujo Superficial Horizontal	Línea 4.1

Línea de tratamiento	Abreviatura
Pretratamiento + Tanques Imhoff + Humedales Artificiales de Flujo Superficial Vertical	Línea 4.2
Pretratamiento + Lombrifiltros	Línea 5
Pretratamiento + Tanques Imhoff + Filtros Percoladores + Sedimentadores Secundarios	Línea 6.1
Pretratamiento + Sedimentadores Primarios + Filtros Percoladores + Sedimentadores Secundario	Línea 6.2
Pretratamiento + Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente + Filtros Percoladores + Sedimentadores Secundarios	Línea 6.3
Pretratamiento + Tanques Imhoff + Contactores Biológicos Rotativos + Sedimentadores Secundarios	Línea 7.1
Pretratamiento + Sedimentadores Primarios + Contactores Biológicos Rotativos + Sedimentadores Secundarios	Línea 7.2
Pretratamiento + Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente + Contactores Biológicos Rotativos + Sedimentadores Secundarios	Línea 7.3
Pretratamiento + Aireaciones Extendidas + Sedimentadores Secundarios	Línea 8.1
Pretratamiento + Aireaciones Extendidas + Sedimentadores Secundarios + Espesadores de Lodos por Gravedad	Línea 8.2

Fuente: (CENTA, 2021)

B. ESTUDIOS PREVIOS.

Aquí se consideran todos los trabajos, investigaciones, normas, etc. ver Figura 39 que como antecedentes apoyan la selección y el diseño de las plantas de tratamiento de aguas residuales según los condicionamientos y factores que precisan ser conocidos previamente en profundidad, esto busca garantizar que las instalaciones se adecúan convenientemente a las condiciones reales del entorno y a las características de las aguas a tratar.

C. CRITERIOS DE SELECCIÓN.

Se agrupan en ocho grandes grupos: 1) eficacia de remoción, 2) terrenos disponibles, 3) aceptación social, 4) características medioambientales, 5) impactos medioambientales, 6) generación de lodos, 7) operación y mantenimiento y 8) costos de construcción, operación y mantenimiento.

D. CRITERIOS LIMITANTES.

Una vez establecidos los criterios de selección, deben señalarse aquellos que para la situación y/o lugar de implantación concreta que se analiza, pueden ser restrictivos para alguna de las alternativas de tratamiento propuestas dentro del documento técnico, haciendo así que estas queden excluidas desde el principio (CENTA, 2021).

E. PONDERACIÓN.

Cada criterio de selección se debe ponderar con un peso, que será mayor o menor dependiendo de la importancia relativa en relación con los demás; el sistema de ponderación es potestativo del evaluador, pero siempre deberá ser sustentado para que todas las entidades intervinientes en el proyecto conozcan su justificación. (CENTA, 2021). Una de las maneras para otorgar los pesos es el siguiente:

- Establecimiento de un peso para cada criterio como un porcentaje de un total de 100.
- Clasificando la importancia de cada factor en una gama de niveles y asignando pesos que luego se introducen como coeficientes multiplicadores de cada uno, como en la siguiente tabla.

Tabla 17 Ponderación de los criterios de selección.

Nivel	Peso
Muy importante	4
Importante	3
Media importancia	2
Poco importante	1

Fuente: (CENTA, 2021)

F. VALORACIÓN.

Dentro de las recomendaciones para el diligenciamiento de la matriz se debe tener un orden en la evaluación, es decir que cada alternativa se valore de forma comparada a las otras en relación a cada uno de los criterios de selección.

Si bien la valoración puede ir entre 1 a 5, están sujetas a variaciones considerando la subjetividad del evaluador y circunstancias locales, es decir las valoraciones dependerán mucho del criterio del técnico responsable de la selección, el cual deberá justificar en todo caso los valores adoptados.

G. MATRIZ DE DECISIÓN.

Finalmente, se suman todas las valoraciones dadas a cada alternativa, ponderando cada factor del sumatorio por su peso correspondiente. La fórmula a aplicar para valorar cuantitativamente cada posible alternativa es la siguiente:

$$VA1 = \sum P(fi) * VA1(fi) = P(f1) * VA1(f1) + P(f2) * VA1(f2) + \dots + P(fn) * VA1(fn)$$

$$VA2 = \sum P(fi) * VA2(fi) = P(f1) * VA2(f1) + P(f2) * VA2(f2) + \dots + P(fn) * VA2(fn)$$

Donde:

- VA : valoración global dada a una tecnología determinada (A).
- $P(fi)$: ponderación dada al criterio de selección (fi), que dependerá de las circunstancias concretas que rodean al proyecto.
- $VA(fi)$: valoración dada a una tecnología determinada (A) respecto a un factor (i).

Al final del proceso, se generan tablas resumen para cada criterio de selección, en las que se muestran todas las alternativas y aparece la valoración global de cada una de ellas.

Tabla 18 Tabla resumen de selección de alternativas.

Tabla resumen comparativa entre las distintas alternativas						
Criterios de selección	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	...
A. EFICACIA DE REMOCIÓN						
A.1. Calidad exigida a los efluentes tratados						
A.2. Tipo de contaminación de las aguas residuales a tratar.						
A.3. Tolerancia a las variaciones de caudal y carga						
B. TERRENOS DISPONIBLES						
B.1. Superficie disponible						
B.2. Características constructivas de los terreno						
C. ACEPTACIÓN SOCIAL						
C.1. Aceptación por parte de la población						
C.2. Aceptación por parte de la entidad explotadora						
D. CARACTERÍSTICAS MEDIOAMBIENTALES						
D.1. Temperatura						
D.2. Pluviometría						
D.3. Altitud						
E. IMPACTOS AMBIENTALES						
E.1. Producción de malos olores						
E.2. Generación de gases de efecto invernadero						
E.3. Generación de ruidos						
E.4. Impacto visual						
F. GENERACIÓN DE LODOS						
F.1. Cantidad de lodos generados						
F.2. Estabilidad de los lodos generados						
G. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO						
G.1. Requerimientos de personal cualificado						
G.2. Disponibilidad de repuestos y de servicio técnico						
H. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO						
H.1. Costos de construcción						
H.2. Costos de operación y mantenimiento						
TOTAL						

Fuente: (CENTA, 2021)

H. SELECCIÓN.

Después de llevar a cabo todo el proceso de selección, no tiene por qué existir una única alternativa como solución (aquella que alcance una mayor puntuación); sino quizá dos o más alternativas tienen valoraciones finales semejantes, por lo que a partir de la comparación de los aspectos en que más se diferencien y en especial de las preferencias del operador, se podrá tomar la decisión definitiva

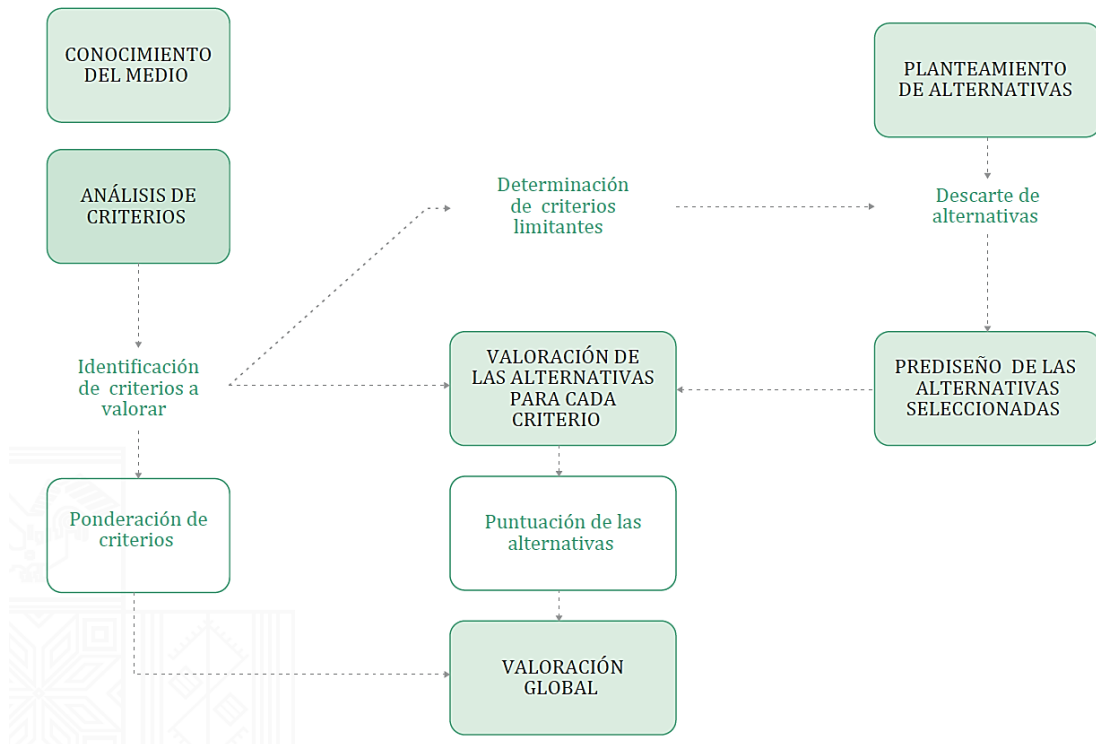


Figura 40 Esquema del proceso de matrices de selección aplicado en proyectos de saneamiento básico.

Fuente: (CENTA, 2021)

6.5 Comparación de las metodologías

Con las pasadas cuatro metodologías de selección usadas y mediante un cuadro comparativo se analizan sus fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas, con el fin de diferenciar de manera objetiva cuál de estas es mejor para implementar en Colombia.

Tabla 19 Matriz de análisis metodología norteamericana y brasilera.

Análisis de las cuatro metodologías de selección de alternativas de tratamiento de agua residual doméstica municipal				
	Fortalezas	Debilidades	Oportunidades	Amenazas
Metodología Norteamericana	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fue un instrumento de planificación altamente usado para la selección de tratamiento de aguas residuales municipales en EEUU. 2. Tiene en cuenta los impactos ambientales (agua, Suelo, aire, subsuelo, entre otras). 3. Análisis del riesgo de la implementación de tecnologías innovadoras. 4. Se tiene en cuenta la eficiencia energética en los análisis de las alternativas. 5. Cuenta con anexos técnicos sobre la aplicación de sistemas de tratamiento para el desarrollo de la metodología. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fue desarrollada en el año 1979, se encuentra desactualizada. 2. Las alternativas planteadas como innovadoras, ya han sido probadas en el continente americano. 3. Su enfoque va dirigido al análisis de los criterios económicos - Costo mínimo de implementación. 4. Es un instrumento extenso para la selección de sistema de tratamiento en America Latina. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Actualización de las alternativas planteadas en el documento técnico. 2. Implementar nuevas tecnologías o variantes tecnológicas para ser desarrolladas en el continente americano. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Al encontrarse desactualizado no esta siendo aplicada a nivel gubernamental en EEUU. 2. Se evidencia que ha sido implementada en proyectos de gran impacto en ciudades en Latinoamérica, sin embargo al tener en cuenta el costo mínimo de implementación como variable importante, generalmente se tiende a direccionar a procesos de bajo CAPEX 2. Debido a que en Colombia no cuenta con una directriz para la metodología de selección de tratamiento de aguas residuales municipales. no es la única alternativa posible para ser implementada en Latinoamérica y en nuestro país.
Metodología Brasilera	<ol style="list-style-type: none"> 1. Usa un software propio para la selección del tratamiento de agua residual. 2. Se contempla el desarrollo de la comunidad en relación con su capacidad para soportar una tecnología (cultural, social, política y económica). 3. Es un instrumento adecuado para ser implementado en America Latina para la selección de tratamiento de aguas residuales municipales. 4. Cuenta con anexos técnicos sobre la aplicación de sistemas de tratamiento para el desarrollo de la metodología. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. No se ha generado una adecuada divulgación del Software desarrollado para ser implementado por diseñadores y consultores en la planificación de sistema a nivel municipal. 2. Debe tener una avance en la planificación (area definida, análisis de calidad de agua del efluente y del cuerpo receptor) para ser aplicado el instrumento de selección. 3. Es necesario la implementación de calidad de agua en el cuerpo de agua para el análisis de alternativas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La adecuada divulgación del Software a nivel de consultores privados, fortalecerá la selección de alternativas a nivel gubernamental. 2. Implementar otras variables de análisis para realizar la selección de la alternativas de manera holística. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Al ser necesario la implementación del modelo de calidad de agua en el análisis de alternativas, implica mayores esfuerzos económicos y de tiempo para lograr la adecuada evaluación preliminar de la tecnología a selecciona para ser aplicados en Latinoamérica. 2. Para la implementación de la herramienta de análisis es necesario tener información completa del lugar donde se implementara el sistema de tratamiento, información que generalmente no se cuenta. 3. Debido a que en Colombia no cuenta con una directriz para la metodología de selección de tratamiento de aguas residuales municipales. no es la única alternativa posible para ser implementada en Latinoamérica y en nuestro país.

Fuente: (Dimas Turmequé , 2022)

Tabla 20 Matriz de análisis metodología mexicana y boliviana.

Análisis de las cuatro metodologías de selección de alternativas de tratamiento de agua residual doméstica municipal				
	Fortalezas	Debilidades	Oportunidades	Amenazas
Metodología Mexicana	<ol style="list-style-type: none"> 1. El documento técnico fue encaminado al proyecto "Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales de América Latina y el Caribe. 2. El desarrollo de la matriz se tiene en cuenta componentes ambientales, técnico, económico y social. 3. Es un instrumento adecuado para ser implementado en América Latina para la selección de tratamiento de aguas residuales municipales. 4. Cuenta con anexos técnicos sobre el ciclo de vida de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales e impactos ambientales de 9 trenes de tratamiento. 5. Es una metodología de fácil implementación en proyectos de planificación gubernamentales Para definir la tecnología más viable. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Falta adoptar otros criterios de evaluación para fortalecer la matriz de selección de alternativas, como la gestión del riesgo, eficiencia energética, entre otros. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La implementación de metodología de panel de expertos favorece la objetividad de la selección de los tratamientos de agua residual doméstica municipal. 2. Metodología que puede ser adoptada como política pública para análisis de tecnologías en proyectos en fase de planeación. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Debido a que en Colombia no cuenta con una directriz para la metodología de selección de tratamiento de aguas residuales municipales. no es la única alternativa posible para ser implementada en Latinoamérica y en nuestro país.
Metodología Boliviana	<ol style="list-style-type: none"> 1. Es un documento técnico robusto elaborado con apoyo de varias instituciones Europeas y adoptado por el gobierno de Bolivia para fortalecer el sector de saneamiento desde el nivel institucional hasta el sector privado 2. El desarrollo de la matriz se tiene en cuenta componentes ambientales, técnico, económico y social. 3. Es un instrumento adecuado para ser implementado en América Latina para la selección de tratamiento de aguas residuales municipales. 4. Cuenta con anexos técnicos sobre conceptos y diseños de sistemas de tratamiento de agua residual doméstica 5. Es una metodología que esta siendo adoptada en Bolivia. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Falta adoptar otros criterios de evaluación para fortalecer la matriz de selección de alternativas, como la gestión del riesgo, eficiencia energética, entre otros. 2. Se presenta dentro del documento un análisis previo de posibles trenes de tratamiento con una valoración previa, generando análisis subjetivos antes de ser implementada la matriz por parte de consultores o entidades estatales. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La implementación de metodología de panel de expertos favorece la objetividad de la selección de los tratamientos de agua residual doméstica municipal. 2. Da lineamientos técnicos y normativos para consultores y entidades estatales en el momento de revisar los proyectos de saneamiento básico. 3. Al contar con la participación de la comunidad y de la entidad que gestiona el tratamiento, se generara transparencia en proyectos de saneamiento básico. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Debido a que en Colombia no cuenta con una directriz para la metodología de selección de tratamiento de aguas residuales municipales. no es la única alternativa posible para ser implementada en Latinoamérica y en nuestro país.

Fuente: (Dimas Turmequé , 2022)

El manual de la EPA (1980) dice seleccionar tecnologías de tratamiento innovadoras, eficientes y de bajo costo; sin embargo, por antigüedad y no actualización, está fuera de contexto del momento por lo que no considera nuevas tecnologías, ni equipos eficientemente energéticos como tampoco condiciones sociales o ambientales; siendo además muy discutible solo enfocarse en la tecnología más económica, sin tener en cuenta otras variables. Adicionalmente este manual se desarrolla en el contexto económico de los Estados Unidos por lo que es difícilmente aplicable a Colombia.

El modelo PROSEL- I desarrollado por el profesor Marco Antonio Almeida de Souza (1996) aborda bien los aspectos técnicos, sociales y económicos de un proyecto; sin embargo, por la antigüedad de su plataforma (software) es de difícil acceso y uso, al ser poco conocida por consultores y/o instituciones educativas en Colombia y Latinoamérica no genera alto impacto para la selección de alternativas de PTARD.

La guía de la UNAM destaca por su fácil uso, cercanía temporal, criterios usados para la evaluación, inclusión de actores en la evaluación de criterios, fortaleciendo la adecuada participación y quizá una selección objetiva de los tratamientos del agua residual doméstica.

La guía técnica del ministerio de medio ambiente y agua de Bolivia (CENTA, 2021), es una metodología implementada a nivel gubernamental, donde se analizan varios criterios desde diferentes puntos de vista (técnico, social, ambiental y económico) abordando de manera objetiva la selección de alternativas. Cabe resaltar que al igual de la metodología de la UNAM, la matriz usada por el CENTA es de fácil implementación e intuitiva.

Al realizar el anterior análisis de las diferentes características internas y externas con la metodología DOFA (ver Tabla 19 y Tabla 20), se argumenta que para el análisis de una ingeniería de planificación gubernamental por parte de diseñadores y consultores, se debe tener una metodología que argumente adecuadamente los criterios y las evaluaciones emitidas por los expertos, razón por la cual la matriz usada por la UNAM, muy similar a la de CENTA, favorecen la adecuada selección objetiva de los tratamientos de agua residual doméstica.

Habiéndose escogido finalmente la metodología mexicana, en el siguiente capítulo esta se toma como base añadiéndole el enfoque de eficiencia energética en la selección de alternativas de sistemas de tratamiento de agua residual municipal.

7 Criterios para Colombia en la evaluación de las PTARD en función de la eficiencia energética.

En este capítulo se describen los criterios de evaluación que se proponen para la matriz de selección de alternativas de tratamientos de agua residual doméstica, teniendo como específica referencia ser energéticamente eficientes y reducción de las emisiones de GEI.

7.1 Consumo energético

El impacto ambiental global del ingente consumo energético de nuestra sociedad hace necesario propender por el uso eficiente de la energía. En consecuencia, dentro de la matriz de evaluación de la tecnología más viable para tratar las aguas residuales domésticas se considera que el primer criterio de evaluación es el “*consumo energético*”.

Se requiere entonces que consultores y/o diseñadores de PTAR's evalúen el gasto energético preliminar de los equipos electromecánicos (bombas, maquinaria en tanques, válvulas, comunicaciones, iluminación, etc.) necesarios para el correcto funcionamiento del sistema de tratamiento que están proponiendo, empleando para ello al menos los cálculos teóricos expuestos en el numeral 5.2 “*Cálculo teórico del consumo energético en PTAR*”, como instrumento para la identificación de la(s) alternativa(s) más eficiente(s) en consumo energético.

7.2 Eficiencia energética

Consecuencia del anterior criterio, en este segundo criterio se pretende favorecer el uso de energías renovables en equipos electromecánicos o cogenerar energía para ser aprovechada en la operación del sistema de tratamiento de agua residual doméstica. A este criterio de evaluación se le denomina “*Eficiencia energética*”, en consecuencia, se abordan aquellas fuentes que se consideran “limpias”.

Energía solar

Dispositivo constituido por laminas muy delgadas de un material semiconductor, las celdas fotovoltaicas convierten luz solar directamente en electricidad. Como un método practico que, a consultores, diseñadores y/o evaluadores de PTAR's les permitiría evaluar el potencial de generación energética a través del sol, con el uso del Atlas Eólico y Solar Mundial (<https://www.enair.es/es/app>) pueden realizarse cálculos y por ende criterios para toma de decisión. Otro ejemplo es el desarrollo de la empresa ENAIR que mediante fuentes de datos internacionales establece los cálculos de energía solar empleando fuentes como son: PVGIS para energía solar y DTU, MERRA-2, VAISALA y BBDD de parte de la NASA.

Energía eólica

Dispositivo que emplea aerogeneradores en locaciones donde el viento es constante, las corrientes de aire pueden ser transformadas en electricidad para ser empleada en equipos electromecánicos de los PTARD. Para facilidad de consultores, diseñadores y/o evaluadores sobre la posibilidad del uso de esta fuente, el Atlas Eólico y Solar Mundial (<https://www.enair.es/es/app>) permite adentrarse en el comportamiento de los vientos y con ello tomar decisiones. También el desarrollo de ENAIR aborda cálculos de energía eólica usando la calculadora: PVGIS y DTU, MERRA-2, VAISALA y BBDD de la NASA; sin embargo, en la complejidad de los cálculos se dan márgenes de error en las medidas de viento que varían del 1 al 15% siendo también importante considerar que no se aplican pérdidas por las turbulencias producidas por objetos cercanos.

