



TRATAMIENTO NO CONVENCIONAL DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS DE TUCANÍ, VENEZUELA

**Mildred Bracho Luzardo
Paula Marcos Barquilla
Laura Moreno Arias
José Antonio Olivares Peña**

Máster en Ingeniería y Gestión del Agua

INDICE

Indice de Tablas.....	IV
Indice de Figuras.....	VI
1. Introducción.....	1
1.1. Justificación del proyecto.....	1
1.2. Objetivos.....	3
2. Aspectos Legales.....	4
2.1. Efluentes líquidos.....	4
2.2. Fangos.....	6
2.3. Residuos Peligrosos y no peligrosos.....	7
3. Estudio del Medio Físico.....	8
3.1. Localización.....	8
3.2. Fisiografía.....	9
3.3. Climatología.....	9
3.4. Hidrología.....	10
3.5. Aspectos medio ambientales.....	10
3.6. Actividad económica.....	12
4. Estudio de las Alternativas.....	13
4.1. Lagunaje.....	13
4.1.1. Lagunas anaerobias.....	14
4.1.2. Lagunas facultativas.....	14
4.1.3. Lagunas de maduración o aerobias.....	14
4.2. Lecho de Turba.....	15
4.3. Lechos bacterianos o filtros percoladores.....	16
4.4. Filtros verdes.....	16
4.5. Humedales artificiales.....	18
4.6. Análisis de alternativas:.....	19
5. Diseño.....	20
5.1. Estimación de la población de estudio.....	20
5.2. Caudales de Diseño.....	20
5.3. Carga Contaminante.....	21
5.4. EDAR.....	22
5.5. Aliviadero.....	23
5.6. Desbaste.....	23
5.7. Desarenado.....	29
5.8. Lagunas Anaerobias.....	32
5.9. Lechos de turba.....	39
5.10. Lagunas de maduración o aerobias.....	43
5.11. Eras de secado.....	49
6. Construcción.....	54
6.1. Obra de llegada.....	56
6.2. Desbaste.....	56

6.3. Desarenado	57
6.4. Lagunas anaerobias	57
6.5. Lechos de turba	62
6.6. Lagunas de maduración	63
6.7. Eras de Secado	64
6.8. Varios	64
7. Puesta en Marcha	65
7.1. Pretratamiento	65
7.2. Lagunas	66
7.2.1. Anaerobias	66
7.2.1. Maduración	66
7.3. lecho de turba	67
7.4. Eras de Secado	67
8. Operación y Mantenimiento	68
8.1. Pretratamiento	68
8.1.1. Desbaste	68
8.1.2. Desarenado	68
8.2. Lagunas	68
8.2.1. Anaerobias	70
8.2.2. Maduración	71
8.3. Lechos de Turba	72
8.4. Eras de Secado	72
9. Reutilización de Productos y Subproductos	74
10. Impacto Ambiental	76
10.1. Impacto Social	76
10.2. Impacto Hidrológico	76
10.3. Impacto Atmosférico	77
10.4. Impacto sobre la Biodiversidad	77
10.5. Impacto sobre el suelo	78
10.6. Impacto paisajístico	78
10.7. Infraestructuras	78
10.8. Aprobación de la Evaluación de Impacto Ambiental	79
11. Análisis Económico	80
11.1. Costes de Inversión	80
11.2. Costes de Mantenimiento y Operación	83
12. Conclusión	85
Bibliografía	86

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Rangos y límites máximos de calidad de vertido a cuerpos de agua en Venezuela. .4	
Tabla 2.2. Límites máximos de calidad de vertido para agua destinada a usos agropecuarios. .5	
Tabla 2.3. Requisitos de los vertidos de aguas residuales Real Decreto 509/1996.5	
Tabla 2.4. Características del agua regenerada para riego directo.6	
Tabla 2.5. Límites de metales pesados en fangos para reutilización agraria.6	
Tabla 4.1. Ventajas e inconvenientes de los sistemas de lagunaje. 14	
Tabla 4.2. Ventajas e inconvenientes de los lechos de turba. 15	
Tabla 4.3. Ventajas e inconvenientes de los lechos bacterianos. 16	
Tabla 4.4. Ventajas e inconvenientes de los lechos de turba. 17	
Tabla 4.5. Ventajas e inconvenientes de los humedales artificiales. 18	
Tabla 4.6. Estudio de las diferentes alternativas. 19	
Tabla 5.1. Caudales de tratamiento de las aguas residuales de Tucaní. 21	
Tabla 5.2. Caracterización de las aguas residuales en Venezuela 22	
Tabla 5.3 Caracterización del agua a tratar en la planta 22	
Tabla 5.4. Clasificación de los tipos de rejillas según luz de paso. 23	
Tabla 5.5. Diseño y dimensionamiento de las rejillas de gruesos. 25	
Tabla 5.6. Diseño y dimensionamiento de las rejillas de medios. 27	
Tabla 5.7. Diseño y dimensionamiento de las rejillas de finos. 28	
Tabla 5.8. Materia retenida en rejillas. [13] 28	
Tabla 5.9. Propiedades materia retenida en rejillas. [13] 29	
Tabla 5.10. Velocidad de sedimentación en función del tamaño de las partículas. 31	
Tabla 5.11. Rendimientos de eliminación en el pretratamiento. 32	
Tabla 5.12. Condiciones del agua a la entrada y salida del pretratamiento. 32	
Tabla 5.13. Valores seleccionados para el diseño de las lagunas anaerobias. 34	
Tabla 5.14. Dimensiones adoptadas para cada laguna en funcionamiento ordinario. 36	
Tabla 5.15. Dimensiones adoptadas para cada laguna en funcionamiento de limpieza. 37	
Tabla 5.16. Rendimientos de eliminación 39	
Tabla 5.17. Características del agua a la entrada y salida de la laguna. 39	
Tabla 5.18. Parámetros de diseño del lecho de turba. 40	
Tabla 5.19. Perfil del lecho de turba. 41	
Tabla 5.20. Volúmenes unitarios por lecho. 41	
Tabla 5.21. Rendimiento de eliminación en lechos de turba. 42	
Tabla 5.22. Características del agua a la entrada y salida de los lechos de turba. 42	
Tabla 5.23. Características del agua a la salida del lecho de turba. 44	
Tabla 5.24. Rango de parámetros de diseño de laguna de maduración. 45	
Tabla 5.25. Parámetros de diseño de laguna de maduración. 45	
Tabla 5.26. Dimensionamiento laguna de maduración. 46	
Tabla 5.27. Dimensiones adoptadas para cada laguna en funcionamiento ordinario. 47	

Tabla 5.28 Rendimientos de eliminación lagunas de maduración.....	48
Tabla 5.29. Valores de DQO, DBO ₅ y sólidos en suspensión a la salida de la laguna.	48
Tabla 5.30. Ventajas e inconvenientes de las eras de secado.	49
Tabla 5.31. Detalles eras de secado.....	50

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Mapa de la localización de la ciudad de Tucaní.	8
Figura 3.2. Temperaturas medias mensuales en Tucaní.	9
Figura 3.3. Climograma. [8]	10
Figura 3.4. Parque Nacional de la Sierra de la Culata.	11
Figura 3.5. Frailejones.	11
Figura 3.6. Tipo de vegetación presente en Venezuela.	12
Figura 4.1. Esquema simplificado de un sistema de lagunaje. [9]	14
Figura 4.2. Esquema de un lecho de turba.	15
Figura 4.3. Esquema de funcionamiento de un lecho bacteriano. [10]	16
Figura 4.4. Esquema de funcionamiento de filtros verdes. [11]	17
Figura 4.5. Esquema de humedal artificial.	18
Figura 5.1. Diagrama de bloques de EDAR de Tucaní.	22
Figura 5.2 Esquema de las diferentes rejillas de desbaste y su disposición en el canal.	29
Figura 5.3. Dimensiones del canal desarenador.	31
Figura 5.4 Perfil del desarenador	32
Figura 5.5. Esquema de reacciones de digestión anaerobia. [15]	33
Figura 5.6 Esquema en perfil de laguna anaerobia.	38
Figura 5.7 Esquema en planta de laguna anaerobia.	38
Figura 5.8 Esquema en perfil del lecho de turba.	42
Figura 5.9 Esquema en planta del lecho de turba.	43
Figura 5.10 Esquema en perfil de laguna de maduración.	47
Figura 5.11 Esquema en planta de laguna de maduración.	48
Figura 5.12 Esquema en perfil de la era de secado.	51
Figura 5.13 Esquema en planta de la era de secado.	51
Figura 5.14 Detalles operación de limpieza.	52
Figura 6.1. Emplazamiento de la EDAR con las conducciones de llegada y salida a la planta.	54
Figura 6.2. Perfil del terreno de la línea de agua completa de la instalación.	54
Figura 6.3. Perfil del terreno del emplazamiento de la EDAR.	55
Figura 6.4. Perfil del terreno de la conducción de entrada de agua residual a la EDAR.	55
Figura 6.5. Perfil del terreno de la conducción de salida de agua tratada de la EDAR.	55
Figura 6.6 Diseño del canal de desbaste.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 6.7. Canal desarenador de hormigón.	57
Figura 6.8. Movimiento de tierras en la construcción de lagunas.	58
Figura 6.9. Estabilización de taludes.	59
Figura 6.10. Revestimiento con material plástico del fondo de la laguna.	61
Figura 6.11. Revestimiento con material plástico de los taludes de la laguna.	62
Figura 6.12. Esquema del lecho de turba.	63
Figura 6.13. Esquema de una era de secado.	64

Figura 9.1 Plantación de plátanos	74
Figura 9.2 Disposición de la plantación platanera.	75

1. INTRODUCCIÓN

Todas las comunidades en su día a día producen residuos líquidos, sólidos y emisiones atmosféricas como consecuencia de su subsistencia y desarrollo. El líquido residual (agua residual) es en esencia el agua suministrada a la comunidad tras haber sido utilizada para una variedad de aplicaciones por distintas entidades, ya sean residencias urbanas, instituciones o industrias, junto con la escorrentía producto del agua de lluvia.

Estas aguas comúnmente contienen sustancias orgánicas que al descomponer pueden generar problemas de olores desagradables. Por otro lado, contienen numerosos microorganismos patógenos que habitan en el tracto intestinal, nutrientes que pueden estimular el crecimiento de plantas acuáticas, y compuestos tóxicos con potencial mutagénico o cancerígeno [1].

Es por estos motivos que estas aguas al producirse, deben ser inmediatamente removidas de su fuente de generación, y trasladadas para darles un tratamiento adecuado que conlleve a su reutilización o desecho en función de proteger la salud pública y el medio ambiente.

El tratamiento de estas aguas dependerá de sus características iniciales, y de acuerdo a los contaminantes que contenga estos pueden ser eliminados o neutralizados por medio de procesos físicos, químicos o biológicos. Por otro lado, para la selección del tratamiento también deben considerarse las características de la zona, al igual que la disponibilidad de recursos de cada población.

1.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Los tratamientos no convencionales o como también suelen llamarse tratamientos blandos, han sido muy utilizados a lo largo del tiempo en pequeñas comunidades de todo el mundo, demostrando que son tratamientos válidos para la depuración de las aguas dependiendo las características del entorno en el cual se desarrollen.

Las plantas depuradoras de aguas residuales basadas en tecnologías convencionales, a pesar de obtener buenos resultados en su tratamiento, ocasionan numerosos problemas técnicos que requieren de un seguimiento y control continuo, implicando altos costes económicos. Debido a estas dificultades se han desarrollado tecnologías alternativas que permiten minimizar esta problemática, planteando una solución factible para llevar a cabo en pequeñas comunidades necesitadas.

El empleo de tecnologías no tradicionales permite que los procesos de tratamiento de aguas residuales se desarrollen mediante autodepuración natural, es decir, depurando las aguas contaminadas de la forma en la que lo haría la naturaleza por sí misma. De esta

manera los costes de operación y las necesidades de mantenimiento del tratamiento son inferiores a la depuración convencional.

Esta iniciativa es muy ventajosa para poblaciones con un número reducido de habitantes y condiciones climáticas propicias para su desarrollo, donde tanto la accesibilidad a la tecnología como al recurso energético sea limitada debido a los elevados costes que estos pueden suponer o a la posible ausencia de los mismos.

La solución planteada en aquellos lugares que presentan los inconvenientes mencionados, permite que la depuración de las aguas pueda desarrollarse sin problema, siempre y cuando el proceso se ejecute con un mantenimiento y seguimiento controlado.

El presente proyecto tiene cabida en la ciudad de Tucaní, una pequeña población de 20.000 habitantes del occidente de Venezuela. Las condiciones actuales en este país hacen que esta localidad tenga grandes dificultades respecto al suministro energético, y al no siempre poder disponer de dicho recurso, una planta depuradora convencional sería inviable.

Conjuntamente se sitúa la problemática, aún por resolver, de la afección al lago de Maracaibo con las aguas residuales domésticas e industriales de las capitales y otros centros poblados que se ubican en las cuencas que vierten sus cauces a esta masa de agua, consecuencia de un desarrollo masivo no planificado. Al no depurar las aguas de estos nuevos núcleos se incrementaron los niveles de nitrógeno en las aguas y se indujo un estado de eutrofización. La ciudad de Tucaní es uno de los núcleos urbanos que contribuye con esta contaminación al no presentar planta de depuración alguna, pues el lago actúa como receptor del escurrimiento de las aguas de la cuenca en la que se encuentra, transportando anualmente gran cantidad de sedimentos por escorrentía.

Adicionalmente el lago cuenta con actividad petrolera significativa, la cual, por fallos de mantenimiento en sus instalaciones, ha generado innumerables derrames de este tóxico hidrocarburo disminuyendo la fauna y flora de la localidad, no permitiendo que sus aguas puedan ser utilizadas para abastecimiento, y eliminando su potencial como fuente recreacional.

Debido a estas circunstancias se ha optado por la realización de un tratamiento que pueda adaptarse a esta localidad, donde además de depurar las aguas a pesar de la inconsistencia en el suministro energético (lo cual disminuye la afección al lago y colabora con su futura restauración), se puedan reutilizar las mismas para la plantación de cultivos tradicionales de la zona, revalorizando el desecho y resolviendo el problema de suministro agrícola.

El tratamiento planteado en Tucaní es un proyecto que puede llevarse a la práctica, como ha sido demostrado en muchas otras sociedades que presentan desventajas similares a las mencionadas, en las cuales se han obtenido resultados exitosos.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente proyecto será la depuración de las aguas residuales de la población de Tucaní en el estado de Mérida, Venezuela. Para lograrlo se diseñará una planta de tratamiento de aguas que funcione a través de métodos no convencionales, la cual dará cabida a la reutilización de dicha agua para regadío, al igual que la revalorización de los fangos como abono en la actividad agrícola.

Para que la estación depuradora en cuestión se adapte a las características específicas de la población, y a su vez sea sostenible en el tiempo, se plantearon los siguientes objetivos complementarios para el proyecto:

- Estudio de las características y necesidades de la población de Tucaní.
- Comparación de distintas tecnologías no convencionales y selección de la más adecuada para la planta.
- Diseño de la estación depuradora.
- Definición de los requisitos de construcción de la estación depuradora.
- Estudio de Impacto Ambiental.
- Estimación del presupuesto de inversión y presupuesto de mantenimiento.

2. ASPECTOS LEGALES

El agua tratada que saldrá de la depuradora tendrá como finalidad su reutilización en actividad agrícola de la zona, sin embargo, en caso de encontrarnos en temporada de lluvia y no ser requerida, la misma será vertida al río Tucaní ubicado cerca de la planta de tratamiento.

Por otro lado, los sólidos y fangos generados en la planta tendrán distinta disposición. Los residuos del pretratamiento, compuestos principalmente por sólidos grandes y arenas, irán a vertedero, mientras que los producidos en procesos biológicos serán reutilizados en la industria agropecuaria como abono.

2.1. EFLUENTES LÍQUIDOS

En Venezuela, el Decreto 883 Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos [2] es el instrumento jurídico que define los parámetros que deben cumplir los vertidos para conservar la calidad de los cuerpos de agua, ya sea descargando a la red cloacal, a ríos, lagos, embalses o al medio marino-costero. De igual forma este decreto clasifica las aguas en función a su uso y características.

Con respecto al presente proyecto debemos considerar los límites máximos de calidad de vertidos que vayan a ser descargados en forma directa a ríos, ya que estos valores sentarán las bases para el diseño de la estación depuradora. Los límites y rangos estipulados en Venezuela se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2.1. Rangos y límites máximos de calidad de vertido a cuerpos de agua en Venezuela.

PARÁMETRO	LÍMITE	PARÁMETRO	LÍMITE
Aceites minerales e hidrocarburos	20 mg/l	Fenoles	0,5 mg/l
Aceites y grasas vegetales y animales	20 mg/l	Fluoruros	5 mg/l
Alkil Mercurio	No detectable	Fósforo	10 mg/l
Aldehidos	2 mg/l	Hierro	10 mg/l
Aluminio total	5 mg/l	Manganeso	2 mg/l
Arsénico total	0,5 mg/l	Mercurio	0,01 mg/l
Bario	5 mg/l	Nitrógeno	40 mg/l
Boro	5 mg/l	Nitritos + Nitratos	10 mg/l
Cadmio	0,2 mg/l	pH	6 - 9
Cianuro	0,2 mg/l	Plata	0,1 mg/l
Cloruros	1000 mg/l	Plomo	0,5 mg/l
Cobalto	0,5 mg/l	Selenio	0,05 mg/l
Cobre	1 mg/l	Sólidos flotantes	Ausentes
		Sólidos suspendidos	80 mg/l
		Sólidos sedimentables	1 ml/l

PARÁMETRO	LÍMITE
Cromo	2 mg/l
DBO₅	60 mg/l
DQO	350 mg/l
Detergentes	2 mg/l
Dispersantes	2 mg/l
Espuma	Ausente
Estaño	5 mg/l

PARÁMETRO	LÍMITE
Sulfatos	1000 mg/l
Sulfitos	2 mg/l
Sulfuros	0,5 mg/l
Zinc	5 mg/l
Biocidas Organo Fosforados	0,25 mg/l
Biocidas organo clorados	0,05 mg/l
Coliformes totales	1000/100ml

Por otro lado, como el agua también será reutilizada para riego de cultivos, en la siguiente tabla se muestran las características que deben cumplirse para dicho fin.

Tabla 2.2. Límites máximos de calidad de vertido para agua destinada a usos agropecuarios.

PARÁMETRO	LÍMITE
Aluminio	1 mg/l
Arsénico	0,05 mg/l
Bario	1 mg/l
Boro	0,75 mg/l
Cadmio	0,005 mg/l
Cianuro	0,2 mg/l
Cobre	0,2 mg/l
Cromo	0,05 mg/l
Hierro	1 mg/l
Litio	5 mg/l
Manganeso	0,5 mg/l
Mercurio	0,01 mg/l
Molibdeno	0,005 mg/l

PARÁMETRO	LÍMITE
Níquel	0,5 mg/l
Plata	0,05 mg/l
Plomo	0,05 mg/l
Selenio	0,01 mg/l
Sólidos disueltos	3000 mg/l
Sólidos flotantes	Ausentes
Vanadio	10 mg/l
Zinc	5 mg/l
Biocidas organofosforados	0,1 mg/l
Biocidas Organoclorados	0,2 mg/l
Coliformes totales	50.000 NMP/100 ml
Coliformes fecales	10.000 NMP /100 ml

Todos los parámetros mostrados en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** deben ser alcanzados a la salida de la estación depuradora, sin embargo, al comparar la legislación venezolana con la de la Unión Europea es notable que la segunda es mucho más restrictiva, particularmente frente a los parámetros más importantes como lo son la DQO, DBO₅, sólidos en suspensión, fósforo y nitrógeno. De esta forma, y considerando que el progreso siempre estará direccionado hacia las mejores prácticas y gestión del recurso agua, los parámetros considerados para el diseño serán los mostrados en la siguiente tabla, que corresponden a los estipulados en el Real Decreto 509/1996 [3] de la normativa española.

Tabla 2.3. Requisitos de los vertidos de aguas residuales Real Decreto 509/1996.

PARÁMETRO	LÍMITE
-----------	--------

PARÁMETRO	LÍMITE
DQO	125 mg/l
DBO ₅	25 mg/l
Sólidos suspendidos	35 mg/l
Nitrógeno	15 mg/l
Fósforo	2 mg/l

De igual forma, el Real Decreto 1620/2007 [4] que establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas, estipula que el agua reutilizada para riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana deberá cumplir con los parámetros mostrados en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Características del agua regenerada para riego directo.

PARÁMETRO	LÍMITE
Nematodos intestinales	1 huevo /10 L
Escherichia Coli	10.000 UFC/ 100 ml
Sólidos suspendidos	35 mg/l

2.2. FANGOS

Los fangos producidos en la EDAR en los que se involucran procesos biológicos, debido a sus características ricas en materia orgánica y elementos fertilizantes, pueden ser revalorizados a través de su utilización en la actividad agraria.

Hacer esto traería un doble beneficio; primero, un beneficio ambiental como consecuencia de la eliminación de los fangos sin alteración relevante del equilibrio ecológico, y segundo, un beneficio agrario debido a su aplicación sobre los suelos impulsando y mejorando el rendimiento agrícola.

Debido a la ausencia de legislación venezolana específica en el tema de reutilización de fangos para la industria agraria, se tomará como referencia el Real Decreto español 1310/1990 [5], en el cual se establecen los valores límite de concentración de metales pesados en dichos fangos.

Tabla 2.5. Límites de metales pesados en fangos para reutilización agraria.

Parámetros	Valores límite (mg/Kg de materia seca)	
	Suelos con pH menor de 7	Suelos con pH mayor a 7
Cadmio	20	40
Cobre	1	1,75
Níquel	300	400
Plomo	750	1,2
Zinc	2,5	4

Parámetros	Valores límite (mg/Kg de materia seca)	
	Suelos con pH menor de 7	Suelos con pH mayor a 7
Mercurio	16	25
Cromo	1	1,5

Este Real Decreto también establece que, por regla general, los lodos de depuración deberán de analizarse, al menos, cada seis meses en la fase de producción, y como mínimo, adicional a los metales pesados descritos en la tabla anterior, los parámetros de materia seca, materia orgánica, pH, nitrógeno y fósforo.

Finalmente, en el artículo 3 queda prohibida la aplicación de lodos a praderas, pastizales y demás aprovechamientos a utilizar en pastoreo directo por el ganado, con una antelación menor de tres semanas respecto a la fecha de comienzo del citado aprovechamiento directo. También se prohíbe su aplicación en cultivos hortícolas y frutícolas durante su ciclo vegetativo.

2.3. RESIDUOS PELIGROSOS Y NO PELIGROSOS

La ley venezolana sobre sustancias, materiales y desechos peligrosos [6] define una sustancia peligrosa como cualquier sustancia líquida, sólida o gaseosa que presente características explosivas, inflamables, reactivas, corrosivas, combustibles, radiactivas o biológicas perjudiciales en cantidades o concentraciones tales que represente un riesgo para la salud y el ambiente.

En caso de la generación de algún residuo peligroso en la planta, los mismos deberán manejarse en las condiciones sanitarias y de seguridad adecuadas de acuerdo a su reglamentación técnica específica, de forma tal que se garantice la prevención y el control de los riesgos a la salud y el ambiente.

De tratarse de lodos con carácter biológico, los mismo deben ser previamente estabilizados antes de ser enviados a vertedero de acuerdo al artículo 108 del Decreto 2635 “Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos” [7]

3. ESTUDIO DEL MEDIO FÍSICO

Para poder realizar un diseño sostenible que se adecúe a las características específicas de la población Tucaní, tomando en cuenta su proyección, necesidades y disponibilidad de recursos, a continuación, se presenta un estudio de los parámetros fundamentales que deben ser considerados para la funcionalidad del proyecto.

Es importante destacar que, debido al carácter rural de la zona, la obtención de valores precisos actuales no es posible, por lo que el diseño se realizará con los últimos datos proporcionados por el estado considerando cierta flexibilidad ante posibles variaciones.

3.1. LOCALIZACIÓN

El área de estudio donde se desarrolla el proyecto se sitúa en la ciudad de Tucaní, capital del Municipio Caracciolo Parra Olmedo, siendo uno de los 23 municipios que conforman el estado Mérida, al oeste de Venezuela.



Figura 3.1. Mapa de la localización de la ciudad de Tucaní.

Se trata de una zona agrícola y ganadera al occidente del territorio nacional la cual forma parte de los pueblos del sur del lago de Maracaibo, en la convergencia de la cordillera norte de Mérida y del Parque Nacional Sierra de la Culata. La ciudad representa un 3,33% de la población total del estado de Mérida, albergando una población de 20.000 habitantes de acuerdo al Censo de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en el año 2.011.

En el anexo I se muestra un plano de situación de la zona en la cual se va a proceder al diseño y construcción de la estación depuradora de aguas residuales de la ciudad de Tucaní.

3.2. FISIOGRAFÍA

La extensión territorial del municipio es de 607 km², y se caracteriza por un relieve accidentado con altitudes que oscilan entre los 25 y 4.000 m.s.n.m. variando desde zonas montañosas con inclinación o pendientes pronunciadas hasta zonas bajas, en donde se localiza la población de Tucaní.

A pesar de ser la región más alta de Venezuela, el área de estudio se ubica en la zona del pie de monte de la Sierra de la Culata, presentando en la zona de llanura una pendiente de aproximadamente 3%, desde los 280 m.s.n.m a 35 m.s.n.m.

3.3. CLIMATOLOGÍA

Debido a las variaciones altitudinales que muestra el Estado de Mérida, la climatología de esta zona presenta enormes diferencias, encontrando climas semiáridos en las partes bajas de planicie hasta climas más húmedos en zonas altas de vertientes nubladas que el 90% de la superficie de la región.

En el área de estudio predomina un clima cálido y templado, con unas temperaturas anuales que registran diferencias que oscilan entre 22°C y 30°C, siendo las temperaturas medias anuales cercanas a los 27°C.

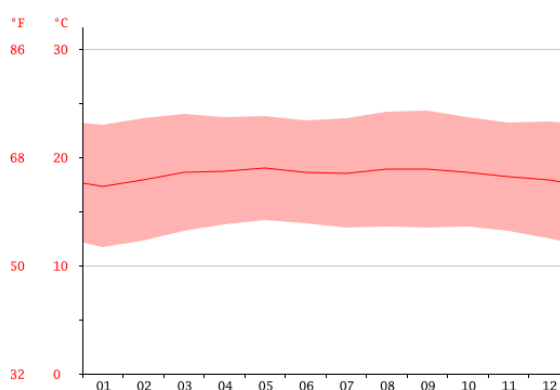


Figura 3.2. Temperaturas medias mensuales en Tucaní.

Las temperaturas registradas tienen diferencias muy marcadas debido a las características del relieve montañoso, encontrando una media de 27°C a orillas del lago de Maracaibo y alcanzando valores inferiores a 0°C por encima de los 4.000 m.s.n.m. siendo el mes más caluroso del año mayo con un promedio de 19°C y enero el mes más frío con 17,3°C.

Las precipitaciones están presentes durante todo el año, incluso en el mes más seco, albergando aproximadamente unos 1.536 mm anuales de lluvia, que varían desde 520 mm hasta unos 1.800 mm en la Sierra de la Culata.

El mes más seco es febrero con 37 mm, mientras que en mayo las precipitaciones ascienden a 222 mm, siendo el mes que presenta las mayores precipitaciones del año.

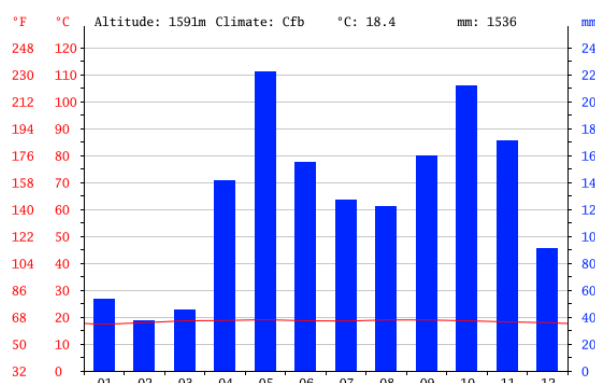


Figura 3.3. Climograma. [8]

3.4. HIDROLOGÍA

La existencia de la cordillera Andina divide el estado de Mérida en dos vertientes, en la parte noroeste se encuentra la vertiente del Caribe a través del lago de Maracaibo y en la zona sureste la del Atlántico que vierte sus aguas en el río Orinoco.

En la vertiente caribeña destaca la cuenca del Chama que desemboca en el sur del lago y forma diversas lagunas debido a los glaciares de las cumbres, destacando el río Tucaní que drena hacia la costa sureste del lago. A su vez, las aguas de las montañas generan el 10% de las aportaciones del río Orinoco.

3.5. ASPECTOS MEDIO AMBIENTALES

El área de estudio presenta una gran diversidad en cuanto a flora y fauna donde las variedades albergadas en la zona crean un entorno que se caracteriza por la vegetación típica del páramo andino, con gramíneas y frailejones.

Se pueden observar los principales usos de la tierra desde los bosques de piedemonte hasta las exuberantes selvas nubladas y amplios páramos, con plantaciones de cacao, cafetales en bosques y cultivos de papa en los páramos.

Los bosques montanos tropicales lluviosos se encuentran en pleno Parque Nacional Sierra de La Culata y en medio de glaciares con lagunas y frailejones gigantes. El Parque Nacional Sierra de La Culata es un territorio virgen que cuenta con protección legal, ocupando una superficie de 200.400 hectáreas, donde dan la casi totalidad de las zonas de vida que existen en Venezuela.



Figura 3.4. Parque Nacional de la Sierra de la Culata.

Los recursos forestales que aún se encuentran en este paisaje están formados por especies como el cedro, el comino, el mijao, el saisai, el jabillo, la ceiba y el pardillo, destacando principalmente arbustales xerófiticos.



Figura 3.5. Frailejones.

Los diferentes estratos arbóreos y sotobosques permiten alojar especies de fauna variadas, encontrándose diferentes especies endémicas como son el jaguar, oso frontino o de anteojos, el cachicamo, la locha, el cuchi-cuchi, el cóndor de Los Andes o anfibios como el sapito niñera.

Además de albergar una amplia fauna y flora, cuenta con los principales yacimientos de fosfato descubiertos hasta ahora en Venezuela, y de concentraciones significativas de plomo, zinc, cobre y plata en complejo, así como mica, berilio, litio y otra serie de minerales no metálicos, entre los que destacan las arcillas y las calizas.

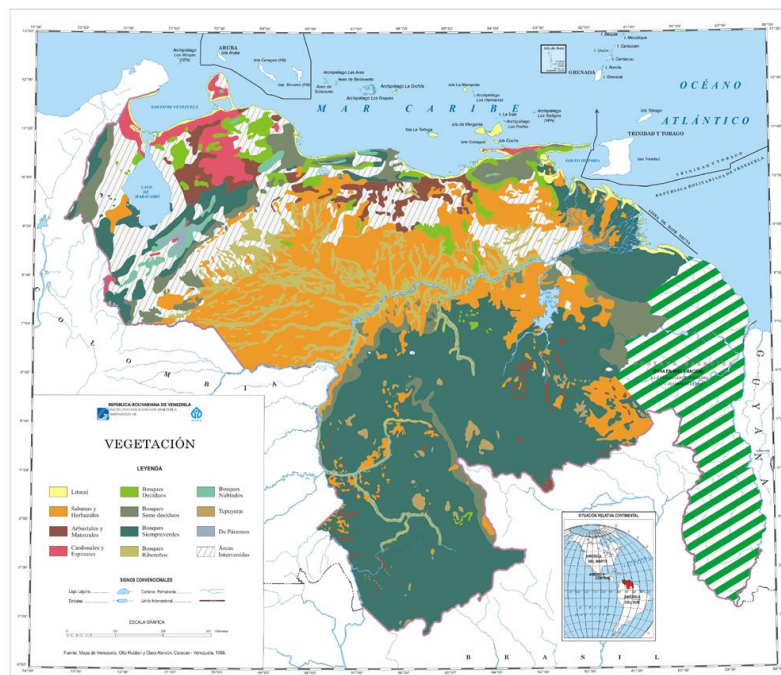


Figura 3.6. Tipo de vegetación presente en Venezuela.

3.6. ACTIVIDAD ECONÓMICA

Los recursos económicos presentes en la zona son diversos, albergando actividades ganaderas, agrícolas, mineras y forestales. Sin embargo, la actividad económica se ha basado tradicionalmente en el desarrollo de la agricultura, destacando productos como café, cacao, yuca, plátano, maíz, caraota, apio o ajo.

Por otro lado, el sector pecuario ha adquirido un gran auge en los últimos años, con cultivos de trucha en ríos, lagunas y quebradas con fines comerciales, y de cangrejos y curubina en lagos. Además, existe una variedad paisajística de recursos forestales en la zona que se centran en el cedro, comino, jabillo, lacre, mijao, pardillo y saisai entre otros.

La cría avícola, junto con la cría de bovino, ovino y porcino son características del lugar, así como la explotación de recursos minerales como son el carbón, feldespato, fosfato, granito, plomo y zinc.

La cultura artesanal es una base fundamental de la economía de Tucaní junto con los cultivos agrícolas sobre todo de café, cacao, cambur, plátano, ocumo, apio, yuca, caraotas, maíz, parchita, aguacate, naranja, zapote, limón, guayaba, ají.

4. ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS

La remoción de los contaminantes presentes en el agua residual puede realizarse por medio de métodos físicos, químicos o biológicos. Los métodos físicos tendrán como objetivo principal la retención de sólidos grandes que hayan sido arrastrados por las aguas, mientras que los químicos y biológicos se encargarán de la eliminación de sólidos pequeños en suspensión y compuestos que se encuentren en disolución.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el agua residual urbana tiene altas cargas de compuestos orgánicos, por lo cual la tecnología que se implemente para la remoción de los mismos será fundamental para el resto del diseño.

El empleo de microorganismos resulta altamente efectivo para la eliminación o estabilización de estos contaminantes ya que los mismos utilizan la materia orgánica bien sea como fuente de energía o como fuente para la síntesis de nueva materia celular. Estos microorganismos en presencia de oxígeno darán lugar a la oxidación aeróbica, donde parte de la materia orgánica se sintetizará para formar nuevos microorganismos y el resto será convertido en productos estables como el dióxido de carbono, nitritos o agua. Por otro lado, en ausencia de oxígeno realizarán la fermentación anaerobia en donde los productos serán compuestos como ácidos orgánicos, alcoholes o metano.

A continuación, se presentan una breve descripción de una serie de tratamientos que han sido previamente seleccionados según sus características intrínsecas para ser implementados en la estación depuradora de la población de Tucaní. Los mismos involucran procesos tanto aerobios como anaerobios, al igual que algunos tratamientos físicos adicionales, con el fin de analizar todas las tecnologías disponibles. Para la selección definitiva se realizará un cuadro comparativo y se seleccionará la alternativa que mejor se adapte a las necesidades del proyecto.

4.1. LAGUNAJE

El lagunaje es una técnica de depuración no convencional que aprovecha los procesos naturales de autodepuración del agua. El agua residual es retenida en varias lagunas correctamente impermeabilizadas donde tienen lugar procesos físicos (decantación de sólidos), químicos (reacciones de oxidación) y biológicos (degradación de materia orgánica debida a actividad microbiana).

En función de la presencia o no de oxígeno, las lagunas se clasifican en aerobias, anaerobias y facultativas, siendo necesaria una combinación de ellas para conseguir una depuración adecuada.

4.1.1. Lagunas anaerobias

Estas lagunas se situarán al comienzo del proceso. El agua bruta es alimentada y se produce la decantación de los sólidos presentes. La ausencia de oxígeno da lugar al desarrollo de bacterias anaerobias que degradarán parcialmente la materia orgánica.

4.1.2. Lagunas facultativas

Se sitúan después de las lagunas anaerobias y se distingue una zona aerobia en superficie y una zona anaerobia en el fondo. Se producirá la estabilización de la materia orgánica presente en el agua.

4.1.3. Lagunas de maduración o aerobias

Se trata de lagunas de poca profundidad, lo que favorece la oxigenación por transferencia superficial, además de la proliferación de organismos fotosintéticos tales como algas o bacterias.

Por otro lado, la acción de la radiación ultravioleta favorece la eliminación de microorganismos patógenos y mineralización de materia orgánica.

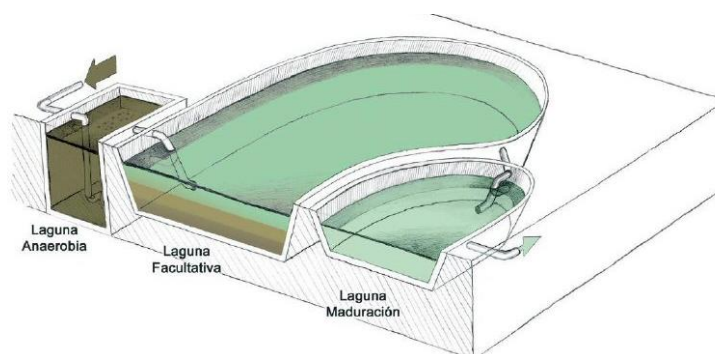


Figura 4.1. Esquema simplificado de un sistema de lagunaje. [9]

Tabla 4.1. Ventajas e inconvenientes de los sistemas de lagunaje.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Sin consumo energético	Requiere una gran superficie
Admite variaciones importantes de carga y caudal	Recuperación lenta cuando se produce el deterioro del sistema biológico
Bajo coste de explotación y mantenimiento	Dependencia de las condiciones climáticas
Bajo coste de implantación	Necesidad de terreno con poco desnivel
No existen períodos de no funcionamiento	Efluente con alto contenido en algas
Rendimientos adecuados incluso con temperaturas muy bajas	
Eliminación de patógenos	
Fácil integración paisajística	

4.2. LECHO DE TURBA

El elemento esencial de este sistema de depuración es un lecho de turba (con un espesor de aproximadamente 0,4-0,5 m) que se coloca sobre una delgada capa de arena (con un espesor de aproximadamente 0,1 m), soportada a su vez por una capa de grava con un espesor de aproximadamente 0,3 m).

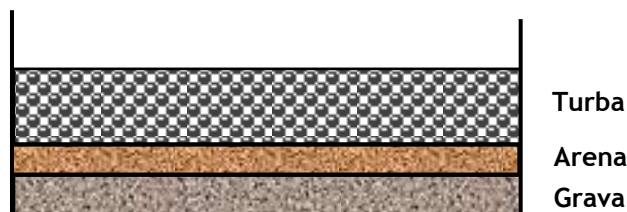


Figura 4.2. Esquema de un lecho de turba.

La depuración se realiza mediante el paso del agua residual a través del lecho de turba, que sirve de soporte para el desarrollo de bacterias y microorganismos poniendo en contacto esta masa microbiana con los compuestos y elementos que el agua residual lleva disuelta, produciéndose reacciones de tipo físico-químico (filtración y adsorción) y de síntesis y estabilización biológica a través de las cuales, la materia en suspensión e incluso un gran porcentaje de las disueltas, son retenidas y transformadas por oxidación-reducción de tipo aeróbico o facultativo, en compuestos más simples o naturales.

Se necesita un dispositivo de reparto para evitar caminos preferentes del influente y otro de drenaje que recoge el efluente de la base del sistema. Además, a la hora de la construcción, se tiene que impermeabilizar la zona donde se va a situar este sistema.

En este sistema se eliminan el 90% de los sólidos en suspensión, el 80% de DQO y el 85% de la DBO₅.

Tabla 4.2. Ventajas e inconvenientes de los lechos de turba.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Ausencia de olores	Menor rendimiento que en el tratamiento convencional
Sin consumo energético	Mayor superficie que el tratamiento convencional
Fácil integración en el entorno	Gasto en la compra de turba para reposición
Ausencia de elementos electromecánicos (excepto en pretratamiento)	Periodos de no funcionamiento para limpieza y reposición de la turba
Sin necesidad de personal cualificado para su explotación y mantenimiento	Rápida colmatación del lecho de turba
Adaptable a variaciones de carga y caudal	Si hay caudales punta, pueden causar arrastres del material
Menor superficie que las lagunas de estabilización	

4.3. LECHOS BACTERIANOS O FILTROS PERCOLADORES

Se trata de un sistema de depuración biológico aerobio cuyo funcionamiento se basa en hacer circular, a través de un medio poroso, aire y agua residual. El material del medio poroso puede ser natural (cantos rodados, antracita, escoria, etc.) o artificial (plásticos). La circulación del aire se realiza de forma natural o forzada, generalmente a contra corriente del agua.

Los microorganismos presentes en el agua se adhieren a los elementos que forman el lecho, donde se desarrollan y degradan la materia orgánica y sustancias contaminantes presentes en el agua.

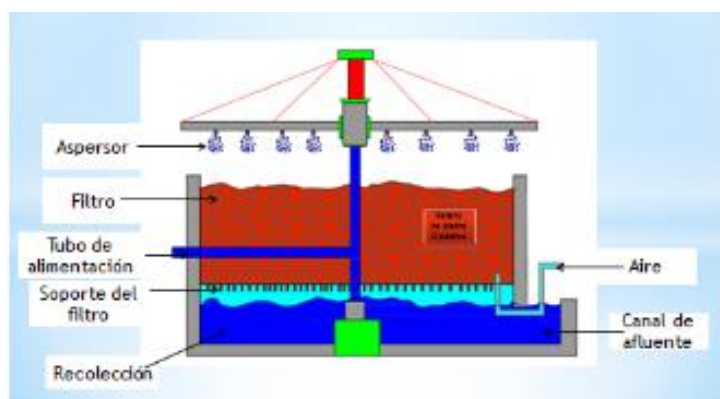


Figura 4.3. Esquema de funcionamiento de un lecho bacteriano. [10]

Los elementos del lecho están diseñados con una alta superficie específica, lo que permite el desarrollo de una gran cantidad de biomasa en el lecho, y por consiguiente, rendimientos de eliminación elevados.

Tabla 4.3. Ventajas e inconvenientes de los lechos bacterianos.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Sin consumo de energía (aireación natural)	Riesgo de colmatación del lecho
Elevado rendimiento de eliminación	Mal funcionamiento en climas fríos
Buen comportamiento con altas cargas	Requiere decantación secundaria
Costo de mantenimiento relativamente bajo	Aparición de olores e insectos
Nivel de ruido bajo	Coste de implantación elevado
	Sensible a las condiciones climáticas

4.4. FILTROS VERDES

Sistema natural de tratamiento de aguas residuales que consiste en el empleo de una superficie de terreno sobre la que se establece cultivos agrícolas, forrajeros o forestales para depurar dichas aguas, utilizando generalmente masas forestales.

El proceso de depuración de las aguas consiste en un tratamiento físico, químico y biológico, donde interviene tanto la acción del suelo y de las plantas, como de los

microorganismos del medio. En la autodepuración se producen dos procesos fundamentales para la eliminación de la materia orgánica que se desarrollará en la capa biológica activa del suelo. Mediante un filtrado mecánico se produce la retención de sólidos en suspensión no degradables y simultáneamente tiene lugar la mineralización de la materia orgánica por la oxidación bioquímica de bacterias anaerobias. Gracias a estos procesos las sustancias contenidas en el agua son asimilables por la vegetación proporcionando un crecimiento de la misma además de la descontaminación del efluente.

Tabla 4.4. Ventajas e inconvenientes de los lechos de turba.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Sin consumo energético	Menor rendimiento que en el tratamiento convencional
Ausencia de elementos electromecánicos (excepto pretratamiento)	Mayor superficie que en el tratamiento convencional
Fácil integración en el entorno	Elevado número de horas de mantenimiento de riego y recolección del cultivo
Sin necesidad de personal cualificado para su explotación y mantenimiento	
Menos superficie que las lagunas facultativas	
Ausencia de olores	
Adaptación a variaciones de carga contaminante y caudal	
Rendimiento económico por la venta del cultivo	

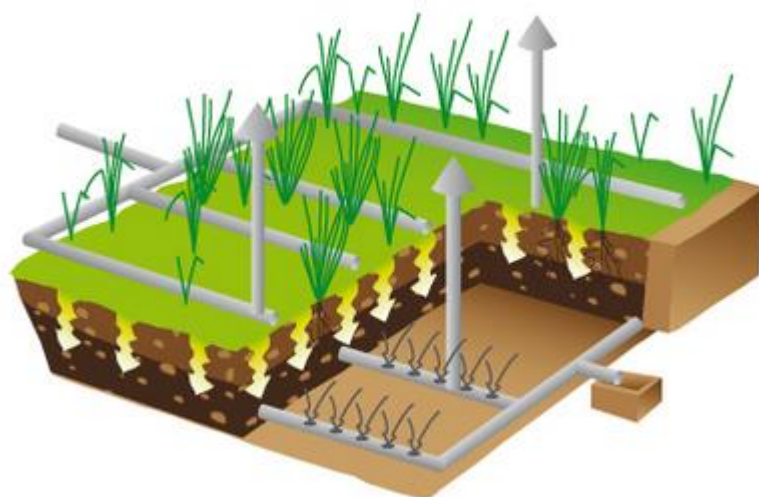


Figura 4.4. Esquema de funcionamiento de filtros verdes. [11]

4.5. HUMEDALES ARTIFICIALES

Son zonas construidas por el hombre en las que se reproducen, de manera controlada, los procesos físicos, químicos y biológicos de eliminación de contaminantes que ocurren normalmente en los humedales naturales. Se realiza mediante un lecho de filtración formado por vegetación acuática.

Se clasifican, dependiendo de cómo circula el agua, en:

- Superficial → por encima de sustrato de plantas.
- Subterránea → agua circula por los espacios intersticiales del lecho filtrante.

Además, se pueden dividir en horizontales y verticales, en función de la dirección de los flujos.

Cada filtro debe tener un recubrimiento impermeable y debe estar formado por una capa de grava para drenar de al menos 20 cm seguida de una capa de arena y otra de grava o de una capa de arena y grava fina, para el efluente. Este lecho filtrante, sirve, además de para la eliminación de sólidos, de soporte tanto para las bacterias y para la vegetación (generalmente plantas perennes como carrizo o la enea).

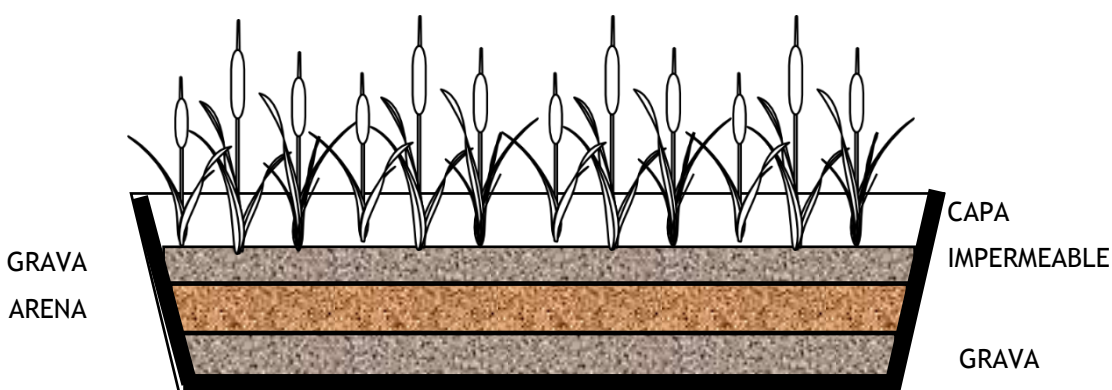


Figura 4.5. Esquema de humedal artificial.

En este proceso, se elimina entre el 80-95% de la DBO₅ existente.

Tabla 4.5. Ventajas e inconvenientes de los humedales artificiales.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Sin consumo energético	Menor rendimiento que en sistemas de tratamiento convencionales
Fácil integración en el entorno	Presencia de insectos
Ausencia de elementos electromecánicos (excepto en pretratamiento)	Si no hay buen tratamiento, posibilidad de olores
Muy buena integración para aves migratorias o estacionales	Mayor superficie que los sistemas convencionales
Sin necesidad de personal cualificado para su explotación y mantenimiento	
Adaptable a variaciones de carga y caudal	

4.6. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS:

En la siguiente tabla se muestran las distintas alternativas que se han valorado para la realización de este trabajo.

La elección de la alternativa más adecuada se llevará a cabo en base a los parámetros más influyentes en la implantación, explotación y mantenimiento del sistema. Se valorarán las diferentes alternativas puntuándolas del 1 al 5 para cada aspecto.

Cada uno de estos parámetros será ponderado del 1 al 5 según su importancia, siendo el 5 el de mayor importancia porque propicia un mayor beneficio en el desarrollo del proyecto y el 1 el de menor.

Los tratamientos con mayor puntuación serán los más recomendados para este caso.

Tabla 4.6. Estudio de las diferentes alternativas.

Tratamientos	Lagunaje	Lechos de turba	Humedales	Filtros verdes	Filtros percoladores	Factor de ponderación
Parámetros						
Costes de operación y mantenimiento	5	3	5	4	2	5
Costes de inversión	2	4	5	4	2	4
Personal cualificado	4	4	4	5	3	3
Rendimiento de eliminación	4	4	3	4	5	4
Superficie	1	4	2	1	4	2
Generación de olores	2	5	1	2	3	2
Influencia del clima	4	4	4	4	4	2
Consumo eléctrico	5	5	5	5	3	5
Flexibilidad	4	3	2	2	4	3
Integración paisajística	4	4	5	4	3	2
Reutilización	4	4	1	4	4	3
Total	132	139	127	132	114	-

Como se observa en la tabla, el tratamiento con mayor puntuación son los **lechos de turba** por lo que esta será la alternativa seleccionada para este proyecto. Para proteger el lecho de turba frente a la colmatación se instalará un **lagunaje anaerobio** previo. Se completará el proceso con la instalación de un **lagunaje de maduración**, que permitirá reutilizar el agua para riego gracias a la eliminación de patógenos.

5. DISEÑO

A la hora de diseñar un sistema de depuración lo primero que hay que establecer es el caudal y la carga contaminante que entran al mismo. Para ello, hay que conocer la población de la zona donde se va a instalar el sistema y la posible tasa de crecimiento que se va a producir en los 25 años siguientes, ya que este sistema se va a diseñar con proyección al año 2.041. Tener esta tasa de crecimiento es importante ya que si no el sistema podría quedarse obsoleto por no cubrir las necesidades de la población.

5.1. ESTIMACIÓN DE LA POBLACIÓN DE ESTUDIO

Según el INE del Gobierno Bolivariano de Venezuela, el censo poblacional de Tucaní en 2.016 es de 20.000 habitantes. La tasa de crecimiento prevista para los próximos años es de 1,5%.

Para obtener la población que habrá en el año 2.041 se emplea la siguiente fórmula aritmética, donde se tiene en cuenta la población actual, la tasa de crecimiento y el periodo de amortización.

$$P_f = P_o \left(1 + \frac{i \cdot t}{100} \right) = 20.000 \left(1 + \frac{1,5 \cdot 25 \text{ (años)}}{100} \right) = 27.500 \text{ habitantes}$$

Dónde:

P_f , población futura

P_o , población actual

i , tasa de crecimiento

t , periodo de amortización (años)

Es así como la población adoptada para el diseño será de 27.500 habitantes. Esta población es un poco elevada para el empleo de tratamientos no convencionales, los cuales son óptimos para poblaciones inferiores a 20.000 habitantes. Sin embargo, el clima de la zona, la disponibilidad de espacio y los problemas de suministro eléctrico, hacen que este tipo de tratamientos sean los más recomendados para el caso de estudio.

5.2. CAUDALES DE DISEÑO

Para proceder al cálculo de los caudales que van a entrar en la planta de depuración, es necesario, en primer lugar, conocer los datos de consumo por habitante y día. Para este caso se tomará un valor de referencia de 150 l/hab/d [12].

Con este dato y el dato de la población futura, se procede a calcular el caudal medio de entrada a la planta de tratamiento.

$$Q \left(m^3/d \right) = consumo \left(m^3/hab/d \right) \cdot habitantes = \frac{150 \left(m^3/hab/d \right)}{1.000} \cdot 27.500 hab$$

$$= 4.125 m^3/d$$

Los procesos de pretratamiento se dimensionarán para caudal máximo, el cual toma en consideración las aguas pluviales. Este caudal se puede obtener multiplicando el caudal medio por 3.

$$Q_{max} \left(m^3/d \right) = 3 \cdot Q_{med} \left(m^3/d \right) = 3 \cdot 4.125 \left(m^3/d \right) = 12.375 m^3/d$$

$Q_{m\acute{a}x}$, caudal máximo.

Q_{med} , caudal medio.

Por otro lado, para la puesta en marcha y su posterior operación se tendrá en cuenta el caudal punta. Este valor se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_p = Q_{med} \cdot \left(1 + \frac{14}{4 + poblacion(miles hab)^{0,5}} \right) = 12.375 m^3/d \cdot \left(1 + \frac{14}{4 + 27,5^{0,5}} \right)$$

$$= 10.486 m^3/d$$

Q_p , caudal punta

Q_{med} , caudal medio

Finalmente, en la siguiente tabla se muestran los distintos caudales empleados para el dimensionamiento de la estación depuradora:

Tabla 5.1. Caudales de tratamiento de las aguas residuales de Tucaní.

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA BRUTA	
Caudal medio	4.125 m ³ /d
Caudal máximo pretratamiento	12.375 m ³ /d
Caudal punta	10.486 m ³ /d

5.3. CARGA CONTAMINANTE

Al tratarse de aguas residuales urbanas de una población donde la actividad económica es principalmente de carácter agrícola, únicamente se tendrán en cuenta los parámetros urbanos, sin considerar las aguas industriales de la población.

En este caso los parámetros a tener en cuenta para el diseño serán: la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los sólidos en suspensión (ss) y los coliformes fecales. El parámetro de coliformes se considera ya que posteriormente se desea reutilizar el agua para regadío.

A continuación, se muestran los valores típicos del agua residual en Venezuela.

Tabla 5.2. Caracterización de las aguas residuales en Venezuela

Parámetros	Máximo	Promedio	Mínimo
pH	7,5	7,2	6,8
Sólidos sedimentables	5,49 ml/l	3,3 ml/l	1,8 ml/l
Sólidos totales	576 mg/l	453 mg/l	322 mg/l
Sólidos totales volátiles	349 mg/l	217 mg/l	118 mg/l
Sólidos suspendidos	232 mg/l	145 mg/l </td <td>83 mg/l</td>	83 mg/l
Sólidos suspendidos volátiles	187 mg/l	120 mg/l	62 mg/l
DQO	392 mg/l	288 mg/l	159 mg/l
DBO ₅	248 mg/l	147 mg/l	75 mg/l
Cloruros	40,5 mg/l	35 mg/l	25 mg/l

Estos datos han sido tomados de bibliografía suramericana donde se representan los parámetros promedio, máximos y mínimos de los líquidos cloacales domésticos [12]. Para el presente proyecto, como medida de seguridad, se han considerado los valores máximos de estos parámetros.

Por otro lado, se admite que la carga contaminante del agua bruta a la entrada de la laguna anaerobia se verá incrementada en un 10% debido a la aportación de contaminantes procedente de los lixiviados. Finalmente la carga contaminante de entrada se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5.3 Caracterización del agua a tratar en la planta

Parámetro	Valor
DQO	392 mg/l
DBO ₅	248 mg/l
SS	232 mg/l
Coliformes fecales	10 ⁶ UFC/100 ml

5.4. EDAR

Tras analizar las distintas alternativas y seleccionar la tecnología que se utilizará para la estación depuradora, se procedió a establecer todos los tratamientos que se colocaran en línea en función de las características de entrada del agua residual. De esta forma, el diagrama de bloques de la EDAR se muestra en la siguiente figura.

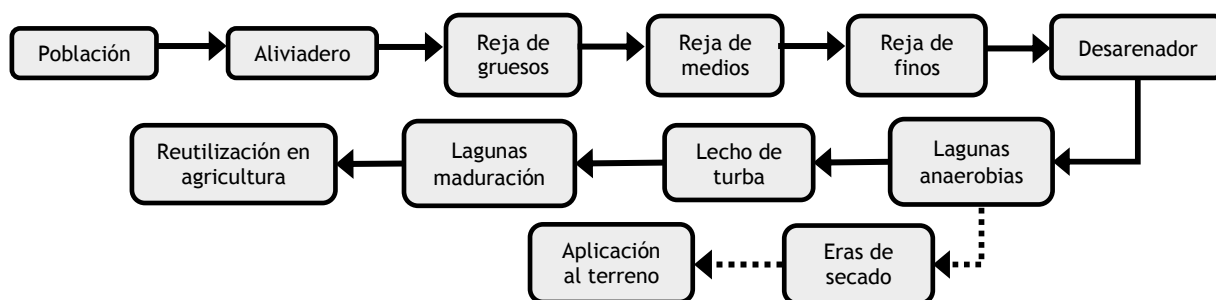


Figura 5.1. Diagrama de bloques de EDAR de Tucaní.

Ahora se procederá al diseño de cada uno de las etapas mostradas en la figura 5.1. En el anexo II se muestra el diagrama de flujo de la planta y en el anexo III el esquema de implantación de la misma.

5.5. ALIVIADERO

El aliviadero en la cabecera de la planta es un punto fundamental siempre que se disponga de una red de saneamiento unitario. El objetivo es evacuar al cauce más cercano, en este caso el río Tucaní, el excedente de caudal respecto del caudal máximo de diseño de la planta. Para ello, se dispondrá de un vertedero a la entrada.

5.6. DESBASTE

El desbaste tiene como objetivo la eliminación de sólidos flotantes y en suspensión de pequeño o mediano tamaño (trozos de madera, trapos, raíces, etc.) para proteger los equipos y evitar que el flujo se bloquee en canales y/o tuberías de la planta. Se trata de una etapa imprescindible salvo excepciones concretas.

La materia flotante en procesos aguas abajo es un problema estético y un riesgo para la seguridad de los operadores, al eliminarla.

El procedimiento más usual del desbaste consiste en hacer pasar el agua a través de rejillas que, de acuerdo con la separación entre los barrotes, pueden clasificarse en gruesos, medios y finos. Los sólidos con tamaño superior a luz de paso del mecanismo quedarán retenidos.

Las rejillas consisten básicamente en un conjunto de barras metálicas de sección circular, regular, trapezoidal o en perfil de lágrima, paralelas y de separación uniforme entre ellas, situadas en un canal de hormigón, en posición transversal al flujo, de tal forma que el agua residual pase a través de ellas.

Todas las barras de la rejilla se encuentran fijadas en un marco, con el fin de rigidizar el sistema.

Tabla 5.4. Clasificación de los tipos de rejillas según luz de paso.

TIPO DE REJILLA	LUZ DE PASO
Gruesos	>25 mm
Medios	10-25 mm
Finos	3-10 mm

El desbaste de la planta proyectada incluirá una rejilla de gruesos seguida de una rejilla de medios y finalmente una de finos. Con esta combinación se garantiza la eliminación de los sólidos de mayor tamaño y se protege el resto del proceso aguas abajo. La razón de instalar tres rejillas en serie es repartir lo máximo posible la retirada de sólidos de

manera que sea más difícil la colmatación de las rejillas. Esto facilita la operación de la planta ya que se trata de rejillas manuales que tienen que ser limpiadas periódicamente por los operarios. Las rejillas de gruesos tendrán una luz de paso de 25 mm, las de medios de 10 mm y las de finos de 5 mm. Con esta disposición se espera una recogida de sólidos homogénea en cada una de ellas.

Todas las rejillas serán de limpieza manual. Este sistema está recomendado para plantas de pequeño tamaño y además garantiza de esta forma el funcionamiento sin energía de la planta.

El sistema de limpieza manual consiste simplemente en el empleo de un rastrillo con púas que se encastran en los espacios abiertos de las rejillas. Con el fin de facilitar el trabajo de limpieza, el ángulo de la rejilla con el canal será de 60°.

Los parámetros de diseño a considerar son:

- La velocidad del agua en el canal.

La velocidad de agua en el canal debe ser mayor a 0,3 m/s a caudal medio y a 0,9 m/s a caudal máximo para evitar depósitos de arenas en la parte inferior del canal o de las rejillas.

- La velocidad de paso por la rejilla.

Se diseñarán las rejillas con una velocidad de paso menor de 1 m/s a caudal medio y 1,4 m/s a caudal máximo, teniendo en cuenta un 30% de colmatación de la rejilla.

El cálculo de la velocidad de paso por la rejilla se calculará a partir de la siguiente expresión:

$$Superficie (m^2) = \frac{Caudal \left(\frac{m^3}{s}\right)}{Velocidad \left(\frac{m}{s}\right)} \cdot \frac{Luz\ paso (mm) + espesor (mm)}{Luz\ paso (mm)} \cdot \frac{1}{Coef. colmatación}$$

Una vez se dispone de la superficie, se dimensionará el canal teniendo en cuenta que se trata de un canal rectangular.

$$Superficie (m^2) = Anchura (m) \cdot Longitud(m)$$

El espesor de las rejillas tiene valores comprendidos entre 6-12 mm dependiendo del tamaño y carga del agua. Por norma general se adoptarán espesores más elevados para las rejillas de gruesos por su mayor exposición frente a la colisión de sólidos de mayor tamaño.

- La pérdida de carga producida.

La pérdida de carga aumenta con el grado de colmatación de la rejilla, no debiendo superar los 150-200 mm.c.a.

$$H(m) = \frac{V^2(m/s) - v^2(m/s)}{2 \cdot g(m/s^2) \cdot C}$$

Dónde:

H, pérdida de carga.

V, velocidad del agua en el paso por la reja.

V, velocidad del agua en el canal.

C, coeficiente de colmatación.

g, aceleración de la gravedad.

Rejas de gruesos

Cálculo de la superficie:

$$\text{Según vel. max. a caudal máx.: } S (m^2) = \frac{0,14 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{0,9 \left(\frac{m}{s}\right)} \cdot \frac{25 (mm) + 10 (mm)}{25 (mm)} \cdot \frac{1}{0,7} = 0,20 m^2$$

$$\text{Según vel. max. a caudal medio: } S (m^2) = \frac{0,05 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{0,3 \left(\frac{m}{s}\right)} \cdot \frac{25 (mm) + 10 (mm)}{25 (mm)} \cdot \frac{1}{0,7} = 0,10 m^2$$

$$\text{Según velocidad mín a caudal máx: } S (m^2) = \frac{0,14 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{1,4 \left(\frac{m}{s}\right)} = 0,16 m^2$$

$$\text{Según velocidad mín. a caudal medio: } S (m^2) = \frac{0,05 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{1,0 \left(\frac{m}{s}\right)} = 0,16 m^2$$

Dada la imposibilidad de cumplir con todas las restricciones se decide adoptar la superficie de 0,2 m². El objetivo es evitar velocidades demasiado altas que puedan dañar las rejas. El hecho de que cuando circulen caudales bajos las velocidades sean más bajas de lo deseado, puede dar lugar a sedimentación de algunas arenas. Para evitar problemas derivados de esta situación, se cambiará el flujo periódicamente de un canal a otro, limpiando si es necesario el canal por el que no circule agua.

Cálculo de la pérdida de carga:

$$H(m) = \frac{1,27 (m/s) - 0,64^2(m/s)}{2 \cdot 9,81(m/s^2) \cdot 0,7} = 89 mm < 200mm$$

Tabla 5.5. Diseño y dimensionamiento de las rejas de gruesos.