Energía a partir de biomasa

El aprovechamiento de los residuos líquidos de la actividad humana mediante la digestión biológica -metabolización de la materia orgánica en gases de elevado contenido calorífico a ser transformados en energía eléctrica- es una de las alternativas de cogeneración en las PTAR's. Sin embargo, esta energía a partir de biomasa no es usualmente suficiente para suplir las necesidades de consumo de los equipos mecánicos, pero en todo caso debe revisarse la factibilidad de su uso.

Energía hidráulica.

El aprovechamiento de las diferencias de nivel entre estructuras de una PTARD para emplear la energía cinética de las masas de agua en movimiento, transfiriendo dicha energía a una turbina y luego a un generador de electricidad, es una alternativa de cogeneración energética que los diseñadores, consultores y/o evaluadores deben considerar para optar por la eficiencia energética.

7.3 Tecnología eficiente en remoción de materia orgánica y nutrientes

El tercer criterio “tecnología eficiente en remoción de materia orgánica y nutrientes” resalta la validez teórica de todos los procesos que componen el PTARD (ver Tabla 12) propuestos por el consultor y/o diseñador, sirviendo para evaluar comparativamente diferentes configuraciones de los trenes de proceso (ver Figura 41) respecto a los objetivos de calidad necesarios para verter en diferentes cuerpos de agua.

Entonces, el consultor-diseñador deberá soportar las eficiencias teóricas del sistema de tratamiento propuesto (I Anexo:) y en casos donde los objetivos de calidad para verter sean más restrictivos y/o se empleen nuevas tecnologías, deberá verificarse la eficiencia en remoción de materia orgánica, nutrientes, etc. y el cumplimiento de las normas, recomendándose que en los análisis y justificación del sistema se incluyan soportes técnicos que indiquen el comportamiento en las condiciones donde será instalada en función de la temperatura, altura sobre el nivel del mar, variación de parámetros de calidad del afluente, entre otros.

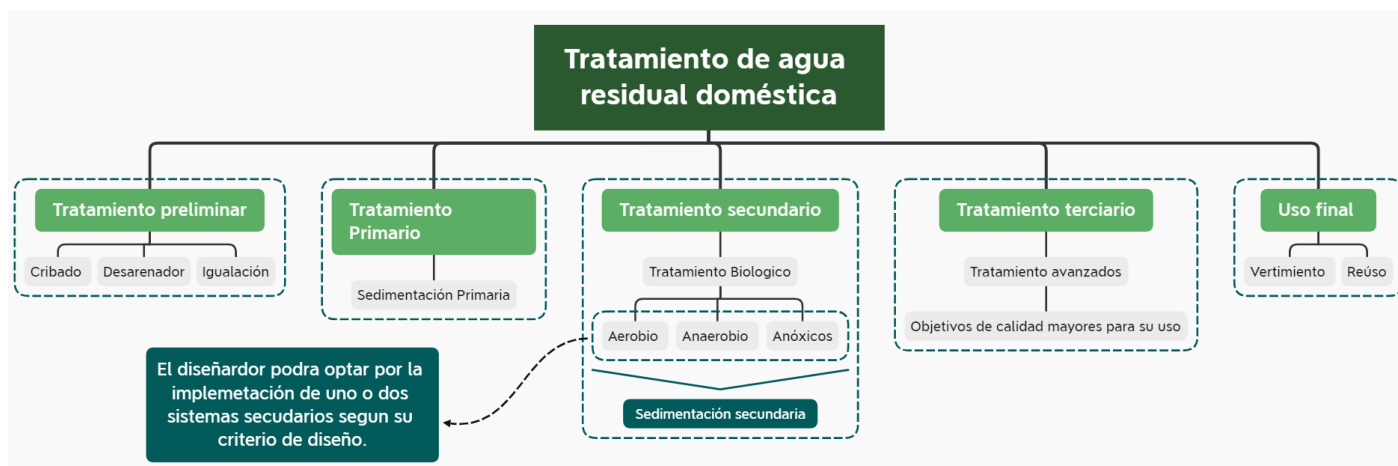


Figura 41 Procesos de tratamiento de agua residual doméstica.

Fuente: (Dimas Turmequé , 2022)

7.4 Costo efectividad

Los equipos mecánicos que requiere el tratamiento del agua residual doméstica consumen electricidad que debe ser cuantificable para su pago, pero actualmente el precio del servicio de la energía que debe pagar cada cliente en el sistema interconectado nacional (en este caso la empresa de servicios públicos o el privado concesionario para la operación de la PTAR) no lo determina la electrificadora sino la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas). Al momento se encuentra

vigente la resolución 119 del 21 de diciembre de 2007 “Por la cual se aprueba la fórmula tarifaria general que permite a los comercializadores minoristas de electricidad establecer los costos de prestación del servicio a usuarios regulados en el Sistema Interconectado Nacional.” (CREG, 2007) en donde se establece el costo unitario de prestación del servicio de energía como se muestra a continuación:

$$CUv_{n,m,i,j} = G_{m,i,j} + T_m + D_{n,m} + Cv_{m,i,j} + PR_{n,m,i,j} + R_{m,i} + CUf_{m,j} = Cf_{m,j}$$

Donde:

- n: Nivel de tensión de conexión del usuario.
- m: Mes para el cual se calcula el costo unitario de prestación del servicio.
- i: Comercializador minorista.
- j: Mercado de comercialización.
- $CUv_{n,m,i,j}$: Componente variable del costo unitario de prestación del servicio (\$/kWh) para los usuarios conectados al nivel de tensión n, correspondiente al mes m, del comercializador minorista i, en el mercado de comercialización j.
- $G_{m,i,j}$: Costo de compra de energía (\$/kWh) para el mes m, del comercializador minorista i, en el mercado de comercialización j, determinados conforme se establece en el Capítulo III de la mencionada resolución.
- T_m : Costo por uso del sistema nacional de transmisión (\$/kWh) para el mes m determinado conforme al Capítulo IV de la mencionada resolución.
- $D_{n,m}$: Costo por uso de sistemas de distribución (\$/kWh) correspondiente al nivel de tensión n para el mes m, determinados conforme al Capítulo IV de la mencionada resolución.
- $Cv_{m,i,j}$: Margen de comercialización correspondiente al mes m, del comercializador minorista i, en el mercado de comercialización j que incluye los costos variables de la actividad de comercialización, expresado en (\$/kWh) y determinado conforme al Capítulo V de la mencionada resolución.
- $R_{m,i}$: Costo de restricciones y de servicios asociados con generación en \$/kWh asignados al comercializador minorista i en el mes m, conforme al Capítulo VI de la mencionada resolución.
- $PR_{n,m,i,j}$: Costo de compra, transporte y reducción de pérdidas de energía (\$/kWh) acumuladas hasta el nivel de tensión n, para el mes m, del comercializador minorista i, en el mercado de comercialización j, determinado conforme se establece en el Capítulo VII de la mencionada resolución.
- $CUf_{m,j}$: Componente fija del costo unitario de prestación del servicio (\$/factura) correspondiente al mes m para el mercado de comercialización j.
- $Cf_{m,j}$: Costo base de comercialización (\$/factura) correspondiente al mes m, para el mercado de comercialización j.

Fuente: (CREG, 2007)

Así, de acuerdo con lo anterior cada región del país tendrá un costo de energía dependiendo de las condiciones mencionadas; de esta manera, el consultor y/o diseñador deberá indagar el costo de KWh en la zona del proyecto a ejecutar para obtener un valor para el consumo energético del sistema partiendo del hecho que sería el mínimo necesario para el correcto funcionamiento en función de los objetivos de calidad a verter. Adicionalmente dentro de las estrategias de reducción de costos energéticos (cogeneración de energía, uso de energías renovables, estrategias de venta de energía o compensación) estos cálculos deberán ser soportados y usados como instrumento de toma de decisión y análisis al momento de validar cada una de las alternativas presentadas.

7.5 Reducción de GEI.

Se estima que 5 % de los GEI emitidos a la atmosfera provienen del tratamiento de efluentes (incluyendo industriales, ganaderos y domésticos) (Parra Z, Apaza M, & Agramont a, 2010)debiendo tenerse en cuenta en la aplicación de las tecnologías eficientemente energéticas la reducción de los GEI; por esta razón en los análisis y evaluaciones de las diferentes alternativas de las PTARD, el consultor y/o diseñador deberá evaluar cuál de estas generan menor cantidad de GEI y relacionarlo con el costo ambiental, considerando que es una aproximación a lo que podría pasar. Como instrumento de análisis, se resaltan los modelos desarrollados por el IPCC descritos en el numeral **5.3 Gases de efecto invernad** y como instrumento de apoyo en el Anexo IV (Anexo: Cálculo de emisiones.) se encuentran diferentes aplicaciones, ecuaciones y constantes para sistemas de tratamiento de agua residual doméstica.

7.6 Incentivos tributarios.

El gobierno de Colombia dentro de las estrategias para el desarrollo de proyectos con visión al uso de energías renovables tiene incentivos tributarios para su implementación con la ley 1715 de 2014 donde establece “*la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional*”. (Ministerio de Hacienda y Crédito Público, 2014). Pero también el Decreto 2143 de 2015, que creo el marco legal donde se incluyen los instrumentos para la promoción de las fuentes no convencionales de energía (FNCE), como aquellas actividades interrelacionadas desarrolladas de manera coordinada para instalar capacidad de generación de energía eléctrica. Entre los incentivos se destacan los siguientes (ver Figura 41):

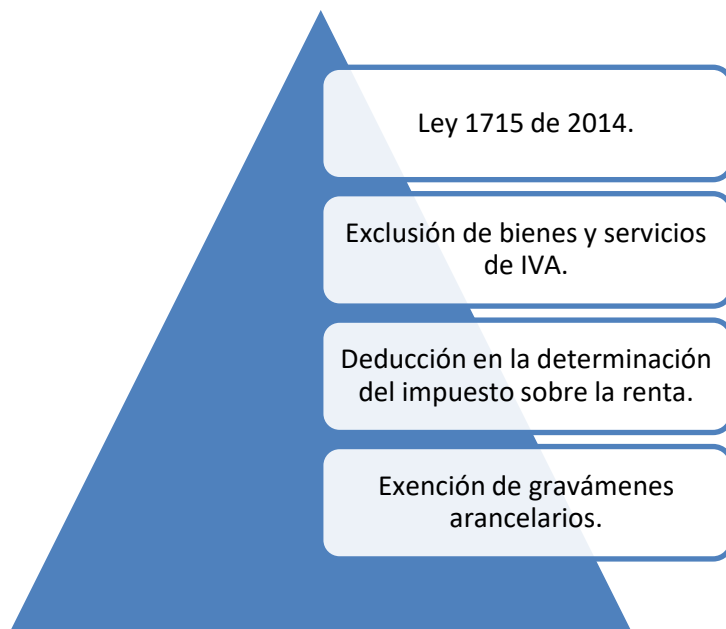


Figura 42 Incentivos tributarios.

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2014)

Esto implica que desde la planificación del proyecto el diseñador y/o consultor debe identificar las diferentes estrategias de implementación de energías no convencionales (energía solar, energía de la biomasa, energía hidráulica, etc.) para impactar favorablemente al proyecto, por ejemplo, para la compra de equipos para cogeneración de energía a partir del biogás, donde podrían tener dos opciones:

- Cogenerar energía eléctrica para alimentar los equipos del sistema de tratamiento de agua residual doméstica
- Cogenerar energía para alimentar la red nacional de energía de la zona de influencia de la PTAR y generar beneficios económicos para el proyecto

De esta manera el consultor y/o diseñador tendrá dentro de su análisis la aplicación de equipos que favorezcan energéticamente el sistema y dentro de la misma planificación estos equipos podrían aplicar para ser excluidos del arancel por importación y/o del IVA. A continuación, en la Figura 43 se encuentra las etapas del proyecto y la aplicación del incentivo:

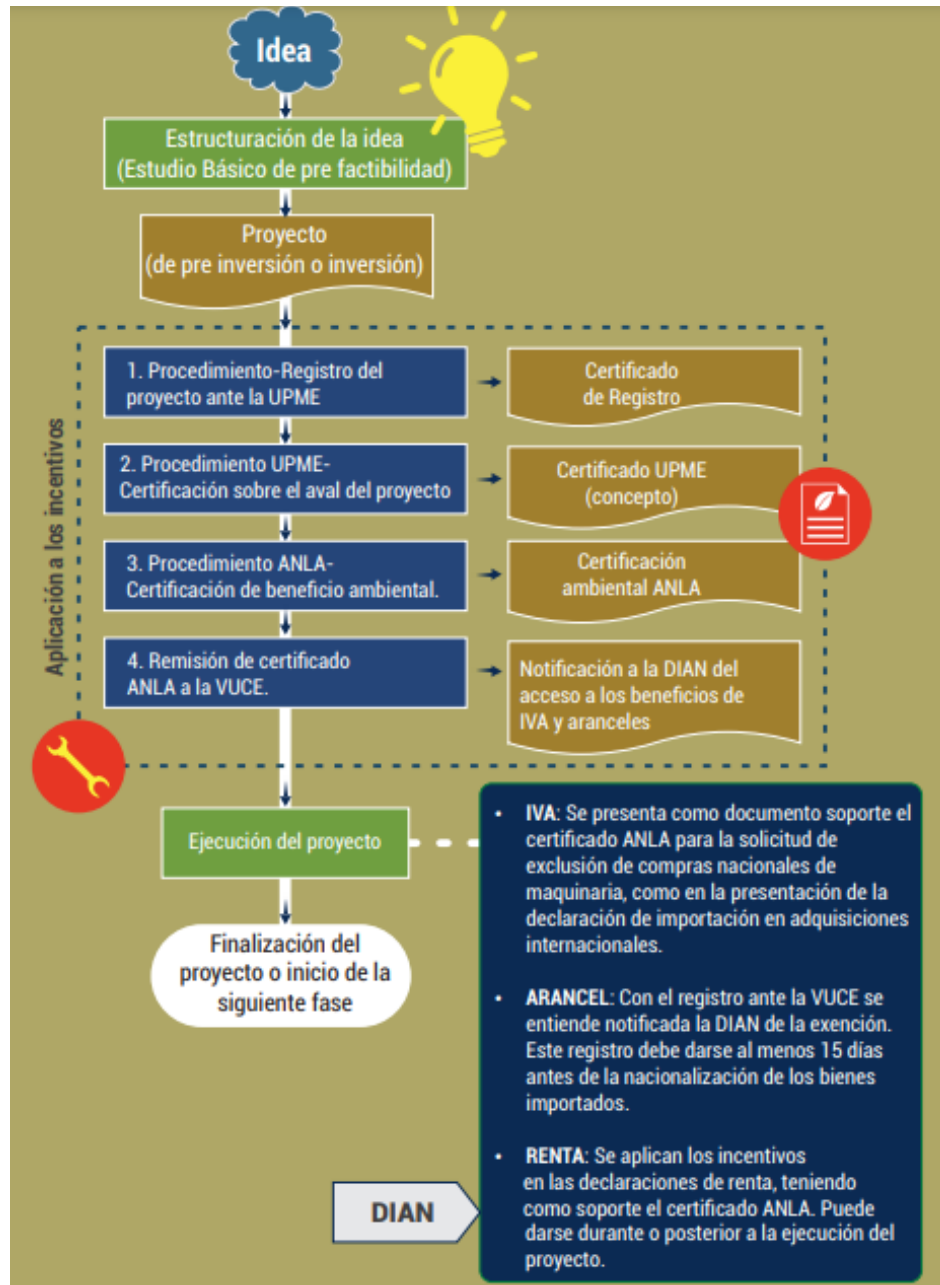


Figura 43 Etapas del proyecto y la aplicación del incentivo.
 Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2014)

8 Propuesta metodológica para la selección de alternativas de tratamiento de agua residual en pequeñas y medianas ciudades colombianas, enfatizando en criterios de eficiencia energética.

Tras el análisis de como las metodologías norteamericana, mexicana, brasilera y boliviana seleccionan los sistemas de tratamiento para el agua residual y habiendo además fijado para Colombia los criterios de eficiencia energética para la evaluación de estos. En este capítulo se propone una metodología que enfatizando en la eficiencia energética permite seleccionar las alternativas de tratamiento para las aguas residuales domésticas de pequeñas y medianas ciudades colombianas; propuesta que se basará en la metodología de la Universidad Nacional Autónoma de México (Noyola, Morgan Sagastume, & Guereca , 2013) al cumplir esta con características como:

- Facilidad de implementación
- Correlación de diferentes aspectos en cada alternativa.
- Evaluación mediante asignación de pesos para cada criterio evaluado.
- Criterios o rubros que reciben una ponderación según la importancia del proyecto.
- Permite que la evaluación cualitativa sea más objetiva.

De acuerdo con lo anterior se acondiciona la matriz de selección de alternativas enfocándose en los lineamientos de eficiencia energética para los sistemas de tratamiento de agua residual doméstica en Colombia (ver Figura 44).

MATRIZ DE EVALUACIÓN - ENFOQUE EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA					
	A	B	C	D	E
#	%	Proceso Evaluado	Calificación	C/5	D*A
		Rubros Evaluados			
1		CONSUMO ENERGÉTICO		0	0
2		EFICIENCIA ENERGÉTICA		0	0
3		TECNOLOGÍA MODERNA, CONFIABLE Y EFICIENTE		0	0
4		COSTO EFECTIVIDAD		0	0
5		REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO		0	0
6		INCENTIVOS TRIBUTARIOS		0	0
7	0%	SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 7E	X	X	0%

Figura 44 Matriz de selección de alternativas.

Fuente: (Dimas Turmequé , 2022)

8.1 Aplicación de la matriz de evaluación.

Para su implementación también se usa la metodología del “panel de expertos”, método de inclusión de profesionales para que desde su área de conocimiento aporten la importancia que debe tener cada criterio evaluado; esto sirve como herramienta de inclusión de actores en la selección de alternativas dando así una mayor validez a la toma de la decisión.

En la columna A, se fijan los pesos de cada criterio de eficiencia energética, definidos en consenso por expertos en tratamiento de aguas, eficiencia energética y/o actores relevantes del proyecto, tal que en su cruce con la fila 7 la suma de todos los criterios sea siempre del 100% (ver figura 43).

En la columna B, se encuentran los criterios de eficiencia energética descritos en el capítulo 7 **“Criterios para Colombia en la evaluación de las PTARD en función de la eficiencia energética.**

En la columna C, deberá ingresarse la calificación (ver figura 44) de parte del diseñador, consultor y/o evaluador; valoración soportada por el documento técnico de evaluación de alternativas, tal que la toma de decisiones realizada por los diferentes actores del proyecto se haga teniendo en cuenta las directrices planteadas, en este caso haciendo énfasis en la eficiencia energética

A		B	C	D	E
#	%	Proceso Evaluado Rubros Evaluados	Calificación	C/5	D*A
1		CONSUMO ENERGÉTICO		0	0
2		EFICIENCIA ENERGÉTICA		0	0
3		TECNOLOGÍA MODERNA, CONFIABLE Y EFICIENTE		0	0
4		COSTO EFECTIVIDAD		0	0
5		REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO		0	0
6		INCENTIVOS TRIBUTARIOS		0	0
7	0%	SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 7E			0%

Porcentaje de rubros evaluados

Suma de los rubros evaluados – 100%

Descripción de los rubros a evaluar enfocados a la eficiencia energética

Instrucciones de uso de la matriz.

Figura 45 Matriz de selección de alternativas - Columna A y B.

Fuente: (Dimas Turmequé , 2022)

Valor	Calificación
0	No aplica
1	Cumple de forma deficiente
3	Cumple de forma adecuada
5	Cumple de forma excelente

Figura 46 Calificación de las matrices.

Fuente: (Dimas Turmequé , 2022)

En la columna D, la calificación asignada en la columna C se divide entre la calificación máxima (cinco - 5), procedimiento que se hace en todas las casillas (tal y como se realiza en la metodología mexicana, numeral 6.3.3 “*Fase III–Evaluación y selección de tecnologías*”) (ver figura 45)

En la columna E, se ingresa el producto (columna D x columna A) para finalmente sumar todos los renglones de la columna y obtener la calificación global del proceso evaluado bajo las condiciones de eficiencia energética en la casilla 7E con el valor final de calificación de la matriz (ver figura 45).