REJA GRUESOS	
Luz de paso	25 mm
Espesor	10 mm
Colmatación	30%
Velocidad mínima Qmed	0,3 m/s
Velocidad mínima Qmax	0,9 m/s
Velocidad máxima (Qmed)	1 m/s
Velocidad máxima (Qmax)	1,4 (m/s)

REJA GRUESOS	
α	60°
Superficie mín. Qmax	0,20 m ²
Superficie mín. Qmed	0,10 m ²
Superficie máx. Qmax	0,16 m ²
Superficie máx. Qmed	0,16 m ²

Unidades	2
Superficie unitaria	2.046 cm ²
Ancho	50 cm
Altura	45 cm
Superficie unitaria adoptada	2.250 cm ²

Velocidad canal	0,64 m/s
Velocidad paso rejas	1,27 m/s
Pérdida de carga	89 mm

Rejas de medios

Cálculo de la superficie:

$$\text{Según vel. max. a caudal máx.: } S \text{ (m}^2\text{)} = \frac{0,14 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}{0,9 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} \cdot \frac{10 \text{ (mm)} + 8 \text{ (mm)}}{10 \text{ (mm)}} \cdot \frac{1}{0,7} = 0,26 \text{ m}^2$$

$$\text{Según vel. max. a caudal medio: } S \text{ (m}^2\text{)} = \frac{0,05 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}{0,3 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} \cdot \frac{10 \text{ (mm)} + 8 \text{ (mm)}}{10 \text{ (mm)}} \cdot \frac{1}{0,7} = 0,10 \text{ m}^2$$

$$\text{Según velocidad mín a caudal máx: } S \text{ (m}^2\text{)} = \frac{0,14 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}{1,4 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} = 0,16 \text{ m}^2$$

$$\text{Según velocidad mín. a caudal medio: } S \text{ (m}^2\text{)} = \frac{0,05 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}{1,0 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} = 0,16 \text{ m}^2$$

Dada la imposibilidad de cumplir con todas las restricciones se decide adoptar la superficie de 0,26 m². El objetivo es evitar velocidades demasiado altas que puedan dañar las rejas. El hecho de que cuando circulen caudales bajos las velocidades sean más bajas de lo deseado, puede dar lugar a sedimentación de algunas arenas. Para evitar problemas derivados de esta situación, se cambiará el flujo periódicamente de un canal a otro, limpiando si es necesario el canal por el que no circule agua.

Cálculo de la pérdida de carga:

$$H(m) = \frac{1,34 \text{ (m/s)} - 0,52^2 \text{ (m/s)}}{2 \cdot 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)} \cdot 0,7} = 111 \text{ mm} < 200 \text{ mm}$$

Tabla 5.6. Diseño y dimensionamiento de las rejjas de medios.

REJA MEDIOS	
Luz de paso	10 mm
Espesor	8 mm
Colmatación	30%
Velocidad mínima. Qmed	0,3 m/s
Velocidad mínima. Qmax	0,9 m/s
Velocidad máxima. Qmed	1 m/s
Velocidad máxima. Qmax	1,4 m/s
α	60 ^o
Superficie Vmax Qmax	0,26 m ²
Superficie Vmax Qmed	0,10 m ²
Superficie Vmin Qmax	0,16 m ²
Superficie Vmin Qmed	0,16 m ²
Unidades	2
Superficie unitaria	2.631 cm ²
Ancho	55 cm
Altura	50 cm
Superficie unitaria adoptada	2.750 cm ²
Velocidad canal	0,52 m/s
Velocidad paso rejjas	1,34 m/s
Pérdida de carga	111 mm

Rejas de finos

Cálculo de la superficie:

$$\text{Según vel. max. a caudal máx.: } S (m^2) = \frac{0,14 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{0,9 \left(\frac{m}{s}\right)} \cdot \frac{5 (mm) + 6 (mm)}{5 (mm)} \cdot \frac{1}{0,7} = 0,32 m^2$$

$$\text{Según vel. max. a caudal medio: } S (m^2) = \frac{0,05 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{0,3 \left(\frac{m}{s}\right)} \cdot \frac{5 (mm) + 6 (mm)}{5 (mm)} \cdot \frac{1}{0,7} = 0,15 m^2$$

$$\text{Según velocidad mín a caudal máx: } S (m^2) = \frac{0,14 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{1,4 \left(\frac{m}{s}\right)} = 0,16 m^2$$

$$\text{Según velocidad mín. a caudal medio: } S (m^2) = \frac{0,05 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{1,0 \left(\frac{m}{s}\right)} = 0,16 m^2$$

Dada la imposibilidad de cumplir con todas las restricciones se decide adoptar una superficie de 0,32 m². El objetivo es evitar velocidades demasiado altas que puedan dañar las rejjas. El hecho de que cuando circulen caudales bajos las velocidades sean más

bajas de lo deseado, puede dar lugar a sedimentación de algunas arenas. Para evitar problemas derivados de esta situación, se cambiará el flujo periódicamente de un canal a otro, limpiando si es necesario el canal por el que no circule agua.

Cálculo de la pérdida de carga:

$$H(m) = \frac{1,36 (m/s) - 0,43^2 (m/s)}{2 \cdot 9,81 (m/s^2) \cdot 0,7} = 122 \text{ mm} < 200 \text{ mm}$$

Tabla 5.7. Diseño y dimensionamiento de las rejillas de finos.

REJILLA FINOS	
Luz de paso	5 mm
Espesor	6 mm
Colmatación	30%
Velocidad mínima Qmed	0,3 m/s
Velocidad mínima Qmax	0,9 m/s
Velocidad máxima (Qmed)	1 m/s
Velocidad máxima (Qmax)	1,4 m/s
α	60°
Superficie Vmax Qmax	0,32 m ²
Superficie Vmax Qmed	0,15 m ²
Superficie Vmin Qmax	0,16 m ²
Superficie Vmin Qmed	0,16 m ²
Unidades	2
Superficie unitaria	3.215 cm ²
Ancho	60 cm
Altura	55 cm
Superficie unitaria adoptada	3.300 cm ²
Velocidad canal a Qmax	0,43 m/s
Velocidad paso rejillas a Qmax	1,36 m/s
Pérdida de carga	122 mm

Generación de residuos

Por último, la generación de residuos procedente de los sólidos retirados en el pretratamiento es muy variable y depende significativamente de las características del agua residual y de las rejillas [13] propone una tabla con valores de referencia.

Tabla 5.8. Materia retenida en rejillas. [13]

LUZ DE PASO (MM)	L/HAB/AÑO
3	15-25
20	5-10
40-50	2-3

Tabla 5.9. Propiedades materia retenida en rejas. [13]

PARÁMETRO	VALOR
Contenido en humedad	>30%
Contenido de materia orgánica	75-80%
Contenido en materia inerte	20-25%

El valor aconsejado para un desbaste completo de gruesos y finos es de 0,035 l/hab/d con un peso de 0,028 kg/hab/d.

$$\text{Residuos generados (l/d)} = 0,035 \cdot N^{\circ}\text{Habitantes} = 963 \text{ l/d}$$

$$\text{Residuos generados (kg/d)} = 0,028 \cdot N^{\circ}\text{Habitantes} = 770 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

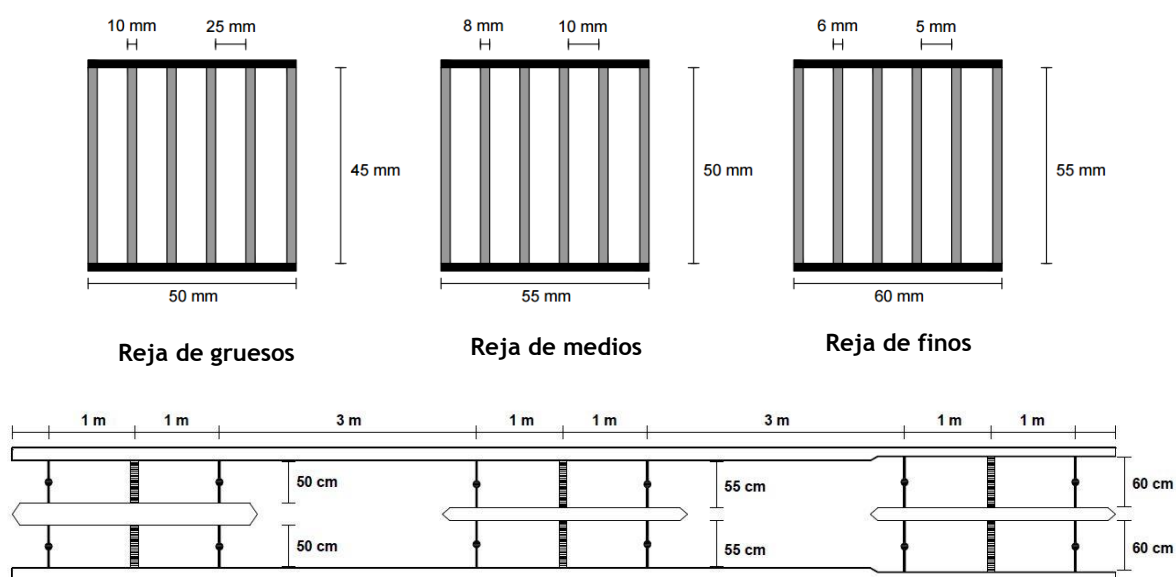


Figura 5.2 Esquema de las diferentes rejas de desbaste y su disposición en el canal.

Las compuertas se situarán previa y posteriormente a cada desbaste con el fin de poder aislar cada proceso en caso preciso de mantenimiento, así como para controlar el funcionamiento de una o ambas líneas en función del caudal a tratar en la planta. A su vez, los canales constarán de una válvula para poder vaciarse en caso de necesidad.

5.7. DESARENADO

El desarenado consiste en un proceso en el que se produce una separación por decantación, de todos aquellos sólidos en suspensión de densidad elevada (compuestos inorgánicos), impidiendo la sedimentación de la materia en suspensión de baja densidad (de naturaleza orgánica).

Las partículas de naturaleza inorgánica eliminadas en este proceso, son conocidas con el nombre genérico de arenas, incluyendo en dicha denominación otros productos presentes en el agua residual, como pueden ser escorias, gravas, cáscaras de huevo, objetos metálicos, etc.

La característica fundamental de estos elementos inorgánicos separados en este proceso es que son totalmente estables, lo que conlleva que no se van a generar descomposiciones posteriores de los mismos.

Estas unidades en sus diferentes versiones, son utilizadas en todas las plantas depuradoras urbanas, no siendo de utilidad de forma general en las depuradoras de aguas industriales.

Los desarenadores eliminan todos aquellos sólidos en suspensión, con un peso específico igual o mayor de 2,65 y un tamaño de partícula superior a 0,2 mm.

El tipo de desarenador elegido es un canal desarenador, que consiste simplemente en un canal de flujo horizontal con longitud suficiente para que tenga lugar la sedimentación de las arenas. La ventaja de estos equipos está en que no necesitan energía eléctrica para la extracción de las arenas.

La superficie transversal del desarenador se obtendrá a partir de la velocidad máxima recomendada, 0,3 m/s. El caudal de diseño será el más limitante, es decir, el caudal máximo que corresponde con tres veces el caudal medio. La superficie se calculará mediante la siguiente expresión.

$$\text{Superficie (m}^2\text{)} = \frac{\text{Caudal máx (m}^3\text{/s)}}{\text{Velocidad (m/s)}} = \frac{0,14 \text{ (m}^3\text{/s)}}{0,3 \text{ (m/s)}} = 0,47 \text{ m}^2$$

Una vez conocida la superficie se podrá dimensionar el canal. Por razones constructivas, se adoptan medidas redondeadas.

$$\text{Superficie (m}^2\text{)} = \text{Ancho (m)} \cdot \text{Altura(m)}$$

$$\text{Ancho} = 90 \text{ cm}$$

$$\text{Altura} = 55 \text{ cm}$$

$$\text{Superficie adoptada} = 0,49 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidad adoptad} = 0,29 \text{ m/s}$$

La longitud del desarenador se calcula en función del tiempo que tarden las partículas en sedimentar. A su vez, el tiempo que tardan las partículas en sedimentar dependerá de las características de las partículas (tamaño, densidad, etc.) y del agua (viscosidad, densidad, etc.). De forma estándar, asumiendo partículas esféricas de 2,65 g/ml de densidad y condiciones típicas del agua, la velocidad de sedimentación en función del tamaño de partícula se muestra en la tabla 5.8.

Tabla 5.10. Velocidad de sedimentación en función del tamaño de las partículas.

Diámetro de partícula	Velocidad de sedimentación
0,15 mm	40-50 m/h
0,20 mm	65-75 m/h
0,25 mm	85-95 m/h
0,30 mm	105-120 m/h

Por norma general, los desarenadores se dimensionan para eliminación de partículas de diámetro superior a 0,2 mm. Por lo que su velocidad de sedimentación en el caso más desfavorable será de 65 m/h. A partir de esta velocidad y de la altura del equipo, se obtiene el tiempo necesario para la decantación.

$$\text{Tiempo decantación (h)} = \frac{\text{altura (m)}}{\text{Velocidad decant.} \left(\frac{\text{m}}{\text{h}}\right)} = \frac{0,5 \text{ (m)}}{65 \left(\frac{\text{m}}{\text{h}}\right)} = 0,0077 \text{ h} = 30 \text{ s}$$

La longitud del equipo se obtiene de forma que las partículas tengan tiempo para decantar. Esta longitud se modifica con un coeficiente de mayoración entre 1,25-1,5 para compensar los efectos de las turbulencias.

$$L \text{ (m)} = C \cdot T \text{ (s)} \cdot V \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = 1,25 \cdot 30,5 \text{ (s)} \cdot 0,29 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = 11 \text{ m}$$

Dónde:

L, longitud.

C, coeficiente de mayoración.

T, tiempo que tarda una partícula en caer.

V, velocidad longitudinal de las partículas.

La limpieza del desarenador se realiza manualmente, por lo que se dispondrá de un equipo de iguales dimensiones como reserva.

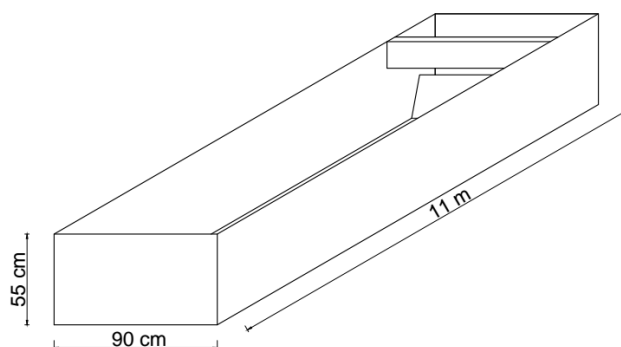


Figura 5.3. Dimensiones del canal desarenador.

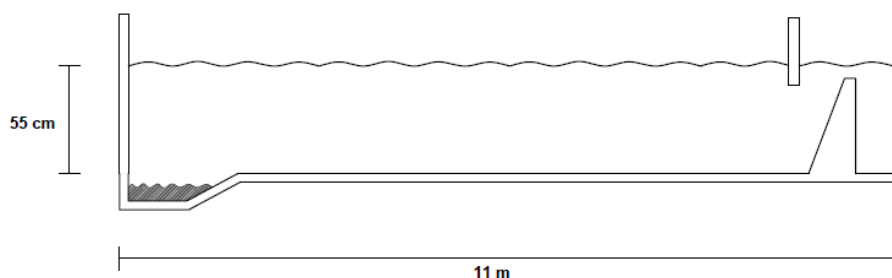


Figura 5.4 Perfil del desarenador

Las características del agua a la salida del pretratamiento se calcularán a partir de los rendimientos de eliminación típicos de un pretratamiento.

Tabla 5.11. Rendimientos de eliminación en el pretratamiento.

Materia en suspensión	30%
DQO	30%
DBO ₅	10%

Tabla 5.12. Condiciones del agua a la entrada y salida del pretratamiento.

PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA
DQO	392 mg/l	274,4 mg/l
DBO ₅	248 mg/l	223,2 mg/l
SS	232 mg/l	162,4 mg/l

5.8. LAGUNAS ANAEROBIAS

Las lagunas anaerobias son estanques profundos usados, generalmente, en la primera fase de tratamiento de las aguas urbanas de zonas con baja población que presenten un alto contenido en materia orgánica biodegradable y sólidos en suspensión.

El objetivo principal de este sistema es la eliminación y estabilización de gran parte de esa materia para proteger de la colmatación los siguientes pasos, reduciendo así la periodicidad y los costes de limpieza y mantenimiento. Los sólidos en suspensión presentes en el agua residual decantan. La estabilización de la materia orgánica tiene lugar en el fondo de la laguna por la acción de bacterias anaerobias que transforman la materia orgánica primero en ácidos volátiles y posteriormente en dióxido de carbono, metano y sólidos mineralizados, por acción de bacterias metanogénicas. Por tanto, la estabilización se produce en 4 etapas:

- ✓ **Hidrólisis:** se produce la rotura de los compuestos orgánicos en compuestos más sencillos y solubles en agua. Con esta etapa, se facilita la acción de los microorganismos que intervienen en la etapa de acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

- ✓ **Acidogénesis:** consiste en la obtención de ácidos orgánicos de cadena corta mediante la acción de bacterias aerobias o facultativas.
- ✓ **Acetogénesis:** formación de ácido acético e hidrogeno a partir de moléculas de pequeño tamaño por la acción de bacterias acetogénicas.
- ✓ **Metanogénesis:** las bacterias metanogénicas, utilizando los ácidos de la etapa anterior, generan metano y dióxido de carbono. Estos gases son los responsables de la formación de burbujas en este tipo de lagunas, que son síntoma de buen funcionamiento del sistema. Esta fase es imprescindible para conseguir la eliminación y estabilización de la materia [14].

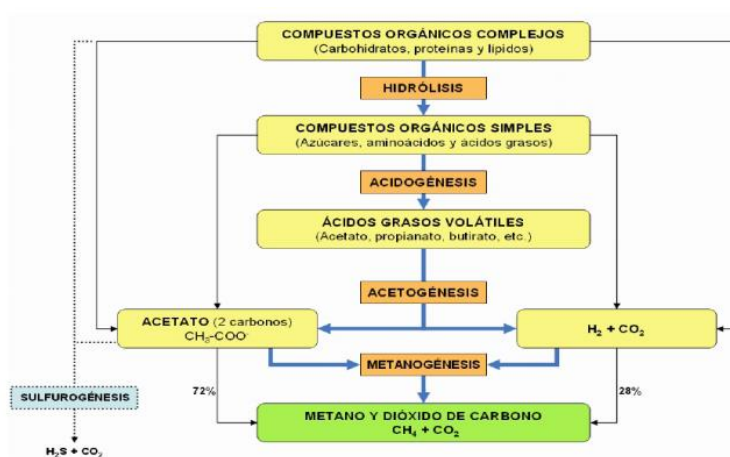


Figura 5.5. Esquema de reacciones de digestión anaerobia. [15]

En este tipo de lagunas, como consecuencia de la elevada carga orgánica y corto periodo de retención del agua residual, el contenido en oxígeno disuelto se mantiene muy bajo o nulo durante todo el año. Para mantener este ambiente anaerobio necesario para el buen funcionamiento del sistema destacan los siguientes mecanismos:

1. El posible oxígeno introducido en la laguna con el influente o debido a la reaireación superficial que se produce con la entrada del agua residual a la laguna se consume rápidamente en la zona más próxima a la superficie debido a la gran carga orgánica presente en esta primera fase de tratamiento.
2. Además, se produce la reducción de los sulfatos a sulfuros, los cuales disminuyen el crecimiento de las algas que producen oxígeno debido a que impiden la entrada de luz por la presencia de sulfuros metálicos en suspensión y a que los sulfuros solubles son tóxicos [16].
3. El intercambio de oxígeno con la atmósfera es casi despreciable ya que no existe agitación en las lagunas que promuevan la difusión [17].

Las lagunas anaerobias a veces toman una tonalidad gris debido a la presencia de sulfuros metálicos en suspensión, como el sulfuro de hierro. Estos sulfuros acaban precipitando provocando una coloración gris oscura o negra en los fangos. También pueden tomar una coloración rojiza debido a los pigmentos de las bacterias

fotosintéticas del azufre que viven en la zona superficial y oxidan los sulfuros en azufre elemental. La presencia de estas bacterias indica una carga insuficiente en la laguna anaerobia, lo que da lugar a la aparición de algas en la superficie. Sin embargo, en ocasiones, pueden ser beneficiosas ya que al oxidar los sulfuros reducen los malos olores que se producen en este tipo de tratamientos por la liberación de ácido sulfhídrico.

Para el diseño de las lagunas anaerobias, los parámetros más adecuados son la carga volumétrica y el tiempo de retención ya que en este proceso, como se mencionó anteriormente, no existen procesos de superficie, como reaireación o fotosíntesis, que sin embargo van a desempeñar un papel fundamental en los siguientes procesos.

En la siguiente tabla se muestran los valores que se han seleccionado para los diferentes parámetros.

Tabla 5.13. Valores seleccionados para el diseño de las lagunas anaerobias.

PARÁMETROS	VALORES SELECCIONADOS
Tiempo de retención	3 d
Carga volumétrica	180 gDBO ₅ /m ³ /d
Profundidad	4 m
DBO ₅	248,4 mg/l
Caudal diseño	4.170 m ³ /d

Se ha elegido un tiempo de retención de 3 días para que exista margen en caso de que el agua llegue más cargada, sin sobrepasar el tiempo de retención máximo para trabajar en lagunas anaerobias. Para este caso, todos los sólidos que no estén en disolución van a decantar, por lo que habrá una reducción de sólidos en suspensión del 80%.

El caudal de diseño en este punto del tratamiento es de 4.170 m³/d dado que ahora se suma a la entrada de la laguna el caudal de recirculación que proviene de los lixiviados que se extraen de las eras de secado y que vuelven a formar parte de la línea de aguas de la planta.

Para calcular el volumen se hará a partir del tiempo de retención y de la carga volumétrica y se cogerá el volumen más limitante, es decir, el mayor.

Inicialmente se tiene una DBO₅ de 248,4 ppm, que son 1.151.026 Kg DBO₅/día, con la carga y la carga volumétrica se puede calcular el volumen:

$$V (m^3) = \frac{\text{Carga biodegradable (gDBO}_5/\text{d)}}{\text{Carga volumétrica (gDBO}_5/\text{m}^3/\text{d)}} = \frac{1.151.026 (gDBO_5/\text{d})}{180 (gDBO_5/\text{m}^3/\text{d})} = 6.395 m^3$$

Se calcula el volumen por tiempo de retención multiplicándolo por el caudal medio de diseño, obteniéndose un volumen de:

$$V(m^3) = Q \left(\frac{m^3}{d} \right) \cdot T_r(d) = 4.170 \left(\frac{m^3}{d} \right) \cdot 3 (d) = 12.511 m^3$$

Dónde:

V, volumen

Q, caudal medio

T_r , Tiempo de retención

Por tanto, el volumen seleccionado será el calculado a partir del tiempo de retención.

Con este volumen se calcula la carga volumétrica para ver si cumple con los valores normales de diseño.

$$\begin{aligned} \text{Carga volumétrica} \left(\frac{gDBO_5}{m^3/d} \right) &= \frac{\text{Carga biodegradable} \left(\frac{gDBO_5}{d} \right)}{V (m^3)} \\ &= \frac{1.151.026 \left(\frac{gDBO_5}{d} \right)}{12.511 (m^3)} = 91,43 \left(\frac{gDBO_5}{m^3/d} \right) < 180 \left(\frac{gDBO_5}{m^3/d} \right) \end{aligned}$$

Al ser inferior a 180 g DBO₅/m³/d, cumple y se puede adoptar el volumen calculado a partir del tiempo de retención.

Se dispondrán 3 lagunas en paralelo para mayor flexibilidad en la operación de la planta. Las lagunas anaerobias son de geometría tronco piramidal, por lo que la superficie varía según la profundidad. Las lagunas constarán de una profundidad de 4 m. Para asegurar la continuidad de operación en el caso de limpieza y retirada de fangos, cada laguna dispondrá de una segunda salida situada a 4,5 m de altura, lo que permite aumentar el volumen unitario de las dos lagunas en servicio, compensando la falta de la otra laguna. El funcionamiento no será tan eficiente como cuando las tres lagunas se encuentran en funcionamiento, pero cumple con los parámetros normales de diseño.

Funcionamiento ordinario

En funcionamiento ordinario, con las tres lagunas en servicio, el volumen unitario mínimo se obtiene de dividir el volumen total necesario, 12.511 m³, entre el número de lagunas. Obteniéndose un volumen de 4.170 m³.

El procedimiento de cálculo será iterativo, se fijan el ancho y largo de la laguna, se calcula el volumen, y se modifican las dimensiones hasta alcanzar el volumen deseado. El volumen de un cuerpo con geometría tronco piramidal se obtiene de la siguiente expresión:

$$\text{Volumen} (m^3) = \frac{h(m)}{3} \cdot \left(A1 (m^2) + A2(m^2) + \sqrt{A1(m^2) \cdot A2(m^2)} \right)$$

Dónde:

h, profundidad.

A1, superficie del fondo.

A2, superficie de la lámina de agua en funcionamiento ordinario.

La superficie de la lámina de agua se calcula a partir del ancho y largo fijados, en caso de obtenerse un volumen inferior al deseado, se ajustarán las dimensiones hasta que el volumen obtenido coincida con el de diseño.

$$A2 = \text{Ancho (m)} \cdot \text{Largo(m)}$$

El área del fondo de la laguna se obtiene a partir de las dimensiones en la lámina de agua, y de la inclinación de los taludes. La inclinación recomendada es de 60°. La longitud del talud se obtiene por estequiometría simple:

$$Lt (m) = \frac{h (m)}{\sin 60} = 4,6 m$$

$$Wb(m) = (\text{Ancho(m)} - 2 \cdot (Lt \cdot \cos 60 \cdot \sin 45)) = 21,7 m$$

$$Lb(m) = (\text{Largo (m)} - 2 \cdot (Lt \cdot \cos 60 \cdot \sin 45)) = 43,2 m$$

$$A1 (m^2) = Wb (m) \cdot Lb(m) = 940 m^2$$

Dónde:

Lt, longitud del talud.

Wb, ancho en el fondo de la laguna.

Lb, largo en el fondo de la laguna.

Las dimensiones de las lagunas en funcionamiento ordinario se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 5.14. Dimensiones adoptadas para cada laguna en funcionamiento ordinario.

FUNCIONAMIENTO ORDINARIO	
Nº lagunas	3
Volumen unitario necesario	4.170 m ³
Profundidad	4 m
Ancho en superficie	25 m
Largo en superficie	46,5 m
Área en superficie	1.162 m ²
Tiempo de retención real	3,02 d
Inclinación talud	60°
Longitud talud	4,6 m
Área en el fondo	940 m ²
Volumen laguna	4.196 m ³

FUNCIONAMIENTO ORDINARIO	
Carga volumétrica	91,43 g DBO/m ³ /d

En la siguiente tabla, se muestra un resumen de los datos obtenidos en el dimensionamiento.

Funcionamiento en limpieza

Se dispone de 2 lagunas en servicio con una profundidad de 4,5 m. Se parte de las dimensiones calculadas para el funcionamiento ordinario, que fijan las dimensiones del fondo de la laguna. Conociendo la profundidad, geometría y dimensiones del lecho, se procede al diseño de la laguna.

$$Lt'(m) = \frac{h(m)}{\sin 60} = 5,2 m$$

$$A2'(m^2) = Wb'(m) \cdot Lb'(m) = 1.192 m^2$$

$$Wb'(m) = (Wb(m) + 2 \cdot (Lt'(m) \cdot \cos 60 \cdot \sin 45)) = 25,4 m$$

$$Lb'(m) = (Lb(m) + 2 \cdot (Lt'(m) \cdot \cos 60 \cdot \sin 45)) = 46,9 m$$

$$V'(m^3) = \frac{h'(m)}{3} (A1(m^2) + A2'(m^2) + \sqrt{A1(m^2) \cdot A2'(m^2)}) = 4.785 m^3$$

Dónde:

Lt', longitud del talud en funcionamiento en limpieza.

A2', superficie de la lámina de agua en funcionamiento en limpieza.

V', volumen laguna en funcionamiento en limpieza.

h', profundidad en funcionamiento en limpieza.

Las dimensiones de las lagunas en funcionamiento en limpieza se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 5.15. Dimensiones adoptadas para cada laguna en funcionamiento de limpieza.

FUNCIONAMIENTO EN LIMPIEZA	
Nº lagunas	2
Profundidad	4,5 m
Ancho en superficie	25,4 m
Largo en superficie	46,9 m
Área en superficie	1.192 m ²
Tiempo de retención real	2,3 d
Inclinación talud	60°
Longitud talud	5,2 m
Área en el fondo	940 m ²
Volumen laguna	4.785 m ³

FUNCIONAMIENTO EN LIMPIEZA	
Carga volumétrica	120,3 (g DBO ₅ /m ³ /d)

Se observa que al recalcular la carga volumétrica y el tiempo de retención los valores están dentro de los límites recomendables en el diseño, ya que la carga volumétrica es inferior a 180 (g DBO₅/m³/d) y el tiempo de retención es superior a 2 días. Finalmente, las dimensiones de las lagunas anaerobias se recogen en la siguiente figura.

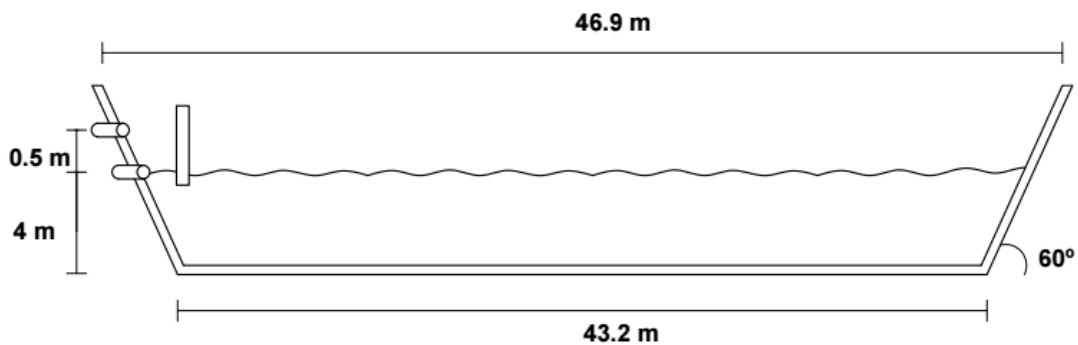


Figura 5.6 Esquema en perfil de laguna anaerobia.

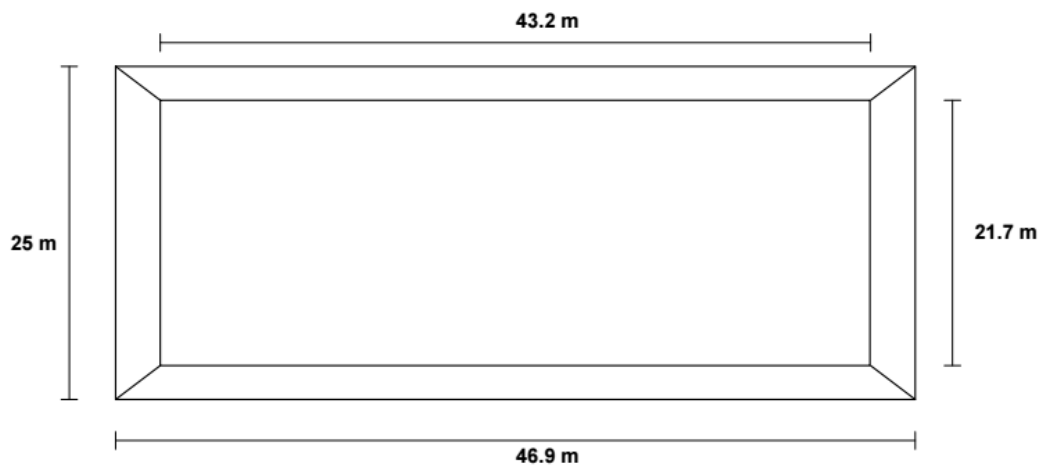


Figura 5.7 Esquema en planta de laguna anaerobia.

Producción de fangos

Los sólidos en suspensión decantan en el fondo de la laguna junto con parte de la materia orgánica presente en el agua residual generando los fangos. La producción de fangos oscila los 40 l/habitante/año por tanto en las lagunas anaerobias se producirán:

$$\begin{aligned}
 \text{Producción de fangos (l/año)} &= 40 \text{ l/hab/año} * 27.500 \text{ hab} = 1.100.000 \text{ l/año} \\
 &= 1.100 \text{ m}^3/\text{año}
 \end{aligned}$$

Dado que hay tres lagunas, la producción por laguna es de 366,7 m³/año de fangos. La retirada de los fangos se realizará cuando un 25% del volumen de las lagunas se encuentre colmatado, es decir cuando el volumen de fangos por laguna sea de 1.050 m³. Con estos datos, podemos obtener la frecuencia de retirada de fangos:

$$\text{Frecuencia de limpieza (años)} = \frac{\text{Volumen colmatación (m}^3\text{)}}{\text{Producción fangos (m}^3\text{/año)}} = \frac{1.050 \text{ (m}^3\text{)}}{366,7 \text{ (m}^3\text{/año)}} = 3 \text{ años}$$

Por tanto, cada 3 años se procederá a la limpieza y retirada de fangos de las lagunas.

Rendimientos de eliminación

En las algunas anaerobias se persigue retener la mayor parte de los sólidos, que pasan a incorporarse a la capa de fangos acumulados en el fondo, eliminándose por consiguiente parte de la materia orgánica. Esta disminución se va a expresar como DBO₅. En el caso que nos ocupa, a pesar de las altas temperaturas anuales, por ser una población rural, con cargas orgánicas muy elevadas y bajo caudal, se va a considerar el caso más desfavorable, en el cuál la reducción de la DBO₅ en las lagunas anaerobias es del 60%. El rendimiento adoptado en el caso de los sólidos en suspensión es del 80% mientras que el de DQO es igual que el de la DBO₅, es decir, 60%.

Tabla 5.16. Rendimientos de eliminación

RENDIMIENTO ELIMINACIÓN LAGUNAJE	
Materia en suspensión	80%
DQO	60%
DBO ₅	60%

Con estos rendimientos de eliminación se puede estimar la carga contaminante que tendrá el agua al salir de las lagunas anaerobias. Los datos del agua de salida se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.17. Características del agua a la entrada y salida de la laguna.

PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA
DQO	301,8 mg/l	120,7 mg/l
DBO ₅	245,5 mg/l	98,2 mg/l
SS	178,6 mg/l	35,7 mg/l

Estos serán los valores tomados para el influente de los lechos de turba, que es el siguiente paso en este sistema de tratamiento.

5.9. LECHOS DE TURBA

Posterior a las lagunas anaerobia, el agua residual se percolará por efectos gravitatorios a través de un lecho de turba, en donde las concentraciones de DQO y DBO₅ serán reducidas a los valores requeridos para su reutilización.

La turba es un carbón ligero, esponjoso y de aspecto terroso que se forma en lugares pantanosos debido a la descomposición de restos vegetales. Al provenir de materia vegetal que está compuesta principalmente por celulosa, la turba es muy rica en compuestos polares como alcoholes, ácidos y cetonas, lo cual le proporciona una alta propiedad de intercambio iónico, adsorbiendo sólidos suspendidos y disueltos como lo son el amonio, pesticidas, metales y algunos compuestos orgánicos [18]. Por otro lado, al contar con alta porosidad, la turba actúa como un filtro físico muy efectivo, al igual que retiene muy bien la humedad ayudando a la sustentabilidad de microorganismos (hongos y bacterias) que se fijan sobre su superficie y mejoran el rendimiento del sistema.

El equipo consta de un sistema de reparto por gravedad, el lecho de turba que se encargará de la depuración del agua, una capa de arena que funcionará como soporte y finalmente un sistema de drenado que dará paso al agua a la siguiente etapa de la planta.

Los parámetros de diseño utilizados para este sistema se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.18. Parámetros de diseño del lecho de turba.

Tipo de turba	clara
Percolación	65 l/h/m ²
Carga hidráulica	1,5 m/d
Carga orgánica	0,5 kg DBO ₅ /m ² /d
Carga de sólidos	0,5 Kg ss/m ² /d
Reserva labores limpieza	30%

Debido a su disponibilidad y propiedades, la turba con la que trabajará el sistema será clara, con la cual se calculan cuatro superficies limitantes de lecho necesarias tomando como requerida la más restrictiva de todas (la mayor). Por otro lado, es necesario considerar un 30% de superficie adicional para labores de limpieza (usualmente se toma un 50%, pero al contar con lagunas anaerobias previas el ratio de colmatación será menor).

A continuación, se calculan las superficies requeridas por percolación, carga hidráulica, carga orgánica y carga de sólidos, considerando los valores del agua residual a la salida de las lagunas anaerobias.

$$S_{\text{Percolación}} (m^2) = \frac{Q \text{ tratamiento} \left(\frac{m^3}{h} \right)}{\text{Percolación} \left(\frac{m^3}{h \cdot m^2} \right)} = \frac{173,8 \left(\frac{m^3}{h} \right)}{65 \left(\frac{l}{h \cdot m^2} \right) \cdot \frac{1 m^3}{1.000 l}} = 2.673 m^2$$

$$S_{\text{Carga Hidráulica}} (m^2) = \frac{Q \text{ tratamiento} \left(\frac{m^3}{h} \right)}{CH \left(\frac{m^3}{h \cdot m^2} \right)} = \frac{173,8 \left(\frac{m^3}{h} \right)}{1,5 \left(\frac{m^3}{d \cdot m^2} \right) \cdot \frac{1 d}{24 h}} = 2.780 m^2$$

$$S_{Carga\ Orgánica} (m^2) = \frac{Q\ tratamiento \left(\frac{m^3}{h}\right) * [DBO_5] \left(\frac{Kg}{m^3}\right)}{CO \left(\frac{Kg_{DBO_5}}{h \cdot m^2}\right)} = \frac{173,8 \left(\frac{m^3}{h}\right) * 0,099 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)}{0,5 \left(\frac{m^3}{d \cdot m^2}\right) \cdot \frac{1\ d}{24\ h}}$$

$$= 829\ m^2$$

$$S_{Sólidos} (m^2) = \frac{Q\ tratamiento \left(\frac{m^3}{h}\right) * [SS] \left(\frac{Kg}{m^3}\right)}{CSS \left(\frac{Kg_{SS}}{h \cdot m^2}\right)} = \frac{173,8 \left(\frac{m^3}{h}\right) * 0,036 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)}{0,5 \left(\frac{m^3}{d \cdot m^2}\right) \cdot \frac{1\ d}{24\ h}} = 301\ m^2$$

Al comparar los cuatro resultados se observa que la superficie más restrictiva es la obtenida a través de la limitación en carga hidráulica, por lo cual, al este valor ser el mayor y por consecuencia cumple con el resto de las limitaciones, será el valor con el cual se procederán los cálculos. Considerando entonces un área requerida de percolación igual a 2.750 m², se procede a calcular la superficie total requerida considerando el excedente por labores de limpieza.

$$S_{total} = S_{CH} * (1 + 0,3) = 2.750\ m^2 * 1,3 = 3.575\ m^2$$

En un sistema de lechos de turba, la superficie máxima por unidad es de 200 m², por lo cual al dividir el área total requerida entre la superficie unitaria tendremos un total de 19 lechos de turba en la planta de tratamiento. La dimensión individual de cada lecho será de 10 metros de ancho por 20 metros de largo.

Para definir la altura de los lechos se tomarán secciones típicas en estos sistemas, con estarán constituidas de la siguiente manera:

Tabla 5.19. Perfil del lecho de turba.

Espesor capa de turba	40 cm
Lámina de Geotextil	
Espesor capa arena fina	10 cm
Espesor capa gravilla	10 cm
Espesor capa de grava	30 cm

La altura total del lecho será aproximadamente de 90 cm, contando con arena, gravilla y grava como soportes, una lámina de geotextil de poliéster para separar la turba de la arena. Se procede a calcular el volumen unitario de cada uno de los materiales utilizados en los lechos, multiplicando la superficie unitaria por la altura de cada capa, arrojando los volúmenes que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.20. Volúmenes unitarios por lecho.

Volumen unitario turba	80 m ³
Volumen unitario arena fina	20 m ³
Volumen unitario turba	20 m ³
Volumen unitario turba	60 m ³

Finalmente, con la densidad de la turba, se calculan los kilogramos de turba necesarios por lecho como se muestra a continuación.

$$Kg_{Turba} = V_{unitario\ Turba}(m^3) \cdot \rho_{Turba\ Clara} \left(\frac{Kg}{m^3}\right) = 80 (m^3) \cdot 60 \left(\frac{Kg}{m^3}\right) = 4.800 Kg$$

De esta forma el dimensionamiento de los lechos queda definido, y ahora procederemos a realizar el balance de masa pertinente para conocer las características del agua a la salida de nuestro sistema. En la siguiente tabla se muestran los porcentajes típicos de rendimiento de eliminación que caracterizan este tipo de sistemas.

Tabla 5.21. Rendimiento de eliminación en lechos de turba.

Materia en suspensión	95%
DQO	80%
DBO ₅	85%
Coliformes fecales *	80%

* Desde cabecera hasta la salida de los lechos de turba.

Al multiplicar las concentraciones de entrada por sus respectivos rendimientos se obtienen los parámetros de salida que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.22. Características del agua a la entrada y salida de los lechos de turba.

PARÁMETRO	ENTRADA	SALIDA
DQO	120,7 mg/l	24,1 mg/l
DBO ₅	98,2 mg/l	14,7 mg/l
SS	35,7 mg/l	1,8 mg/l
Coliformes fecales	10 ⁶ UFC/100ml	2,0·10 ⁵ UFC/100ml

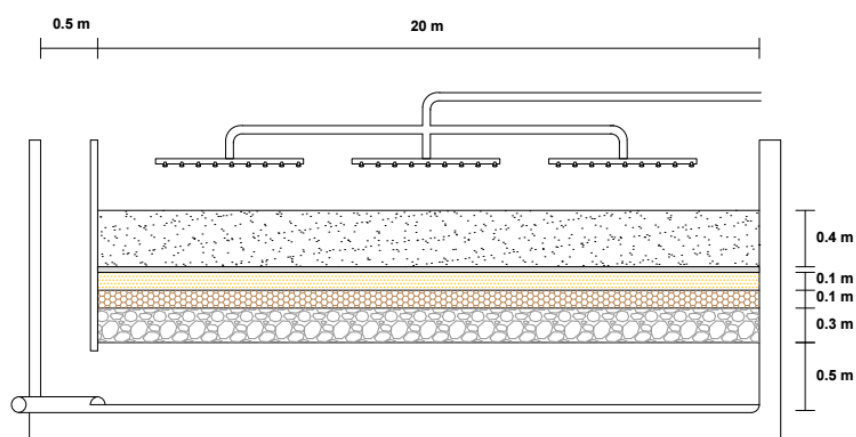


Figura 5.8 Esquema en perfil del lecho de turba.

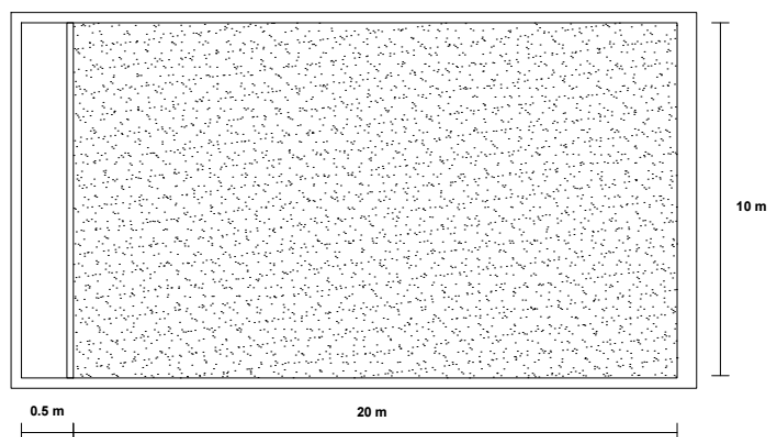


Figura 5.9 Esquema en planta del lecho de turba.

5.10. LAGUNAS DE MADURACIÓN O AEROBIAS

La laguna de maduración o laguna aerobia es una balsa de poca profundidad que favorece la oxigenación por transferencia superficial, así como la proliferación de organismos fotosintéticos que gracias a la energía procedente de sol permiten la eliminación de los organismos patógenos y la mineralización de nutrientes contenidos en las aguas. El objetivo principal de las lagunas de maduración es por tanto la reducción de las bacterias patógenas, coliformes fecales generalmente, para obtener un efluente clarificado y oxigenado donde se haya eliminado completamente la DBO5 y las aguas puedan verterse directamente a cauce público o bien puedan ser reutilizados directamente con fines agrícolas, pues los parámetros de salida del efluente son aptos para tales usos.

El proceso que tiene lugar consiste en que los microorganismos aerobios que están presentes en las aguas debido a las condiciones favorables que se encuentran en las mismas, es decir, una oxigenación continua de la superficie del estanque y una incidencia constante de luz solar, permite que los microorganismos aerobios habiten en condiciones óptimas. Estos microorganismos, principalmente bacterias anaerobias, protozoos y algas, son los encargados de mineralizar la materia orgánica del agua, sin embargo, las cargas orgánicas del medio deben ser bajas para que estos organismos puedan degradarlas. Por ello, este tratamiento siempre se desarrollará tras la operación de un proceso o procesos previos que puedan eliminar la mayor cantidad de materia orgánica, donde la cantidad de DBO5 a oxidar en este punto no sea superior al 20% del total, funcionando así como laguna de maduración y no como facultativa.

El desarrollo eficiente de esta laguna tiene lugar cuando su profundidad se encuentra entre 0,5 y 1,2 metros para favorecer la oxigenación del medio en toda la columna de agua, así como la penetración de la luz ultravioleta procedente del sol. Además de esta característica es necesario que los tiempos de retención alcancen los 5 o 3 días como mínimo, dependiendo del número de lagunas establecidas para que la

actividad fitoplanctónica pueda desarrollarse. Esta actividad permite que el pH del medio aumente y con ello que las condiciones de supervivencia para los patógenos sean hostiles, haciéndolo un medio desfavorable en el que habitar.

La principal ventaja que presenta este tipo de lagunaje es la ausencia consumo energético para el desarrollo del proceso, puesto que se obtiene de la luz ultravioleta de la radiación solar que incide sobre y esta es suficiente para que el proceso de eliminación de patógenos tenga lugar sin necesidad de más aporte energético. Sin embargo, es preciso que la superficie que ocupe dichos estanques sea lo suficientemente amplia como para que los procesos de mineralización tengan lugar, así como que la balsa esté impermeabilizada para evitar procesos de lixiviación e infiltraciones que contaminen el terreno.

Para el diseño y dimensionamiento de las lagunas de maduración, el primer elemento preciso a considerar es la carga orgánica que llega y que debe eliminarse para conseguir un efluente clarificado. Por este motivo su diseño se basa en modelos cinéticos para la eliminación de las bacterias patógenas presentes en el medio, siendo la ecuación cinética de eliminación de dichos patógenos la siguiente:

$$N_e = N_i / (1 + k_b \cdot t)$$

Los parámetros empleados en el modelo son:

N_e , el número de coliformes fecales en 100 ml del efluente.

N_i , el número de coliformes fecales en 100 ml del influente.

k_b , la constante de velocidad para la eliminación de coliformes (días⁻¹).

t , el tiempo de retención (días).

Sin embargo, si se desea construir diversas lagunas de maduración en serie, como es el caso de este proyecto donde se establecerán dos, la ecuación de diseño que se seguirá será la siguiente:

$$N_e = N_i / ((1 + k_b \cdot t_1) \cdot (1 + k_b \cdot t_2))$$

Para partir de estos datos es necesario conocer previamente las características que presenta el efluente que sale del proceso anterior de lechos de turba, observando como se muestra en la 5.21 que las coliformes de entrada a la laguna son de $2 \cdot 10^5$ UFC.

Tabla 5.23. Características del agua a la salida del lecho de turba.

AGUA SALIDA LECHO TURBA	
DQO	24,1 mg/l
DBO ₅	14,7 mg/l
SS	1,8 mg/l
Coliformes fecales	$2 \cdot 10^5$ UFC/100 ml

Para poder cumplir con los indicadores de coliformes en tras depurar las aguas, los parámetros de diseño imprescindibles a considerar en este tratamiento son el cálculo de coliformes en el efluente, la temperatura del ambiente, así como la temperatura media anual en el agua y el tiempo de retención. Par cumplir con dichos parámetros, estos deben ajustarse a los siguientes valores:

Tabla 5.24. Rango de parámetros de diseño de laguna de maduración.

Tiempo de retención (Tr)	>5 días si hay una laguna > 3 días si hay dos o más lagunas
Profundidad	0,5 - 1,2 m
Funcionamiento	En serie
Producción de fangos	Despreciable

En el dimensionamiento de las lagunas de maduración se tendrá en cuenta un total de 2 lagunas que se colocarán en serie y por ello el tiempo de retención deberá ajustarse como mínimo a 3 días en cada una de ellas, el valor recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Los datos de partida adoptados para el diseño de las lagunas de maduración son los siguientes:

Tabla 5.25. Parámetros de diseño de laguna de maduración.

PARÁMETROS	VALORES SELECCIONADOS
Tiempo de retención	3 d
Temperatura del agua	22 °C
Profundidad	1 m
Coliformes fecales	$2 \cdot 10^5$ UFC/ 100ml
Caudal diseño	4.170 m ³ /d

Como se ha mencionado con anterioridad, para calcular la eliminación de patógenos se partirá de la ecuación cinética donde de la constante de velocidad depende de la temperatura, siendo su cálculo:

$$K_b = K_{20} \cdot \theta^{(t-20)}$$

Los parámetros empleados en la ecuación son:

K_{20} = constante de velocidad a 20°C, días⁻¹ = 2,6

θ = coeficiente de temperatura, adimensional = 1,19

T = temperatura media anual del agua = 22°C

Por tanto, la constante de cinética de eliminación de coliformes es:

$$K_b = 2,6 \cdot 1,19^{(22-20)} = 3,68$$

Los coliformes a la salida de la laguna de maduración serán los siguientes:

$$N_e = 2 \cdot 10^5 / ((1 + 3,68 \cdot 3) \cdot (1 + 3,68 \cdot 3)) = 1,38 \cdot 10^3 \text{ UFC}/100\text{ml}$$

El resultado obtenido de $1,38 \cdot 10^3 \text{ UFC}/100\text{ml}$ de agua tras realizar el tratamiento de lagunaje muestra que es inferior a $10.000 \text{ UFC}/100 \text{ ml}$, por lo que se cumple con el objetivo de depuración de las aguas de la población de estudio.

En la siguiente tabla se muestran los valores que se han seleccionado para los diferentes parámetros.

Tabla 5.26. Dimensionamiento laguna de maduración.

Nº de lagunas	2
Tiempo retención laguna 1	3 d
Tiempo retención laguna 2	3 d
Temperatura mínima	22 °C
Constante de velocidad	2,6 d ⁻¹
Coefficiente de T ^a (φ)	1,19
Constante cinética eliminación de coliformes	1,84
Coliformes a la salida	1,38·10 ³ UFC/100ml

Para calcular el volumen de las lagunas se partirá del tiempo de retención y del caudal de entrada en este proceso, obteniendo:

$$V_{\text{unitario}} (m^3) = \text{Caudal} (m^3/d) \cdot t_r(\text{dias}) = 4.170 (m^3/d) \cdot 3 (\text{dias}) = 12.511 m^3$$

La superficie unitaria de cada laguna de maduración se calculará a partir del volumen individual de cada laguna, de la profundidad de las mismas y considerando su geometría tronco piramidal. Se fijará un ancho y largo estimados y se calculará el volumen. Se realizarán diversas iteraciones hasta que el volumen obtenido coincide con el necesario.

$$W(m) = 50 m$$

$$L(m) = 254 m$$

$$As (m^2) = L(m) \cdot W(m) = 12.700 m^2$$

$$Lt(m) = \frac{h(m)}{\sin 60} = 1,2 m$$

$$Wb(m) = (W(m) - 2 \cdot (Lt(m) \cdot \cos 60 \cdot \sin 45)) = 49,3 m$$

$$Lb(m) = (L(m) - 2 \cdot (Lt(m) \cdot \cos 60 \cdot \sin 45)) = 253,3 m$$

$$Ab (m^2) = Wb (m) \cdot Lb(m) = 12.452 m^2$$

$$V(m^3) = \frac{h (m)}{3} \left(As (m^2) + Ab(m^2) + \sqrt{As (m^2) \cdot Ab(m^2)} \right) = 12.576 m^3$$

Dónde:

W, ancho de la laguna en superficie.

L, largo de la laguna en superficie.

As, área de la laguna en superficie.

Wb, ancho de la laguna en el fondo.

Lb, largo de la laguna en el fondo.

Ab, área de la laguna en el fondo.

H, profundidad de la laguna.

Lt, longitud del talud.

Se dispondrán 2 lagunas de iguales dimensiones en serie. Por tanto, el volumen unitario será de 12.511 m³ que, por razones constructivas se adoptará un volumen de 12.576 m³, con unas dimensiones de 50 m de ancho, 254 m de largo y 1 m de profundidad. La superficie unitaria adoptada será de 12.700 m², ocupando una superficie total de 2,54 Ha de terreno.

Tabla 5.27. Dimensiones adoptadas para cada laguna en funcionamiento ordinario.

Volumen unitario mín	12.511 m ³
Profundidad	1 m
Ancho en superficie	50 m
Largo en superficie	254 m
Área en superficie	12.700 m ²
Inclinación taludes	60°
Longitud talud	1,2 m
Área en fondo	12.452 m ²
Volumen laguna	12.576 m ³
Tiempo de retención	3,0 d
Ancho en fondo	49,3 m
Largo en fondo	253,3 m

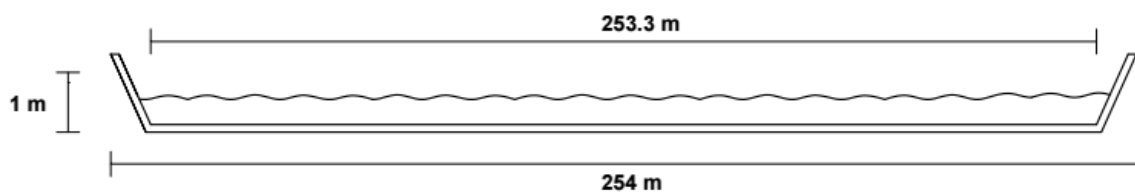


Figura 5.10 Esquema en perfil de laguna de maduración.

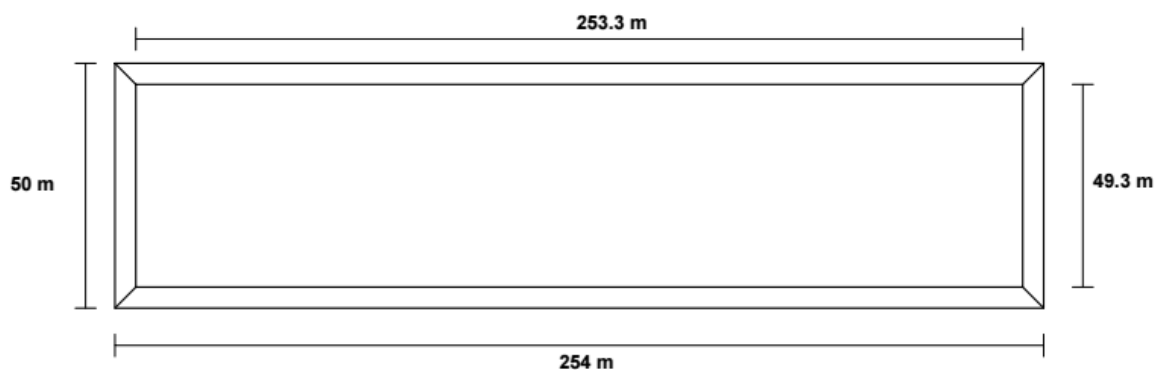


Figura 5.11 Esquema en planta de laguna de maduración.

Rendimientos de eliminación

Los rendimientos de eliminación de las lagunas de maduración se recogen en la tabla 5.27.

Tabla 5.28 Rendimientos de eliminación lagunas de maduración

PARÁMETRO	RENDIMIENTO ELIMINACIÓN
DQO (mg/l)	65%
DBO ₅ (mg/l)	65%
SS (mg/l)	45%
Coliformes fecales	99%

Los parámetros a la salida de las lagunas de maduración se calcularán a partir de los rendimientos de eliminación y de los valores a la salida de los lechos de turba.

Tabla 5.29. Valores de DQO, DBO₅ y sólidos en suspensión a la salida de la laguna.

PARÁMETRO	VALORES DE ENTRADA	VALOR DE SALIDA
DQO (mg/l)	24,1 mg/l	8,5 mg/l
DBO ₅ (mg/l)	14,7 mg/l	5,2 mg/l
SS (mg/l)	1,8 mg/l	1 mg/l
Coliformes fecales	2·10 ⁵ UFC/100 ml	1,38·10 ³ UFC/100ml

Estos serán los valores finales obtenidos en el tratamiento completo de las aguas residuales de la población de Tucaní, siendo este el último tratamiento en el proceso de depuración. Como se muestra en la tabla 5.28 los resultados obtenidos cumplen con los parámetros de vertidos establecidos en la legislación española, valores que han sido objetivo a alcanzar en esta población.

5.11. ERAS DE SECADO

La deshidratación de lodos se puede conseguir mediante fuerzas mecánicas, gravitatorias y/o térmicas. De forma general, la eliminación de agua de los lodos se consigue en un proceso de tres etapas: espesado, deshidratación y secado. Dadas las peculiaridades de la planta proyectada, se recurre al tratamiento más sencillo y que no requiere energía ni térmica ni eléctrica, las eras de secado.

Las eras de secado son un tratamiento de eliminación de agua de los lodos a partir de fuerzas gravitatorias (campos gravitatorios naturales) y fuerzas térmicas (evaporación natural). El método consiste en incorporar sobre una balsa de arena, con fondo drenado, los lodos que deben estar bien estabilizados. De esta forma se efectúa una primera pérdida de agua por drenaje, a la vez que se produce la evaporación.

Las cantidades de agua eliminadas dependen de:

- ✓ Características del lodo.
- ✓ Contenido inicial de materia seca.
- ✓ Condiciones climáticas.
- ✓ Espesor inicial de la capa incorporada al lecho.
- ✓ Naturaleza del material drenante.

Valores de concentración de los lodos del 30-40% son fáciles de alcanzar, siendo asumible alcanzar concentraciones del 60-70% si las condiciones climáticas son favorables. La reutilización de lodos en agricultura requiere una concentración mínima de un 15-20%, por lo que los lodos procedentes de la era de secado son totalmente aptos para ello.

En resumen, las ventajas e inconvenientes de las eras de secado se recogen en la tabla siguiente.

Tabla 5.30. Ventajas e inconvenientes de las eras de secado.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Sencillez y fácil operación	Gran superficie
Lodos reutilizables en agricultura	Generación de olores
No consume energía eléctrica	Dependencia de condiciones climáticas
Personal poco cualificado	Extracción de fangos
	Mucha mano de obra

Diseño y dimensionado de las eras de secado

El diseño de las eras de secado se realiza en base a tres parámetros:

- ✓ Rotación o número de llenados por año.
- ✓ Carga de secado (Kg MS/m² año).
- ✓ Número de habitantes equivalentes por año y por m².

Al tratarse de un sistema no convencional, en el que los fangos no son extraídos en continuo, sino que son extraídos periódicamente al realizar las tareas de limpieza de las lagunas, el dimensionamiento será diferente.

Las lagunas anaerobias serán limpiadas cuando los fangos ocupen un cuarto de su volumen. La producción de fangos normal en aguas urbanas es de 40 l/hab año. Por lo que se calcula la producción anual de fangos, que se repartirá de forma homogénea entre las tres lagunas.

Producción unitaria fangos (m³ fango/laguna/año)

$$\text{Producción unitaria fangos (m}^3/\text{año)} = \frac{40 \left(\frac{\text{l}}{\text{hab año}} \right) \cdot 27.500 (\text{hab})}{3 (\text{lagunas})} = 367 \text{ m}^3/\text{año}$$

Las lagunas se limpian una vez cada 3 años, por lo que se puede determinar la cantidad de fangos que se retira en cada limpieza.

$$\text{Fangos extraídos en cada limpieza (m}^3) = 367 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) \cdot 3 (\text{años}) = 1.100 \text{ m}^3$$

La superficie necesaria para el secado se obtendrá a partir del volumen de fango a secar y de la altura máxima de fangos que se puede colocar en una era. Según J. Rubio Bosch [19] la altura máxima de lodos es de 40 cm.

$$\text{Superficie eras (m}^2) = \frac{\text{Fangos extraídos en cada limpieza (m}^3)}{\text{Altura máx. fangos (m)}} = \frac{1.100 (\text{m}^3)}{0,40 (\text{m})} = 2.750 \text{ m}^2$$

Las eras de secado tendrán unas dimensiones tales que permitan el reparto homogéneo a lo largo de toda la superficie y cuyo vaciado sea lo más sencillo posible. Las dimensiones adoptadas para este trabajo han sido de 8x20 m. El número de eras de secado se obtiene a partir de la superficie unitaria de cada una de ellas.

$$\text{N}^{\circ} \text{ eras de secado} = \frac{\text{Superficie eras (m}^2)}{\text{superficie unitaria (m}^2)} = \frac{2750 (\text{m}^2)}{8 (\text{m}) \cdot 20 (\text{m})} = 17$$

Tabla 5.31. Detalles eras de secado.

Características principales de las eras de secado	
Fangos de lagunas anaerobias	1.100 m ³ /ciclo
Concentración fangos	1%
Pendiente solera	3%
Superficie necesaria	2.750 m ²
Profundidad de llenado	40 cm
Ancho	8 m
Largo	20 m

Nº eras	17
Resguardo sobre la arena	60 cm
Granulometría arenas	0,2 - 0,8 mm
Coefficiente uniformidad arenas	< 4
Concentración fangos secos	80%
Porcentaje lixiviados	43%
Porcentaje pérdidas evaporación	57%
Volumen de lixiviados	468 m ³ /ciclo
Tiempo necesario para secado	7 d

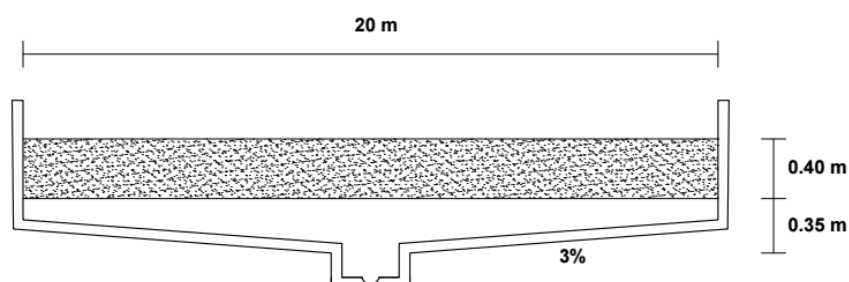


Figura 5.12 Esquema en perfil de la era de secado.

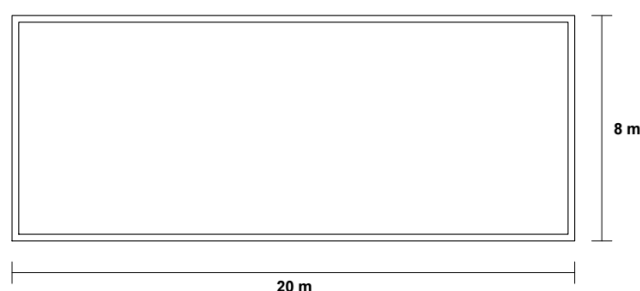


Figura 5.13 Esquema en planta de la era de secado.