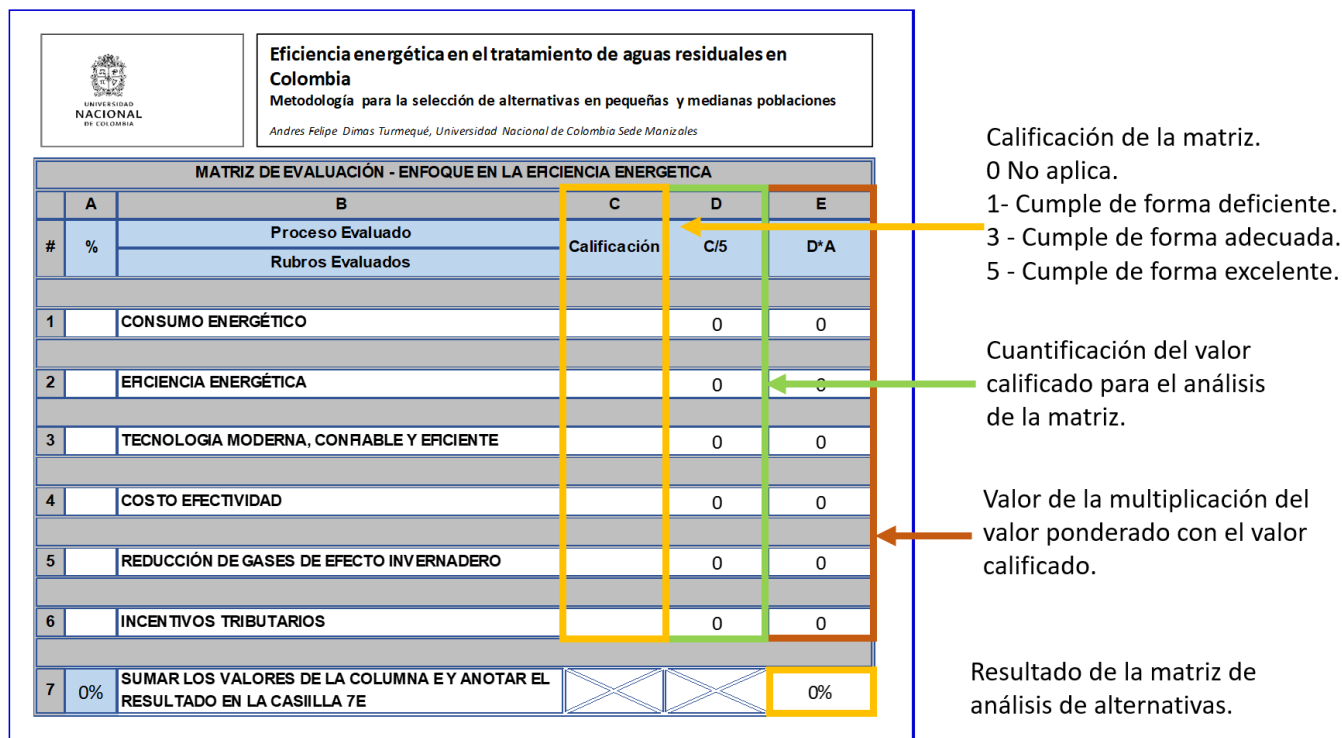


Figura 47 Matriz de selección de alternativas – Columna C, D y E.

Fuente: (Dimas Turmequé , 2022)

8.1.1 Link de descarga de la matriz

A continuación, se encuentra el link de acceso al servidor de alojamiento de archivos para descargar los anexos editables para el uso de esta, y así, obtener la matriz de análisis de eficiencia energética y la matriz de análisis multicriterio multi objetivo desarrollado en el trabajo de grado.

<https://drive.google.com/drive/folders/1- AayzCkWeaxXq3cOcf7-NGNW4NS1XLe?usp=sharing>

8.2 Validación de los criterios y la matriz de evaluación

Para realizar la validación de la matriz se evaluaron tres alternativas hipotéticas que no representan ningún proyecto en Colombia (ver tablas 13 a 16), tomando valores al azar con el fin de analizar qué tan dependientes son entre sí los valores o si cualquier calificación que se le da a una alternativa puede hacerla susceptible de ganar.

Tabla 21 Valores de las alternativas hipotéticas.

Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Consumo energético	3	1	3
Eficiencia energética	5	5	3

Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Tecnología moderna, confiable y eficiente	3	5	1
Costo efectividad	3	3	5
Reducción de gases de efecto invernadero	5	3	3
Incentivos tributarios	3	5	3

Fuente: (Dimas Turmequé , 2022)

Tabla 22 Evaluación alternativa hipotética 1.

A		B			C	D	E
#	%	Proceso Evaluado	Calificación	C/5	D*A		
		Rubros Evaluados					
1	25%	CONSUMO ENERGÉTICO	3	0,6	0,15		
2	15%	EFICIENCIA ENERGÉTICA	5	1	0,15		
3	10%	TECNOLOGIA MODERNA, CONFIABLE Y EFICIENTE	3	0,6	0,06		
4	20%	COSTO EFECTIVIDAD	3	0,6	0,12		
5	15%	REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	5	1	0,15		
6	15%	INCENTIVOS TRIBUTARIOS	3	0,6	0,09		
7	100%	SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 7E				72%	


Fuente: (Dimas Turmequé , 2022)

Tabla 23 Evaluación alternativa hipotética 2.

A		B			C	D	E
#	%	Proceso Evaluado	Calificación	C/5	D*A		
		Rubros Evaluados					
1	25%	CONSUMO ENERGÉTICO	1	0,2	0,05		
2	15%	EFICIENCIA ENERGÉTICA	5	1	0,15		
3	10%	TECNOLOGIA MODERNA, CONFIABLE Y EFICIENTE	5	1	0,1		
4	20%	COSTO EFECTIVIDAD	3	0,6	0,12		
5	15%	REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	3	0,6	0,09		
6	15%	INCENTIVOS TRIBUTARIOS	5	1	0,15		
7	100%	SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 7E				66%	


Fuente: (Dimas Turmequé , 2022)

Tabla 24 Evaluación alternativa hipotética 3.

 Eficiencia energética en el tratamiento de aguas residuales en Colombia Metodología para la selección de alternativas en pequeñas y medianas poblaciones <small>Andrés Felipe Dimas Turmequé, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales</small>					
MATRIZ DE EVALUACIÓN - ENFOQUE EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA					
	A	B	C	D	E
#	%	Proceso Evaluado	Calificación	C/5	D*A
		Rubros Evaluados			
1	25%	CONSUMO ENERGÉTICO	3	0,6	0,15
2	15%	EFICIENCIA ENERGÉTICA	3	0,6	0,09
3	10%	TECNOLOGIA MODERNA, CONFIABLE Y EFICIENTE	1	0,2	0,02
4	20%	COSTO EFECTIVIDAD	5	1	0,2
5	15%	REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	3	0,6	0,09
6	15%	INCENTIVOS TRIBUTARIOS	3	0,6	0,09
7	100%	SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 7E	X X		64%

Fuente: (Dimas Turmequé , 2022)

Tabla 25 Resumen de análisis de alternativas hipotéticas.

 Eficiencia energética en el tratamiento de aguas residuales en Colombia Metodología para la selección de alternativas en pequeñas y medianas poblaciones <small>Andrés Felipe Dimas Turmequé, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales</small>					
Item	Criterios	Rubros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
1	CONSUMO ENERGÉTICO	25%	3	1	3
2	EFICIENCIA ENERGÉTICA	15%	5	5	3
3	TECNOLOGIA MODERNA, CONFIABLE Y EFICIENTE	10%	3	5	1
4	COSTO EFECTIVIDAD	20%	3	3	5
5	REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	15%	5	3	3
6	INCENTIVOS TRIBUTARIOS	15%	3	5	3
Total		100%	72%	66%	64%

Fuente: (Dimas Turmequé , 2022)

La alternativa A es la de mejor puntaje y con el fin de validar estadísticamente el ejercicio se usa el método Chi cuadrado en el software estadístico *StatGraphics Centurion 18* ingresando los valores de la tabla 13 para obtener los siguientes resultados y la evaluación del software, así: “*Este procedimiento construye diversos estadísticos y gráficas para una tabla de doble entrada. De interés particular son las pruebas de independencia entre filas y columnas, las cuales pueden seleccionarse de la lista de Opciones Tabulares.*” (STATGRAPHICS TECHNOLOGIES, INC, 2018)

Tabla 26 Pruebas de independencia.

Prueba	Estadístico	Gl	Valor-P
Chi-Cuadrada	20,008	10	0,0292

Fuente: (STATGRAPHICS TECHNOLOGIES, INC, 2018)

Resultado de la prueba de evaluación de las alternativas hipotéticas, el valor-P es menor que 0,05 por lo que se puede rechazar con un nivel de confianza del 95,0% el que filas y columnas son dependientes. (STATGRAPHICS TECHNOLOGIES, INC, 2018).

Tabla 27 Resumen Estadístico 1

Estadístico	Simétrico	Con filas dependientes	Con columnas dependientes
Lambda	0,0833	0,0380	0,1385
Coef. de incertidumbre	0,0361	0,0293	0,0470
Somer's D	0,0161	0,0180	0,0145
Eta		0,1096	0,1707

Fuente: (STATGRAPHICS TECHNOLOGIES, INC, 2018)

Tabla 28 Resumen Estadístico 2

Estadístico	Valor	Valor-P	Gl
Coef. De contingencia	0,3002		
Cramer's V	0,2225		
Gamma Condicional	0,0216		
Pearson's R	0,0172	0,8078	200
Kendall's Tau b	0,0161	0,7839	
Kendall's Tau c	0,0179		

Fuente: (STATGRAPHICS TECHNOLOGIES, INC, 2018)

Los estadísticos de las tablas 19 y 20 miden el grado de asociación entre filas y columnas, de particular interés son el coeficiente de contingencia y lambda, los cuales miden el grado de asociación en una escala de 0 a 1. Lambda mide que tan útil es el factor de la fila -o de la columna- para predecir al otro factor (p.e. el valor de lambda con columnas dependientes es igual a 0,138462, esto significa que hay un 13,8462% de reducción en el error cuando las filas se usan para predecir a las columnas). Mientras que aquellos estadísticos con valores P, valores-P menores que 0,05 indican una asociación significativa entre filas y columnas con un nivel de confianza del 95%. (STATGRAPHICS TECHNOLOGIES, INC, 2018).

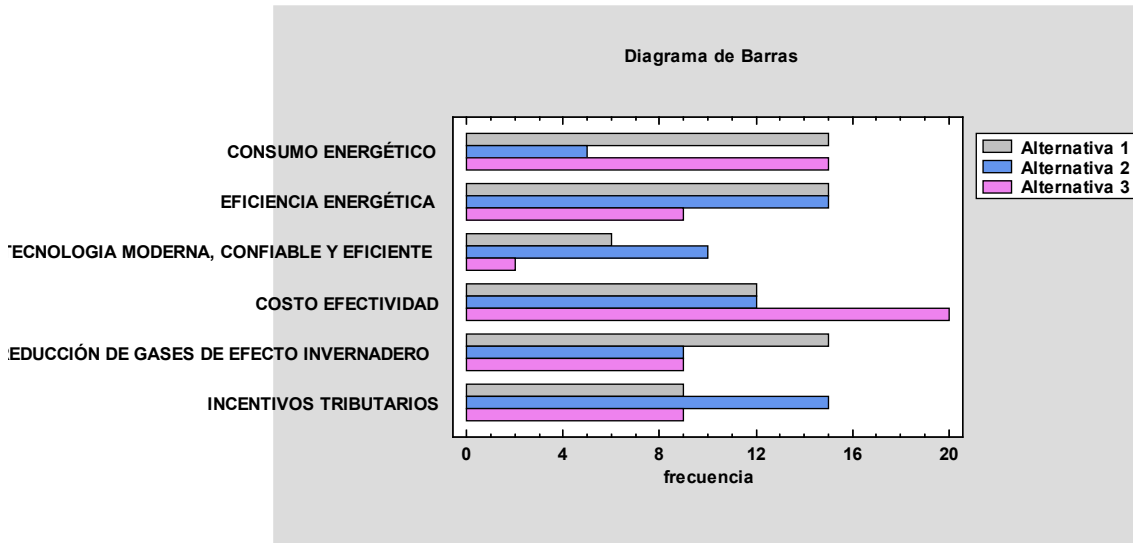


Figura 48 Diagrama de barras.
Fuente: (STATGRAPHICS TECHNOLOGIES, INC, 2018)

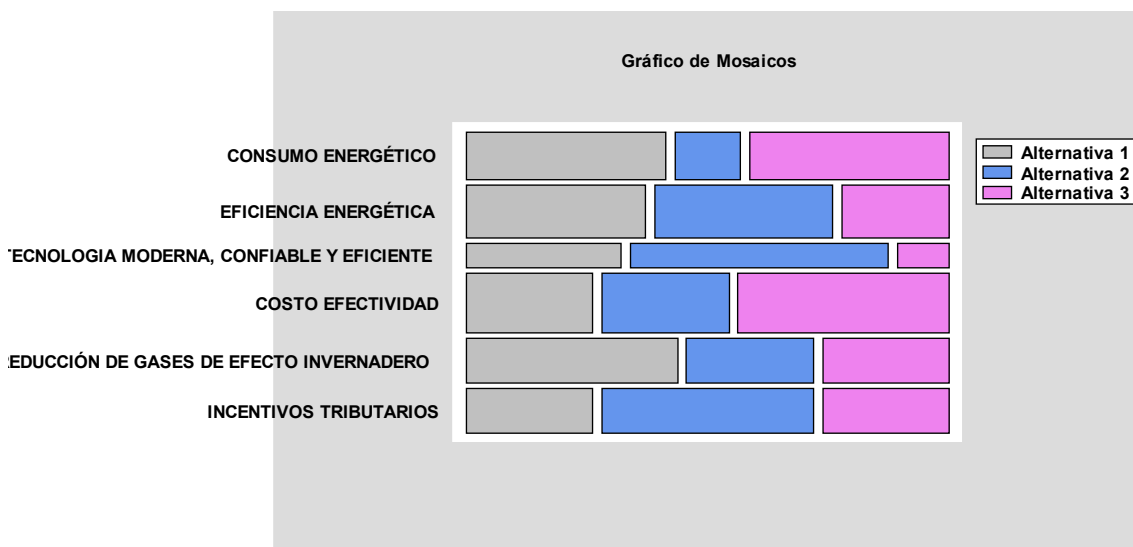


Figura 49 Grafico de mosaico.
Fuente: (STATGRAPHICS TECHNOLOGIES, INC, 2018)

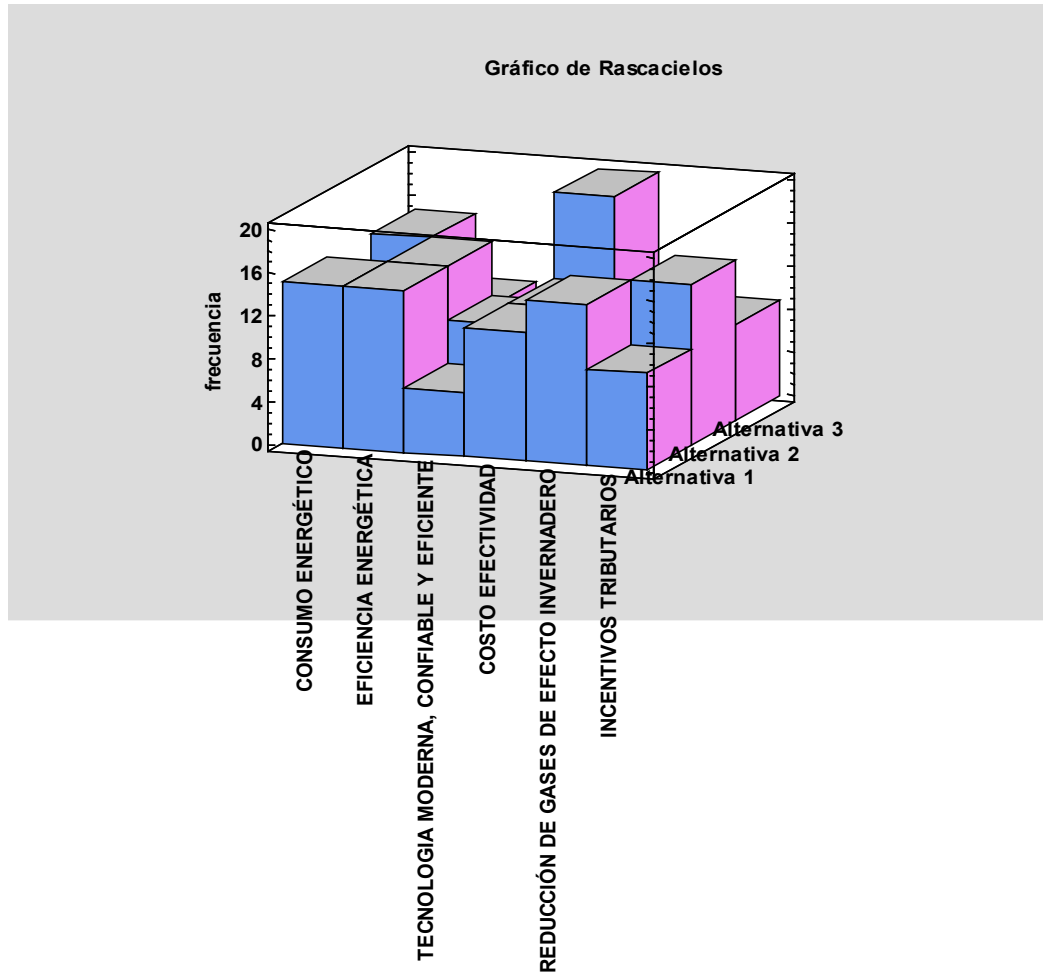


Figura 50 Gráfico de rascacielos.
Fuente: (STATGRAPHICS TECHNOLOGIES, INC, 2018)

La prueba Chi-cuadrado muestra que hay diferencias estadísticamente significativas entre los valores de los criterios específicos de eficiencia energética con cada una de las alternativas hipotéticas y se obtuvo un valor P de 0.0292, el cual se encuentra por debajo del valor de 0.05 lo que significa que cualquier valor analizado dentro de la matriz es independiente entre sí.

Es decir, de las tres alternativas hipotéticas analizadas cualquiera puede ser la ganadora, lo que valida el que los criterios empleados para la eficiencia energética y la matriz empleada para la evaluación de las alternativas de la PTARD con énfasis en eficiencia energética funcionan adecuadamente y con independencia de evaluación.

9 Conclusiones

De los 1 122 municipios censados por el DANE en Colombia en 2018, 1 053 municipios (93.85%) tienen menos de 100 000 habitantes, 65 ciudades (5.79%) tienen entre 100 000 y 1 000 000 habitantes y 4 ciudades (0.36%) superan el millón de habitantes. Pero no es posible correlacionar estos datos con los 715 sistemas de tratamiento de agua residual reportados en 2020 por la superintendencia de servicios públicos, ya que algunas ciudades los han descentralizado, otros municipios poseen PTAR, pero no la usan o incluso esta nunca funcionó. En general, puede decirse que se requiere un gran esfuerzo para tratar las aguas residuales del país, razón por la cual, la adecuada selección del tratamiento es fundamental para el desarrollo del país y el cuidado del medio ambiente, de esta manera la aplicación de esta metodología en el análisis energético del tratamiento de las aguas residuales domésticas, es un instrumento que servirá a consultores, evaluadores, investigadores y entidades estatales en el análisis de alternativas más viable de saneamiento básico.

Las ecuaciones propuestas en este trabajo permitirán analizar *ex ante* el consumo energético de los equipos de una PTAR en condiciones de operación normal; es decir estimar el gasto eléctrico que si bien variará con la operación del sistema de tratamiento se acercará a lo que puede ser el promedio de consumo, favoreciendo positivamente la toma de decisiones, permitiendo evaluar el comportamiento de los sistemas, retroalimentando al diseñador y sobre todo consintiendo el establecimiento de estrategias para evitar los excesos y por ende disminuir costos, todas como estrategias que impactan positivamente los proyectos de saneamiento básico desde su planificación.

La metodología propuesta en este trabajo para evaluar alternativas de tratamiento de agua residual doméstica con enfoque de eficiencia energética, aclara el panorama sobre qué sistemas de tratamiento emplear para disminuir los consumos eléctricos y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero; pero como lo dictan las resoluciones 0330 de 2017 y 0799 de 2021, otros criterios también deben ser evaluados (económicos, técnicos, ambientales, de riesgos, sociales); por lo que aquí se aporta -desde el componente técnico y ambiental- para lograr una mejor evaluación.