Duración de la operación de limpieza

Para la extracción de los fangos de las lagunas se emplea un camión cisterna de 20 m³ de capacidad y con una bomba de vacío de 1000 m³/h de caudal máximo. La duración de la operación de limpieza se puede calcular a partir de los tiempos de llenado, vaciado y transporte.

$$\text{Tiempo de llenado} = \frac{\text{Vol. cisterna (m}^3\text{)}}{\text{Caudal máx. bomba } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)} = \frac{20 \text{ (m}^3\text{)}}{1000 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)} = 1,2 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo de vaciado} = \frac{\text{Vol. cisterna (m}^3\text{)}}{\text{Capacidad vaciado (l/min)}} = \frac{20 \text{ (m}^3\text{)}}{215 \text{ (l/min)}} = 93 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo recorrido entre laguna y era} \approx 10 \text{ min}$$

$$Tiempo\ total\ cada\ viaje = 2 \cdot 10 + 1,2 + 93 = 114\ min$$

A partir de estos tiempos y del número de veces que es necesario realizar esta operación para vaciar por completo la laguna, se obtiene el tiempo total de limpieza de la laguna.

$$N^{\circ}\ viajes = \frac{Fangos\ extraídos\ en\ cada\ limpieza\ (m^3)}{Capacidad\ cisterna\ (m^3)} = \frac{1.100\ (m^3)}{20\ (m^3)} = 55\ viajes$$

$$Tiempo\ neto\ ciclo\ de\ limpieza = N^{\circ}\ viajes \cdot (T\ total\ cada\ viaje) = 55\ (viajes) \cdot 114\ (min) \\ = 105\ h$$

Teniendo en cuenta que para reducir costes y no tener problemas de tiempo, se trabajará en un solo turno diario de 8 horas y 5 días a la semana, se puede obtener el tiempo real de limpieza de una laguna.

$$Tiempo\ real\ limpieza = \frac{Tiempo\ neto\ ciclo\ de\ limpieza(h)}{8\ \left(\frac{h}{d}\right) \cdot 5\ \left(\frac{d\ hábiles}{semana}\right)} \cdot 7\ \left(\frac{d\ naturales}{semana}\right) \\ = 18,3\ días\ naturales$$

Figura 5.14 Detalles operación de limpieza.

Detalles operación de limpieza	
Capacidad camión	20 m ³
Nº de viajes	55
Caudal de la chupona	1.000 m ³ /h
Caudal de vaciado	215 l/min
Tiempo de llenado	1,2 min
Tiempo de vaciado	93 min
Tiempo recorrido entre lagunas y eras de secado	10 min
Tiempo neto ciclo de limpieza	105 h
Horario de trabajo	8 h/d
Días hábiles	5 d/sem
Tiempo real ciclo de limpieza	13 d hábiles
Tiempo real ciclo de limpieza	18,3 d naturales

Caudal de lixiviados

El cálculo del caudal de lixiviados es fundamental para el dimensionamiento de las conducciones que recircularán el lixiviado de nuevo a la laguna anaerobia, así como para el dimensionamiento del propio tratamiento.

Asumiendo que los fangos se secan en 7 días, el caudal máximo de lixiviados será aquel que provenga de la cantidad de fangos extraída en una semana.

El volumen de fangos extraído cada día se puede calcular, así como la superficie que ocuparían sobre los lechos.

$$\text{Fangos extraídos} \left(\frac{m^3}{d} \right) = \frac{N^{\circ} \text{ viajes}}{\text{Tiempo real limpieza (d)} \cdot \frac{5 (d \text{ hábiles})}{7 (d \text{ natur.})}} \cdot \text{Capac. cisterna (m}^3\text{)}$$

$$\text{Fangos extraídos} \left(\frac{m^3}{d} \right) = \frac{55}{18,3 \cdot \frac{5 (d \text{ hábiles})}{7 (d \text{ natur.})}} \cdot 20 (m^3) = 84 \frac{m^3}{d}$$

$$\text{Superficie ocupada} \left(\frac{m^2}{d} \right) = \frac{\text{Fangos extraídos} \left(\frac{m^3}{d} \right)}{\text{Altura máx. fangos (m)}} = \frac{84 \left(\frac{m^3}{d} \right)}{0,4 (m)} = 210 \frac{m^2}{d}$$

Los estudios realizados por J. Rubio Bosch [19], empleando como soporte lechos de arena de 0,2-0,8 mm de diámetro y un coeficiente de uniformidad menor a 4, muestran como la velocidad de drenaje va cambiando a lo largo del tiempo. Se pueden distinguir dos fases:

- Las 8 primeras horas: velocidad de drenaje 4 l/m²/h
- Después de las 8 primeras horas: velocidad de drenaje 1 l/m²/h

Dado que los turnos de trabajo son de 8 horas al día. La superficie máxima de eras de secado que se encontrará simultáneamente drenando a 4 l/m² h será 210 m².

El caudal máximo de lixiviados será aquel que provenga de la cantidad de fangos extraída en una semana. La superficie máxima de eras de secado que se encontrará simultáneamente drenando a 1 l/m²/h será la correspondiente a 5 días de trabajo que corresponde con 1.050 m².

El caudal máximo de lixiviado se calculará con la siguiente expresión.

Caudal máx. lixiviado

$$= \text{Superf. Drenando a } 4 \text{ l/m}^2\text{h} \cdot 4 \left(\frac{l}{m^2 \cdot h} \right) + \text{Superf. Drenando a } 1 \text{ l/m}^2\text{h} \cdot 1 \left(\frac{l}{m^2 \cdot h} \right)$$

$$\text{Caudal máx. lixiviado} = 210 (m^2) \cdot 4 \left(\frac{l}{m^2 \cdot h} \right) + 1050 (m^2) \cdot 1 \left(\frac{l}{m^2 \cdot h} \right) = 1,9 m^3/h$$

El caudal de lixiviado será conducido por gravedad hasta las lagunas anaerobias.

Tabla 5.28. Cálculo de los lixiviados.

Caudal de lixiviados	
Velocidad de drenaje 8 primeras horas	4 l/h/m ²
Velocidad de drenaje resto del tiempo	1 l/h/m ²
Superficie máx llenada cada día	210 m ²
Superficie máx funcionando a 4 l/h/m ²	210 m ²
Superficie máx funcionando a 1 l/h/m ²	1.051 m ²
Caudal máximo de lixiviados	1,9 m ³ /h

En el anexo IV se muestra el resumen de los cálculos del diseño y dimensionamiento de la estación depuradora de aguas.

6. CONSTRUCCIÓN

La construcción de la planta depuradora de aguas residuales de la población de Tucaní estará ubicada próxima a la ciudad, concretamente a 4,82 km al Oeste de la misma, en el propio municipio de Caracciolo Parra Olmedo.



Figura 6.1. Emplazamiento de la EDAR con las conducciones de llegada y salida a la planta.

El emplazamiento se ha localizado en esta zona con motivo de poder verter las aguas tratadas al cauce del río Tucaní, que transcurre desde los pies de la Sierra La Culata hasta el Lago Maracaibo, recorriendo el municipio de sur a norte por su zona Occidental.

Esta situación presenta una topografía idónea que permite la adaptación de la totalidad de la instalación al terreno puesto que la pendiente media del 1,6% favorece la implantación de las conducciones para el abastecimiento por gravedad a la planta. Los suelos presentes en la zona son limosos, óptimos para la agricultura, los cuales permiten que la excavación sobre el terreno sea sencilla de realizar, sin presentar inconvenientes en las tareas de construcción.

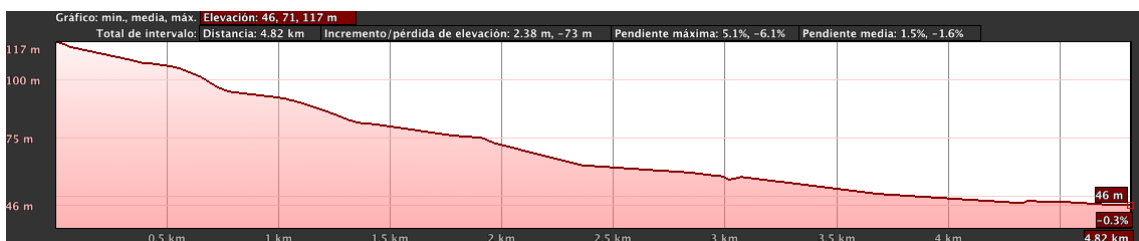


Figura 6.2. Perfil del terreno de la línea de agua completa de la instalación.

La ocupación del terreno de 5,8 hectáreas necesarias para la EDAR se ubica sobre un perfil topográfico de un 1% de pendiente media, donde la variación altitudinal de la

parcela oscila entre los 53 y 51 m.s.n.m. beneficiando la construcción y explotación de la planta.

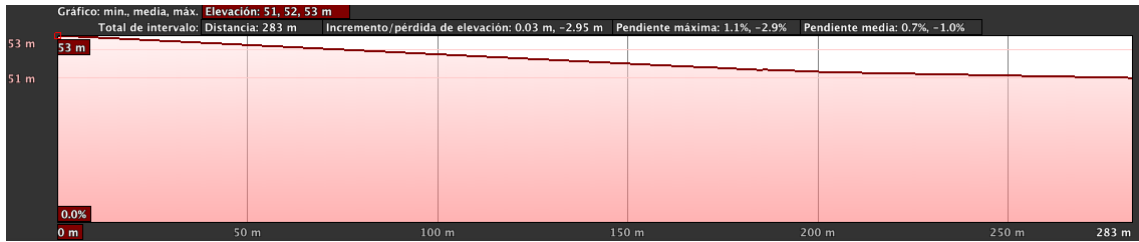


Figura 6.3. Perfil del terreno del emplazamiento de la EDAR.

Adicionalmente, la zona elegida es un punto estratégico donde no crear afección a las poblaciones cercanas, encontrándose en un área aislada y despoblada donde los vientos predominantes del este no incidirían sobre ningún foco poblacional.

El estacionamiento permite el aprovechamiento de las tierras próximas al río para establecer una zona de plantación, donde el terreno es apto al presentar una pendiente mínima que permite el riego por gravedad de los cultivos sembrados que beneficiará a los agricultores de Tucaní.

En el Anexo V se muestra un plano en planta de la disposición de la parcela de la EDAR que tendrá una longitud de 280 m y un ancho de 262 m, ocupando una superficie de 5,8 ha. El colector de aguas residuales que abastecerá la planta directamente por gravedad desde el noroeste de la ciudad de Tucaní presentará una longitud de 3,47 km, recorriendo una pendiente del 1,8%. Por otro lado, el colector de salida de agua tratada será de 1,07 km hasta llegar al cauce del río sobre un terreno con un 0,5% de pendiente.

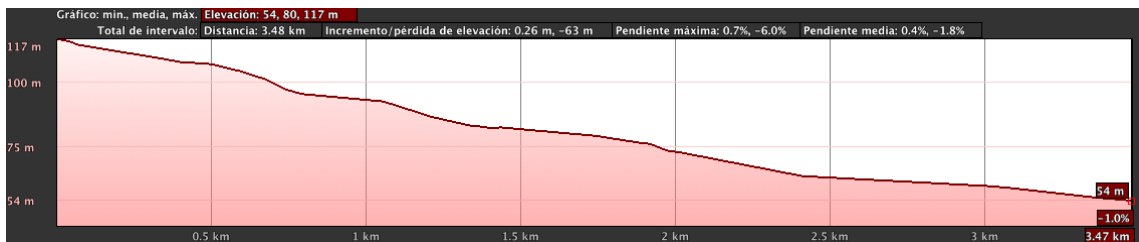


Figura 6.4. Perfil del terreno de la conducción de entrada de agua residual a la EDAR.

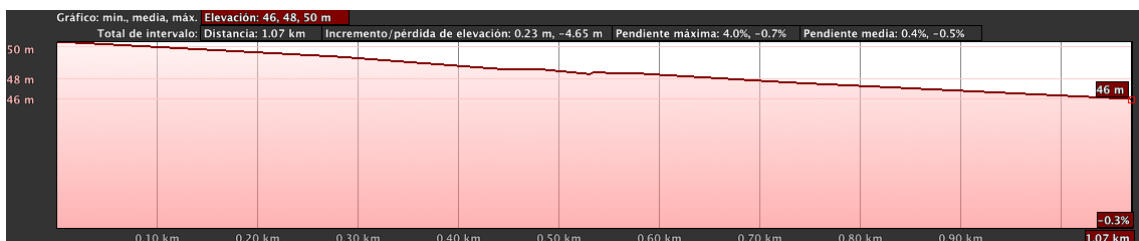


Figura 6.5. Perfil del terreno de la conducción de salida de agua tratada de la EDAR.

Como se muestra en los planos 2 y 3, la disposición de cada proceso de depuración de las aguas se ha ubicado considerando la topografía para que no sea necesario la implementación de bombeo y que todas las aguas circulen sin obstáculos de un

tratamiento a otro. Se ha tenido en cuenta la optimización del terreno en el recinto para ejecutar los procesos de explotación y mantenimiento requeridos, estableciendo el espacio necesario para realizar las labores de control, limpieza y tránsito de vehículos que se precisen a lo largo de la vida útil de la instalación.

En el anexo V se muestra el plano de topografía en el cual se construirá la estación depuradora de aguas residuales de la ciudad de Tucaní.

6.1. OBRA DE LLEGADA

El agua residual llegará a la planta de tratamiento a través de un colector municipal. A la entrada, se colocará un canal de hormigón para conducir el agua hacia el pretratamiento. Este canal, contará con un aliviadero para que, en el caso del que el caudal de entrada sea superior al que el sistema pueda tratar, el agua sea enviada directamente al cauce.

6.2. DESBASTE

Se construirán dos canales de hormigón, uno de ellos de reserva conectados a través de un aliviadero para cuando se colmaten las rejillas el agua residual pase a ese canal y siga el procedimiento. En estos canales, se dispondrán las rejillas de finos, medios y de gruesos. Además, contarán con compuertas metálicas para controlar el paso del agua.

El objetivo del desbaste o cribado es retener y separar los cuerpos voluminosos flotantes y en suspensión de las aguas residuales ya que pueden dañar u obstruir las tuberías, interfiriendo en los procesos de tratamiento. Los dispositivos utilizados para este fin son las rejillas de barras, que son una serie de barras o soleras de metal paralelas, colocadas en un determinado ángulo de inclinación en el canal que conduce las aguas residuales a la planta de tratamiento. En este caso al realizar limpieza manual, el ángulo de inclinación usado será de 60°.

También contará con un depósito escurridor, tipo cesta, donde se irán retirando los sólidos que se retiran de las rejillas.

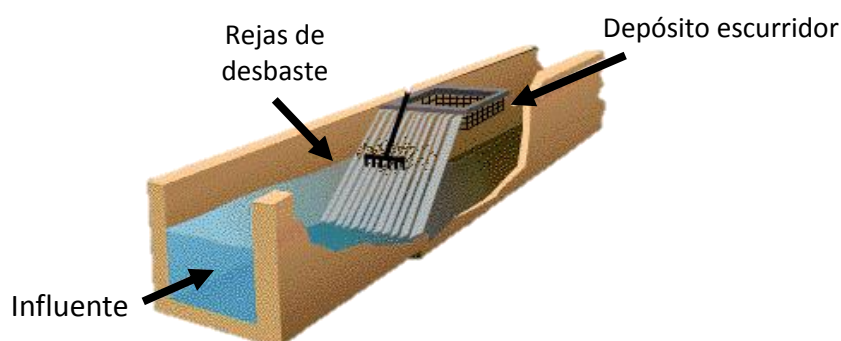


Figura 6.6. Diseño del canal de desbaste.

6.3. DESARENADO

El desarenador seleccionado es un desarenador de flujo horizontal que son canales rectangulares donde se mantiene una velocidad controlada del agua residual, de forma que las arenas sedimentan y los sólidos orgánicos pasan a las siguientes unidades de tratamiento. El parámetro principal de diseño es la velocidad horizontal del flujo a través de la unidad.

El canal será de hormigón armado y debe de proveerse un espacio dentro de la canal para la acumulación y almacenamiento de las arenas.



Figura 6.7. Canal desarenador de hormigón.

6.4. LAGUNAS ANAEROBIAS

El diseño de lagunas consiste no solamente en determinar su superficie y profundidad sino, particularmente, en resolver un sinnúmero de detalles de construcción y especificaciones que asegurarán un funcionamiento y estabilidad adecuados de la unidad a lo largo de su vida útil.

Una vez definidos en un plano la ubicación de las lagunas, determinada por la posición del colector terminal y también por la disponibilidad de terreno, se procederá a efectuar el replanteo en el terreno, siguiendo estrictamente las indicaciones de los planos, en cuanto a distancias, rumbos, etc. Se colocarán estacas indicando el corte o el relleno necesarios para lograr el nivel de obra terminado.

Se realizará el desmonte, que consiste en el corte y desenraizado de árboles, arbustos, hierbas o cualquier otro tipo de vegetación, y su retiro. Todo este material removido debe sacarse fuera de los límites del predio de la instalación de tratamiento y de sus accesos.

En la construcción de una planta depuradora por lagunaje las unidades de mayor importancia de la obra son:

Movimiento de tierras

Una vez caracterizado el material del subsuelo y determinado el material necesario para la conformación del fondo y taludes, se debe estudiar cuidadosamente el manejo de los estratos. Las lagunas de estabilización se construyen procurando que el movimiento de tierra sea compensado; es decir, que la excavación produzca el material necesario para la estabilización de los taludes. Este aspecto es de vital importancia para la economía del proyecto ya que generalmente el movimiento de tierras supera el 80% del costo de la obra.

El despalme consiste en el retiro del material que se considera inapropiado, ya sea para el fondo de la laguna o para la fundación de los diques, tuberías u obras de arte. Generalmente, es la capa vegetal la que debe retirarse. En algunos casos, el despalme obliga a excavar por debajo de los límites previstos en el proyecto, obligando a reemplazar el material extraído por material apropiado, el cual debe ser compactado cuidadosamente.

Excavación y escarificación

Las excavaciones se ejecutan con el objeto de obtener los niveles deseados para el fondo, así como para formar las secciones del proyecto. Por lo general, la excavación se hace con equipo de construcción similar al utilizado en carreteras.

La escarificación consiste en la rotura de unos 15 cm del terreno sobre el cual se van a formar los terraplenes. Se entiende que estos 15 cm son después de efectuado el despalme. La escarificación se realiza con el fin de lograr una liga íntima entre el terreno natural y el material de los terraplenes



Figura 6.8. Movimiento de tierras en la construcción de lagunas.

Formación de terraplenes

Una vez concluidos el despalme y la escarificación, los terraplenes se construyen con el material producto de las excavaciones, o del obtenido mediante préstamos. El

material se irá colocando en capas delgadas que se van compactando. La pendiente de los taludes será de 3:1 o 2:1. El espesor de las capas, el porcentaje de humedad permisible, lo mismo que el grado de compactación requerido, será fijado con base en los estudios de suelos que se realicen. En todo diseño deberá darse a los diques la pendiente que garantice su estabilidad total. La coronación del dique debe ser hecha lo suficientemente ancha como para permitir el fácil tráfico de vehículos. En las lagunas, sobre todo en las primarias, el ancho debe ser tal que permita la circulación del equipo pesado, tanto en la etapa de construcción como durante la remoción de lodos.



Figura 6.9. Estabilización de taludes.

Conducciones

Se trata de tuberías o canales que transportan el agua entre los diferentes procesos del tratamiento de agua. Las tuberías de interconexión se utilizan para transferir el efluente de una laguna a otra en casos donde se operan dos o más unidades en serie, tal como de una laguna anaerobia conectada a una facultativa o una facultativa conectada a una de maduración. En muchos casos una tubería que atraviesa la balsa, bajo el nivel del espejo de agua, es suficiente para establecer una interconexión adecuada.

Esta red de tuberías trabajará por gravedad. Por ello, se utilizarán tuberías convencionales de saneamiento (PVC, fibrocemento, hormigón) cuidando la estanqueidad de las juntas para evitar que las fugas pongan en peligro la estabilidad de los taludes.

A la hora de seleccionar la tubería hay que tener en cuenta la velocidad de paso, ya que esta no puede ser muy baja para evitar sedimentación ni muy alta para evitar daños en los procesos.

Para llevar a cabo las labores de mantenimiento, deben de ponerse pozos de registro en los cambios de dirección y a distancias no mayores de 50 metros.

Unidades especiales

En este concepto se engloban las arquetas de reparto y las unidades de entrada y salida de las diferentes balsas.

- **Arquetas de reparto:** Estas unidades son requeridas para la distribución del flujo entre dos o más lagunas operadas en paralelo, para que reciban cargas

hidráulicas proporcionales a su capacidad. Los repartidores más apropiados son aquellos que cumplen su función para todo el intervalo de caudales, de mínimo a máximo horario.

Uno de los repartidores más utilizados es el que consiste en una cámara, en la cual el caudal que entra sale por dos vertederos que se reparten independientemente a cada laguna. La cámara de reparto suele construirse con hormigón armado y los vertederos son de acero inoxidable o aluminio

- **Unidades de entrada:** En general, el tipo de entrada debe ser lo más simple posible y no muy alejado del borde de los taludes. Existe bastante controversia en cuanto si la tubería de entrada a una laguna debe ir sumergida o sobre el nivel del agua. Estas entradas, constan de una arqueta receptora y una tubería. La arqueta suele construirse en hormigón o fábrica de ladrillo y la tubería con cualquier material usado para fluido a presión.
- **Unidades de salida:** La estructura de salida de una laguna determina el nivel del agua dentro de ella y podrá colocarse en cualquier punto del borde, ordinariamente al pie del talud y opuesto a la tubería de entrada. Se debe incorporar un vertedero triangular o rectangular para medición y control de efluentes. Las salidas superficiales deben incorporar placas deflectoras de acero inoxidable o aluminio alrededor del dispositivo para la retención de capa de agua superficial, ya que en el caso de lagunas anaerobias es recomendable impedir que desaparezca la costra superficial formada. Se pueden poner salidas a diferentes alturas, con el fin de tener la posibilidad de manejar distintos volúmenes de en una misma laguna.

Es muy importante la adecuada disposición de las unidades de entrada y salida en las lagunas, para evitar zonas muertas en las mismas que reducen el volumen operativo de éstas y por tanto provocan sobrecargas.

Impermeabilización

- **Revestimiento del fondo:** Los estudios de conductividad hidráulica y permeabilidad del material encontrado en el fondo, serán los que indiquen si a éste se le deberá hacer algún tratamiento especial o revestirlo con algún material impermeable natural (arcilla) o artificial (membranas sintéticas). Si la tierra es muy permeable teóricamente puede suceder que la laguna nunca complete su llenado debido a la infiltración a través del fondo.
Los revestimientos de materiales poliméricos son los más utilizados. En el caso de suelos con más de 70% de material granular por peso (grava o arena), el uso de suelo-cemento es una alternativa, pero se tiene que tener en cuenta el aspecto económico. Otra alternativa es la utilización de manto asfáltico.

En este caso se ha optado por una geomembrana impermeabilizante de polietileno de alta densidad electrosoldado de 1,5 mm de espesor, que presenta unas características impermeabilizantes ideales, buena resistencia al desgaste y es inocuo con el medio ambiente.

Es muy importante que la ejecución de esta unidad se realice de forma muy cuidadosa, fundamentalmente en las uniones entre los diferentes paños y en la unión de éstos con las obras de fábrica, pues una pequeña fuga puede causar la ruina de la obra. Hay que perfilar muy bien los taludes y se suele poner una capa de geotextil de poliéster para evitar roturas en la lámina.



Figura 6.10. Revestimiento con material plástico del fondo de la laguna.

- **Revestimiento de taludes:** En términos generales, el revestimiento de un talud suave es innecesario. Para este propósito se recomienda pendientes de 1 en la vertical y 3 o 4 en la horizontal. En este caso las olas que resultan de la fricción del viento reventarán en el talud aligerándose, pero ello no significa que no dañe el talud. En caso de pendientes más pronunciadas el revestimiento puede hacerse obligatorio.

Aparentemente, el revestimiento de piedra es lo más recomendable para el talud, colocándose una parte por encima y otra por debajo del nivel del agua las piedras de diferentes tamaños y formas se acomodan manualmente sin unir las con argamasa. El empedrado es un medio efectivo contra la erosión y la maleza.

Es probable que el empedrado acumule grasa y otros materiales flotantes.



Figura 6.11. Revestimiento con material plástico de los taludes de la laguna.

6.5. LECHOS DE TURBA

El sistema de lechos de turba consistirá en un lecho inundado de un total de 90 cm de espesor formado por diversas capas que se encargarán de depurar las aguas. Se empleará un soporte drenante formado por arena fina, gravilla y grava que se encontrará separado por una malla de geotextil sobre la cual se instalará la turba clara, y posteriormente un sistema de drenado en la parte inferior para transportar el agua al proceso posterior de lagunaje de maduración.

La turba procederá de la Sierra de la Culata, que se encuentra a menos de 40 km de donde se va construir la estación de depuración de aguas residuales.

Al igual que en el resto de tratamientos, para poder implantar este sistema con un reparto por gravedad es imprescindible considerar la geografía del terreno desde un principio. Asimismo se debe considerar que la superficie del lecho de la turba clara a emplear será de 65 l/h/m² para un buen funcionamiento del proceso.

Será necesario disponer de un 50% o 1/3 más de superficie del lecho con el fin de poder realizar las tareas de limpieza y mantenimiento de los lechos, es decir, la práctica de las labores de rastrillado cada 15 días y el reposo de los lechos posteriormente, todo ello sin interrumpir el proceso continuo de depuración. Puesto que previamente a este proceso se encuentra un tratamiento de lagunaje anaerobio, se ha considerado suficiente un 30% de superficie extra para el mantenimiento de los filtros de turba. Considerando este aspecto constructivo la superficie total deberá ser de 3.575 m². Sin embargo, la construcción de los filtros de turba presenta una limitación de 200 m² de superficie por unidad para poder ejecutar estas tareas de limpieza, dejando fuera de servicio cada uno de los lechos como consecuencia de estas tareas periódicas o ante posibles inconvenientes en la planta.

Este factor a considerar implica la construcción de 19 filtros para cumplir con las características mencionadas, cuyas dimensiones individuales serán de 10 metros de ancho por 20 de largo. Los lechos se colocarán de forma que quede espacio suficiente entre ellos para el paso de camiones, necesarios para la renovación de la turba

- Alimentación:

La alimentación del lecho de turba se realizará mediante una tubería que reparta el agua residual, la distribución debe ser homogénea y continua durante todo el año, evitando la formación de caminos preferentes del agua. El espesor del lecho de turba no debe exceder de 50 cm para que la infiltración de las aguas transcurra funcionalmente.

Para que el caudal de percolación sea el adecuado se ha optado por la implantación de un lecho de turba con de 40 cm de espesor.

- Impermeabilización:

La excavación deberá estar impermeabilizada con el objetivo de impedir la lixiviación de contaminantes al terreno. Hay diferentes formas de impermeabilizar, instalando una capa de arcilla, una lámina de plástico o como en este caso, tras colocar una lámina de polietileno de alta densidad, el propio cuenco de hormigón del lecho actúa como aislante.

- Sección del lecho de turba:

Se establecerá una sección de lecho de turba clara de 40 cm de espesor seguida de una lámina de geotextil cuya función será separar la turba del soporte de drenaje evitando su arrastre a las capas inferiores. Posteriormente se situarán 3 capas de drenaje: 10 cm de arena fina, 10 cm de gravilla y 30 cm de grava.

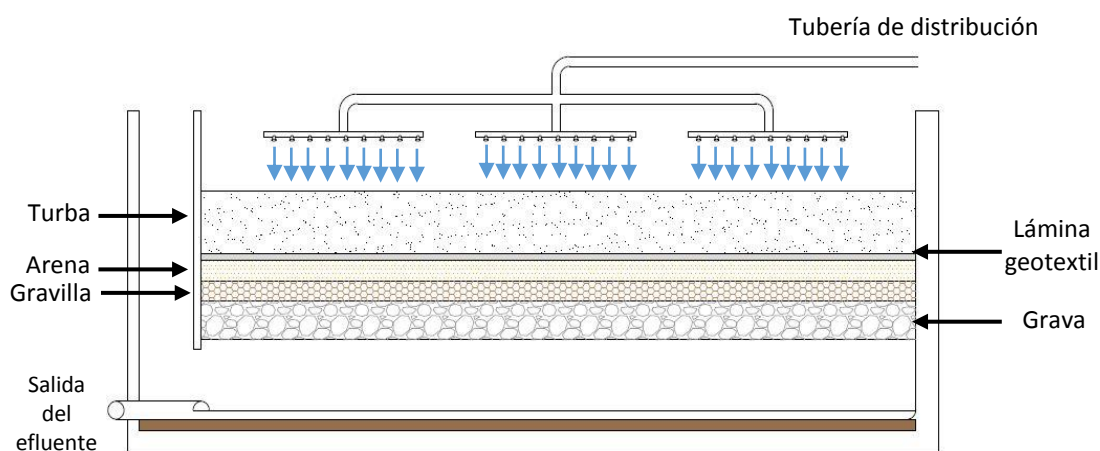


Figura 6.12. Esquema del lecho de turba.

6.6. LAGUNAS DE MADURACIÓN

El procedimiento para la construcción de dichas lagunas es similar al de las lagunas anaerobias, la única diferencia es que en este caso las lagunas tienen menor profundidad y, por lo tanto, el movimiento de tierra será inferior y menos costoso. Además, en este caso las placas deflectoras que se colocan en los aliviaderos sirven para evitar la salida de algas que proliferan en la capa superficial.

6.7. ERAS DE SECADO

Para la construcción de las eras de secado, primero se realizarán las labores de limpieza y desbroce del terreno donde se van a disponer las diferentes eras.

Después, se procede a la excavación y el terraplenado para construir la estructura de hormigón armado que almacenara los lodos para que se produzca la deshidratación de los mismos. La estructura se realizará con hormigón armado de 15 cm de espesor, lo que sirve como método de impermeabilización.

La era de secado se rellenará con arena como capa filtrante, para que el lixiviado sea lo más limpio posible. Se colocará un dren en el fondo de la era para recoger el líquido drenado para su reincorporación a la cabecera de la planta.

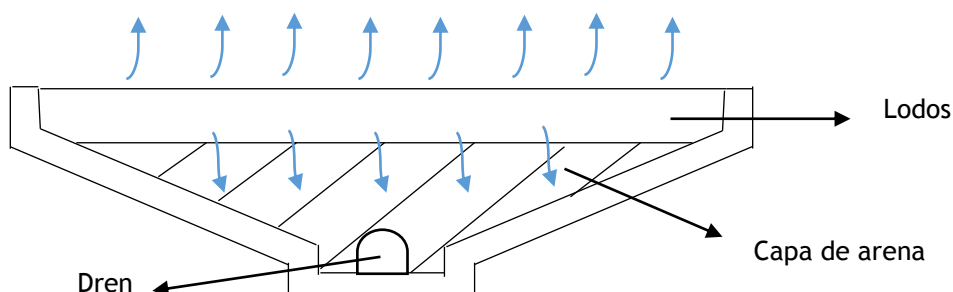


Figura 6.13. Esquema de una era de secado.

6.8. VARIOS

Se engloba todas las unidades complementarias de urbanización de la instalación, como caseta de servicio, cerramiento, caminos de coronación, alumbrado y jardinería.

Además, hay que tener en cuenta la construcción de una zanja para la recogida de aguas pluviales, así como disponer de acceso para la toma de muestra en los diferentes procesos.

En el anexo VI se muestra el cronograma de los trabajos de construcción a realizar en la presente estación depuradora de aguas residuales urbana.

7. PUESTA EN MARCHA

El funcionamiento inicial de la planta es un proceso muy importante, siendo el punto de partida que permitirá el buen desarrollo de la instalación. Para que la puesta en marcha se realice de forma adecuada se deberá tener en cuenta los condicionantes que se mencionan a continuación.

La puesta en marcha de la estación depuradora de aguas residuales es una operación compleja que requiere una planificación, coordinación y preparación adecuada para maximizar su eficiencia y minimizar los problemas que puedan presentarse.

Una consideración importante es la selección del personal que operará la planta. Lo ideal es la selección del supervisor antes de la puesta en marcha, de modo que observe las instalaciones y se familiarice con los equipos y su disposición en planta.

Previo a la puesta en marcha deben estar disponibles e inventariados los siguientes ítems:

- ✓ Manual de operación y mantenimiento de cada equipo.
- ✓ Planos de la planta.
- ✓ Especificaciones de construcción.
- ✓ Todos los instrumentos y equipos necesarios para la operación y mantenimiento de la planta.
- ✓ Equipo de seguridad.
- ✓ Químicos necesarios para el control de procesos.
- ✓ Equipos de repuesto recomendados por los distribuidores.

Adicionalmente debe hacerse una prueba con agua para verificar que no hayan fugas en tuberías o válvulas, al igual que la distribución hidráulica e instrumentación en los equipos.

7.1. PRETRATAMIENTO

Las rejillas deben revisarse con mayor frecuencia debido a la acumulación de escombros en el colector durante la construcción, por lo que posiblemente también será necesario personal adicional para la adecuada limpieza de las mismas.

Durante la puesta en marcha el desarenador debe inspeccionarse periódicamente para asegurar que la remoción de arenas ocurre adecuadamente. La remoción de arenas acumuladas en el fondo ocurrirá con mayor frecuencia debido a la posible acumulación de arena en el colector.

7.2. LAGUNAS

Al igual que cualquier proceso biológico, ninguna laguna funciona desde su comienzo con la eficiencia de diseño. El inicio del funcionamiento del lagunaje es un punto complejo del proceso de depuración, depende de la temperatura, las características del agua residual y del buen desarrollo de la población biológica, pues los microorganismos encargados de depurar la materia orgánica no aparecen de manera inmediata, precisan según las condiciones ambientales de un periodo de tiempo más o menos largo.

Ante esta situación, es recomendable que la puesta en marcha de la planta se ejecute cuando los microorganismos presentan mayor velocidad de crecimiento, siendo esta época en primavera o al inicio del verano. Esta operación puede llevar de semanas a meses, dependiendo de las condiciones del medio y de las habilidades del operador de la planta.

7.2.1. Anaerobias

El comienzo del funcionamiento debe ser continuo, por lo que la balsa debe llenarse desde un principio para poder empezar a funcionar. Es recomendable que se llene hasta la altura de diseño y que se opere durante unos días, de 5 a 10 aproximadamente, antes de iniciar la alimentación de forma gradual. Para el control del proceso debe analizarse la evolución del pH, manteniéndose siempre por encima de 7 en la puesta en marcha para comprobar que es correcto el funcionamiento. Para ajustar su valor puede añadirse lechada de cal.

A su vez, es imprescindible disponer de bacterias metanogénicas procedentes de la digestión anaerobia de otra planta de depuración de aguas residuales cercanas para poder iniciar el proceso biológico y que este transcurra en el menor periodo de tiempo posible. Para acelerar el proceso, será preciso disponer de los fangos de la EDAR y traspasarlos a la nueva balsa.

Durante los primeros días de operación es posible la formación de grandes cantidades de espuma como consecuencia del contenido en detergentes del agua residual urbana y la escasez de población bacteriana, por lo que puede ser necesario la aplicación de antiespumantes comerciales en dosis de 10 a 20 mg/l.

7.2.1. Maduración

Estas lagunas deben funcionar en continuo una vez que se encuentra en operación el tratamiento anterior, en este caso los lechos de turba. Por ello la balsa debe llenarse previo al funcionamiento de la misma.

7.3. LECHO DE TURBA

Se debe poner en marcha el sistema durante la primavera o inicio de verano ya que la velocidad de crecimiento de los microorganismos es mayor en esta época. Una vez puestos en marcha los lechos funcionan de forma inmediata debido al proceso físico de filtración, sin embargo, lograrán un rendimiento óptimo una vez haya ocurrido la proliferación de microorganismos.

7.4. ERAS DE SECADO

Se debe verificar que el sistema de drenaje se encuentre libre de escombros.

8. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Es importante mantener las instalaciones de toda la planta en adecuadas condiciones. El cercado debe estar en buen estado para evitar la entrada de animales y personas ajenas a la planta, así como las interconexiones entre todas las estructuras de entrada y salida de la planta también deben ser limpiadas con regularidad.

8.1. PRETRATAMIENTO

8.1.1. Desbaste

La limpieza de las rejillas se realizará de manera manual por lo que se recomienda una limpieza cada 4 horas mediante un rastrillo, depositando los residuos acumulados y escurridos en un vertedero metálico con tapa próximo a las instalaciones de pretratamiento, que posteriormente será enviado a su disposición final en rellenos sanitarios. Para realizar esta tarea el rastrillo debe deslizarse cuidadosamente hacia la plataforma de drenaje sin que los residuos pasen a través de las rejillas. Estas deben protegerse de la corrosión pintándolas cada 6 meses con pintura epóxica.

8.1.2. Desarenado

La remoción de las arenas depositadas en el fondo de los canales debe realizarse al menos una vez por semana. La limpieza debe efectuarse más frecuentemente en las épocas de lluvia donde hay más acumulación de sedimentos, así como en los casos donde el caudal aumente inesperadamente. Para un correcto mantenimiento es recomendable que se revise el nivel de arena sedimentada semanalmente para proceder a las tareas de limpieza cuando la acumulación de sedimentos llegue a 5 o 6 cm.

Las labores de mantenimiento consisten en agitar la arena del fondo mediante una pala para desprender la porción de materia orgánica depositada, mientras el agua aún está circulando, y posteriormente drenar el canal y extraer los sedimentos con la pala. Una vez al año es conveniente pintar utilizando pintura epóxica el canal para evitar la corrosión.

8.2. LAGUNAS

Para el correcto funcionamiento del proceso de depuración en las lagunas, entre las diferentes tareas de mantenimiento a desarrollar se encuentran:

- Remoción de la materia flotante: para evitar el crecimiento excesivo de algas, del manto de lodos, la formación de capas de espuma en la superficie, acumulación de grasas, aceites, madera, papel, hojas y otro tipo de materiales flotantes.

- Control de la vegetación acuática: es imprescindible la ausencia de vegetación en las lagunas, así como los bordes, caminos de acceso y zonas adyacentes a la planta deben encontrarse libres de maleza ya que esta favorece la proliferación de los mosquitos y otro tipo de insectos. Es aconsejable disponer de una rampa en alguna de esquinas de la laguna para poder retirar los botes de remo con los cuales se acceda a la balsa para poder despejarla de especies vegetales que en ella se puedan desarrollar, o bien empleado cribas y rastrillos. La remoción de las plantas se realiza dependiendo del sitio de crecimiento de las especies, pudiendo arrancarlas a mano, aumentar el nivel de agua hasta inundarla o, al contrario, disminuir el nivel hasta que queda expuesta y pueda ser destruida con quemadores especiales de gas.

- Mantenimiento de los taludes: impermeabilizar con láminas de PVC e inspeccionar la cubierta para detectar posibles deterioros o desgarros, evitando el desarrollo de especies vegetales que puedan atraer mosquitos y otros insectos. Por otra parte, los animales pueden causar daños, así como los provocados por escorrentías fuertes de las lluvias. El mantenimiento requerido consiste en rellenar las grietas del terreno para igualarlo y compactarlo, eliminar las malas hierbas que puedan crecer, mantener una distancia mínima de 30 cm entre el nivel máximo del agua y la zona ajardinada.

- Control del nivel del agua de la laguna: se recomienda que la laguna no opere nunca a su nivel máximo, para evitar que cualquier variación del caudal pueda ocasionar desbordamiento en la planta.

- Control biológico: no es recomendable el uso de insecticida u otros productos químicos para paliar el desarrollo de organismos predadores ya que se pueden contaminar las aguas y/o la tierra sobre la cual se aplica el producto.

- Limpieza de estructuras instaladas: los vertederos, canales, compuertas y estructuras especiales como son los deflectores de espumas y mallas deben ser limpiados con cepillos de mango largo, además se recomienda efectuar un mantenimiento preventivo de las válvulas cada 6 meses para cambiar los estoperos y verificar que no presenten fugas.

La inspección visual a lo largo de la planta es fundamental ya que permite que el operador pueda detectar problemáticas emergentes tales como la aparición de espumas y flotantes, la acumulación de grasas que impiden la aireación y bloquean la entrada de luz en la laguna de maduración. Se pueden observar desprendimientos de fangos desde el fondo a la superficie, la coloración verde brillante o la aparición de manchas de distintos colores que indican el desarrollo de microorganismos no deseados. El crecimiento de plantas en los taludes o dentro de las lagunas, así como revisar la profundidad de la columna de agua y el caudal de llegada a la planta.

8.2.1. Anaerobias

La coloración de las lagunas anaerobias debe ser gris y presentar cierto burbujeo en la superficie producido por el biogás formado en el fondo de la laguna. La superficie de la balsa debe mantener la cubierta con una costra superficial solida compuesta por grasas, aceites y materias flotantes.

Para proceder a la retirada de los lodos acumulados en el fondo de las lagunas es preciso conocer la profundidad a la cual se encuentran los mismos. Mediante el empleo de una barca posicionada cerca de la estructura de entrada de la laguna se mide la profundidad de la balsa, y tras alcanzar $\frac{1}{4}$ de su altura se procede al drenado del fango.

Para el proceso de extracción de fangos en una laguna en paralelo se desviaré el agua de la laguna a lagunas adyacentes, mientras que en las lagunas de maduración al encontrarse en serie, el flujo de agua se derivará a la siguiente. Asimismo, se debe procurar que la laguna se vacíe completamente. Cuando las lagunas comienzan a llenarse a la mitad de su capacidad, deben ser desalzolvasadas, aunque esto no suele ocurrir en lagunas con un previo desarenador.

El fango se puede acumular en el fondo de la laguna durante 3 años en el caso del presente trabajo, por lo que la limpieza debe ajustarse a este periodo de tiempo. La retirada de los fangos se realiza en húmedo, por lo que es imprescindible contar con las eras de secado para tras la extracción de los fangos estos puedan eliminar su concentración de agua en estas instalaciones.

Como indicadores de mal funcionamiento en las lagunas se pueden tener:

- Presencia de malos olores:

Las causas por las cuales tiene lugar esta problemática se deben a varias razones, entre ellas un desajuste en la carga orgánica de aporte a la balsa así como del caudal de entrada, un descenso brusco de la temperatura del ambiente o una variación repentina de la composición del agua residual de entrada.

Si se diesen los problemas mencionados las soluciones o medidas planteadas son las siguientes:

- Sobrecarga de caudal: disminuir el caudal de entrada o disminuir la carga aplicada mediante un by-pass, aumentar el volumen operativo de la laguna, introducir una siembra de bacterias metanogénicas o ajustar el pH del medio hasta alcanzar valores neutros

- Defecto de carga orgánica o caudal: debe disminuirse el volumen operativo de la laguna, el número de las lagunas que se encuentren en funcionamiento o permitir la salida del efluente a diferentes alturas, opción por la que se ha optado en este trabajo.

· Caída brusca de la temperatura: proteger la superficie de la balsa con una capa de paja o polietileno para aislar la superficie evitando que las temperaturas descendan.

· Variación de la composición del agua residual de entrada: realizar análisis periódicos de pH y presencia de sustancias tóxicas para poder controlar estos desajustes. Si existiese presencia de sustancias tóxicas o valores anormales de pH es necesario by-pasear el agua hasta poder detectar el origen del vertido causante del problema en la planta.

- Presencia de coloración rosácea:

La aparición de colores rosáceos en las aguas se debe a la presencia de bacterias fotosintéticas del azufre, indicando la falta de carga en la balsa.

Para mitigar dicha problemática se emplean las mismas medidas desarrolladas en el apartado anterior para evitar malos olores para paliar la falta de carga orgánica, es decir, disminuir la profundidad de trabajo o el número de lagunas anaerobias.

- Presencia de mosquitos, insectos y otros animales:

El desarrollo de especies de mosquitos e insectos se debe principalmente al crecimiento de vegetación en los bordes de las balsas o de plantas acuáticas en las mismas. La vegetación se adhiere al fondo o a los taludes internos inundados causando problemas en las zonas muertas, deteniendo la espuma y formando un lugar apropiado para la proliferación de mosquitos. A su vez, estas zonas pueden servir de alimento de animales donde hacer sus madrigueras perforando los bordes.

Para poder remediar este problema, debe realizarse un mantenimiento de los taludes de las lagunas que conservándose libres de plantas en contacto con el agua.

8.2.2. Maduración

Los indicadores de un buen funcionamiento de las balsas de maduración son una coloración verde intensa del agua y la ausencia de sólidos sedimentables, sin presencia de materia sólida en la superficie de la balsa, así como de vegetación acuática y plantas en los taludes.

Como indicadores de mal funcionamiento en las lagunas de maduración, además de los ya mencionados en las lagunas anaerobias, se establece:

- Acumulación de materiales sólidos en superficie o flotantes: debe eliminarse la acumulación de algas o flotación de fangos que impidan el paso de la luz solar, produciendo una reducción de la fotosíntesis y de la producción de oxígeno que disminuya la eficiencia de la laguna. Esta labor de mantenimiento se realizará con ayuda

de un cedazo o un chorro de manguera. También se puede aislar la laguna afectada mediante by-pass.

8.3. LECHOS DE TURBA

El agua residual se filtra a través del lecho de turba, recogándose el efluente en la base del sistema y quedando la materia en suspensión retenida en la superficie de la turba, por lo que el mantenimiento fundamental de la turba consiste en la remoción de esta capa de sólidos.

Para ello es necesario dejar fuera de funcionamiento el lecho en el que vaya a entrar en labores de mantenimiento, desviando el caudal de tratamiento hacia las otras unidades en paralelo. Una vez seca la superficie del mismo se procede, mediante rastrillado, a la eliminación de la costra superficial. Por otro lado, los sucesivos rastrillados conducen a una disminución en la altura de los lechos, por lo que será necesaria su reposición con frecuencia.

En la planta diseñada, al contar con un sistema de pretratamiento que retira sólidos grandes, al igual que lagunas anaerobias previas en la que la mayor parte de los sólidos en suspensión serán retirados, se espera que la frecuencia de colmatación de los filtros sea muy baja, con una expectativa de reposición de la turba de por lo menos 4 años.

Adicionalmente debe realizarse a diario una inspección visual de los lechos en busca de cambios en el aspecto general del agua como turbidez o coloración. No debe haber presencia de espumas, que indicarían elevadas concentraciones de detergentes, ni producción de olores desagradables en ninguna de las etapas del lecho

El mantenimiento deficiente de los lechos influiría en la disminución de su permeabilidad, promoviendo la formación de caminos preferenciales o sobrecarga en la instalación disminuyendo la eficacia del tratamiento.

8.4. ERAS DE SECADO

En este sistema no es necesario adicionar reactivos ni elementos mecánicos ya que se encuentra previsto un secado lento. La operación de deshidratación comienza con la descarga del fango proveniente de las lagunas anaerobias, el cual es transportado por medio de camiones a las eras. En las eras es distribuido sobre la superficie del lecho permeable (arena). No se debe esparcir lodo en el lecho cuando éste ya contenga una carga anterior en fase de secado.

El operador deberá controlar que a través de la tubería de desagüe fluya el efluente percolado del dren, debido a que la mayor parte del agua libre puede removerse en menos de un día. Pasado este primer periodo de drenaje, el secado seguirá por evaporación. Se observará una disminución progresiva tanto es dirección horizontal como

vertical, comenzando la formación de grietas, que junto con remoción manual con rastrillo, aceleraran el proceso de evaporación ya que se aumenta la superficie expuesta al aire.

El tiempo de secado completo del fango variará en función de las condiciones climáticas y meteorológicas, por lo cual se aconseja programar la extracción en época de altas temperaturas.

Debe realizarse un control de humedad y de calidad bacteriológica semanal, con el que una vez alcanzados los valores de humedad establecidos, se procederá a retirar el lodo y trasladarlo hasta su disposición final (uso agropecuario).

En cuanto al mantenimiento de las eras de secado, éste consistirá en reemplazar la arena perdida durante la remoción del fango seco, y en caso de que la misma muestre tendencia a colmatarse, toda la capa debe ser reemplazada por una arena de una granulometría mayor.

9. REUTILIZACIÓN DE PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS

Como se mencionó en el estudio del medio físico, el desarrollo agrícola en las zonas colindantes a la población de Tucaní se caracteriza por la producción de café, cacao, yuca, plátano, maíz, caraota, apio y ajo.

Para el presente proyecto, se realizará el estudio de la cantidad de hectáreas de un sembradío hipotético de plátano que se verían beneficiadas por el agua regenerada de la estación depuradora que se busca implementar en la población.

El plátano requiere un suministro de agua abundante y frecuente; el déficit de agua influye de forma negativa sobre el crecimiento y el rendimiento del cultivo. El periodo de establecimiento y la primera fase del periodo vegetativo determinan el potencial de crecimiento y de fructificación; siendo esencial durante este periodo un suministro adecuado de agua y suficientes nutrientes.



Figura 9.1 Plantación de plátanos

Las necesidades de agua anualmente en estas plantas varían desde 1.200 mm en las zonas tropicales húmedas hasta 2.200 mm en las tropicales secas. Debido a que las musáceas tienen un área foliar extensa, consumen cantidades grandes de agua. Para una planta con un área foliar permanente de 4 m², se estima un consumo diario de 26 litros de agua en días soleados, 7 litros en días seminublados y entre 2,5 - 10 litros en días completamente nublados.

Un cultivo de plátano con 1.500 plantas/Ha y un índice de área foliar igual a 2,1 consume en un mes 1.170 m³/Ha de agua en ambientes soleados y 765 m³/Ha en condiciones de nubosidad intensa permanente [20].

Con un caudal a la salida de la estación depuradora igual a 172 m³/h, considerando el escenario más desfavorable (ambiente soleado) con la aportación de la estación sería posible regar un total de **106 hectáreas** al día.

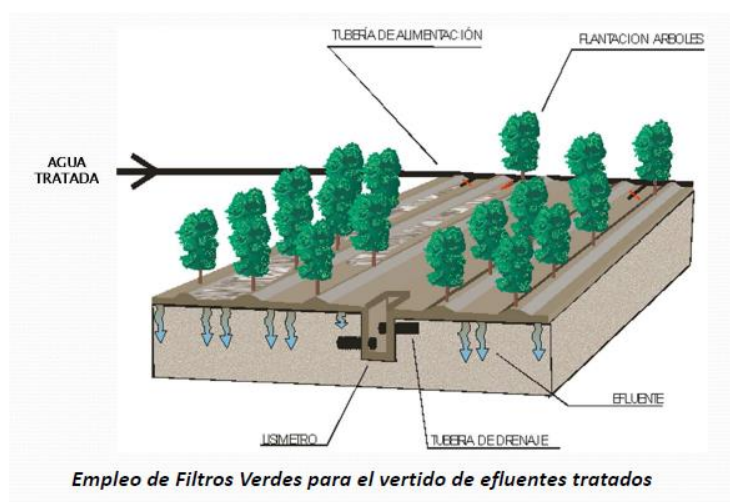


Figura 9.2 Disposición de la plantación platanera.

Por otro lado, los fangos pueden ser reutilizados en el mismo tipo de plantación ya que al no ser aplicación directa a pastizales para ganado, ni tratarse de cultivos hortícolas o frutícolas no existe restricción. Es importante comentar que los fangos deben ser analizados en su contenido de metales pesados y parámetros básicos especificados en la sección 2.2 antes de su implementación. Sin embargo, aunque las aguas residuales urbanas no presentan en general metales pesados, es conveniente realizar análisis de estos contaminantes puesto que puede producirse algún vertido incontrolado.

Este tipo de fangos son ideales para ser utilizados como abono debido a su alto contenido de compuestos orgánicos y nutrientes, representando un ahorro significativo para los agricultores de la zona.

Se prevé que la turba de los lechos sea sustituida aproximadamente cada 4 años. Esta turba, al ser de carácter orgánico tendrá alto contenido de ácidos fulvicos y húmicos los cuales contribuyen a la estabilidad del suelo, incidiendo positivamente en la absorción de nutrientes. Es así como la turba podría ser revalorizada empleándola para esponjamiento del suelo agrícola, sin embargo, al igual que con los fangos, deben analizarse el contenido de metales pesados y parámetros básicos antes de su aplicación.

Finalmente, los residuos del pretratamiento, al estar compuestos principalmente por sólidos grandes y arenas, no podrán ser revalorizados en agricultura. Al no entrar en la categoría de residuo peligroso (sección 2.3) la disposición que debe hacerse de los mismos será su traslado al relleno sanitario más cercano, según lo estable la ley de gestión integral de la basura.

Por ello su revalorización no será considerada en este trabajo, únicamente se procederá a la reutilización de los fangos como compost para los plataneros cultivados en la zona.

10. IMPACTO AMBIENTAL

Según establece la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela en su artículo 3, es obligatoria la realización de estudios de impacto ambiental y sociocultural para todas las actividades susceptibles de generar daños a los ecosistemas, a los fines de verificar el cumplimiento de las disposiciones ambientales contenidas en la normativa legal vigente y determinar los parámetros ambientales que deben establecerse para cada proyecto o programa; todo esto para asegurar la sustentabilidad ambiental e impacto socio cultural, proponiendo las correspondientes medidas preventivas, mitigantes y correctivas.

De acuerdo con el Decreto de Normas sobre Evaluación Ambiental de actividades susceptibles de degradar el ambiente [21], se establece que la realización de un proyecto debe ser notificada al Ministerio con un documento de intención (artículo 4), además ciertos proyectos precisan de Evaluación de Impacto Ambiental, entre ellos proyectos de plantas de tratamiento de aguas servidas municipales para centros poblados con más de 10.000 habitantes (artículo 6 punto 10). Puesto que la EDAR objeto de trabajo se diseña para una población actual de 20.000 habitantes, esta debe contar con una EIA.

A continuación, se presenta un estudio de los posibles impactos ambientales que puede producir la implementación de la estación depuradora de aguas residuales en su entorno, distribuidos en las diferentes fases de planificación, construcción y explotación de la planta. Se realiza con el fin de identificar dichos impactos para prevenirlos o compensarlos de la manera más adecuada.

10.1. IMPACTO SOCIAL

Para adquirir los terrenos donde se realizará la construcción de la planta, los mismos deberán ser cedidos por el ayuntamiento. Esto implicaría la expropiación de 5,85 hectáreas de terreno apto para actividad agrícola, por los cuales los agricultores deben ser adecuadamente compensados ante la necesidad de ocupación de dicho terreno.

10.2. IMPACTO HIDROLÓGICO

El impacto principal de la planta estará representado por el vertido del efluente. La estación estará diseñada para entregar agua con características aptas para su reutilización en agricultura, eliminando virtualmente el vertido. El exceso de agua por otro lado será descargado al río Tucaní, sin embargo, considerando el caudal del río el vertido contará con las condiciones óptimas para que el impacto sea imperceptible.

Otro aspecto a considerar son las infiltraciones que pudiesen generar las lagunas anaerobias y de maduración. Para evitar este impacto las cinco lagunas serán impermeabilizadas con una lámina de polietileno de alta densidad, un material plástico, biodegradable, con mejores propiedades impermeables que la arcilla y además menos agresivo que otros materiales para el medio ambiente. A esta actuación se suma la impermeabilización de los lechos de turba con poliéster el mismo fin de protección.

10.3. IMPACTO ATMOSFÉRICO

Al estar implementando procesos biológicos para la eliminación de los contaminantes presentes en las aguas residuales, los mismos se caracterizan por la transformación de dicha materia en sustancias más estables, entre las cuales podemos encontrar distintos gases. Algunos de estos gases (como el ácido sulfhídrico en procesos anaerobios), se caracterizan por tener olores muy fuertes y desagradables para el hombre, lo cual podría impactar negativamente en actividades humanas que se realicen en las inmediaciones de la planta.

La mayor parte de los olores serían generados en la zona del pretratamiento, por lo cual todos estos residuos serán depositados en contenedores cerrados. Por otro lado, si la planta es manejada correctamente por el operario la generación de olores será muy baja, pero de igual forma se tomó como previsión la construcción de la EDAR en una zona despoblada alejada de la población de Tucaní y de otras comunidades cercanas. El emplazamiento de la planta se realizará atendiendo a esta necesidad, por lo que se tendrá en cuenta la dirección del viento para evitar dicha afección.

Adicionalmente se identifica contaminación atmosférica generada por el transporte de camiones necesarios para la construcción de la obra, así como para la realización de trabajos de mantenimiento y limpieza que implica la depuradora.

10.4. IMPACTO SOBRE LA BIODIVERSIDAD

Con respecto a la flora, al contar previamente con terrenos utilizados para la agricultura, no habrá impacto sobre la biodiversidad de la misma. Tras el despeje de la zona de trabajo, la pérdida de la capa vegetal que sufrirá con la instalación de la conducción de entrada y salida de la EDAR será recuperada con la replantación de las especies de la zona que hubiesen sido afectadas.

La Fauna tampoco sufrirá grandes alteraciones, sólo podría verse ligeramente afectada por el paso de materiales constructivos y camiones durante el periodo de obras. Tras estas dichas operaciones el entorno recuperará sus características previas sin verse alterado ningún corredor biológico.

10.5. IMPACTO SOBRE EL SUELO

Ninguno de los residuos generados en la planta entrará en contacto directo con el suelo, para evitar así el traspaso de contaminantes no deseados al mismo. Sólo en el caso de la reutilización de los fangos habrá disposición directa, pero la misma será de manera controlada y generando un impacto ambientalmente positivo ya que estos fangos poseen un alto contenido de nutrientes que mejorará las condiciones del terreno.

Por otro lado, las conducciones que comunican la población de Tucaní con la EDAR, y posteriormente la EDAR con el río Tucaní, serán realizadas bajo tierra, generando un impacto sobre el suelo por la remoción de tierra que la construcción acarrea. Este impacto será asumido bajo la premisa de evitar un impacto mayor sobre la flora y fauna que ocurriría al construir dichas conducciones de manera superficial.

Los materiales que se emplearán para las conducciones no repercutirán en la contaminación del terreno, así como en los materiales empleados en las distintas instalaciones de la planta, tales como la lámina geotextil utilizada en los lechos de turba, 100% poliéster inocuo para el medio ambiente y 100% reciclable.

10.6. IMPACTO PAISAJISTICO

La degradación visual del paisaje no tendrá repercusión en esta instalación, únicamente bajo las tareas de construcción y obra de la misma durante 5 meses y medio. No existirá apenas deterioro de la calidad del paisaje puesto que los cambios realizados no ocasionan modificaciones excesivas en las condiciones naturales del lugar. No obstante, se generará un impacto visual al cambiar un área de cultivo por la estación. En líneas generales la estación no contará con grandes edificaciones de hormigón, y al estar constituida principalmente por grandes lagunas el impacto no será significativo. Para paliar el posible impacto visual de igual forma se sembrará vegetación en el perímetro de la planta.

10.7. INFRAESTRUCTURAS

No será alterada ninguna infraestructura de la zona ya existente, tales como carreteras o caminos, sin embargo, debe construirse un acceso secundario para que el operario de la planta pueda acceder a la misma, así como durante las obras de construcción toda la maquinaria pertinente.

El impacto más importante a considerar será la contaminación acústica generada como consecuencia del empleo de maquinaria en tareas de excavación y alisado del terreno, así como el aumento de la contaminación atmosférica debido al tránsito de maquinaria durante la fase de construcción.

10.8. APROBACIÓN DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Para la que el proyecto pueda ejecutarse es preciso contar con una evaluación de impacto ambiental positiva que permita el desarrollo del proyecto. Tras considerar una valoración de los impactos teniendo en cuenta el cálculo de la importancia, con la ponderación de cada impacto individualmente, y el cálculo de la magnitud de cada uno de los mismos, se obtiene una calificación de impactos que resultan principalmente favorables para la ejecución de la obra.

Los impactos negativos ligados a este proyecto se clasifican en compatibles y, por tanto, de recuperación inmediata en el tiempo sin necesidad de llevar a cabo medidas correctoras, o bien moderados, con necesidad de cierto tiempo de recuperación que requiere medidas correctoras no intensivas.

Atendiendo a la calificación obtenida, la evaluación de impacto ambiental ha sido aprobada y el proyecto puede proceder a su ejecución, puesto que no se determina ningún impacto de carácter crítico. El proyecto presenta viabilidad en su totalidad implantando las medidas correctoras necesarias.

Alguna de las actuaciones que se llevarán a cabo para corregir impactos moderados tales como la erosión del terreno producida por el despeje vegetal de la zona de trabajo, la retirada de suelo o las excavaciones, serán medidas de reforestación con especies autóctonas del entorno. Esta actuación ayudará a prevenir movimientos de tierra, a mejorar la infiltración, la fertilidad y calidad de los suelos. El programa de vigilancia ambiental garantizará el cumplimiento de las indicaciones y medidas establecidas del Estudio de Impacto Ambiental, para que la actividad se realice según el proyecto y las condiciones que se han autorizado en relación al medio ambiente y a la eficacia de las medidas de protección ambiental.

11. ANÁLISIS ECONÓMICO

Una propuesta para diseño, construcción y operación de un sistema de tratamiento de agua debe incluir una estimación de costo. El propósito de dicho estudio es:

- Ayudar a los administradores, ingenieros y responsables involucrados en la planificación del sistema de tratamiento de agua para determinar, en forma preliminar, la magnitud de la inversión de los costos de capital, de operación y de mantenimiento
- Proporcionar un elemento financiero para la toma de decisiones respecto al tipo de procesos que pueda integrar un sistema de tratamiento. Los costos asociados con las instalaciones del tratamiento de agua residual se dividen en dos:
 - ✓ Costos de capital (inversión)
 - ✓ Costos para operación y mantenimiento (O y M).

En este apartado se resumen, por tanto, todos los costos derivados de la construcción, operación y mantenimiento de sistema de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Tucaní.

11.1. COSTES DE INVERSIÓN

En general, para el cálculo de la inversión intervienen numerosos factores como son:

- Capacidad de la planta (población estimada).
- Tipo de sistema de tratamiento.
- Costos locales de materiales y mano de obra.
- Criterios de diseño.
- Costo del terreno y ubicación geográfica.
- Accesibilidad.
- Costo de construcción y de acarreo de materiales.
- Condiciones climáticas
- Niveles de competencia entre los contratistas de la obra.
- Tiempo de entrega.

A continuación, se va a proceder al desglose de los costes de la construcción de los diferentes procesos.

Coste del terreno:

El coste del terreno se ha calculado en función del tipo de suelo, que en este caso al tratarse de un terreno agrícola es un suelo rústico, cuyo valor, según el catastro, es de:

Precio Ha de terreno.....6.000,00 €

Total.....36.000,00 €

Obra de llegada:

En el presupuesto, se incluye la colocación de la conducción desde la ciudad de Tucaní hasta la entrada de la planta de tratamiento de aguas residuales. También se incluye, los costes de construir el aliviadero.

Coste colector.....411.623,04 €

Aliviadero924,44 €

Total.....412.547,48€

Desbaste:

Se incluye la construcción de ambos canales, la instalación de las rejas de gruesos, medios y finos así como la instalación de las compuertas para controlar el paso del agua. Además se incluyen los costes de preparación de terreno

Desbroce y limpieza.....10,66 €

Movimiento de tierras5,56 €

Canal de desbaste1.147,92 €

Reja manual gruesos.....244,3 €

Reja manual medios541,51 €

Reja manual finos697,94 €

Cesta recogida solidos981,08 €

Compuertas.....4.136,83 €

Total.....7.765,79 €

Desarenado:

Se incluyen los costes de preparación de terreno así como la construcción del canal desarenador.

Desbroce y limpieza.....14,65 €

Movimiento de tierras10,51 €

Canales de desarenado5.449,22 €

Total.....5.474,38 €

Laguna anaerobia:

Se tendrán en cuenta los costes de preparación del terreno, excavación y terraplenado, así como la instalación de la capa protectora de geotextil y la capa impermeabilizante.

Desbroce y limpieza.....	2.645,92 €
Movimiento de tierras y terraplenado	180.852,29 €
Geotextil	12.764,78 €
Impermeabilización	46.446,64 €
Conducciones.....	24.270,99 €
Total.....	266.980,63 €

Lechos de turba

Se tendrán en cuenta los costes de preparación del terreno, excavación y terraplenado, así como la construcción del lecho y los materiales necesarios para formar la capa filtrante y de soporte (turba, arena, gravilla y grava).

Desbroce y limpieza.....	2.812,00 €
Movimiento de tierras	11.001,00 €
Construcción lecho	105.800,27 €
Geotextil	13.566,00 €
Materiales.....	73.546,56 €
Conducciones.....	33.184,29 €
Total.....	239.910,11 €

Lagunas de maduración

Se tendrán en cuenta los costes de preparación del terreno, excavación y terraplenado, así como la instalación de la capa protectora de geotextil y la capa impermeabilizante.