La validación de los criterios propuestos para la evaluación de la eficiencia energética y con estos de la matriz de evaluación, determinó que no hay dependencia entre estos factores, lo que significa que cualquier alternativa a evaluar en la matriz propuesta tiene la oportunidad de obtener el puntaje calificativo mayor permitiendo una selección objetiva de la tecnología más apropiada en eficiencia energética y por ende en emisiones de gases de efecto invernadero

10 Bibliografía

- AK Envipure. (19 de 12 de 2019). Sistemas de control de olores PTAR. Bogotá.
- Almeida de Souza, M. A. (1996). *UM MODELO PARA SELEÇÃO DE PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS MUNICIPAIS*. Brasília: Universidade de Brasília - UnB. Recuperado el 19 de noviembre de 2020
- Almeida de Souza,, M. A., ordeiro Netto,, O. M., & Lopes Júnior, R. P. (2000). *SISTEMA DE APOIO À DECISÃO (SAD) PARA SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REATORES ANAERÓBIOS*. Brasília: Universidad de Brasilia. Recuperado el 18 de Noviembre de 2020
- ANDRITZ GROUP. (s.f.).
- Arceivala , D. (2007). *Wastewater treatment for pollution control and reuse*. New delhi: Mc Graw Hill.
- Arthur, J. P. (1986). *Notes on the desing and operation of waste stabilization ponds in warm climates of developing countries*. London: The World Bank.
- ATV-DVWK. (2002). Dimensioning of Single-Stage Active Sludge Plants. *ATV-DVWK-A 131E*. German: DCM, Meckenheim.
- Batalha, B. (1989). *Fossa séptica. Série de manuais*. Sao Pablo: Secretaria do Meio Ambiente.
- BENAYOUN, R., ROY, B., & SUSSMAN, B. (1966). "ELECTRE: Une Méthode pour guider le choix en presence de points de vue multiples.". Paris, France: Direction Scientifique.
- Bertanza, G., & Canato, M. (2013). Metodi per il calcolo teorico dei consumi energetici negli impianti di depurazione. En M. Campanelli, P. foladori, & M. Vaccari, *Consumi elettrici ed efficienza energetica nel trattamento delle acque reflue* (págs. 87-104). Repubblica di San Marino: Maggioli Editore.
- Brentwood industries. (2021). Filtro Percolador. Recuperado el 2021 de 04 de 29, de <http://es.brentwoodindustries.com/segmentos/agua/>
- Buitrago Leon, I. A., & Dimas Turmequé, A. F. (2018). Grafica del comportamiento de las concentraciones en sistemas de tratamiento de agua residual doméstica. Bogotá, Colombia. Recuperado el 30 de Septiembre de 2020

- CENTA. (2021). *Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales* (Vol. 3). La Paz, Bolivia : FUNDACIÓN PÚBLICA ANDALUZA CENTRO DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS DEL AGUA. Recuperado el 15 de agosto de 2022
- China-Biomedica. (2021). Recuperado el 29 de 04 de 2021, de <https://es.china-biomedica.com/>
- Comisión Nacional del Agua. (Febrero de 2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Coyoacán, Mexico. Recuperado el 16 de 04 de 2021
- CREG. (21 de diciembre de 2007). Resolución 119. Bogotá: CREG. Recuperado el 20 de julio de 2021, de <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1aed427ff782911965256751001e9e55/c63f06a9114e1a150525785a007a6fa2>
- Criollo Cabrera, X. L., & Quezada Damian, C. L. (2011). *Diseño de una mini central de energía hidroeléctrica en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Cuenca*. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado el 03 de 05 de 2021
- Cristancho Montenegro, D. L., Gámez Posada, W., Guerra Alfaro, J. A., & Dueñas Escudero, M. F. (Enero de 2019). Estimación de los gases efecto invernadero generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales ubicadas en la cuenca del río Bogotá. Medellín, Colombia: *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*.
- DANE. (2018). *Censo 2018*. Bogotá, Colombia: DANE. Recuperado el 17 de septiembre de 2020, de <https://www.dane.gov.co/index.php/servicios-al-ciudadano/311-demograficas/censo-2018>
- Daw, J., Hallett, K., DeWolfe, J., & Venner, I. (2012). *Energy Efficiency Strategies for*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Departamento Nacional de Planeación. (2014). *Misión Sistema de Ciudades - Una política Nacional para el sistema de ciudades Colombiano con visión a largo Plazo*. Bogotá, Colombia. Recuperado el 17 de septiembre de 2020, de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Las-ciudades-intermedias-con-mayor-potencial-en-Colombia-Un-sistema-de-identificaci%C3%B3n.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2017). *Energy Demand Situation in Colombia*. Bogotá: DNP.
- Dimas , A., & Mesa, J. (2019). *Reactor anaerobio de flujo a pistón*. Bogotá, Colombia.
- Dimas Turmequé , A. F. (2022). *Eficiencia energética en el tratamiento de aguas residuales en Colombia Metodología para la selección de alternativas en pequeñas y medianas poblaciones*. Bogotá, Cundinamarca, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- DUCKSTEIN, L., & OPRICOVIC, S. (1980). Multiobjective Optimization in River Basin Development. *Water Resources Research*,. 1, 14-20. *Water Resources Research*,.

- EMSERCHIA AAA ESP. (2020). Atención a la acción popular No. 2009 - 058. Chía, Colombia. Recuperado el 16 de 04 de 2021, de <https://www.chia-cundinamarca.gov.co/2020/sentenciariobogota/Presentaci%C3%B3n%20PTAR%20Olores.pdf>
- EPA. (1980). *Innovative and Alternative Technology Assessment Manual*. Washington: Environmental Protection Agency4.
- EPM. (2020). Parque Planta de Tratamiento Aguas Claras. Medellin. Recuperado el 29 de 04 de 2021, de <https://www.epm.com.co/site/home/nuestra-empresa/nuestras-plantas/agua/planta-bello-e-interceptor-norte>
- Estruagua. (2021). Espesador de lodos de acconamiento central "PACIFIC". Recuperado el 09 de 04 de 2021, de <https://estruagua.com/espesador-de-lodos-de-accionamiento-central-pacific/>
- Fair, G. (1986). *Abastecimiento de aguas y remoción de aguas residuales*. Mexico: Limusa.
- Ferrer, J. (2008). *Tratamiento biológicos de aguas residuales*. Valencia: Universidad politécnica de valencia.
- Ferro, G., & Lentini, E. J. (2015). *Eficiencia energética y regulación económica en los servicios de agua potable y alcantarillado*. Santiago de Chile.: Naciones Unidas.
- Filtros Banda Muddy. (s.f.). Filtros Banda. Ciudad de Mexico, Mexico. Recuperado el 29 de 04 de 2021, de <https://filtrosbandamuddy.com.mx/filtros>
- Gamarra, J. R. (2013). *Tratamiento de Aguas residuales en Pequeñas comunidades. Capítulo II Tanque Imhoff*. Mexico. Recuperado el 03 de 01 de 2020, de Biblioteca Digital: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/19117/Capitulo2.pdf>
- Gamarra, J. R. (2013). *Tratamiento de Aguas residuales en Pequeñas comunidades. Capítulo IV Lagunas de Estabilización*. Mexico. Recuperado el 04 de 01 de 2020, de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/19117/Capitulo4.pdf>
- Giesen, A., & Thompson , A. (2013). Aerobic granular biomass for cost-effective, energy efficient and sustainable wastewater treatment. Recuperado el 07 de 01 de 2020
- Gikas, P. (2016). *Towards energy positive wastewater treatment plants*. Science Direct.
- GOICOECHEA, A., HANSEN, D. R., & DUCKSTEIN, e. (1982). *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- González, A. (09 de 2015). *Tecnologías para la potabilización y tratamiento en pequeñas comunidades*. Ciudad de Mexico. Recuperado el 16 de 04 de 2021, de <https://docplayer.es/65787739-Universidad-nacional-autonoma-de-mexico-f-a-c-u-l-t-a-d-e-i-n-g-e-n-i-e-r-i-a-programa-unico-de-especializaciones-de-ingenieria.html>
- Grupo de investigación en procesos químicos y bioquímicos de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia. (2018). *Estimación del potencial de conversión a*

- biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 22 de 01 de 2020
- Gua, Y., Lia, Y., Lia, X., Luoa, P., Wanga, H., Wangb, X., . . . Lia , F. (2017). *Energy self-sufficient wastewater treatment plants*:. Science Direct.
- Gurung, K., Tang , W., & Sillanpää, M. (2018). *Unit Energy Consumption as Benchmark to Select Energy Positive Retrofitting Strategies for Finnish Wastewater Treatment Plants (WWTPs): a Case Study of Mikkeli WWTP*. Cross Mark.
- Hazen and Sawyer. (2011). *Información Compilada de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Disponibles y Aplicables al Proyecto* . Bogotá: CAR.
- HUBER TECHNOLOGY. (2021). Reja de Barrotes. Recuperado el 29+ de 04 de 2021, de <https://www.directindustry.es/prod/huber-technology/product-69228-1115587.html>
- iagua. (2008). El modesto tanque Imhoff: fundamentos y diseño. España. Recuperado el 03 de abril de 2022, de <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/modesto-tanque-imhoff-fundamentos-y-diseno>
- iea. (2016). *WORLD ENERGY OUTLOOK 2016* . International Energy Agency.
- IPCC. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. *Programa de inventarios nacionales de gases de efecto invernadero del IPCC*. Francia : IGES.
- Kaplinsky, R. (1990). *The Economics of Small: Appropriate Technology in a Changing World*. London, UK: Intermediate Technology Press.
- Kubota Membrane Europe. (2021). doi:<https://www.kubota-mbr.com/es/Packageplants>
- Lettinga , G. (1991). *UASB - process design for various types of wastewaters*. Water Science and Technology.
- Mara, D. (1997). *Design manua for waste stabilization ponds in india*. India: University of Leeds.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. New York: Mc Graw Hill. Recuperado el 21 de enero de 2020
- Ministerio de Hacienda y Crédito Público. (13 de mayo de 2014). Ley 1715 de 2014. *Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Hacienda y Crédito Público.
- Ministerio de Minas y Energía. (2014). Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 201. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía. Recuperado el 21 de julio de 2021, de https://www1.upme.gov.co/Documents/Cartilla_IGE_Incentivos_Tributarios_Ley1715.pdf
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330 del 8 de junio de 2017*. Bogotá: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Recuperado el 07 de Septiembre de 2019

- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (09 de diciembre de 2021). Resolución 0799 de 2021. *Por la cual se modifica la Resolución 0330 de 2017*. Bogotá, Colombia: MINVIVIENDA. Recuperado el 10 de abril de 2022
- Nerada. (2019). Recuperado el 29 de 04 de 2021, de <https://www.youtube.com/watch?v=MyrHLesrGdo>
- Nolasco, D. A. (2010). Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales. Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado el 01 de 05 de 2021, de www.iadb.org
- NORDIC WATER. (2021). MEVA MCU. Recuperado el 29 de 04 de 2021, de <https://www.nordicwater.com/product/meva-mcu/>
- Noyola, A., Morgan Sagastume, J. M., & Guereca, L. P. (2013). *SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES*. MEXICO: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Especificaciones técnicas para la construcción de Tanque Séptico, Tanque Imhoff y Laguna de Estabilización*. Lima: Cepis.
- Ortiz, E. (2014). *Preparación para la Estrategia Nacional para el desarrollo de la Infraestructura Estudio sectorial Agua Potable y Alcantarillado*. Bogotá.
- Parra Z, R., Apaza M, G., & Agramont a, A. (2010). *ESTIMACION DE FACTORES DE EMISION DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*. La Paz, Bolivia. Recuperado el noviembre de 2021
- REID, G. W., & DISCENZA, R. (1982). Prediction Methodology for Suitable Water and Wastewater. *Appropriate Methods of Treating Water and Wastewater in Developing Countries*. Michigan, uUSA.
- Rodríguez Miranda, J. P., García Ubaque, C. A., & Pardo Pinzón, J. (24 de agosto de 2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Revista Tecnura*, 149-164. Recuperado el 21 de 01 de 2020, de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/9553/11114>
- ROY, B. (1971). Problems and Methods with Multiple Objective Functions. *Mathematical Programming*. 239-266.
- Ruffino, B., Campo, G., Genon, G., Lorenz, E., Novarino, D., Scibilia, G., & Zanetti, M. (2014). *Improvement of anaerobic digestion of sewage sludge in a wastewater treatment plant by means of mechanical and thermal pre-treatments: Performance, energy and economical assessment*. Science Direct.
- Sánchez Torres, J. M. (09 de marzo de 2020). Dinámica de generación de conocimiento. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

- Scopus. (07 de junio de 2020). Obtenido de <https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/search/form.uri?display=basic&zone=header&origin=>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s.f.). *Diseño de Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente*. Mexico: Comisión Nacional del Agua.
- Shen, Y., Linville, J., Urgun-Demirtas, M., Mintz, M., & Snyder, S. (2015). *An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs*. Science Direct.
- Singh, P., & Kansal, A. (2016). *Energy and GHG accounting for wastewater infrastructure*. New Delhi: Science Direct.
- SOARHYDRO. (20 de enero de 2022). Turbina hidraulica en linea. Obtenido de <https://soarhydro.com/equipment/>
- Spena Group. (2021). Aireación. Recuperado el 29 de 04 de 2021, de <https://spenagroup.com/category/aireacion/>
- STATGRAPHICS TECHNOLOGIES, INC. (2018). STATGRAPHICS CENTURION 18.
- Superintendencia de servicios publicos. (2020). *Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y alcantarillado*. Bogota: Superintendencia de servicios publicos. Recuperado el 05 de febrero de 2022
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2018). *Estudio Sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2014 - 2017*. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Bogotá: REPÚBLICA DE COLOMBIA.
- Tchobanoglous. (2000). *Tratamiento de Aguas Residuales en. Pequeñas Poblaciones*. Santa Fe de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- Torregrossa, D., Castellet, L., & Hernández-Sancho, F. (2018). *A data analysis approach to evaluate the impact of the capacity utilization on the energy consumption of wastewater treatment plants*. Madrid: Science Direct.
- Torregrossa, D., Schutz, G., Cornelissen, A., Hernández, F., & Hansen, J. (2016). *Energy saving in WWTP: Daily benchmarking under uncertainty and data availability limitations*. Science Direct.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. (2017). *Energy Data Management Manual Energy Data Management Manual*. Better Buildings.
- UNO. (2015). *Ageda 2030 - Nueva agenda de desarrollo sostenible*. ONU.
- Venkatesh, G., & Abdi Elmi, R. (2013). *Economic environmental analysis of handling biogas from sewage sludge digesters in WWTPs (wastewater treatment plants) for energy*. G. Venkatesh.

- Ventrat. (2021). Barrelos. Recuperado el 29 de 04 de 2021, de <http://ventrat.com/pag/plantas/equipos.html>
- Von Sperling, M. (1996). *Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries*. Water science and technology.
- WARP SAS. (2020). Desarrollo de proyectos de ingeniería. Recuperado el 29 de 04 de 2021
- Water Environmental Federation. (2010). *Biofil Reactors*. Alexandria: WEF. Recuperado el 05 de 01 de 2020
- WILLOUGHBY, K. W. (1990). *Technology Choice - A Critique of the Appropriate Technology*. Colorado, USA: Intermediate Technology Publications.
- Xu, J., Li, Y., Wang, H., Wu, J., & Wan, X. (2017). *Exploring the feasibility of energy self-sufficient wastewater treatment plants: a case study in eastern China*. Science Direct.
- Yañez, F. (1995). *Lagunas de estabilización*. Lima: Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ambiental.
- ZELENY, M. (1973). Compromise Programming. In: COCHRANE, J. L.; e ZELENY, M. eds. *Multiple*. 263-301. Columbia, USA: University of South Carolina Press.
- ZELENY, M. (1974). A Concept of Compromise Solutions and the Method of the Displaced Ideal. *Computers and Operations Research*. 1, 479-496.
- ZELENY, M. (1982). *Multiple Criteria Decision Making*. New York, USA: McGraw-Hill.

11 Anexos

I. Anexo: Metodología para la planificación de la búsqueda de información.

Con el fin de realizar una correcta búsqueda de información, se buscan documentos técnicos avalados por revistas indexadas, la metodología usada para establecer los lineamientos de búsqueda se da en 4 etapas (ver Figura 5).

A continuación, se desarrolla la metodología planteada para la búsqueda de información del tema deseado, no obstante, se aclara que el uso de esta metodología sirve de soporte para la validación de la información existente de bases de datos, sin embargo, no indicara que la información encontrada sea totalmente válida para su uso.

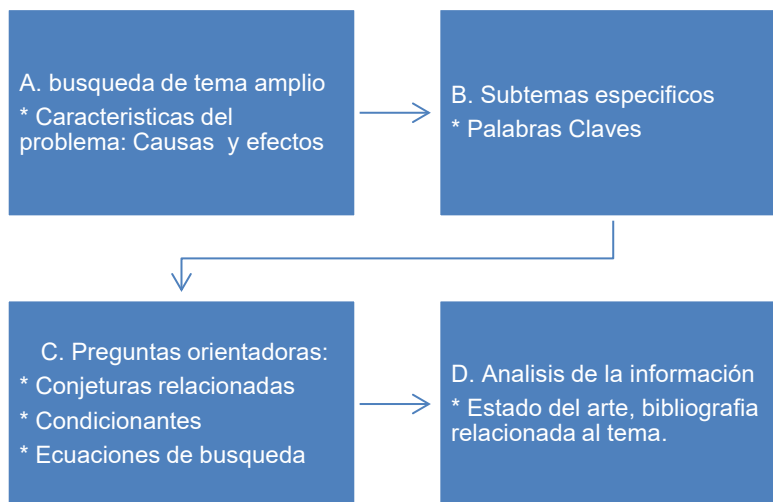


Figura 51 Metodología de búsqueda bibliográfica.

Fuente: (Sánchez Torres, 2020)

A. Tema amplio.

Se inicia planteando el tema amplio, donde se especifican las características principales del problema, como son: causas, problema, efectos, actores y manifestación del problema.

- Eficiencia energética en tratamiento de agua residual (Energy efficiency of Wastewater Treatment Plants)

Se plantean estos dos temas amplios para el soporte del tema de profundización.

B. Subtemas específicos.

- ¿Qué metodologías de selección de alternativas de tratamiento de aguas residual se han dado en los últimos años?
- ¿Cuál ha sido la evolución de la implementación de estas metodologías?
- ¿Qué beneficios trae hacer uso de las metodologías de selección de alternativas?

a. Palabras claves.

Se buscan las palabras claves acotadas en inglés para temas específicos con sus respectivos sinónimos de acuerdo con el vocabulario controlado usando tesaurus o diccionarios controlados para apoyar la selección de palabras de búsqueda.

- **Wastewater**, Sewerage, Effluent, Treatment.
- **Technology**, Mechanics.
- **Selection**, Option, Preference, Alternative
- **Methodology**, Methodologies, Empirical Research, Scientific Methods, Technique, Process, System.
- **Design**, Method.
- **Efficiency**, Energetic, Energy resources.

C. Ecuación de búsqueda.

En el desarrollo de la búsqueda se usa el metabuscador Scopus®, base de datos para indexación de publicaciones, que ofrece un análisis y adicionalmente indica en que base de datos fue publicado el documento (i.e. Web Of Science, Science Direct), abarcando gran cantidad de diferentes bases de datos. Las ecuaciones de búsqueda para los diferentes temas amplios. Las gráficas del número de publicaciones realizadas anualmente sobre los temas de búsqueda.

Wastewater Treatment Methodology of selection.

A continuación, se presenta la ecuación de búsqueda teniendo en cuenta el tema de metodología de selección de tratamiento de agua residual.

TITLE-ABS-KEY(“Selection Methodolog*”) AND (“Wastewater Treatment” OR “Sewerage Treatment” OR “Effluent Treatment”) AND (“Wastewater” OR “Sewerage” OR “Effluent” OR “Waste”)

De acuerdo con la anterior ecuación, en la base de datos solo se encuentran 10 documentos en donde presentan estas palabras claves de búsqueda, y haciendo la revisión se determina que de estos 12 documentos ninguno es del tema relacionado de interés. -Fecha de búsqueda: 16 de septiembre de 2021-

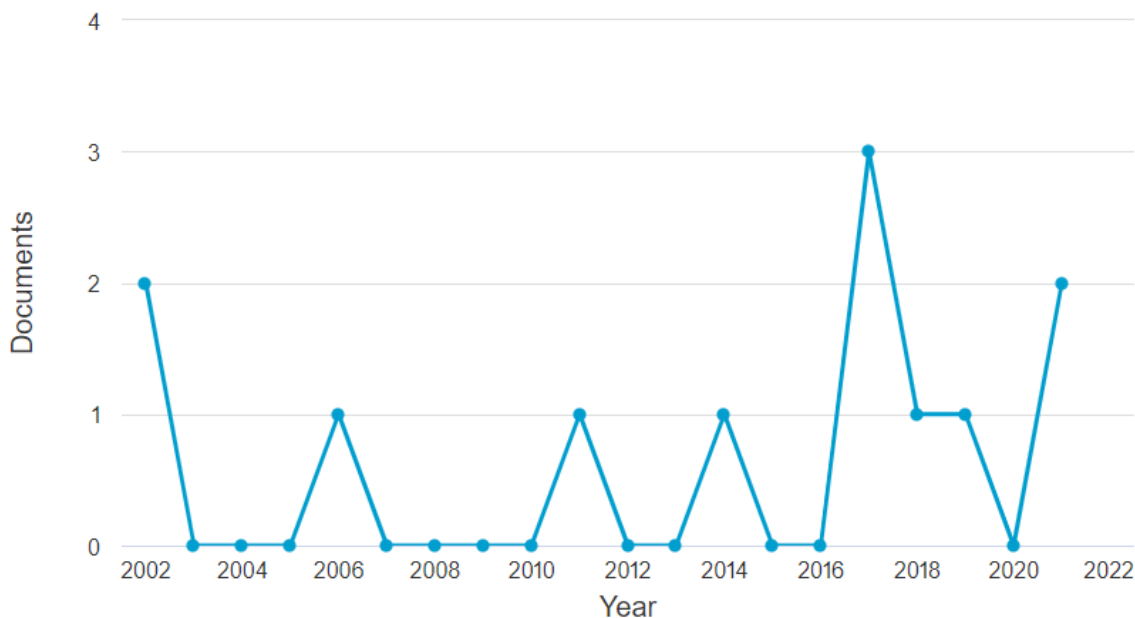


Figura 52 Publicaciones realizadas del tema: Methodology of selection.

Fuente: (Scopus, 2020)

Siguiendo con la metodología planteada se aplica una ecuación de búsqueda con mayores límites de búsqueda (usando mayor cantidad de sinónimos), como se observa a continuación.