Desbroce y limpieza.....	18.574,00 €
Movimiento de tierras y terraplenado	31.359,60€
Geotextil	89.607,00 €
Impermeabilización	326.049,00 €
Conducciones.....	26.304,47 €
Total.....	742.658,47 €

Eras de secado

Desbroce y limpieza.....	2.064,60 €
Movimiento de tierras	11.001,00 €
Construcción	114.287,33 €

Geotextil	9.960,30 €
Conducciones.....	15.777,00 €
Total.....	173.448,83 €

Costes de inversión:

Terreno.....	36.000,00 €
Obra de llegada.....	412.547,48 €
Desbaste	7.765,79 €
Desarenado	5.474,38 €
Laguna anaerobia.....	266.980,63 €
Lecho de turba.....	239.910,11 €
Laguna maduración	742.658,47 €
Eras de secado	173.448,83 €
Cerramiento	19.839,95 €
Gastos generales (6%).....	102.693,17 €
Beneficio industrial (10%)	171.155,285 €
Total.....	2.178.474,10€

11.2. COSTES DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

Los costos de operación y mantenimiento son los referidos al funcionamiento de una planta de tratamiento para hacer producir la capacidad instalada. Estos costos se estiman por vigencias anuales de acuerdo con las proyecciones de producción que se establezcan.

Para las plantas de tratamiento, estos costes comprenden por lo común los siguientes factores:

- Materiales y materias primas, se incluyen los gastos de restitución de la turba y de la arena de las eras de secado.
- Maquinaria: todos los gastos asociados al transporte de residuos como arenas y fangos tanto dentro de la planta como hacia los campos de agricultura y a vertedero. También se incluye la barca para el control de las lagunas y los gastos de combustible.
- Personal, aquí se incluyen los costos del personal de mantenimiento y operación, la formación y el equipamiento (ropa, elementos de seguridad

y salud,...). Se considerarán las vacaciones y las posibles bajas que se produzcan en el personal.

- Mantenimiento preventivo y correctivo, donde se tienen en cuenta las labores de mantenimiento de la planta y de los equipos (pintura, desbroce,...).
- Seguros
- Gastos varios que incluyen los gastos de reactivos como la cal para estabilizar el pH en las lagunas, la compra de bacterias por si hay que reponer la población de las lagunas, etc.

Para la mayor parte de los procesos de tratamiento los costos de operación y mantenimiento están influenciados en gran medida por el consumo de energía, de ahí que las lagunas con excepción de las aeradas resulten económicas.

Materiales.....	17.950,35 €/año
Maquinaria	15.620 €/año
Personal	13.620 €/año
Mantenimiento	503,88 €/año
Gastos varios	14.308,27 €/año
Total.....	62.002,51 €/año

Tras analizar el coste anual total del tratamiento de depuración de las aguas residuales, se obtiene un precio de 0,04 €/m³.

En el anexo VII se muestra en detalle el presupuesto y las mediciones para llevar a cabo la construcción y el mantenimiento de la estación depuradora de aguas residuales en la ciudad de Tucaní.

12. CONCLUSIÓN

Tras el estudio y análisis en profundidad de los diferentes tratamientos de depuración de aguas residuales que se podrían implementar en la ciudad de Tucaní, se concluye que el proceso más adecuado que asegure que la planta sea sostenible a lo largo del tiempo dada la población y las condiciones del medio existentes, es un tratamiento compuesto por un pretratamiento que consta de un desbaste y un desarenado, un lagunaje anaerobio seguido por un lecho de turba y, finalmente, un lagunaje de maduración que permitirá la reutilización en regadío de la plantación de plátanos que se situara cercana a la planta y el aprovechamiento de los fangos como abono en dicho terreno agrícola.

Para la construcción y el mantenimiento de la planta se han empleado las mejores técnicas disponibles, así como materiales inocuos para el medio ambiente que permiten el desarrollo completo del proceso logrando los parámetros exigidos por la legislación, incluso con margen ante posibles modificaciones futuras. Para asegurar la calidad del efluente a lo largo del tiempo es importante desarrollar adecuadamente las tareas de mantenimiento y control, por ello se contará con un operario que visitará la planta diariamente.

A la hora de cumplir con todos estos aspectos es imprescindible realizar un estudio de impacto ambiental previo que demuestre la viabilidad del proyecto en su entorno, teniendo en cuenta las posibles afecciones al medio y a la sociedad. Este estudio resultó positivo para la implementación de la planta en la ciudad de Tucaní.

Por último, se realizó un estudio económico en el cual se consideraron tanto los costes de inversión como los costes de operación y mantenimiento, demostrando que este proyecto requiere un gasto inferior a plantas depuradoras convencionales, obteniendo un valor de 0,04 €/m³. Este coste permite la viabilidad de la planta, puesto que el ahorro es significativo así como los beneficios asociados al mismo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Metcalf & Eddy, *Ingeniería de Aguas residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización*, Madrid: McGraw-Hill, 1995.
- [2] Gaceta Oficial 5021, *Decreto 883: Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos*, 1995.
- [3] BOE, *Real Decreto 509/1996*, 1996, pp. 12038 - 12041.
- [4] BOE, *Real Decreto 1620/2007*, 2007, pp. 50639 - 50661.
- [5] BOE, *Real Decreto 1310/1990*, 1990, pp. 32339 - 32340.
- [6] Gaceta Oficial, *Ley sobre Sustancias, Materiales y Desechos Peligrosos*, 2001.
- [7] Gaceta Oficial, *Decreto 2635: Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos*, 1998.
- [8] Climate Data, «Clima: Mérida,» [En línea]. Available: <http://es.climate-data.org/location/3337/>. [Último acceso: 20 06 2016].
- [9] UNAD, «Universidad Nacional Abierta y a Distancia,» 16 06 2016. [En línea]. Available:
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358039/ContenidoLinea/leccion_41_sistemas_de_lagunaje_parte_i.html.
- [10] Tecdepur, «Tecnologías Blandas: Lechos Percoladores,» [En línea]. Available: <http://www.tecdepur.com/blog/tecnologias-blandas-3-lechos-bacterianos-o-filtros-percoladores>. [Último acceso: 16 06 2016].
- [11] Roth, «Sistemas de depuración natural complementarios,» [En línea]. Available: <http://www.roth-spain.com/581.htm>. [Último acceso: 16 06 2016].
- [12] G. Rivas, *Tratamiento de Aguas Residuales*, Caracas: Ediciones Vega, 1922.
- [13] A. H. Muñoz, *Depuración y desinfección de aguas residuales*, Madrid, 2001.
- [14] T. Brock, *Thermophilic Microorganisms and Life at High Temperatures*, 1978.
- [15] S. Pavlostathis, «Digestion Anaerobia,» 1991.
- [16] R. Dinges, *Natural Systems for Water Pollution Control.*, Nueva York: Van Nostrand Reinhold Co, 1962.
- [17] G. Bowie, *Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling*, Georgia: U.S Environmental Protection Agency.
- [18] T. Headley, «Suitability of Peat Filters for On-site Wastewater Treatment in the Gisborne Region,» National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd, Hamilton, 2006.
- [19] J. R. Bosch, «Secado de lodos de aguas residuales por filtración evaporativa natural.

- Eras de secado.,» *Universidad Politécnica de Madrid*, 1976.
- [20] Ecured, «Riego del plátano,» [En línea]. Available: http://www.ecured.cu/Anexo:Riego_en_el_pl%C3%A1tano. [Último acceso: 24 06 2016].
- [21] Gaceta Oficial, *Normas sobre Evaluación Ambiental de Actividades Susceptibles de Degradar el Ambiente*, 1996.
- [22] J. La Iglesia, *Filtros verdes. Humedales. Macrofitas.*, Escuela de organización industrial, Madrid., 2016.
- [23] J. La Iglesia, *Fundamentos lodos activos y tipos de reactores.*, Escuela de organización industrial, Madrid., 2016.
- [24] J. La Iglesia, *Lagunaje*, Escuela de organización industrial, Madrid., 2016.
- [25] J. La Iglesia, *Lechos de Turba*, Escuela de organización industrial, Madrid., 2016.
- [26] R. Fernández, *Pretratamientos/Aguas*, Escuela de Organización Industrail, Madrid, 2016.
- [27] C. N. d. Agua, *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*, 2007.
- [28] UCA, «Operaciones en el tratamiento de unidades biológicas. Gestión y mantenimiento.,» [En línea]. Available: http://catedramln.unizar.es/files/conferencias/edar09/edar09_11_JM_Quiroga.pdf.
- [29] J. La Iglesia, *Línea de agua. Estación Depuradora de Aguas Residuales Municipales.*, Aqualogy, 2016.
- [30] PlaniGestión, *Listado de Legislación Ambiental Venezolana. Un apoyo para mejorar el desempeño ambiental.*, Venezuela, 2012.
- [31] M. d. P. P. p. e. Ambiente, «Sistema de Información de Gestión para las Aguas (SIGA).,» Gobierno Bolivariano de Venezuela, [En línea]. Available: <http://siga.geoportalsb.gob.ve/siga/index.php>.
- [32] M. d. P. P. d. Planificación., «Instituto Nacional de Estadística (INE),» Gobierno Bolivariano de Venezuela, [En línea]. Available: <http://www.ine.gov.ve>.
- [33] F. d. C. Q. Universidad Veracruzana. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/bioingenieriauv15/unidad-1-sistemas-de-depuracion-de-agua/1-3-filtros-verdes>.
- [34] IGME, «LOS MÉTODOS NATURALES DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES,» [En línea]. Available: http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/2.pdf.



TRATAMIENTO NO CONVENCIONAL DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS DE TUCANÍ, VENEZUELA

**Mildred Bracho Luzardo
Paula Marcos Barquilla
Laura Moreno Arias
José Antonio Olivares Peña**

Máster en Ingeniería y Gestión del Agua

INDICE

1. Introducción.....	1
2. Objetivos	1
3. Aspectos Legales	2
4. Estudio del Medio Físico.....	3
5. Estudio de Alternativas.....	3
5.1. Lagunaje	3
5.2. Lecho de Turba	5
5.3. Lechos bacterianos o filtros percoladores	5
5.4. Filtros verdes	5
5.5. Humedales artificiales	5
5.6. Análisis de alternativas:	6
6. Diseño	6
6.1. Estimación de la población de estudio	6
6.2. Caudales de Diseño	7
6.3. Carga Contaminante	7
6.4. EDAR	7
6.4.1. Desbaste	8
6.4.2. Desarenador.....	9
6.4.3. Lagunas Anaerobias.....	9
6.4.4. Lechos de turba	10
6.4.5. Lagunas de maduración o aerobias.....	11
6.4.6. Eras de secado.....	12
7. Construcción	13
7.1. Conducciones	14
7.2. Pretratamiento	14
7.3. Lagunas	14
7.4. Lechos de turba	14
7.5. Eras de Secado	15
8. Operación y Mantenimiento	15
8.1. Desbaste	15
8.2. Desarenado.....	15
8.3. Lagunas	15
8.3.1. Anaerobias	15
8.3.2. Maduración.....	16
8.4. Lechos de Turba.....	16
8.5. Eras de Secado	16
9. Reutilización de Producto y Subproductos	16
10. Impacto Ambiental	17
11. Análisis Económico	17
11.1. Costes de Inversión.....	17
11.2. Costes de Mantenimiento y Operación	18
12. Conclusión	18

1. INTRODUCCIÓN

Todas las comunidades en su día a día producen residuos líquidos, sólidos y emisiones atmosféricas como consecuencia de su subsistencia y desarrollo. El agua residual es en esencia la suministrada a la comunidad después de haber sido utilizada para una variedad de aplicaciones. Estas aguas comúnmente contienen sustancias orgánicas que al descomponerse pueden generar problemas de olores, al igual que microorganismos patógenos y compuestos tóxicos con potencial mutagénico o cancerígeno.

Es por estos motivos que estas aguas al producirse deben ser inmediatamente removidas de su fuente de generación, y trasladadas para darles un tratamiento adecuado que conlleve a su reutilización o desecho en función de proteger la salud pública y el medio ambiente.

El tratamiento de estas aguas dependerá de sus características iniciales, y de acuerdo a los contaminantes que contenga estos pueden ser eliminados o neutralizados por medio de procesos físicos, químicos o biológicos. Por otro lado, para la selección del tratamiento también deben considerarse las características de la zona, al igual que la disponibilidad de recursos de cada población.

Dentro de los tratamientos existentes se encuentran los no convencionales o blandos. Estos buscan imitar el proceso de autodepuración natural, siendo como consecuencia procesos más lentos y flexibles, con costes de operación y necesidades de mantenimiento inferiores a las tecnologías convencionales. Estas tecnologías resultan aplicables en poblaciones con un número reducido de habitantes y condiciones climáticas cálidas, donde tanto la accesibilidad a la tecnología convencional como al recurso energético sea limitada debido a sus elevados costes o difícil accesibilidad.

Este es el caso de la ciudad de Tucaní; Una población de 20.000 habitantes al occidente de Venezuela, donde las condiciones actuales del país hacen que la localidad tenga grandes dificultades financieras y respecto al suministro energético.

Conjuntamente se sitúa la problemática de la contaminación de sus aguas colindantes como consecuencia de un desarrollo urbano e industrial no planificado, particularmente el lago de Maracaibo, el cual es el receptor de la cuenca en la que Tucaní se encuentra. En este lago existen problemas de eutrofización, al igual que afección de la fauna y flora debido a derrames petroleros como consecuencia de un mal mantenimiento de las instalaciones que en él se encuentran, no permitiendo así que estas aguas puedan ser utilizadas para abastecimiento.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo será la depuración de las aguas residuales de la población de Tucaní en el estado de Mérida, Venezuela. Para lograrlo se diseñará una planta de tratamiento de aguas que funcione a través de métodos no convencionales, la cual dará cabida a la reutilización de dicha agua para regadío, al igual que la revalorización de los fangos como abono en actividad agrícola.

Para que la estación depuradora en cuestión se adapte a las características específicas de la población, y a su vez sea sostenible en el tiempo, se plantearon los siguientes objetivos complementarios para el proyecto:

- ✓ Estudio de las características y necesidades de la población de Tucaní.
- ✓ Comparación de distintas tecnologías no convencionales y selección de la más adecuada.
- ✓ Diseño de la estación depuradora.
- ✓ Definición de los requisitos de construcción y mantenimiento.
- ✓ Estudio de impacto ambiental.
- ✓ Estimación del presupuesto de inversión y presupuesto de mantenimiento.

3. ASPECTOS LEGALES

El agua que saldrá de la depuradora será reutilizada para abastecimiento agrícola, sin embargo, de no ser necesaria, será vertida en el río Tucaní. Para ello es necesario conocer los límites de descarga a masas de agua al igual que las características necesarias en el agua de riego.

El instrumento jurídico que define los parámetros que deben cumplir dichos vertidos en Venezuela es significativamente menos restrictivo que la legislación europea, por lo cual considerando que el progreso siempre estará direccionado hacia las mejores prácticas y gestión del recurso agua, los parámetros considerados para el diseño de la estación serán los mostrados en la legislación española.

Tabla 3.1. Requisitos de los vertidos de aguas residuales Real Decreto 509/1996.

PARÁMETRO	LÍMITE
DQO	125 mg/l
DBO ₅	25 mg/l
Sólidos suspendidos	35 mg/l
Nitrógeno	15 mg/l
Fósforo	2 mg/l

Adicionalmente se establece que el agua reutilizada para riego de los cultivos típicos de la zona deberá cumplir con los parámetros mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 3.2. Características del agua regenerada para riego directo Real Decreto 1620/2007.

PARÁMETRO	LÍMITE
Nematodos intestinales	1 huevo / 10 L
Escherichia Coli	100 UFC/ 100 ml
Sólidos Suspendido	20 mg/l

Para la reutilización de fango en el sector agricultor deberán de analizarse cada seis meses en la fase de producción los metales pesados, al igual que la materia seca, materia orgánica, pH, nitrógeno y fósforo.

4. ESTUDIO DEL MEDIO FÍSICO

Tucaní se encuentra en el estado Mérida al oeste de Venezuela. Se trata de una zona agrícola y ganadera al sur del lago de Maracaibo que alberga una población de 20.000 habitantes de acuerdo al Censo de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística en el año 2.011.

Predomina un clima cálido y templado, con unas temperaturas anuales que registran oscilaciones entre 22°C y 30°C, siendo las temperaturas medias anuales cercanas a los 27°C. Las precipitaciones están presentes durante todo el año, siendo menores en febrero con 37 mm, y ascendiendo en mayo hasta 222 mm. La población se encuentra en la cuenca del Chama, destacando en sus cercanías el río Tucaní, el cual vierte sus aguas al lago de Maracaibo.

Los recursos económicos presentes en la zona son diversos, albergando actividades ganaderas, agrícolas, mineras y forestales, sin embargo, la actividad económica se ha basado tradicionalmente en el desarrollo de la agricultura, destacando productos como café, cacao, yuca, plátano, maíz, caraota, apio o ajo. Por otro lado, el sector pecuario ha adquirido un gran auge en los últimos años, con cultivos de trucha en ríos, lagunas y quebradas con fines comerciales, y de cangrejos y curubina en lagos. Adicionalmente, existe una variedad paisajística de recursos forestales en la zona que se centran en el cedro, comino, jabillo, lacre, mijao, pardillo y saisai entre otros.

5. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

A continuación, se presenta una breve descripción de tratamientos que han sido previamente seleccionados según sus características intrínsecas para ser implementados en la estación depuradora de la población de Tucaní, para posteriormente seleccionar el que mejor se adapte al caso.

5.1. LAGUNAJE

El agua residual es retenida en varias lagunas donde tienen lugar procesos físicos (decantación de sólidos), químicos (reacciones de oxidación) y biológicos (degradación de materia orgánica debida a actividad microbológica). En función de la presencia o no de oxígeno, las lagunas se clasifican en aerobias, anaerobias y facultativas, siendo necesaria una combinación de ellas para conseguir una depuración adecuada.

Las lagunas anaerobias se sitúan al comienzo del proceso. El agua bruta es alimentada y se produce la decantación de los sólidos presentes donde la ausencia de oxígeno da lugar al desarrollo de bacterias anaerobias que degradarán parcialmente la materia orgánica.

Las lagunas facultativas se sitúan después de las lagunas anaerobias y se distingue una zona aerobia en superficie y una zona anaerobia en el fondo. Se producirá la estabilización de la materia orgánica presente en el agua.

Finalmente irán las lagunas de maduración, las cuales, al ser de poca profundidad, se favorece la oxigenación por transferencia superficial además de la proliferación de organismos fotosintéticos tales como algas o bacterias. La acción de la radiación ultravioleta favorece la eliminación de microorganismos patógenos y mineralización de materia orgánica.

5.2. LECHO DE TURBA

La depuración se realiza mediante el paso del agua residual a través del lecho de turba, que sirve de soporte para el desarrollo de bacterias y microorganismos poniendo en contacto esta masa microbiana con los compuestos y elementos que el agua residual lleva disuelta. Se producen reacciones de tipo físico-químico (filtración y adsorción) y de síntesis y estabilización biológica a través de las cuales la materia en suspensión e incluso disuelta, es retenida y transformada por oxidación-reducción de tipo aeróbico o facultativo, en compuestos más simples o naturales.

5.3. LECHOS BACTERIANOS O FILTROS PERCOLADORES

Se trata de un sistema de depuración biológico aerobio cuyo funcionamiento se basa en hacer circular, a través de un medio poroso, aire y agua residual. El material del medio poroso puede ser natural (cantos rodados, antracita, escoria, etc.) o artificial (plásticos). La circulación del aire se realiza de forma natural o forzada, generalmente a contra corriente del agua. Los microorganismos presentes en el agua se adhieren a los elementos que forman el lecho, donde se desarrollan y degradan la materia orgánica y sustancias contaminantes presentes en el agua.

5.4. FILTROS VERDES

Se emplea una superficie de terreno sobre la que se establecen cultivos agrícolas, forrajeros o forestales para depurar las aguas. El proceso de depuración de las aguas consiste en un tratamiento físico, químico y biológico. Mediante un filtrado mecánico se produce la retención de sólidos en suspensión no degradables y simultáneamente tiene lugar la mineralización de la materia orgánica por la oxidación bioquímica de bacterias anaerobias. Gracias a estos procesos las sustancias contenidas en el agua son asimilables por la vegetación proporcionando un crecimiento de la misma además de la descontaminación del efluente.

5.5. HUMEDALES ARTIFICIALES

Son zonas construidas por el hombre en las que se reproducen, de manera controlada, los procesos físicos, químicos y biológicos de eliminación de contaminantes que ocurren normalmente en los humedales naturales. Se realiza mediante un lecho de filtración formado por vegetación acuática. Cada filtro debe estar formado por una capa de grava para drenar seguida de una capa de arena y otra de grava para el efluente. Este lecho filtrante, sirve, además de para la eliminación de sólidos, de soporte tanto para las bacterias como para la vegetación (generalmente plantas perennes como el carrizo).

5.6. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS:

La elección de la alternativa más adecuada se llevará a cabo en base a los parámetros más influyentes en la implantación, explotación y mantenimiento del sistema. Se valorarán puntuándolas del 1 al 5 para cada aspecto, siendo el 5 el valor de mayor importancia.

Tabla 5.1. Estudio de las diferentes alternativas.

Tratamientos	Lagunaje	Lechos de turba	Humedales	Filtros verdes	Filtros percoladores	Factor de ponderación
Parámetros						
OPEX	5	3	5	4	2	5
Costes de inversión	2	4	5	4	2	4
Personal cualificado	4	4	4	5	3	3
Rend. de eliminación	4	4	3	4	5	4
Superficie	1	4	2	1	4	2
Generación de olores	2	5	1	2	3	2
Influencia del clima	4	4	4	4	4	2
Consumo eléctrico	5	5	5	5	3	5
Flexibilidad	4	3	2	2	4	3
Integración paisajística	4	4	5	4	3	2
Reutilización	4	4	1	4	4	3
Total	132	139	127	132	114	-

El tratamiento con mayor puntuación es el lecho de turba, por lo que esta será la alternativa seleccionada para el proyecto. Para mejorar la eficiencia de la planta se instalarán complementariamente otros procesos no convencionales; Un lagunaje anaerobio previo disminuirá la colmatación en los lechos y un lagunaje de maduración posterior eliminará patógenos y permitirá la reutilización del agua para riego.

6. DISEÑO

Para poder seleccionar los procesos involucrados tanto en la línea de aguas como en la de fangos, se procedió a estimar las características del agua residual de la población de Tucaní.

6.1. ESTIMACIÓN DE LA POBLACIÓN DE ESTUDIO

Según el INE del Gobierno Bolivariano de Venezuela, el censo poblacional de Tucaní en 2016 es de 20.000 habitantes y la tasa de crecimiento prevista para los próximos años es de 1,5%. Para obtener la población que habrá en el año 2041 se emplea una fórmula aritmética, donde se tiene en cuenta la población actual, la tasa de crecimiento y el periodo de amortización, estimando una población futura de 27.500 habitantes.

6.2. CAUDALES DE DISEÑO

Se tomará un valor de referencia de consumo de 150 l/hab/d (Rivas, 1922), y junto con el dato de la población futura se procede a calcular el caudal medio de entrada a la planta de tratamiento, siendo de 4.125 m³/d. Los procesos de pretratamiento se dimensionarán para caudal máximo, el cual toma en consideración las aguas pluviales. Este caudal se puede obtener multiplicando el caudal medio por 3, resultando 12.375 m³/d.

6.3. CARGA CONTAMINANTE

Los valores de la carga contaminante presente en las aguas residuales a tratar, según bibliografía de la zona, son:

Tabla 6.1. Datos de agua residual de la población de Tucaní.

DQO	436 mg/l
DBO ₅	276 mg/l
SS	258 mg/l
Coliformes fecales	10 ⁶ UFC/100 ml

6.4. EDAR

Una vez obtenidas las características del afluente de la EDAR, se seleccionaron los procesos de pretratamiento, tratamiento y fangos a implementar, los cuales se observan en el siguiente diagrama.

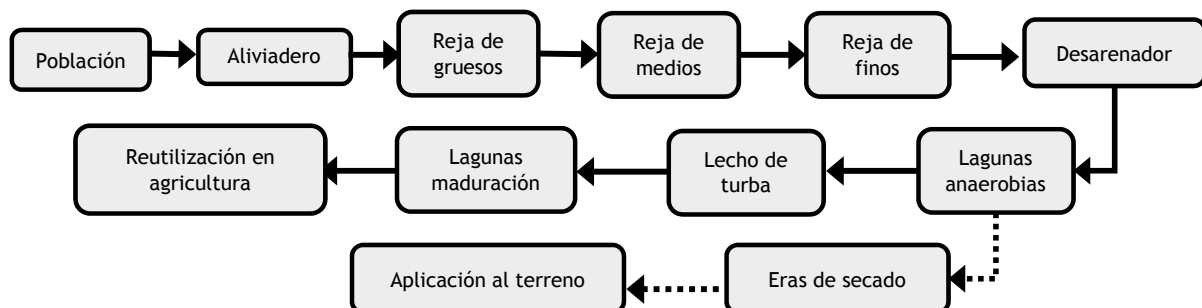


Figura 6.1. Diagrama de bloques de EDAR de Tucaní.

El aliviadero en la cabecera de la planta es un punto fundamental siempre que se disponga de una red de saneamiento unitario, ya que su objetivo es evacuar al cauce más cercano el excedente de caudal proporcionado por las aguas de lluvia. Posteriormente el agua pasa al desbaste, conformado por tres rejillas de distintos tamaños, el cual eliminará los sólidos flotantes y en suspensión de mediano tamaño (trozos de madera, trapos, raíces, etc.). Así se protegerán los equipos aguas abajo y se evitará que el bloqueo en canales y/o tuberías de la planta.

A continuación, en el desarenador se producirá una separación por decantación de todos aquellos sólidos en suspensión de densidad elevada (arenas, gravas), para posteriormente separar el resto de los sólidos suspendidos en las lagunas anaerobias. En esta laguna adicionalmente se eliminará y estabilizará gran parte de la materia. Por efecto gravitatorio el agua percolará a través de los lechos de turba, en

donde las concentraciones de DQO y DBO₅ serán reducidas a los valores requeridos a la salida de la planta. Por último, las lagunas de maduración reducirán las bacterias patógenas para obtener un efluente clarificado y oxigenado donde se hayan alcanzado los parámetros para su reutilización.

Los lodos extraídos de la laguna anaerobia serán trasladados a unas eras de secado, para que posterior a su deshidratación, sean reutilizados por agricultores como abono.

6.4.1. Desbaste

Se seleccionaron 3 rejas de desbaste con distintos tamaños para distribuir la colmatación en las mismas.

Tabla 6.2. Clasificación de los tipos de rejas según luz de paso.

TIPO DE REJA	LUZ DE PASO	ESPESOR
Gruesos	25 mm	10 mm
Medios	10 mm	8 mm
Finos	5 mm	6 mm

A continuación, se muestran los parámetros de diseño a considerar en su dimensionamiento:

Tabla 6.3. Parámetros de diseño de las rejas.

Colmatación	30%
Velocidad mínima Q_{med}	0,3 m/s
Velocidad mínima Q_{max}	0,9 m/s
Velocidad máxima (Q_{med})	1 m/s
Velocidad máxima (Q_{max})	1,4 m/s
α	60°

Se procede a calcular los parámetros de cada una de las rejas tanto a caudal máximo como medio, y se selecciona el valor más restrictivo, con el cual se procede a realizar el dimensionamiento.

Tabla 6.4. Diseño y dimensionamiento de las rejas.

PARÁMETROS DE DISEÑO	REJA DE GRUESOS	REJA DE MEDIOS	REJA DE FINOS
Superficie mín. Q_{max}	0,20 m ²	0,26 m ²	0,32 m ²
Superficie mín. Q_{med}	0,10 m ²	0,10 m ²	0,15 m ²
Superficie máx. Q_{max}	0,16 m ²	0,16 m ²	0,16 m ²
Superficie máx. Q_{med}	0,16 m ²	0,16 m ²	0,16 m ²
Velocidad canal	0,64 m/s	0,52 m/s	0,43 m/s
Velocidad paso rejas	1,27 m/s	1,34 m/s	1,36 m/s
Pérdida de carga	89 mm	111 mm	122 mm
Unidades	2	2	2
Superficie unitaria	2.046 cm ²	2.631 cm ²	3.215 cm ²
Ancho	50 cm	55 cm	60 cm
Altura	45 cm	50 cm	55 cm
Superficie unitaria adoptada	2.250 cm ²	2.750 cm ²	3.300 cm ²

El valor aconsejado para la generación de residuos en un desbaste completo de gruesos, medios y finos es de 0,035 l/hab/d con un peso de 0,028 kg/hab/d, siendo los residuos retirados en este proceso de 963 l/d.

6.4.2. Desarenador

Consistirá en un canal rectangular dimensionado en función de los siguientes parámetros:

Tabla 6.5. Parámetros de diseño del desarenador.

Q_{\max} pretratamiento	0,14 m ³ /s
Velocidad longitudinal diseño	0,30 m/s

A partir de estos parámetros y velocidades de sedimentación teóricas se obtiene:

Tabla 6.6. Dimensiones del desarenador.

Ancho	90 cm
Altura	55 cm
Longitud	11 m
Superficie adoptada	0,49 m ²
Velocidad adoptada	0,29 m/s
Velocidad decantación	65 m/h
T decantación	30 s

Las características del agua a la salida del pretratamiento se calcularán a partir de los rendimientos de eliminación típicos de un pretratamiento.

Tabla 6.7 Condiciones del agua a la entrada y salida del pretratamiento.

PARÁMETRO	ENTRADA	RENDIMIENTO	SALIDA
DQO	436 mg/l	30%	305,2 mg/l
DBO ₅	276 mg/l	10%	248,4 mg/l
SS	258 mg/l	30%	180,6 mg/l

Tanto el desbaste como el desarenado fueron diseñados en función del caudal máximo de la planta, y contarán con dos líneas de equipos, las cuales darán flexibilidad a la planta a la hora de su mantenimiento.

6.4.3. Lagunas Anaerobias

A partir de este punto el caudal de diseño será el medio, adicionando la recirculación proveniente del lixiviado en las eras de secado. Para el diseño de las lagunas anaerobias se consideró:

Tabla 6.8 Valores seleccionados para el diseño de las lagunas anaerobias.

Tiempo de retención	3 días
Carga volumétrica	180 g DBO ₅ /m ³ /d
Profundidad	4 m

Se dispondrán 3 lagunas en paralelo, adoptando cada una las siguientes características:

Tabla 6.9. Dimensiones adoptadas para cada laguna en funcionamiento ordinario.

Volumen unitario necesario	4.170 m ³
Profundidad	4 m
Ancho en superficie	25 m
Largo en superficie	46,5 m
Tiempo de retención (d)	3,02 días
Inclinación talud	60°
Longitud talud (m)	4,6 m
Área en el fondo (m ²)	940 m ²
Volumen laguna (m ³)	4.196 m ³
Carga volumétrica	91,43 g DBO/m ³ /d

Para asegurar la continuidad de operación en el caso de mantenimiento cada laguna dispondrá de dos salidas, lo cual permitirá aumentar el volumen unitario de las lagunas en servicio. En la siguiente tabla, se muestra el dimensionamiento considerando dos lagunas en funcionamiento.

Tabla 6.10. Dimensiones adoptadas para cada laguna en funcionamiento de limpieza.

Profundidad	4,5 m
Ancho en superficie	25,4 m
Largo en superficie	46,9 m
Área en superficie	1.192 m ²
Tiempo de retención real	2,3 días
Longitud talud	5,2 m
Volumen laguna	4.785 m ³
Carga volumétrica	120,3 g DBO/m ³ /d

La producción de fangos se aproxima a 40 l/habitante/año, por tanto, en las lagunas anaerobias se producirán 1.100 m³/año. Dado que hay tres lagunas, la producción por laguna es de 366,7 m³/año de fangos. La retirada de los fangos se realizará cuando un 25% del volumen de las lagunas se encuentre colmatado, siendo la frecuencia cada 3 años.

Las características del agua a la salida de las lagunas anaerobias serán:

Tabla 6.11. Características del agua a la entrada y salida de la laguna.

PARÁMETRO	ENTRADA	RENDIMIENTO	SALIDA
DQO	305,2 mg/l	60%	122,08 mg/l
DBO ₅	248,4 mg/l	60%	99,36 mg/l
SS	180,6 mg/l	80%	36,12 mg/l

6.4.4. Lechos de turba

Los parámetros de diseño utilizados para este sistema se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6.12. Parámetros de diseño del lecho de turba

Tipo de turba	Clara
Percolación	65 l/h/m ²
Carga hidráulica	1,5 m/d
Carga orgánica	0,5 kg DBO ₅ /m ² /d
Carga de sólidos	0,5 Kg ss/m ² /d
Reserva labores limpieza	30%

Tras calcular y comparar las superficies necesarias por percolación, carga hidráulica, carga orgánica y carga de sólidos, se observa que la superficie más restrictiva es la obtenida a través de la limitación en carga hidráulica, por lo que será el valor con el cual se procederán los cálculos.