TITLE-ABS-KEY(“Selection Methodolog*”) AND (“Wastewater Treatment” OR “Sewerage Treatment” OR “Effluent Treatment”) AND (“Wastewater” OR “Sewerage” OR “Effluent” OR “Waste”) AND (“Treatment” OR “Analysis”) AND (“Technology” OR “Mechanics”) AND (“Selection” OR “Option” OR “Preference” OR “Alternative”) AND (“Methodolog*” OR “Empirical Research” OR “Scientific Method*” OR “Technique*” OR “Process” OR “System”) And (“Design*” OR “Method*”)

Realizada la búsqueda se encuentra 10 documentos relacionados con las palabras claves de búsqueda, sin embargo, se revisa cada uno de estos documentos y ninguno tiene relación con el tema de búsqueda. -Fecha de búsqueda: 16 de septiembre de 2021-

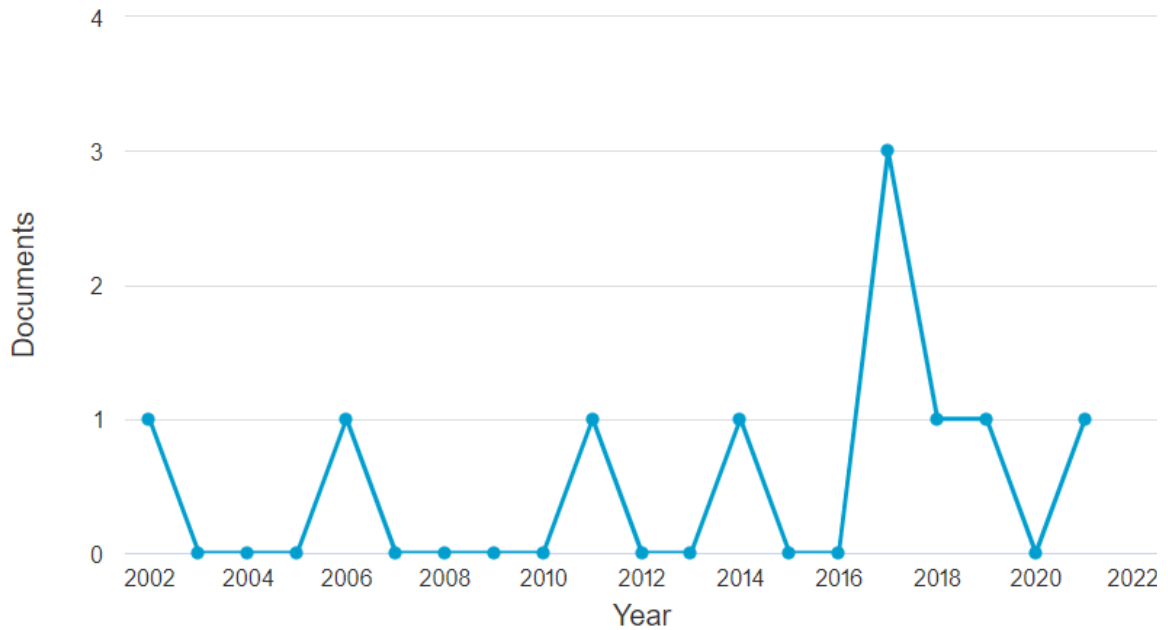


Figura 53 Publicaciones realizadas del tema: Methodology of selection y sinónimos.

Fuente: (Scopus, 2020)

Energy Efficiency Wastewater Treatment

A continuación, se presenta la ecuación de búsqueda para el tema de eficiencia energética en tratamiento de agua residual.

TITLE-ABS-KEY(“Energy efficiency”) AND (“Wastewater Treatment” OR “Sewerage Treatment” OR “Effluent Treatment”) AND (“Wastewater” OR “Sewerage” OR “Effluent” OR “Waste”) AND (“Treatment” OR “Analysis”) AND (“Technology” OR “Mechanics”) AND (“Selection” OR “Option” OR “Preference” OR “Alternative”)

Realizada la búsqueda se delimita con las siguientes sub-áreas de búsqueda

- Energía
- Ingeniería
- Ingeniería química,
- Solo publicaciones realizadas en los años 2001 al 2021 (20 años)

Se obtiene 1 076 documentos relacionados con las palabras claves de búsqueda, a continuación, se observa la cantidad de publicaciones realizadas en los últimos 20 años. -Fecha de búsqueda: 16 de septiembre de 2021-

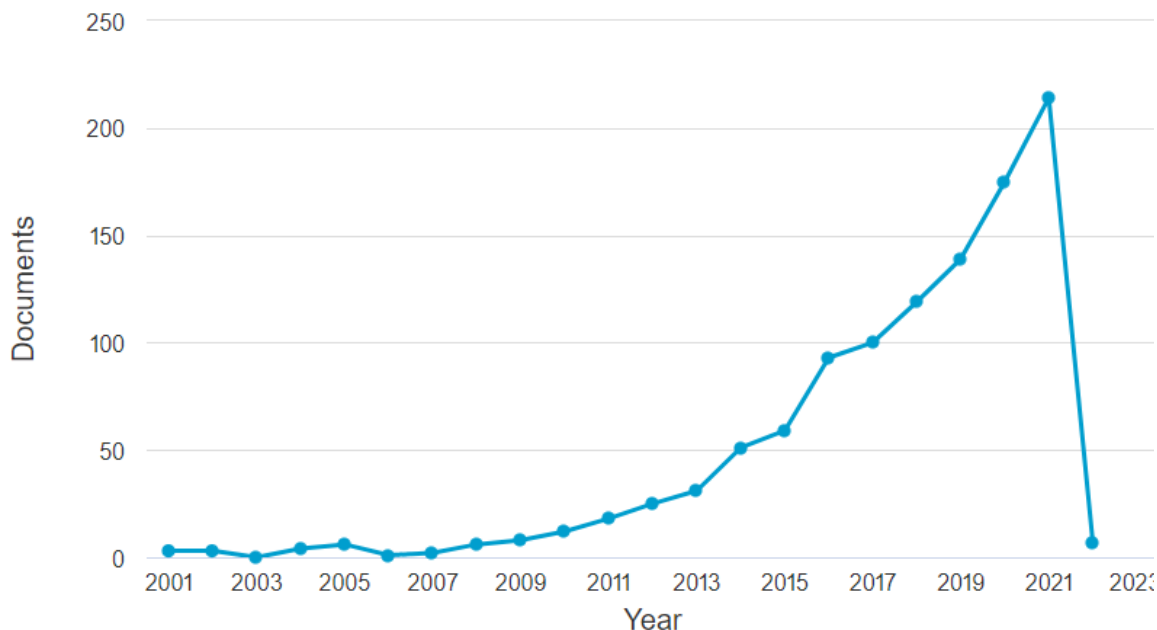


Figura 54 Publicaciones realizadas del tema: Energy Efficiency.

Fuente: (Scopus, 2020)

Siguiendo con la metodología planteada se aplica la ecuación de búsqueda con mayores restricciones, como se observa a continuación.

TITLE-ABS-KEY(“Energy efficiency”) AND (“Wastewater Treatment” OR “Sewerage Treatment” OR “Effluent Treatment”) AND (“Wastewater” OR “Sewerage” OR “Effluent” OR “Waste”) AND (“Treatment” OR “Analysis”) AND (“Technology” OR “Mechanics”) AND (“Selection” OR “Option” OR “Preference” OR “Alternative”) AND (“Methodolog*” OR “Empirical Research” OR “Scientific Method*” OR “Technique*” OR “Process” OR “System”) And (“Design*” OR “Method*”) AND (“Efficiency” OR “Energy” OR “Energy Resources”)

Realizada la búsqueda se delimita con las siguientes subáreas de búsqueda

- Energía
- Ingeniería
- Ingeniería química,
- Solo publicaciones realizadas en los años 2001 al 2021 (20 años)

Se obtiene 978 documentos relacionados con la ecuación de búsqueda aplicado más palabras claves, a continuación, se observa la cantidad de publicaciones realiza en los últimos 20 años. -Fecha de búsqueda: 16 de septiembre de 2021-

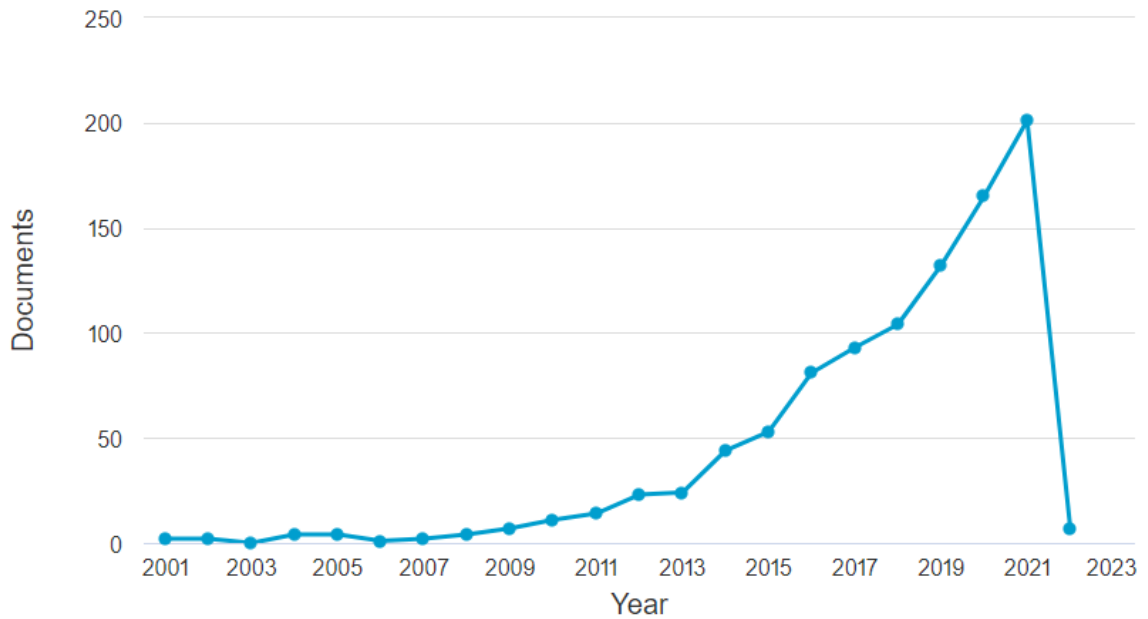


Figura 55 Publicaciones realizadas del tema: Energy Efficiency y sinónimos

Fuente: (Scopus, 2020)

Análisis de resultado.

Realizada la búsqueda de los dos temas amplios, se concluye que hay pocas publicaciones en revistas indexadas del tema de *Metodología de selección de tratamiento en agua residual*, sin embargo esto no quiere decir que no exista información o no se investigue sobre estos temas, al contrario, mucha de esta información se ha desarrollado por universidades, entidades gubernamentales o empresas privadas del sector, por consiguiente, se opta por la búsqueda de la información en entidades públicas (colombiana y norteamericana), universidades (europeas, norteamericanas, colombianas, y brasileras), resaltando temas relacionados con Tecnologías de Tratamiento, Metodologías de Selección y Eficiencia Energética en agua residual doméstica.

II. Anexo: Pequeñas y medianas poblaciones

De acuerdo con el estudio adelantado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP), las poblaciones que se encuentran entre 500 000 y 1 000 000 habitantes son denominadas medianas poblaciones, y las que se encuentran por debajo de 100 000 habitantes son pequeñas poblaciones (Departamento Nacional de Planeación, 2014).

A partir de lo anterior, se realiza una segregación estadística de la población por municipios de Colombia, tomando como referencia la información estadística desarrollada por el DANE en su último censo realizado en el año 2018, obteniendo lo siguiente.

- Total, de centros poblados analizados en Colombia: 1 122
- Total, de habitantes en Colombia 48 258 494 habitantes.

Teniendo la información el último censo nacional de población y vivienda mencionado, se hace uso del principio estadístico de Pareto, el cual nos sirve para identificar el valor muestral de la población en Colombia y definir el rango en que se encuentra cada municipio, identificando las siguientes variables:

- Valor máximo de un centro urbano: 7 412 566 habitantes (Bogotá D.C)
- Valor mínimo de un centro urbano: 279 habitantes (La Guadalupe - Guainía)

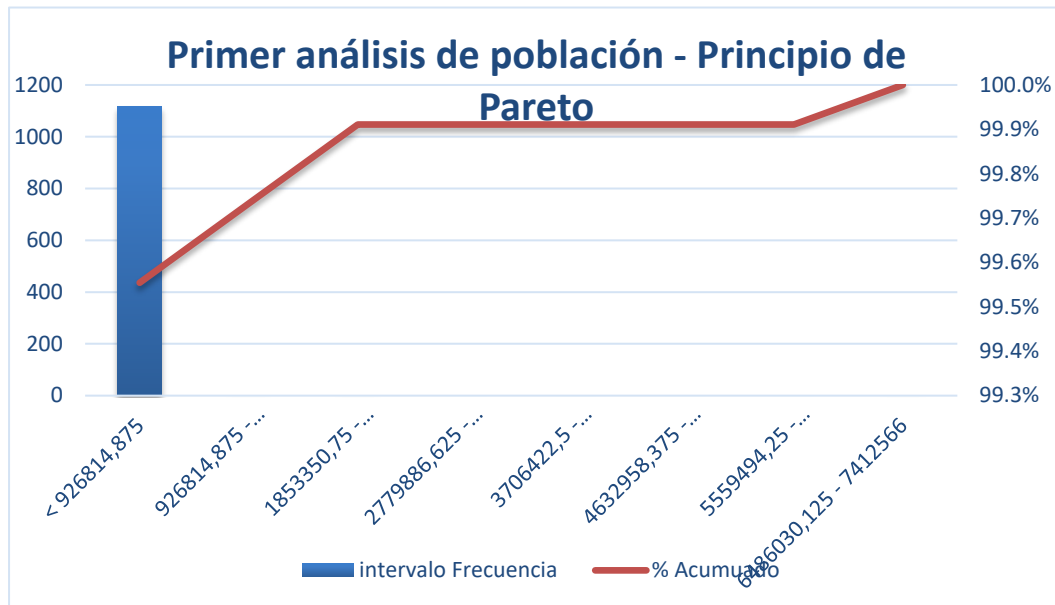


Figura 56 Primer análisis de Pareto
Fuente: (Dimas Turmequé, 2022)

De acuerdo con la Figura 56 se observa que el 99.5% de los centros poblados en Colombia se encuentran por debajo de los 926 814 habitantes, el restante son las 4 principales ciudades de Colombia (Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla).

Siguiendo con el análisis, se realiza una discretización de los centros poblados que tienen más de 33 583 habitantes, ya que estas ciudades representan solo el 18.4% de los datos (207 ciudades), obteniendo los siguientes resultados:

- Total de datos: 915 municipios.
- Valor máximo centro urbano: 33 535 habitantes (Paipa - Boyacá).
- Valor mínimo centro urbano: 279 habitantes (La Guadalupe – Guainía).

Segregando en 8 grupos con la misma cantidad muestral se obtienen lo siguiente:

Tabla 29 Resultado de segregación de datos.

Rango	Cantidad de municipios
< 4 436	164
4 436 – 8 593	227
8 593 – 12 750	170
12 750 – 16 907	106

Rango	Cantidad de municipios
16 907 – 21 064	87
21064 – 25 221	65
25 221 – 29 378	50
29 378 – 33 535	46
Total:	915

Fuente: (Dimas Turmequé , 2022)

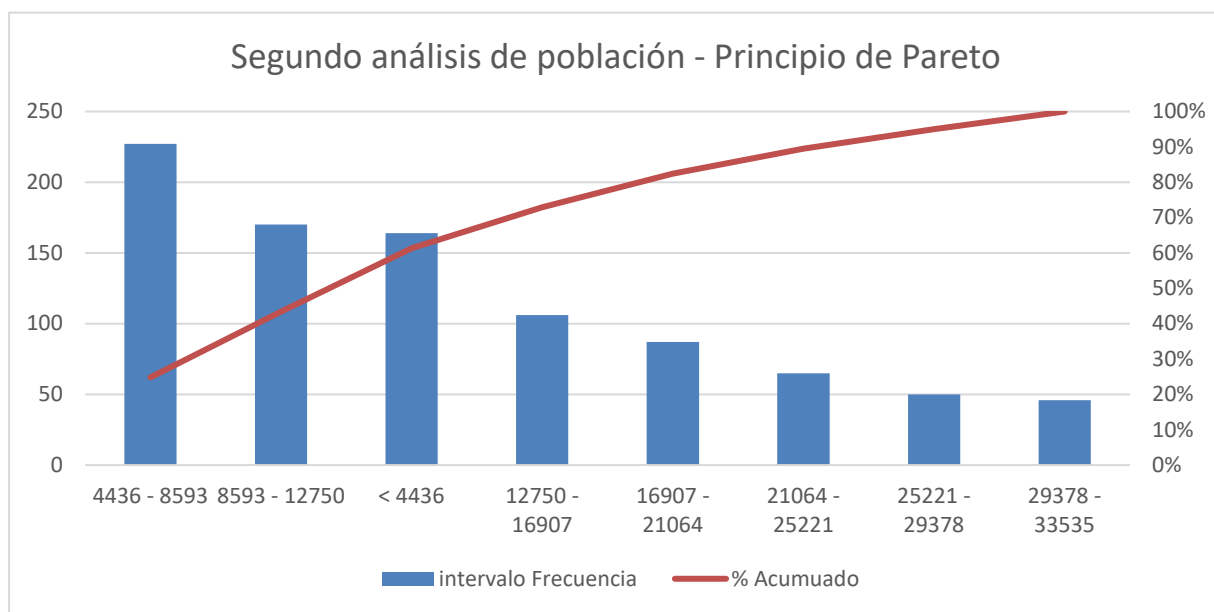


Figura 57 Segundo análisis de Pareto.

Fuente: (Dimas Turmequé , 2022)

Se puede concluir que de los 1 122 municipios censados en Colombia en el año 2018 por el DANE (2018), 4 ciudades de país superan el millón de habitantes, 65 ciudades se encuentran entre 100 000 y 1 000 000 habitantes, y 1 053 municipios de Colombia se encuentran por debajo de 100 000 habitantes, sin embargo, como se observa en la Figura 57, más del 80% de municipios se encuentran comprendidos por poblaciones menores a 16 907 habitantes.

III. Anexo: Eficiencias de sistemas de tratamiento

Como soporte teórico del comportamiento en función de la eficiencia de los sistemas de tratamiento, se anexan los análisis de eficiencias máximas y mínimas de la DBO₅ teniendo en cuenta el tren de tratamiento definido, estas eficiencias son obtenidas según la Tabla 12 de la resolución 0330 de 2017.¹ y resolución 0799 de 2021.

A continuación, se encuentran el análisis de los sistemas de tratamiento mediante la aplicación de sistemas simples y compuestos:

- Simple: sistema de tratamiento que está comprendido por un solo sistema biológico, buscando la remoción de la materia orgánica fácilmente biodegradable.
- Compuesto: Tren de tratamiento conformado por dos sistemas biológicos para la remoción de la materia orgánica disuelta, se tiene en cuenta los sistemas de tratamiento implementados en la región de Latinoamérica y el Caribe (Noyola, Morgan Sagastume, & Guereca, 2013).

Dentro de los sistemas de tratamiento de agua residual doméstica considerados, se tienen en cuenta las siguientes premisas para su análisis:

- Tratamiento preliminar: rejillas y desarenador
- Tratamiento primario: Trampa de grasas y/o sedimentador primario y/o Lagunas anaerobias.

Dentro de los sistemas de tratamiento simples se tienen los siguientes sistemas biológicos analizados:

¹ Los análisis fueron propuestos por los ingenieros Iván Alexander Buitrago León y Andrés Felipe Dimas Turmequé, en el desarrollo de la ingeniería de detalle del sistema de tratamiento de agua residual doméstica para el municipio de Neiva (2018), como instrumento de análisis para definir los rangos de eficiencia y operación teóricos esperados de los trenes de tratamiento, para la toma de decisiones ya sea de eficiencia en la remoción como en la operación de los sistemas de automatización y control.

Sistemas anaerobios

- Reactor UASB.
- Lagunas facultativas.
- Lagunas aireadas.
- Reactor anaerobio RAP.
- Filtros anaerobios.

Sistemas aerobios

- Lodos activados (convencionales).
- Filtros percoladores de alta tasa – Roca.
- Filtros percoladores de alta tasa – plástico.

Para los sistemas de tratamiento compuestos se tienen los siguientes sistemas de tratamiento analizados.

- Lagunas aireadas + Lagunas facultativas.
- Filtros percoladores de alta tasa – plástico + Lodos activados (convencionales).
- Reactor anaerobio RAP + Filtros percoladores de alta tasa – plástico.
- Reactor UASB + Filtros percoladores de alta tasa – plástico.
- Reactor UASB + Lodos activados (convencionales).

Por último, se toma las concentraciones típicas de un agua residual doméstica según el libro de Metcalf & Eddy (2014) para el análisis de eficiencias.

Tabla 30 Concentraciones típicas de agua residual doméstica – DBO₅

Concentración de DBO	Valor
Ligera – mg/L	133
Media – mg/L	200
Alta – mg/L	400

Fuente: (Metcalf & Eddy, 2014)

Eficiencias mínimas y máximas según la resolución 0330

Tabla 31 Eficiencia mínimas y máximas – DBO₅

Tratamiento	Unidades de tratamiento	Eficiencias mínimas de remoción de parámetros (%)	
		DBO ₅	
Pre- Tratamiento	Cribado o desbaste	0%	0%
	Desarenadores	0%	0%
	Trampa de grasas	0%	0%
Tratamiento primario	Sedimentación primaria	30%	40%
	Lagunas anaerobias	50%	70%
	Tanque Imhoff	25%	40%
	Trampa de grasas	0%	5%
Tratamiento secundario	Reactor UASB ²	65%	80%
	Lagunas facultativas	80%	90%
	Lagunas aireadas	80%	95%
	Reactor anaerobio RAP ³	65%	80%
	Filtros anaerobios	65%	80%
	Lodos activados (convencionales) ⁴	80%	95%
	Filtros percoladores de alta tasa - Roca ⁵	65%	90%
	Filtros percoladores de alta tasa - plástico ⁶	75%	95%

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021)

² El valor de la eficiencia mínima y máxima contempla el uso de la estructura de sedimentación secundaria.³ El valor de la eficiencia mínima y máxima contempla el uso de la estructura de sedimentación secundaria.⁴ El valor de la eficiencia mínima y máxima contempla el uso de la estructura de sedimentación secundaria.⁵ El valor de la eficiencia mínima y máxima contempla el uso de la estructura de sedimentación secundaria.⁶ El valor de la eficiencia mínima y máxima contempla el uso de la estructura de sedimentación secundaria.

• Reactor UASB

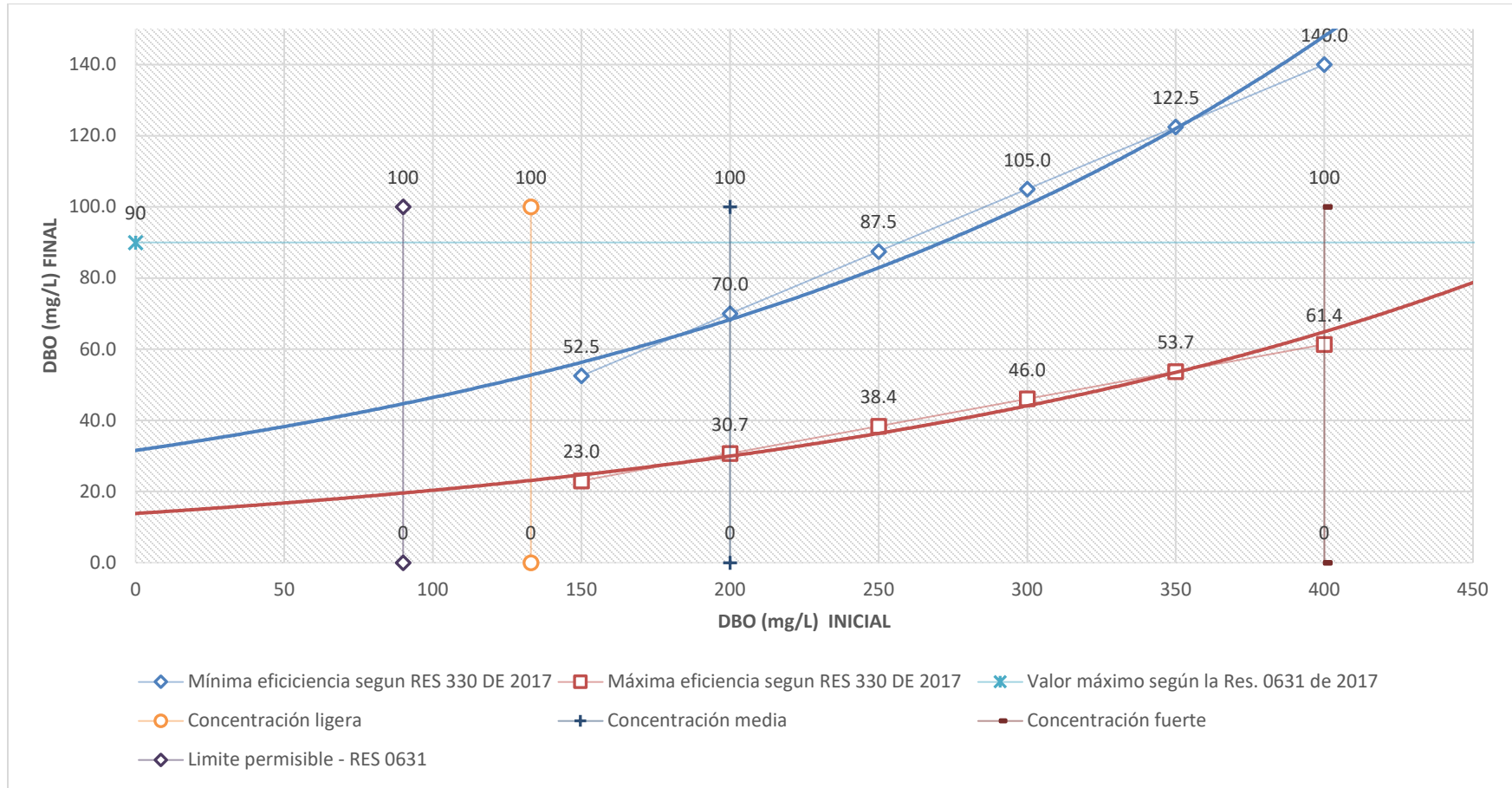


Figura 58 Eficiencias mín. y máx. - Reactor UASB

Fuente: (Buitrago Leon & Dimas Turmequé, 2018)

• Lagunas facultativas

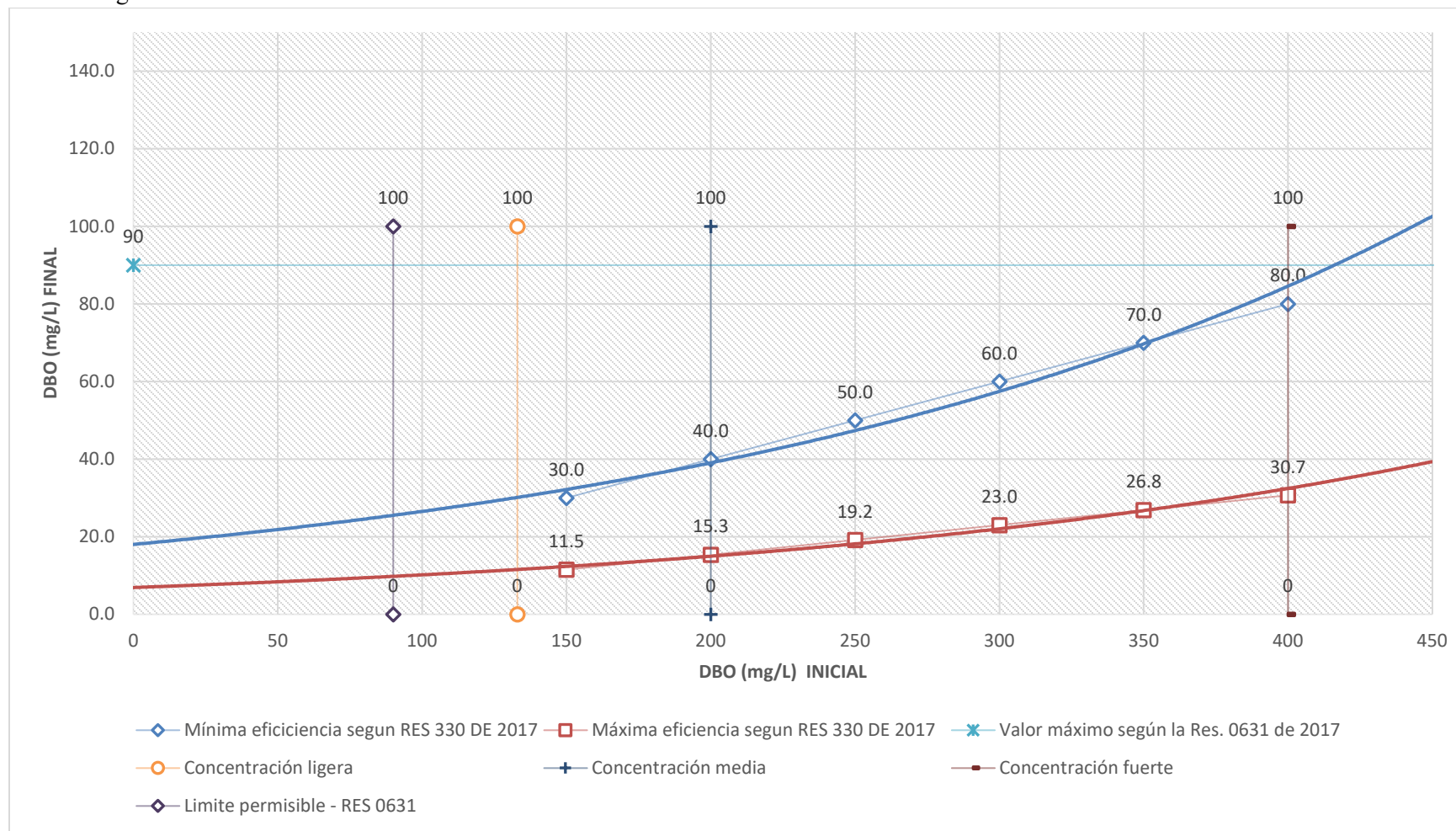


Figura 59 Eficiencias mín. y máx. – Laguna Facultativas

Fuente: (Buitrago Leon & Dimas Turmequé, 2018)

• Lagunas aireadas

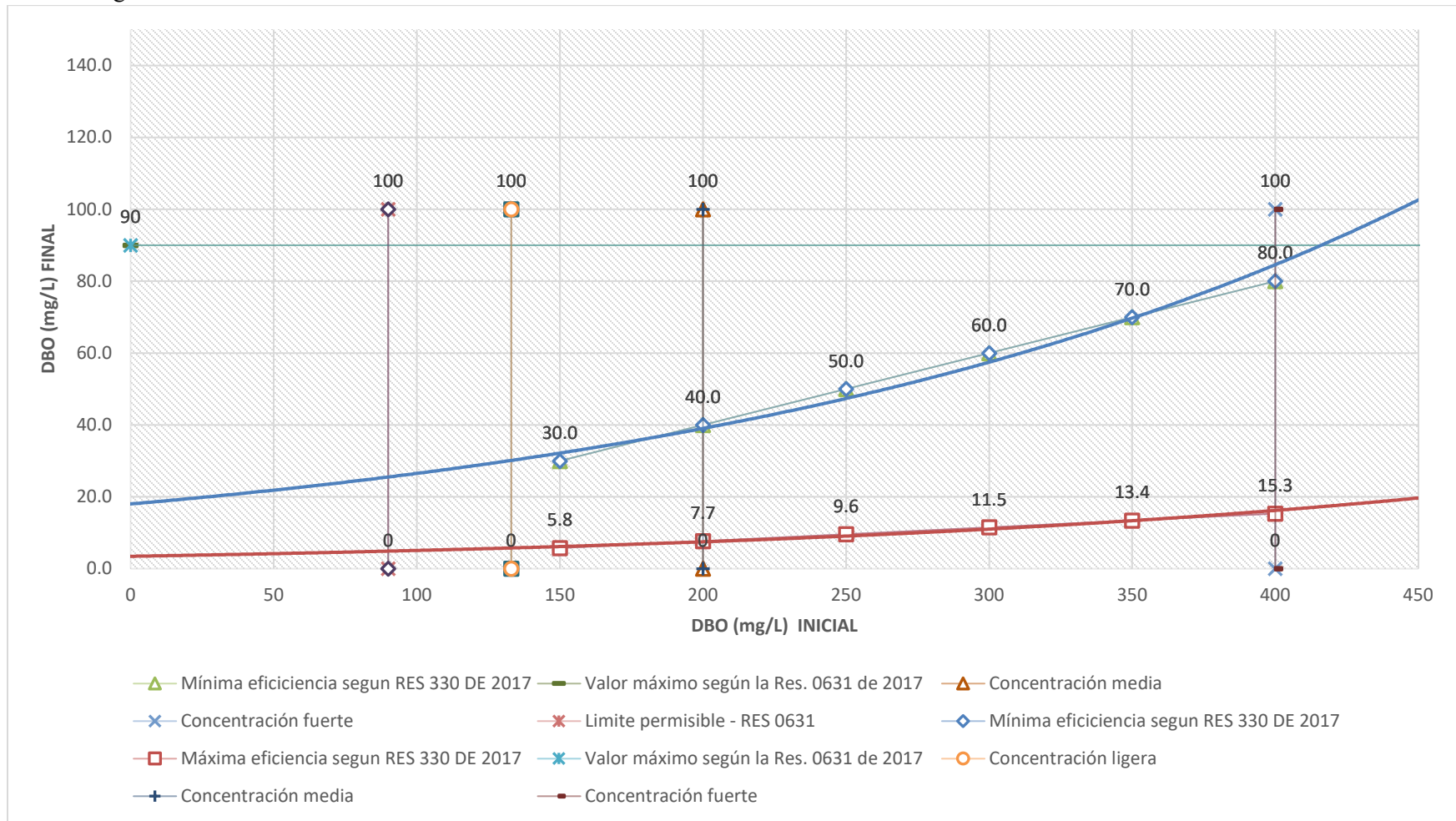


Figura 60 Eficiencias mín. y máx. – Laguna aireadas

Fuente: (Buitrago Leon & Dimas Turmequé, 2018)

• Reactor anaerobio RAP

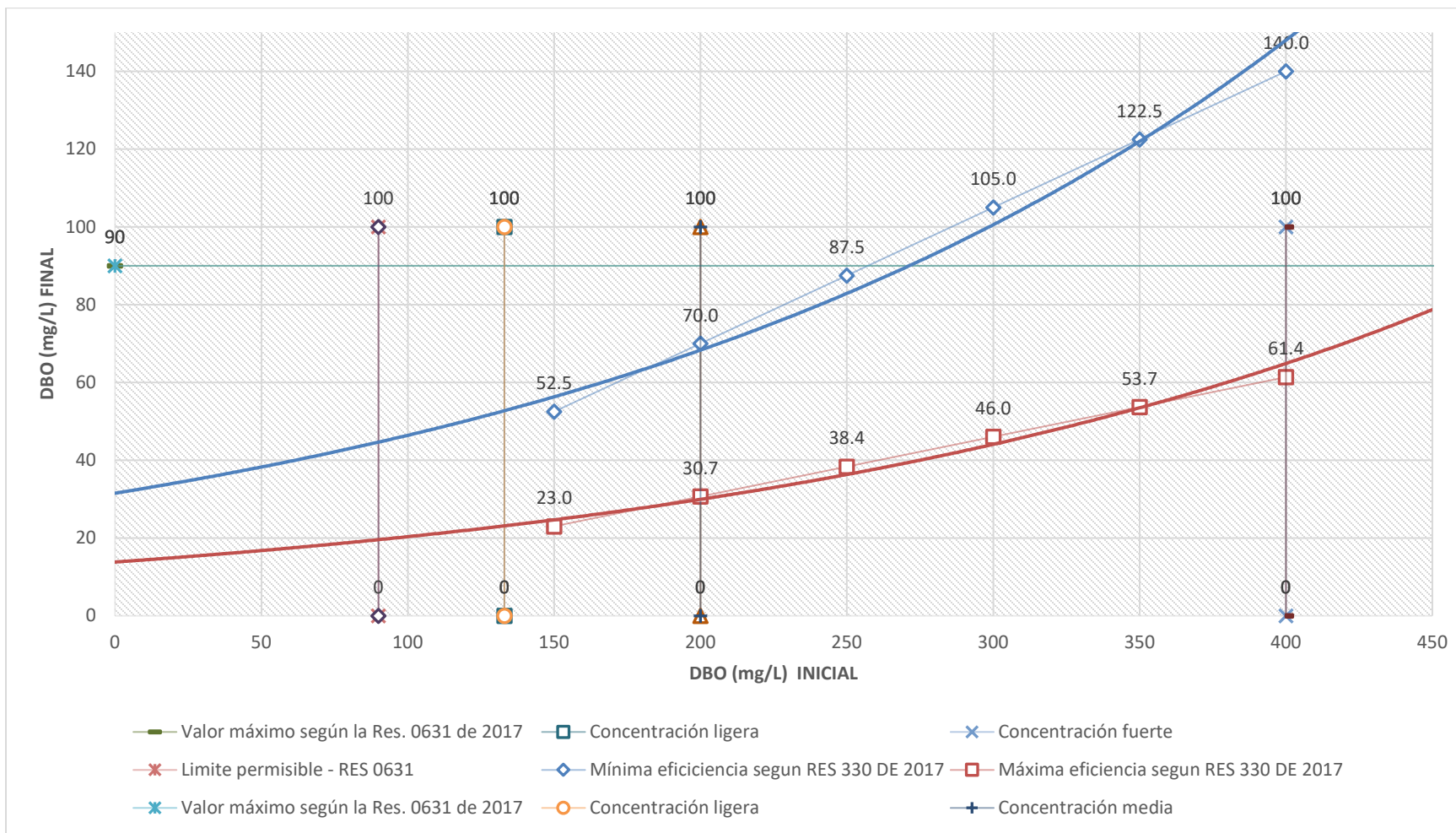


Figura 61 Eficiencias mín. y máx. – Reactor anaerobio RAP

Fuente: (Buitrago Leon & Dimas Turmequé, 2018)

• Filtros anaerobios

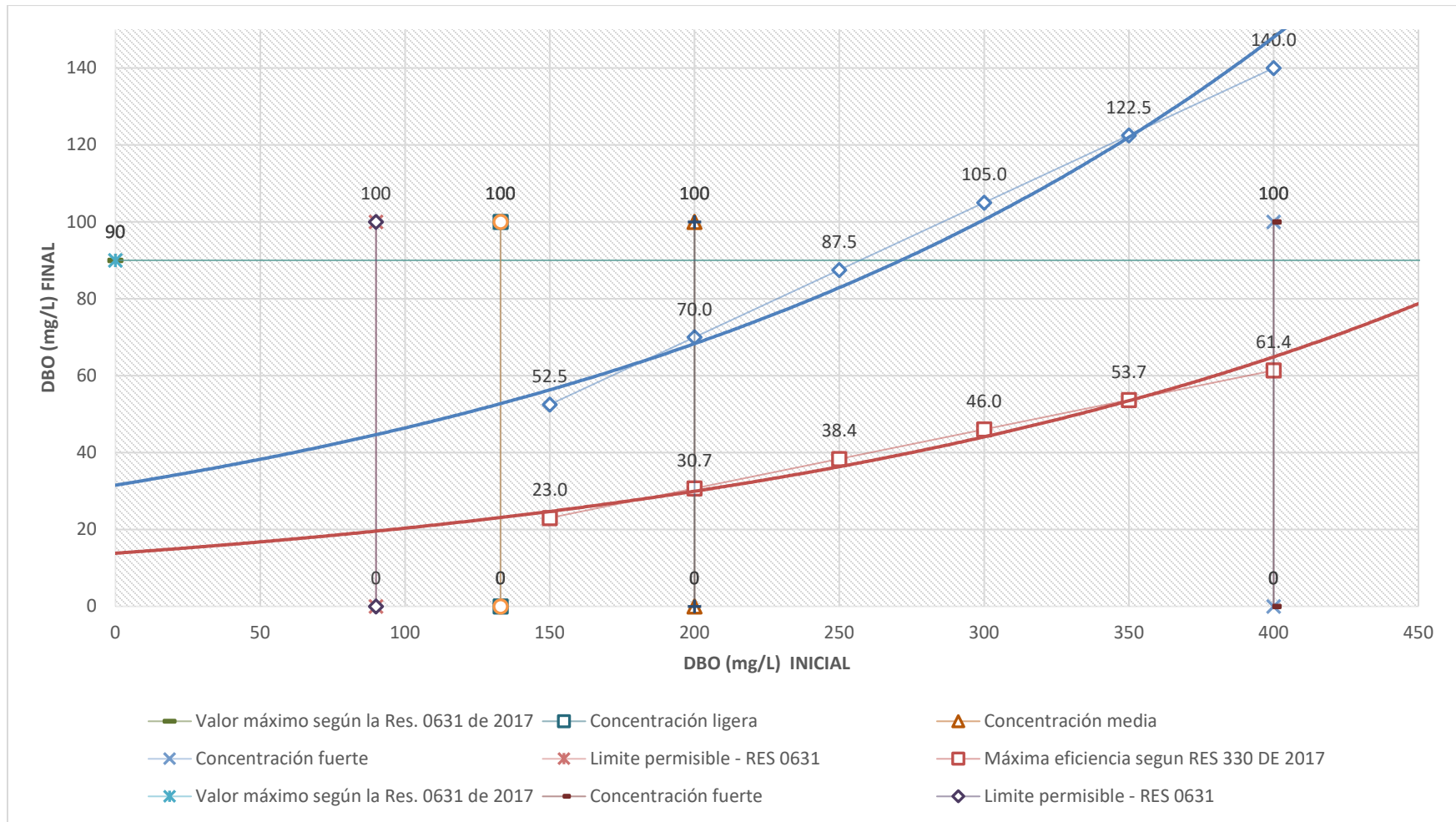


Figura 62 Eficiencias mín. y máx. – Filtros anaerobios

Fuente: (Buitrago Leon & Dimas Turmequé, 2018)

Sistemas aerobios

- Lodos activados (convencionales)

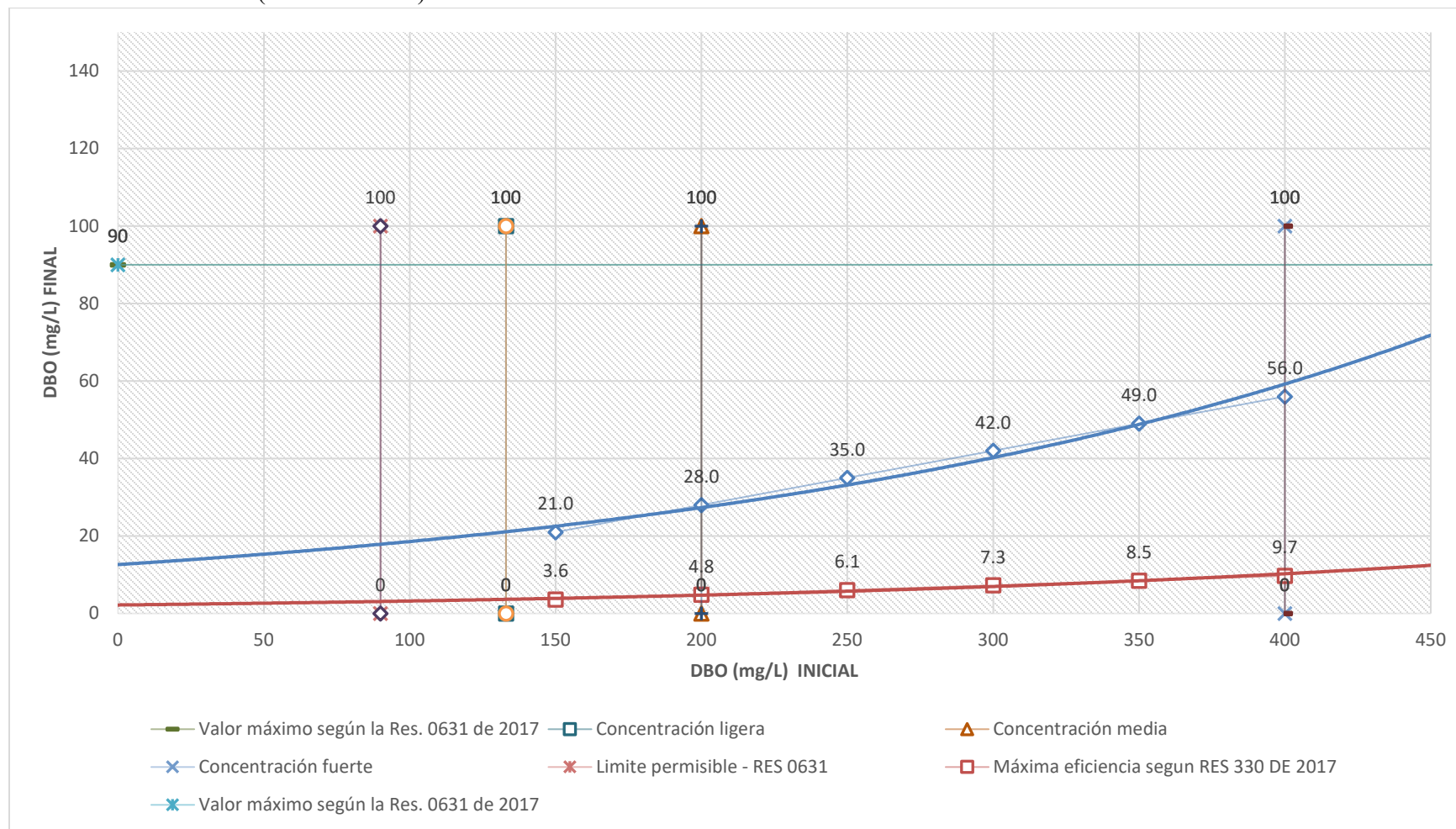


Figura 63 Eficiencias mín. y máx. – Lodos Activados

Fuente: (Buitrago Leon & Dimas Turmequé, 2018)

- Filtros percoladores de alta tasa – Roca

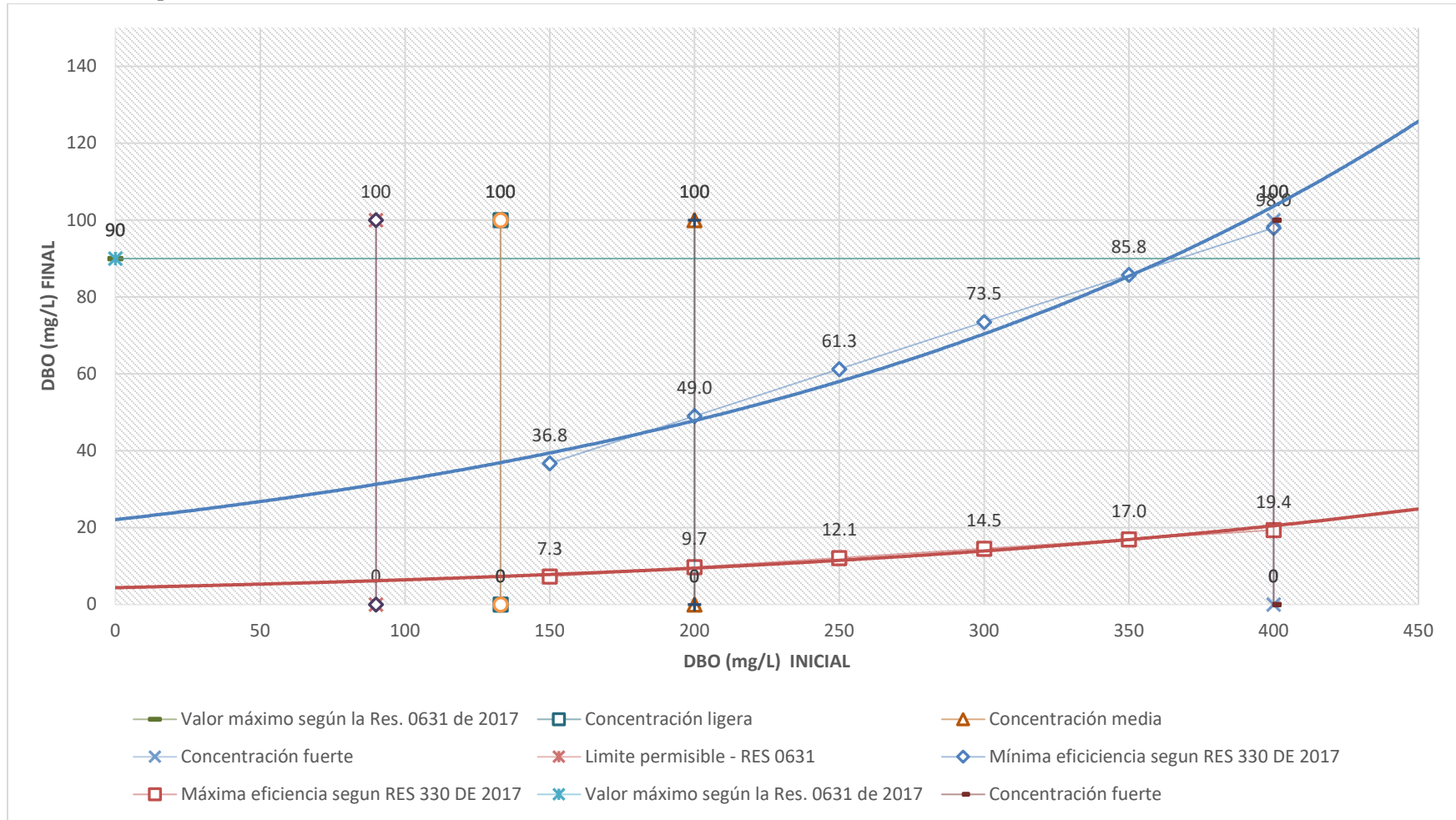


Figura 64 Eficiencias mín. y máx. – Filtros percoladores de alta tasa - Roca

Fuente: (Buitrago Leon & Dimas Turmequé, 2018)

- Filtros percoladores de alta tasa - plástico

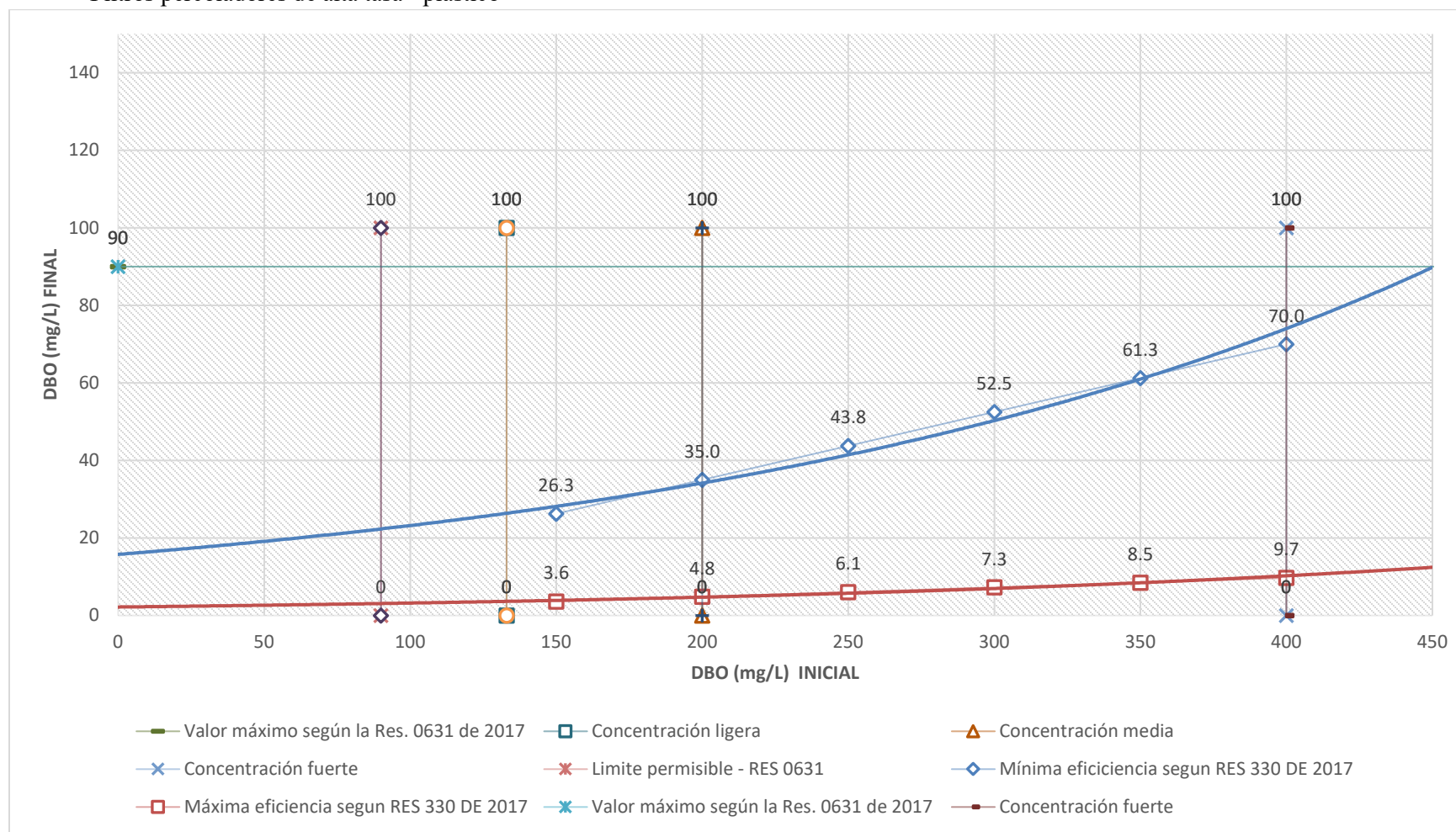


Figura 65 Eficiencias mín. y máx. – Filtros percoladores de alta tasa - Plástico

Fuente: (Buitrago Leon & Dimas Turmequé, 2018)

Sistemas compuestos

- Lagunas aireadas + Lagunas facultativas

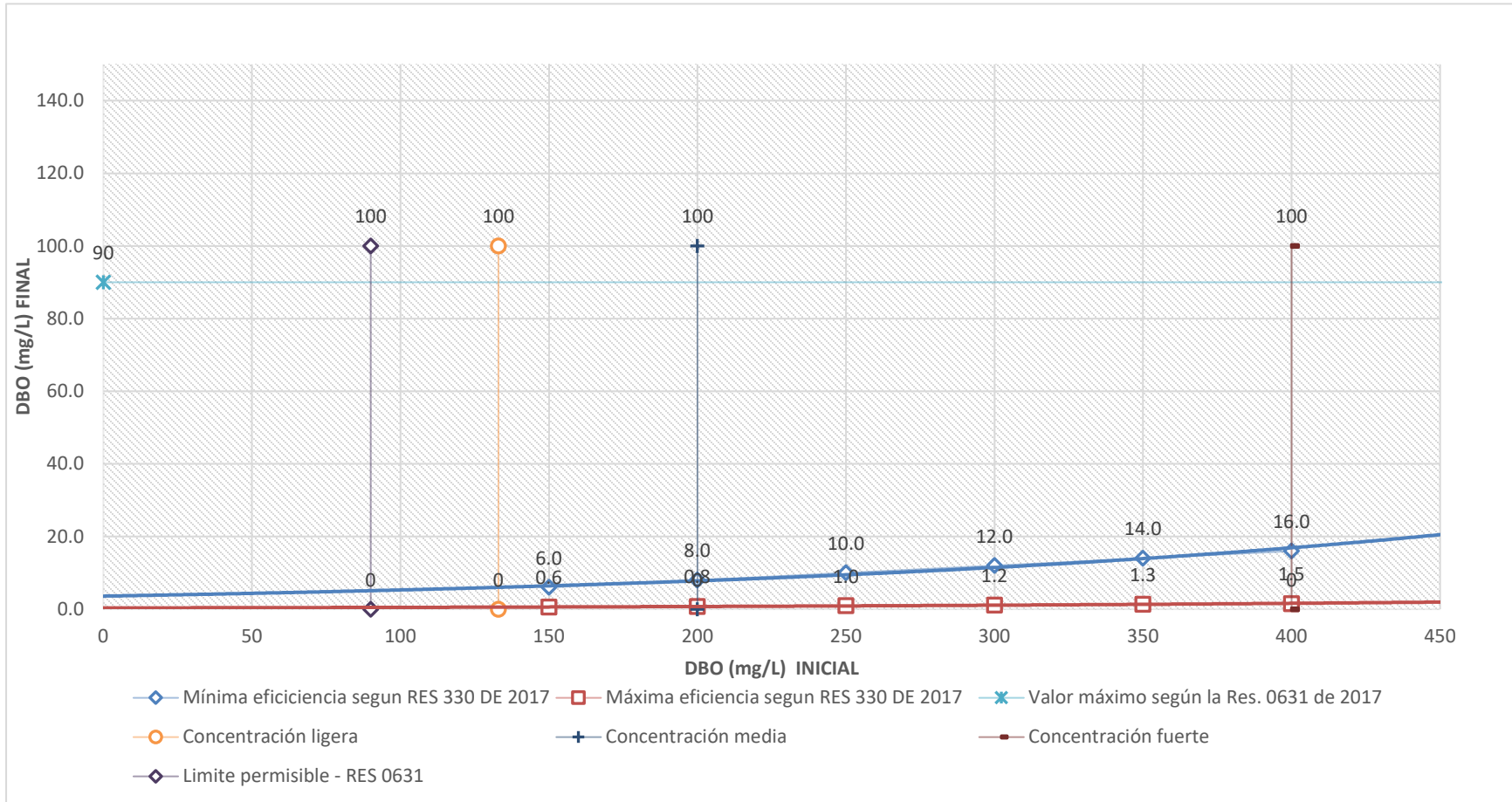


Figura 66 Eficiencias mín. y máx. – Lagunas aireadas + Lagunas facultativas

Fuente: (Buitrago Leon & Dimas Turmequé, 2018)

- Filtros percoladores de alta tasa – plástico + Lodos activados (convencionales)

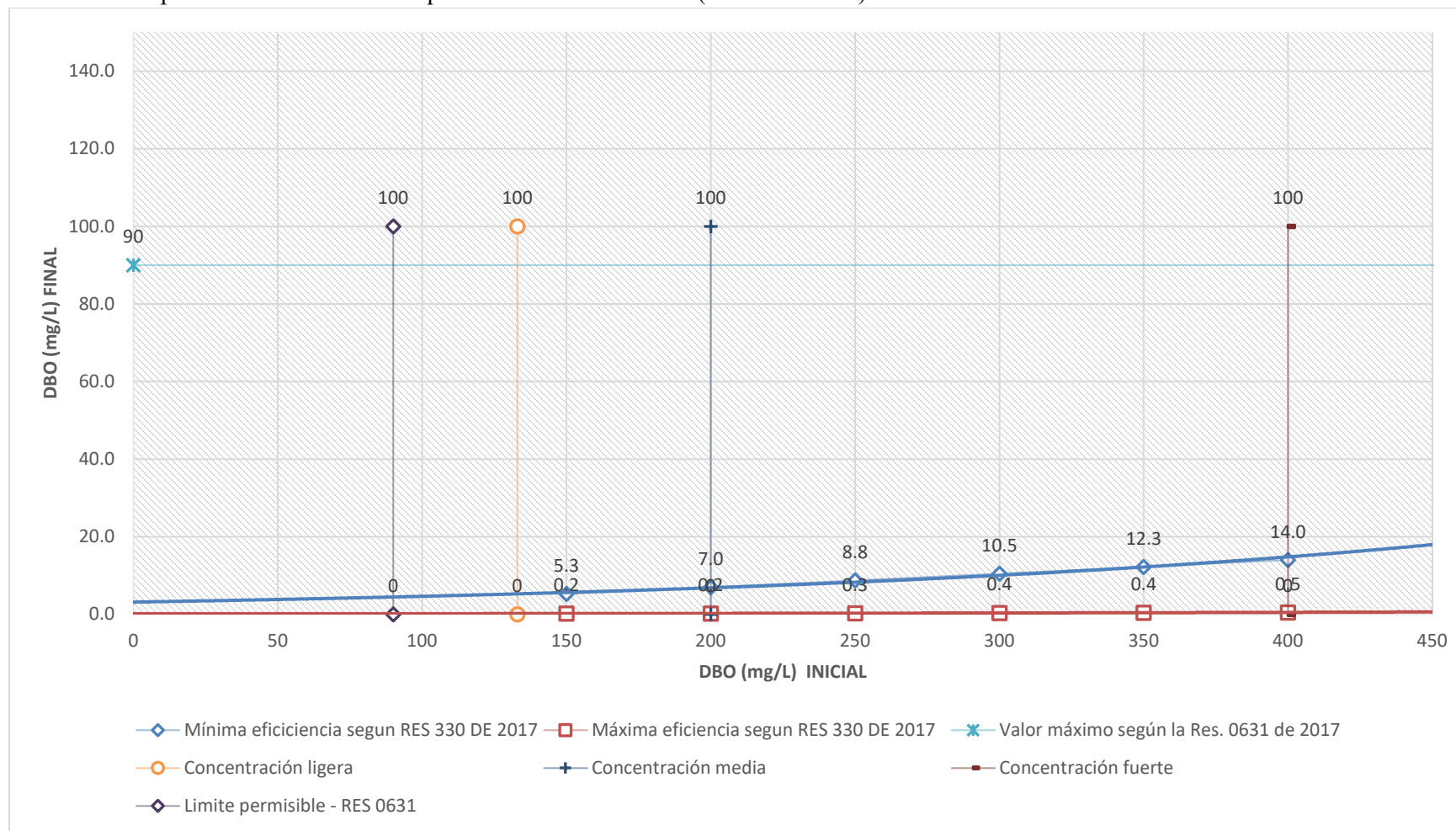


Figura 67 Eficiencias mín. y máx. – f. percoladores de alta tasa – plástico + Lodos activados

Fuente: (Buitrago Leon & Dimas Turmequé, 2018)

- Reactor anaerobio RAP + Filtros percoladores de alta tasa – plástico

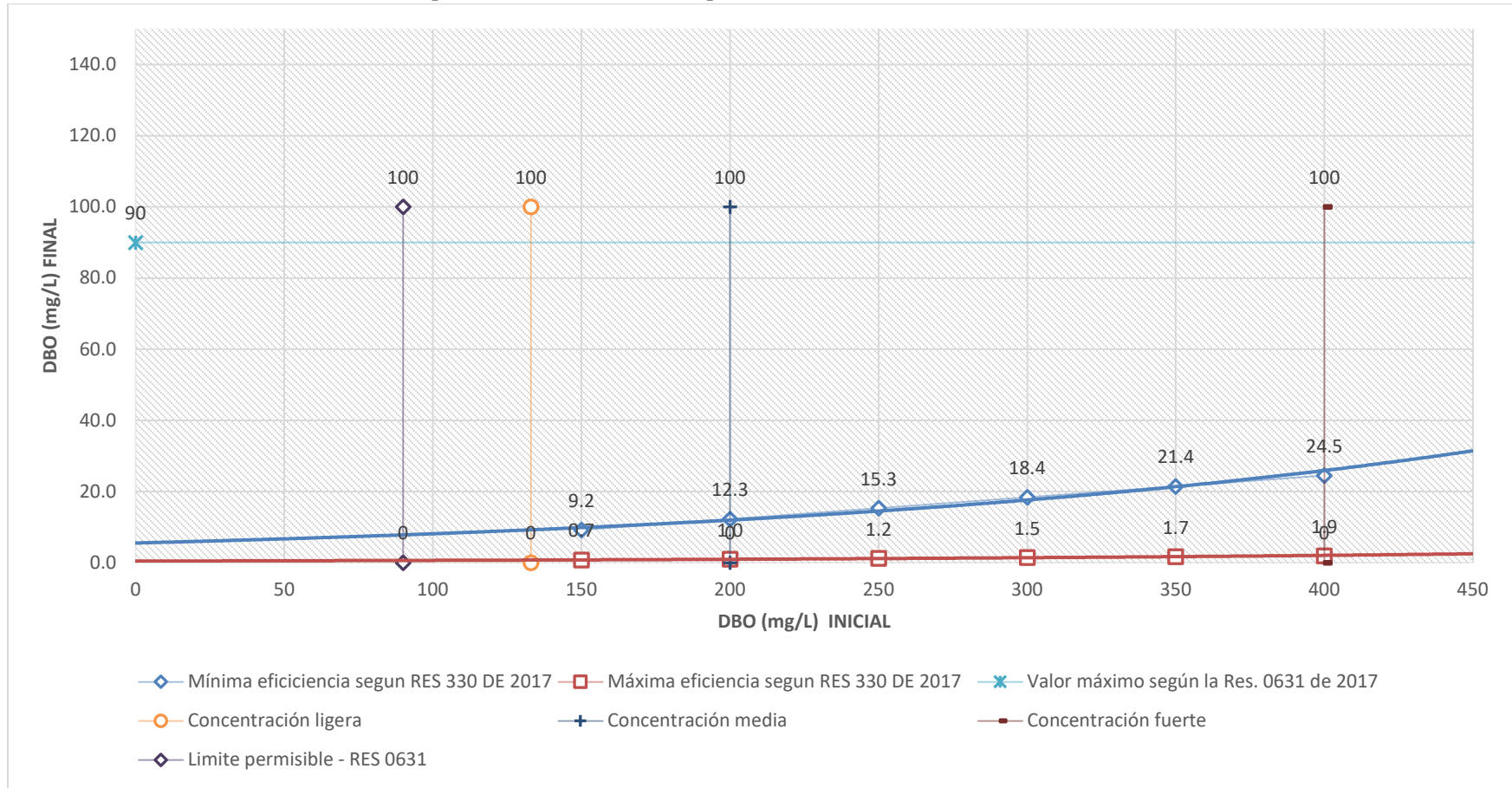


Figura 68 Eficiencias mín. y máx. – R. anaerobio RAP + F. percoladores de alta tasa – plástico

Fuente: (Buitrago Leon & Dimas Turmequé, 2018)

• Reactor UASB + Filtros percoladores de alta tasa – plástico

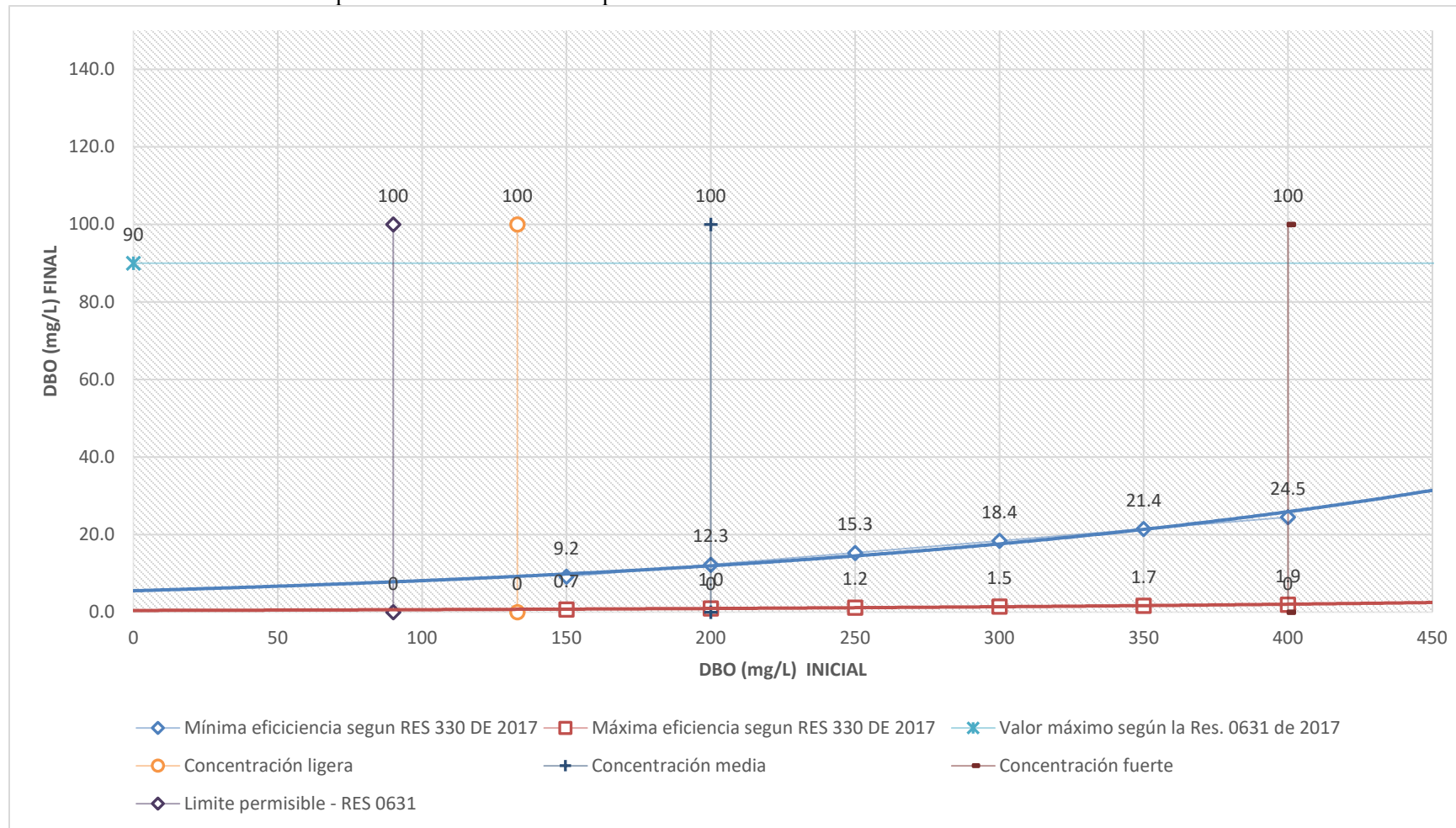


Figura 69 Eficiencias mín. y máx. – R. UASB + F. percoladores de alta tasa – plástico

Fuente: (Buitrago Leon & Dimas Turmequé, 2018)

- Reactor UASB + Lodos activados (convencionales)

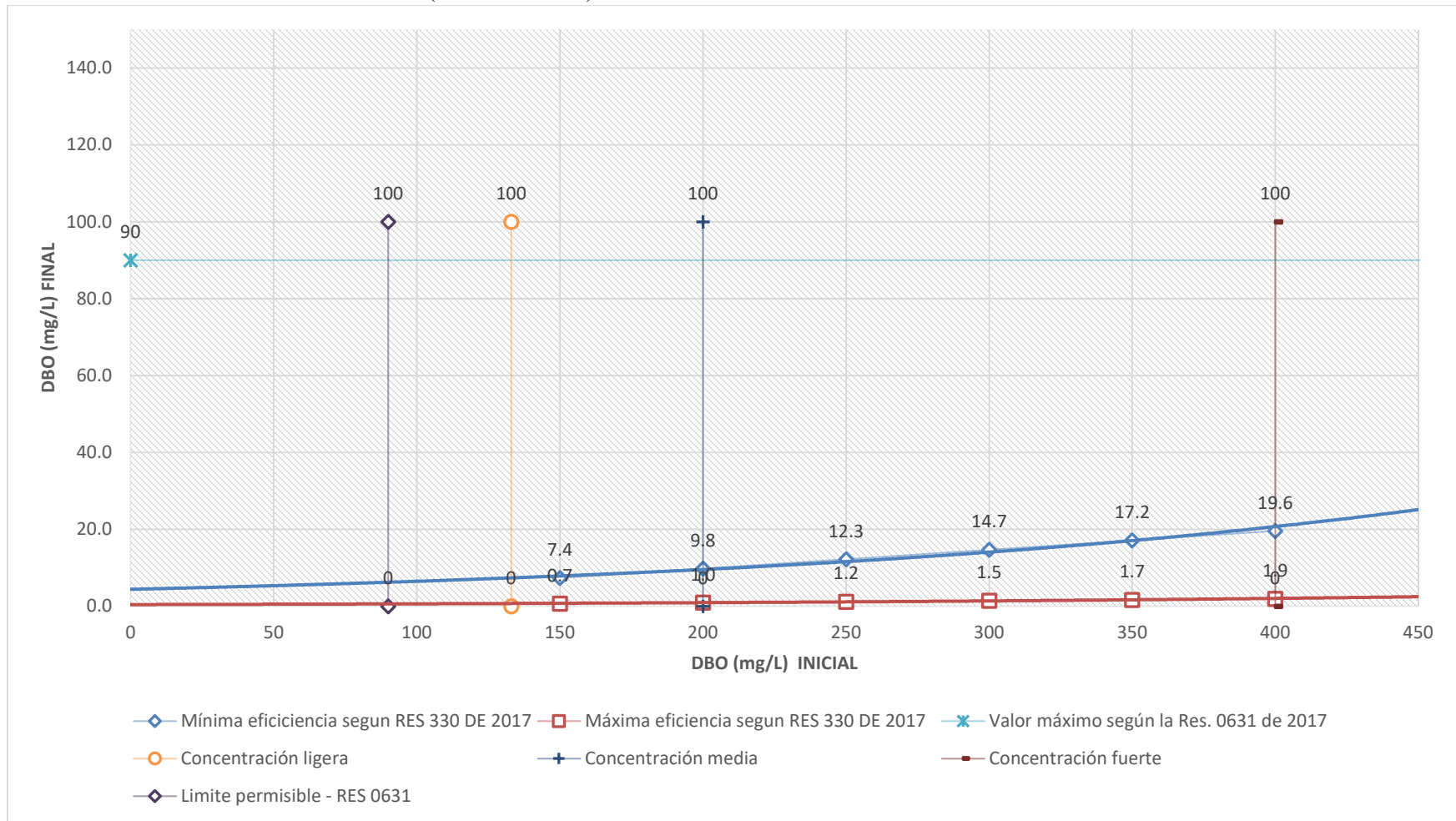


Figura 70 Eficiencias mín. y máx. – R. UASB + Lodos activados (convencionales)

Fuente: (Buitrago Leon & Dimas Turmequé, 2018)

IV. Anexo: Cálculo de emisiones.

La siguiente es una metodología de análisis para definir la producción de GEI por los sistemas de tratamiento de agua residual doméstica, el estudio fue desarrollado por Daniel Nolasco (2010) llamado “*Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales*”. , sin embargo, la metodología fue desarrollada para para los proyectos MDL, que de manera transversal sirve como un análisis a priori para el cálculo de las emisiones de los sistemas de tratamiento analizados por parte del evaluador y/o consultor.

- 1- Debe encontrarse, en la primera columna de la Tabla 32, una línea de base que coincida con la situación de base de su proyecto potencial.⁷
- 2- Luego, en la segunda columna, según la línea de base elegida, se presentan los proyectos potenciales. Si su proyecto no se encuentra, posiblemente sea el primero de su tipo, por lo que tendrá que desarrollar una metodología nueva, que deberá luego ser aprobada por la Junta Ejecutiva del MDL para poder ser utilizado en su proyecto.⁸
- 3- Si su proyecto coincide con una de las opciones propuestas, encontrará en las siguientes celdas de esa misma fila el nombre de la (s) metodología (s) aprobada (s) aplicable (s).
- 4- En la siguiente celda se presentan las ecuaciones para calcular las emisiones de base (BE) y las emisiones de proyecto (EP), con las que se calcula el potencial de reducción de emisiones (ER) de la siguiente forma: $ER = BE - PE$.
- 5- En la última columna (“Comentarios”) encontrará, entre otras cosas, referencias a otros cuadros con valores por defecto para algunos de los parámetros que integran las ecuaciones.
- 6- Al final del cuadro encontrará las definiciones de todos los parámetros que integran las ecuaciones.

⁷ La línea de base no debe consistir necesariamente en la situación actual, sino en la situación más probable al momento de implementar el proyecto.

⁸ En caso que se proponga una nueva metodología en el siguiente link se puede registrar y divulgar <<http://cdm.unfccc.int/Projects/pac/howto/CDMProjectActivity/NewMethodology/index.html>>.

Tabla 32 cálculo de emisiones tCO₂e/año

Línea de base	Proyectos potenciales	Metodologías aplicables	Cálculo simplificado de emisiones de base y proyectos	Comentarios
Tratamiento anaerobio sin sistema de recuperación de metano	Implementación de un sistema de captura y utilización o quemado de metano	AMS III.H, ACM0014	$BE = Q \times CODd \times MCF \times Bo \times GWPC4 \times UF$ $PE = Q \times CODd \times Bo \times GWPC4 \times L - EG \times EF$	Las emisiones del proyecto se deben a fugas e ineficiencias en la captura y quemado del biogás y a las emisiones por consumo de energía (EG x EF).
	Reemplazo por un sistema aeróbico	AMS III.I	$BE = Q \times CODd \times MCF \times Bo \times GWPC4 \times UF$ $PE = Q \times CODd \times MCF \times Bo \times GWPC4 + EC \times EF + S \times DOC \times MCFS \times DOCF \times F \times 16/12 \times GWPC4$	Se considera que el lodo generado en el proyecto es tratado anaeróbicamente sin recuperación de metano. De lo contrario, no debe tenerse en cuenta el 3er término de PE (S x DOC x MCFS...).
	Introducción de una primera etapa de tratamiento anaeróbica con recuperación de metano	AMS III.H, ACM0014	$BE = Q \times CODd \times MCF \times Bo \times GWPC4 \times UF - EG \times EF$ $PE = (0,14 + 0,25 \times MCF) \times Q \times COD \times Bo \times GWPC4$	P. ej. Introducción de un reactor anaeróbico con recuperación de metano anterior a un sistema existente de lagunas anaeróbicas. Se supone que en el reactor anterior se degrada 70% de la materia orgánica recibida y otro 25% en la laguna existente. El MCF corresponde a la laguna existente (ver cuadro B).
	Co-compostaje con residuos sólidos orgánicos	AMS III.F, AM0039	$BE = Q \times CODd \times MCF \times Bo \times GWPC4 \times UF$ $PE = EC \times EF$	El agua residual se utiliza como fuente de humedad y nutrientes en el proceso de compostaje.
tratamiento aeróbico (con aireación forzada)	Reemplazo por un sistema de tratamiento anaerobio con recuperación de metano.	AMS III.H	$BE = (Q \times CODd \times MCF \times Bo + S \times DOC \times MCFS \times DOCF \times F \times 16/12) \times GWPC4 \times UF + EC \times EF$ $PE = Q \times CODd \times Bo \times GWPC4 \times L - EG \times EF$	A la cantidad de lodo generado en la línea de base (S) debe restársele lo que se estima que generará el proyecto. De esta forma sólo se incluye la generación adicional del sistema aeróbico. Se considera que el lodo generado en el tratamiento aeróbico de base es tratado anaeróbicamente (o dispuesto en un relleno sanitario) sin recuperación de metano; de lo contrario, no debe considerarse el segundo término de la primera parte de la ecuación (S x DOC x ... x 16/12).
Descarga directa a un curso de agua anóxico	Implementación de un sistema de tratamiento anaerobio con recuperación de metano	AMS III.H	$BE = Q \times COD \times MCF \times Bo \times GWPC4 \times UF$ $PE = Q \times COD \times Bo \times GWPC4 \times L - EG \times EF$	El MCF (ver cuadro B) de la línea de base corresponde al sitio de descarga. Para lograrse una reducción de emisiones, el proyecto debe incluir generación de energía para exportar.

Fuente: (Nolasco, 2010)

Siglas

- Bo: Máxima capacidad de producción de metano del agua residual (valor conservador: 0,21 kgCH₄/kgDQO).
- BE: emisiones en la línea de base (tCO₂e/año).
- PE: emisiones del proyecto (tCO₂e/año).
- Q: caudal de agua residual o lodos (m³/año).
- CODd: demanda química de oxígeno degradada promedio (t/m³).
- COD: demanda química de oxígeno promedio (t/ m³).
- MCF: factor de corrección de metano para el tratamiento o sitio de descarga del agua servida. Ver Tabla 33
- MCFS: factor de corrección de metano para el sistema de tratamiento o disposición del lodo. Ver Tabla 33 o Tabla 36.
- MCFLA: factor de corrección de metano para aplicación al terreno (0,05).
- MCFLA: factor de corrección de metano para aplicación al terreno (0,05).
- GWPN₂O: potencial de calentamiento global del óxido nitroso (310 kgCO₂e/kgN₂O).
- UF: factor de corrección por incertidumbre (0,94).
- UFP: factor de corrección por incertidumbre en la estimación de emisiones del proyecto (1,06)
- EC: energía consumida en forma de combustible fósil o electricidad (toneladas/año o MWh/año).
- EG: cantidad de energía generada excedente (= generación – consumo del proyecto) que desplace el uso de combustibles fósiles o electricidad (toneladas/año o MWh/año).
- EF: factor de emisión de la red eléctrica o combustible fósil (tCO₂e/t o tCO₂e/MWh).
- S: cantidad de lodo generado o tratado (t/año).
- DOC: contenido de materia orgánica en el lodo generado (0,05 para lodo doméstico, 0,09 para lodo industrial).
- DOCF: fracción del DOC que se transforma en biogás (0,5).
- F: fracción de metano en el biogás (0,5).
- WN: fracción másica de nitrógeno en el lodo (tN/t lodo).
- L: fracción del biogás generado que se pierde en el sistema de captura, ruteo y utilización o quemado. Se aconseja utilizar un valor de 0,2.
- EFN₂O: Factor de emisión de N₂O para lodo aplicado al terreno.

Tabla 33 Factor de corrección de metano para el tratamiento o sitio de descarga del agua servida.

Tipo de tratamiento	Comentarios	MCF	Rango
Descarga directa a cuerpo de agua natural (lago, río, mar)	Ríos con altas cargas orgánicas pueden volverse anaeróbicos	0.1	0 – 0.2
Planta de tratamiento aeróbica	Correctamente gestionada	0	0 – 0.1
Planta de tratamiento aeróbica	Mal gestionada o sobrecargada	0.3	0.2 – 0.4
Digestor anaeróbico de lodos	No considera recuperación de metano	0.8	0.8 – 1
Reactor anaeróbico	No considera recuperación de metano	0.8	0.8 – 1
Laguna anaeróbica poco profunda	Profundidad menor a 2 m	0.2	0 – 0.3
Laguna anaeróbica profunda	Profundidad mayor a 2 m	0.8	0.8 – 1

fuelle: (Nolasco, 2010)

NOTA: Para lograr un resultado conservador en el cálculo de reducción de emisiones, se recomienda utilizar los valores más bajos del rango para las emisiones de base y los más altos para las del proyecto. (IPCC, 2006)

Tabla 34 Factor de emisión.

Tipo de combustible	EF (Factor de emisión) (tCO₂ e/t)
Gasolina	3.070
Gasoil (diesel)	3.186
Queroseno	3.149
Fuel oil	3.127
Gas natural	2.693
Gas licuado de petróleo	2.985
Carbón de coque	2.668
Otro carbón bituminoso	2.441
Carbón sub-bituminoso	1.816
Coque	3.017

Fuente: (IPCC, 2006)

Tabla 35 Factor de emisión de la red eléctrica.

País o Red	EF (factor de emisión de la red eléctrica- (tCO₂e/MWh)
Estados Unidos	0,559
China (red del este)	0,9046
India	0,81
Vietnam	0,705
Reino Unido	0,43
España	0,428
Italia (Sicilia)	0,47
Ucrania	0,807
Brasil (red interconectada del sur-sudeste-medio oeste)	0,2826
Ecuador	0,56053
Argentina	0,425
Uruguay	0,575
Colombia	0,4392
El Salvador	0,717
Chile	0,408
Perú	0,47207
Nicaragua	0,7127
Bolivia	0,581
Panamá	0,5593
Costa Rica	0,48835
Australia	0,751
Nueva Zelanda	0,161
Filipinas	0,494
Etiopía	0,00591
Ghana	0,57582
Uganda	0,5767

Fuente: (IPCC, 2006)

Tabla 36 Factor de corrección de metano para el sistema de tratamiento o disposición del lodo.

Sitio de disposición	Características	MCFS
Sitio de disposición anaeróbico gestionado	Debe contar con una disposición controlada y por lo menos uno de los siguientes: (1) material cobertor, (2) compactación mecánica, (3) nivelación del residuo.	1
Sitio de disposición semi aeróbico gestionado	Debe contar con una disposición controlada y por lo menos uno de los siguientes métodos de aireación: (1) material cobertor permeable, (2) sistema de captura de lixiviados, (3) lagunas de retención de lixiviados, (4) sistema de ventilación de gases	0,5
Sitio de disposición no gestionado - profundo y/o con nivel freático alto	Sitios que no cumplan con los requisitos de un sitio gestionado y que tengan una profundidad mayor a 5 m y/o el nivel freático cerca del nivel del suelo, es decir, rellenar un lago o estuario con residuos	0,8
Sitio de disposición no gestionado poco profundo	Sitios que no cumplan con los requisitos de un sitio gestionado y que tengan una profundidad menor a 5 m	0,4

Fuente: (IPCC, 2006)