Tabla 6.13. Características de diseño del lecho de turba.

Área de percolación	2.780 m ²
Superficie + limpieza	3.575 m ²
Superficie unitaria	200 m ²
Unidades	19
Largo	20 m
Ancho	10 m

Para definir la altura de los lechos se tomarán secciones típicas en estos sistemas.

Tabla 6.14. Perfil del lecho de turba

Espesor capa de turba	40 cm
Lámina de Geotextil	
Espesor capa arena fina	10 cm
Espesor capa gravilla	10 cm
Espesor capa de grava	30 cm

Considerando el espesor y el área del lecho junto con la densidad de la turba, se obtienen un total de 4.800 kg de turba necesaria por lecho. Las características del agua a la salida de los lechos de turba se calcularán a partir de los rendimientos de eliminación típicos.

Tabla 6.15. Características del agua a la entrada y salida de los lechos de turba

PARÁMETRO	ENTRADA	RENDIMIENTO	SALIDA
DQO	122,08 mg/l	80%	24,42 mg/l
DBO ₅	99,36 mg/l	85%	14,90 mg/l
SS	36,12 mg/l	95%	1,81 mg/l
Coliformes Fecales	10 ⁶ UFC/100 ml	80% desde la entrada a la EDAR	2·10 ⁵ UFC/100 ml

6.4.5. Lagunas de maduración o aerobias

Para cumplir con los parámetros exigidos para reutilización, los datos de partida adoptados serán:

Tabla 6.16. Parámetros de diseño de laguna de maduración.

Tiempo de retención	3 días
Temperatura del agua	22°C
Profundidad (m)	1 m
Coliformes fecales	2·10 ⁵ UFC/ 100ml

Los valores que se han seleccionado para el dimensionamiento son los siguientes:

Tabla 6.17. Dimensionamiento laguna de maduración.

Tiempo de retención	3 días
Temperatura mínima	22°C
Constante de velocidad	2,6 d ⁻¹
Coeficiente de T ^a (φ)	1,19
Constante cinética eliminación de coliformes	3,68
Coliformes a la salida	1,38·10 ³ UFC/100 ml

Se dispondrán 2 lagunas de iguales dimensiones en serie cuyas características unitarias serán:

Tabla 6.18. Dimensiones adoptadas para cada laguna en funcionamiento ordinario.

Profundidad	1 m
Ancho en superficie	50 m
Largo en superficie	254 m
Área en superficie	12.700 m ²
Inclinación taludes	60°
Longitud talud	1,2 m
Área en fondo	12.452 m ²
Volumen laguna	12.576 m ³
Ancho en fondo	49,3 m
Largo en fondo	253,3 m

Las características del agua a la salida de las lagunas serán:

Tabla 6.19. Características del agua a la entrada y salida de la laguna.

PARÁMETRO	ENTRADA	RENDIMIENTO	SALIDA
DQO	24,42 mg/l	65%	8,5 mg/l
DBO ₅	14,90 mg/l	65%	5,2 mg/l
SS	1,81 mg/l	45%	1 mg/l
Coliformes fecales	2·10 ⁵ UFC/100 ml	99%	1,38·10 ³ UFC/100 ml

6.4.6. Eras de secado

Los fangos producidos en las tres lagunas anaerobias serán ubicarlos en las eras para su deshidratación.

Tabla 6.20. Detalles eras de secado.

Concentración fangos	1%
Pendiente solera	3%
Superficie necesaria	2.750 m ²
Profundidad de llenado	40 cm
Ancho	8 m
Largo	20 m
Nº eras	17 uds
Resguardo sobre la arena	60 cm
Granulometría arenas	0,2 - 0,8 mm
Concentración fangos secos	80%
Porcentaje lixiviados	43%
Porcentaje pérdidas evaporación	57%
Volumen de lixiviados	468 m ³ /ciclo

El cálculo del caudal de lixiviados, debido a su recirculación, es fundamental para el dimensionamiento de la planta.

Tabla 6.21. Detalles del cálculo de lixiviados.

Secado de fangos	7 días
Fangos extraídos	84 m ³ / día
Velocidad de drenaje 8 primeras horas	4 l/h m ²
Velocidad de drenaje resto del tiempo	1 l/h m ²
Superficie máx. llenada cada día	210 m ²
Superficie máx. funcionando a 4 l/h/m ²	210 m ²
Superficie máx. funcionando a 1 l/h/m ²	1.051 m ²
Caudal máximo de lixiviados	1,9 m ³ /h

7. CONSTRUCCIÓN

La construcción de la EDAR estará ubicada a 4,82 km de la población. La parcela tendrá una longitud de 280 m y un ancho de 262 m, ocupando una superficie total de 5,8 ha. El colector de aguas residuales que abastecerá la planta por presentará una longitud de 3,47 km, mientras que el de salida será de 1,07 km hasta llegar al cauce del río Tucaní, ambos sobre un terreno con 0,4% de pendiente. Los suelos presentes en la zona son limosos, los cuales permiten que la excavación sobre el terreno sea sencilla.

Dentro de la superficie de la parcela se encuentran consideradas las unidades de tratamiento de aguas, al igual que las edificaciones complementarias de urbanización, como lo son la caseta de servicio, cerramiento, caminos de coronación, alumbrado y jardinería.

7.1. CONDUCCIONES

Se utilizarán tuberías convencionales de saneamiento (PVC, fibrocemento, hormigón) con pozos de registro en los cambios de dirección y a distancias no mayores de 50 metros para labores de mantenimiento. Para la distribución del flujo entre equipos instalados en paralelo se emplearán arquetas de reparto, en las cuales el flujo pasará a cada equipo a través de vertederos. Suelen construirse de hormigón armado y los vertederos de acero inoxidable o aluminio.

7.2. PRETRATAMIENTO

En la obra de llegada se colocará un canal de hormigón para conducir el agua hacia el pretratamiento y contará con un aliviadero para caudales superiores al de diseño.

Se construirán dos canales de hormigón donde se dispondrán las rejillas metálicas de finos, medios y gruesos que componen el desbaste. Uno de los canales será de reserva, y estará conectado al otro a través de un aliviadero para que cuando se colmaten las rejillas, el agua residual pase a ese canal y continúe con el tratamiento. Se contará con compuertas metálicas antes y después de cada rejilla para controlar el paso del agua en caso de mantenimiento.

Los canales de los desarenadores serán de hormigón armado y deben de proveerse un espacio dentro de los mismos para la acumulación y almacenamiento de las arenas.

7.3. LAGUNAS

Se realizará el corte y desenraizado de árboles, arbustos, hierbas o cualquier otro tipo de vegetación, y su retiro. Se ejecutarán excavaciones con el objeto de obtener los niveles deseados para el fondo, así como para formar las secciones del proyecto procurando que el movimiento de tierra sea compensado. La pendiente de los taludes será de 3:1 o 2:1 y la coronación del dique debe ser hecha lo suficientemente ancha como para permitir el fácil tráfico de vehículos.

La estructura de salida podrá colocarse en cualquier punto del borde, ordinariamente al pie del talud y opuesto a la tubería de entrada. Las salidas superficiales deben incorporar placas deflectoras de acero inoxidable o aluminio alrededor del dispositivo. El fondo y taludes de las lagunas irán revestidos con polietileno de alta densidad de 1,5 mm de espesor, que presenta unas características impermeabilizantes ideales, buena resistencia al desgaste y es inocuo con el medio ambiente.

7.4. LECHOS DE TURBA

Los lechos se colocarán de forma que quede espacio suficiente entre ellos para el paso de camiones, necesarios para la renovación de la turba. El cuento del lecho será cubierto con hormigón armado el cual funcionará como soporte e impermeabilizante.

7.5. ERAS DE SECADO

La estructura se realizará con hormigón armado de 15 cm de espesor, lo que sirve como método de impermeabilización. La era de secado se rellenará con arena como capa filtrante para que el lixiviado sea lo más limpio posible. Se colocará un dren en el fondo de la era para recoger el líquido drenado para su reincorporación a la cabecera de la planta.

8. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

El cercado de la planta debe estar en buen estado para evitar la entrada de animales y personas ajenas, así como las interconexiones entre todas las estructuras deben ser limpiadas con regularidad. Por otro lado, la inspección visual es fundamental para detectar posibles problemáticas emergentes.

8.1. DESBASTE

La limpieza de las rejillas se realizará de manera manual mediante un rastrillo, depositando los residuos acumulados y escurridos en un vertedero metálico con tapa, que posteriormente será enviado a su disposición final en rellenos sanitarios. Las rejillas deben protegerse de la corrosión pintándolas cada 6 meses con pintura epóxica.

8.2. DESARENADO

La remoción de las arenas depositadas en el fondo de los canales debe realizarse al menos una vez por semana. Se procederá a la limpieza cuando la acumulación de sedimentos llegue a 5 o 6 cm. Las labores de mantenimiento consisten en agitar la arena del fondo para desprender la porción de materia orgánica depositada y posteriormente drenar el canal y extraer los sedimentos con la pala. Una vez al año es conveniente pintar el canal para evitar la corrosión.

8.3. LAGUNAS

Entre las diferentes tareas de mantenimiento a desarrollar en las lagunas se encuentran:

- ✓ Remoción de la materia flotante.
- ✓ Control de la vegetación acuática.
- ✓ Mantenimiento de los taludes.
- ✓ Control del nivel del agua de la laguna.
- ✓ Control biológico.
- ✓ Limpieza de estructuras instaladas.

8.3.1. Anaerobias

Para iniciar el proceso, se necesitan fangos de una depuradora cercana para acelerar el proceso biológico. La coloración de las lagunas anaerobias debe ser gris y presentar cierto burbujeo en la superficie. Para proceder a la retirada de los lodos es preciso conocer la profundidad a la cual se

encuentran, para ello se realiza una medición cerca de la entrada con la ayuda de una barca. Cuando se alcanza $\frac{1}{4}$ de su altura se procede al drenado del fango el cual puede acumularse en el fondo de la laguna durante 3 años.

Como indicadores de mal funcionamiento en las lagunas se pueden tener: Presencia de malos olores, presencia de coloración rosácea y presencia de mosquitos, insectos y otros animales.

8.3.2. Maduración

En la puesta en marcha, el proceso se inicia cuando los lechos de turba funcionan correctamente. Debe tener una coloración verde intensa y ausencia de sólidos sedimentables, vegetación acuática y plantas en los taludes. Como indicadores de mal funcionamiento, además de los ya mencionados en las lagunas anaerobias, se establece la acumulación de materiales sólidos en superficie o flotantes.

8.4. LECHOS DE TURBA

El mantenimiento consiste en la remoción de la capa de sólidos en la turba. Para ello, una vez seca la superficie se procede, mediante rastrillado, a la eliminación de la costra superficial. El rastrillado conduce a una disminución en la altura de los lechos, por lo que será necesaria su reposición con frecuencia. En este caso, la reposición se hará cada 4 años.

8.5. ERAS DE SECADO

En el primer periodo de drenaje el operador deberá controlar que a través de la tubería de desagüe fluya el efluente percolado. Debe realizarse un control de humedad y de calidad bacteriológica semanal, y una vez alcanzados los parámetros deseados, se procederá a retirar el lodo y trasladarlo hasta su disposición final (uso agropecuario). En cuanto al mantenimiento de las eras de secado, éste consistirá en reemplazar la arena perdida durante la remoción del fango seco.

9. REUTILIZACIÓN DE PRODUCTO Y SUBPRODUCTOS

A continuación, se realizará el estudio de la cantidad de hectáreas de un sembradío de plátano que se verían beneficiadas por el agua regenerada de la estación depuradora que se busca implementar. Según bibliografía referente al tema un cultivo de plátano con 1.500 plantas/Ha y un índice de área foliar igual a 2,1 consume en un mes 1.170 m³/Ha de agua en ambientes soleados y 765 m³/Ha en condiciones de nubosidad intensa permanente. Considerando un caudal a la salida de la estación depuradora igual a 172 m³/h, considerando el escenario más desfavorable (ambiente soleado) con la aportación de la estación sería posible regar un total de 106 hectáreas al día.

Por otro lado, los fangos generados en las lagunas anaerobias son ideales para ser utilizados como abono debido a su alto contenido de compuestos orgánicos y nutrientes, representando un ahorro significativo para los agricultores de la zona. Para su reutilización, aunque las aguas residuales urbanas no suelen presentar metales pesados, deben ser analizados en su contenido y parámetros básicos.

Se prevé que la turba de los lechos sea sustituida aproximadamente cada 4 años. Esta turba, al ser de carácter orgánico tendrá alto contenido de ácidos fulvicos y húmicos los cuales contribuyen a la estabilidad del suelo, incidiendo positivamente en la absorción de nutrientes. Es así como la turba también podría ser revalorizada empleándola para esponjamiento del suelo agrícola, sin embargo, al igual que con los fangos, debe analizarse su contenido y verificar que sea el adecuado.

Finalmente, los residuos del pretratamiento, al estar compuestos principalmente por sólidos grandes y arenas, no podrán ser revalorizados en agricultura. Su disposición debe hacerse en vertederos, según lo establece la ley de gestión integral de la basura.

10. IMPACTO AMBIENTAL

A continuación, se identifican algunos de los posibles impactos ambientales que pueda producir la implementación de la EDAR y se resume la manera de prevenirlos o compensarlos.

- ✓ Expropiación de terreno agrícola para parcela: Compensación económica a dueño actuales
- ✓ Vertido: Se alcanzan parámetros aptos para reutilización y cauce
- ✓ Infiltraciones: Impermeabilización de procesos en riesgo
- ✓ Malos olores: Operación adecuada y emplazamiento alejado de la población
- ✓ Contaminación por tránsito de vehículos
- ✓ Conducciones: Subterráneas. Replantación de capa vegetal afectada
- ✓ Impacto visual: Pocas edificaciones de hormigón
- ✓ Infraestructuras: Construcción de carretera para acceder a la planta.
- ✓ Contaminación sonora: principalmente durante los 5 meses de construcción.

Tras considerar una valoración de los impactos se obtiene una calificación favorable para la ejecución de la obra. Los impactos negativos ligados a este proyecto se clasifican en compatibles y, por tanto, de recuperación inmediata en el tiempo sin necesidad de llevar a cabo medidas correctoras. Se puede proceder a la ejecución del proyecto puesto que no se determina ningún impacto de carácter crítico.

11. ANÁLISIS ECONÓMICO

En este apartado se resumen todos los costos derivados de la construcción, operación y mantenimiento de sistema de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Tucaní.

11.1. COSTES DE INVERSIÓN

Terreno	36.000,00 €
Obra de llegada	412.546,48 €
Desbaste	7.765,79 €
Desarenado	5.474,38 €
Laguna anaerobia	266.980,63 €

Lecho de turba	239.910,11 €
Laguna maduración	742.658,47 €
Eras de secado.....	173.448,83 €
Cerramiento	19.839,95 €
Gastos generales (6%)	102.693,17 €
Beneficio industrial (10%).....	171.155,29 €
Total	2.178.474,10€

11.2. COSTES DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

Los costos de operación y mantenimiento son los referidos al funcionamiento de la planta de tratamiento para hacer producir la capacidad instalada.

Materiales	17.950,35 €/año
Maquinaria	15.620,00 €/año
Personal	13.620,00 €/año
Mantenimiento	503,88 €/año
Gastos varios.....	14.308,27 €/año
Total	62.002,51 €/año
Coste anual	0,04 €/m³

12. CONCLUSIÓN

Tras el estudio y análisis en profundidad de los diferentes tratamientos de depuración de aguas residuales que se podrían implementar en la ciudad de Tucaní, se concluye que el proceso más adecuado que asegure la sostenibilidad de la planta es un tratamiento compuesto por un pretratamiento que consta de un desbaste y un desarenado, luego un lagunaje anaerobio seguido por un lecho de turba y, finalmente, un lagunaje de maduración que permitirá la reutilización del agua en regadío de plátanos y el aprovechamiento de los fangos como abono en dicho terreno agrícola.

Para la construcción y el mantenimiento de la planta se han empleado las mejores técnicas disponibles, así como materiales inocuos para el medio ambiente que permiten el desarrollo del proceso logrando los parámetros exigidos por la legislación. Para asegurar la calidad del efluente a lo largo del tiempo es importante desarrollar adecuadamente las tareas de mantenimiento y control, contando con un operario que visite la planta diariamente. A la hora de cumplir con todos estos aspectos es imprescindible realizar un estudio de impacto ambiental previo que demuestre la viabilidad del proyecto en su entorno.

Por último, se realizó un estudio económico en el cual se consideraron tanto los costes de inversión como los costes de operación y mantenimiento, demostrando que este proyecto requiere un gasto inferior a plantas depuradoras convencionales, ya que el coste por m³ es de 0,04 €.

TRATAMIENTO NO CONVENCIONAL DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS DE TUCANÍ, VENEZUELA

Julio 2016

Mildred Bracho • Paula Marcos • Laura Moreno • José Antonio Olivares

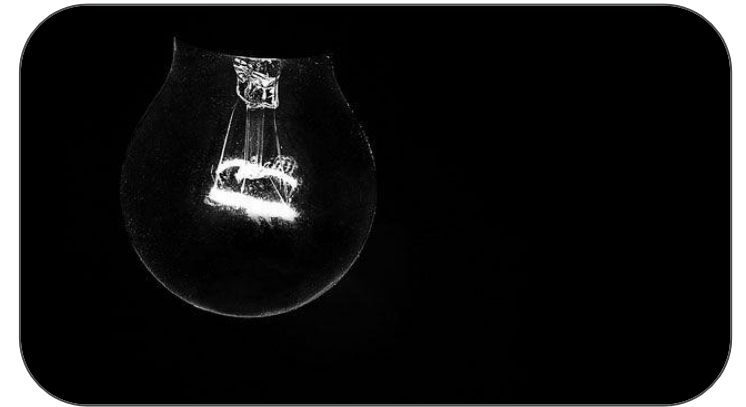
ÍNDICE

- 1 **Introducción**
- 2 **Objetivos**
- 3 **Aspectos legales**
- 4 **Estudio de Alternativas**
- 5 **Diseño**
- 6 **Construcción, puesta en marcha y operación**
- 7 **Reutilización**
- 8 **Estudio de Impacto Ambiental**
- 9 **Análisis económico**
- 10 **Conclusiones**

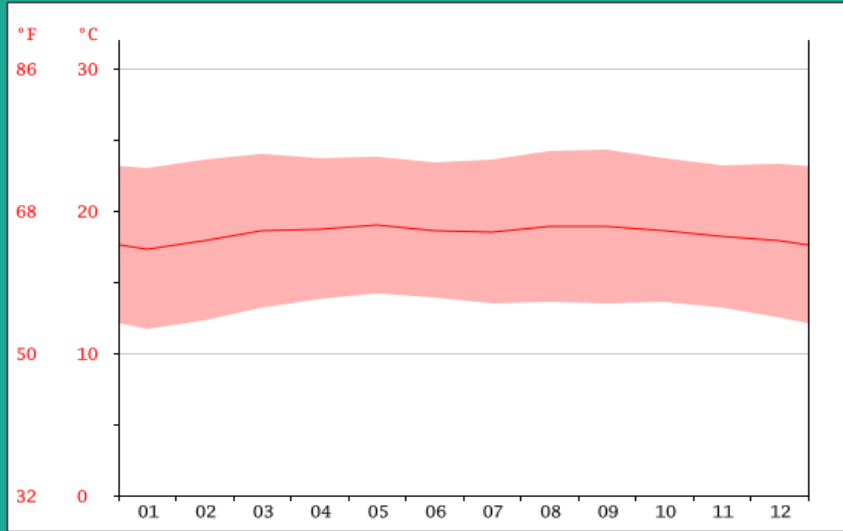
CONTEXTO ACTUAL



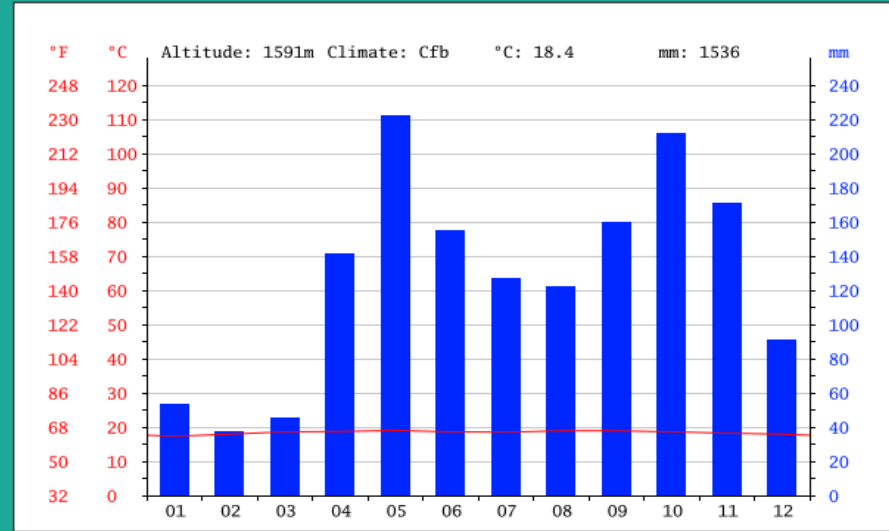
SITUACIÓN



ESTUDIO DEL MEDIO FÍSICO



Temperaturas



Precipitaciones



OBJETIVOS



ASPECTOS LEGALES

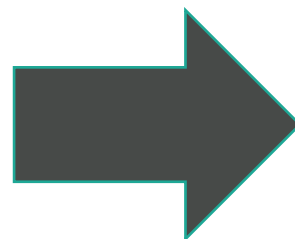
EFLUENTES LÍQUIDOS

VENEZUELA

Decreto 883

PARÁMETRO	LÍMITE
DQO	350 mg/l
DBO ₅	60 mg/l
Sólidos suspendidos	80 mg/l
Nitrógeno	40 mg/l
Fósforo	10 mg/l

PARÁMETRO	LÍMITE
Coliformes totales	50.000/100 mL
Coliformes fecales	10.000 / 100 ml



ESPAÑA

Real Decreto 509/1996

PARÁMETRO	LÍMITE
DQO	125 mg/l
DBO ₅	25 mg/l
Sólidos suspendidos	35 mg/l
Nitrógeno	15 mg/l
Fósforo	2 mg/l

Real Decreto 1620/2007

PARÁMETRO	LÍMITE
Nematodos intestinales	1 huevo / 10 L
Escherichia Coli	10.000 UFC/ 100 ml
Sólidos suspendidos	35 mg/l

ASPECTOS LEGALES

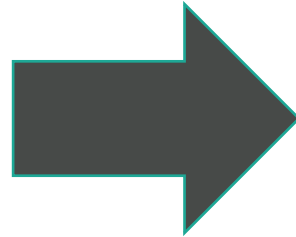
FANGOS

ESPAÑA

Real Decreto español 1310/1990

VENEZUELA

No existe
legislación
específica



PARÁMETROS	VALORES LÍMITE (mg/Kg de materia seca)	
	Suelos con pH menor de 7	Suelos con pH mayor a 7
Cadmio	20	40
Cobre	1	1,75
Níquel	300	400
Plomo	750	1,2
Zinc	2,5	4
Mercurio	16	25
Cromo	1	1,5

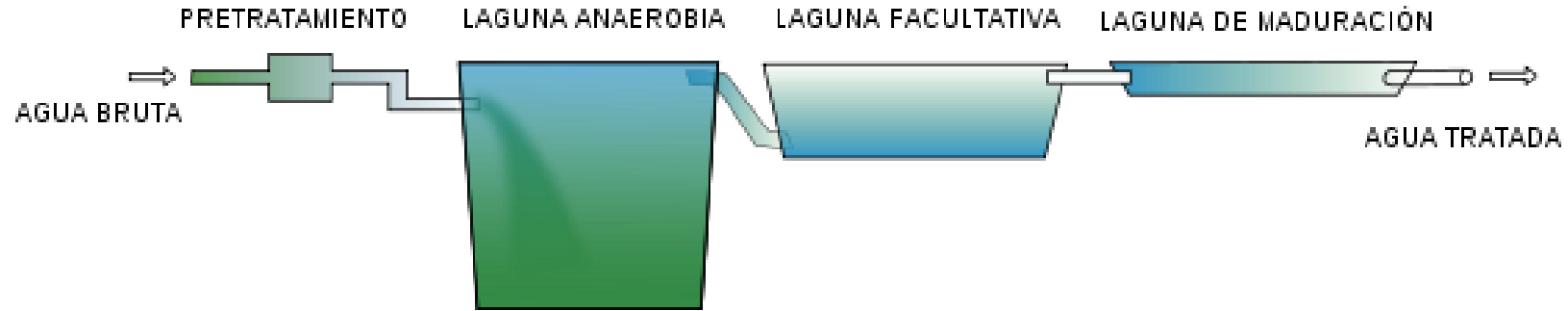
ESTUDIO DE ALTERNATIVAS



ALTERNATIVAS

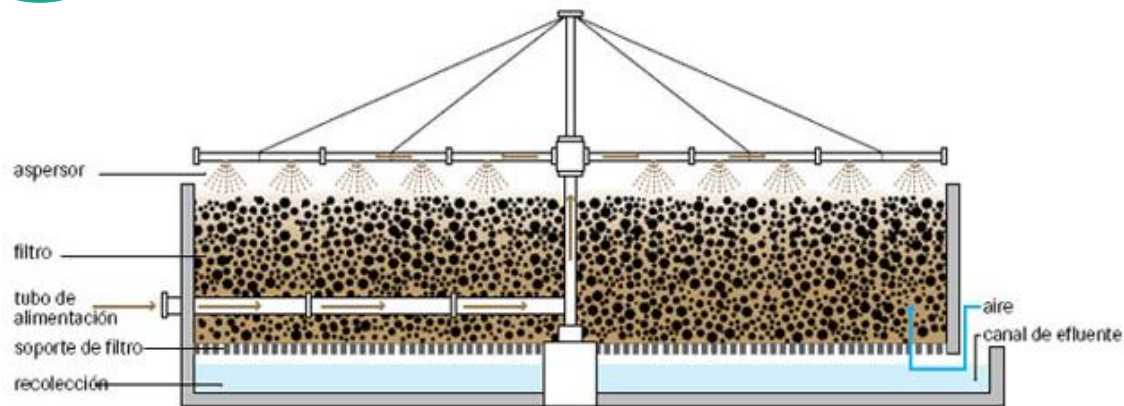
1

LAGUNAJE



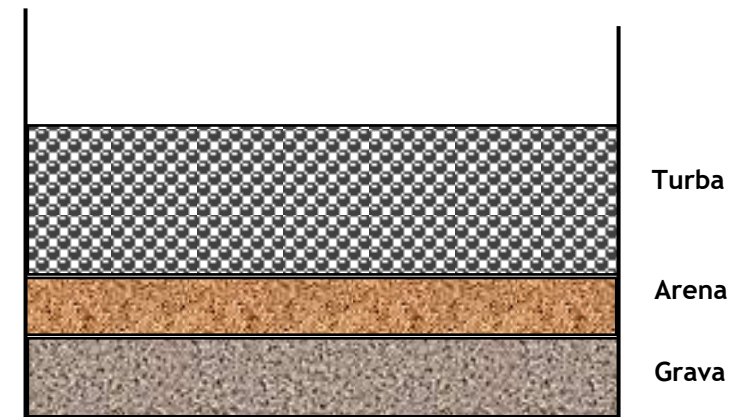
2

LECHO BACTERIANO



3

LECHO DE TURBA



ALTERNATIVAS

4

FILTROS VERDES



5

HUMEDALES ARTIFICIALES



SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Tratamientos	Lagunaje	Lechos de turba	Humedales	Filtros verdes	Filtros percoladores	Factor de ponderación
Parámetros						
OPEX	5	3	5	4	2	5
CAPEX	2	4	5	4	2	4
Personal cualificado	4	4	4	5	3	3
% eliminación	4	4	3	4	5	4
Superficie	1	4	2	1	4	2
Olores	2	5	1	2	3	2
Influencia del clima	4	4	4	4	4	2
Consumo eléctrico	5	5	5	5	3	5
Flexibilidad	4	3	2	2	4	3
Integración paisaje	4	4	5	4	3	2
Reutilización	4	4	1	4	4	3
Total	132	139	127	132	114	





DISEÑO

BASES DE DISEÑO

POBLACIÓN

INE 2011

20.000 Habitantes

Tasa de crecimiento 1,5%

Proyección a 25 años

27.500 habitantes

CAUDALES

150 l/hab/d

Medio

4.125 m³/d

Máximo

12.375 m³/d

CARGA CONTAMINANTE

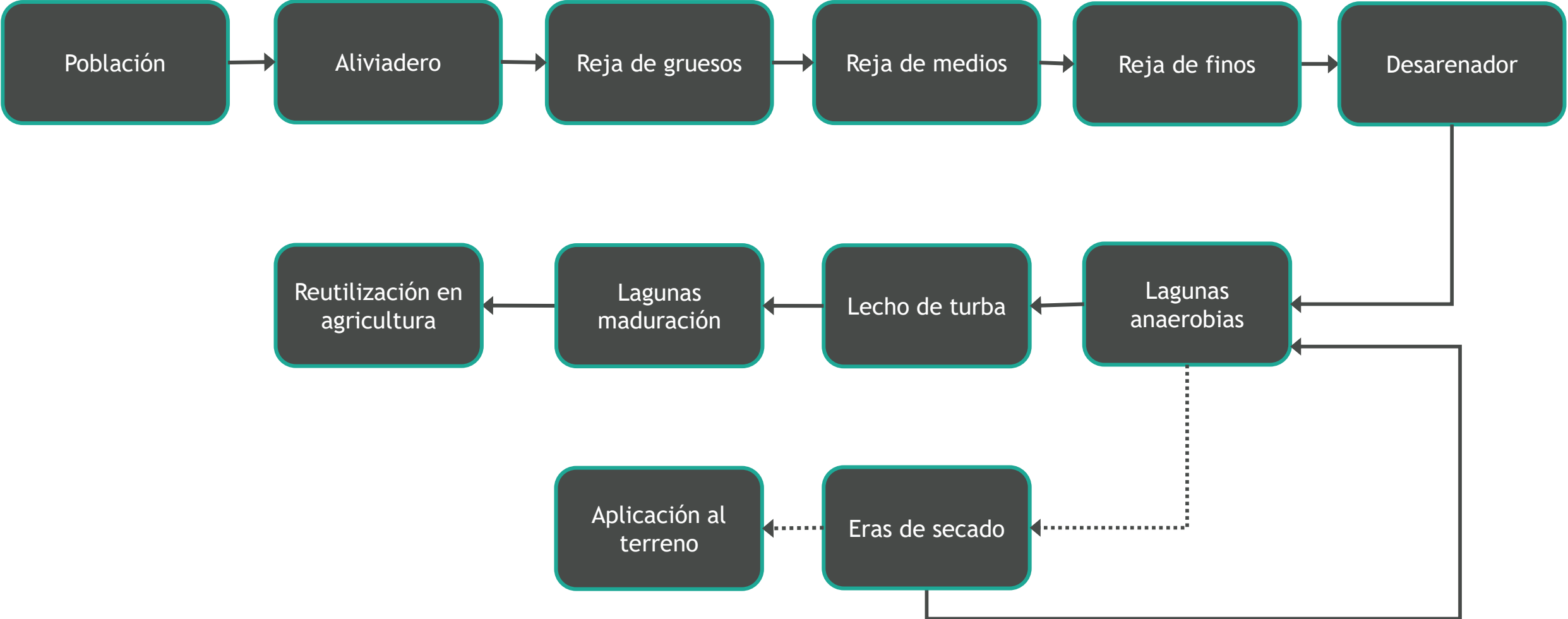
DQO 392 mg/l

DBO₅ 248 mg/l

SS 232 mg/l

CF 10⁶ UFC/100 ml

DIAGRAMA DE BLOQUES

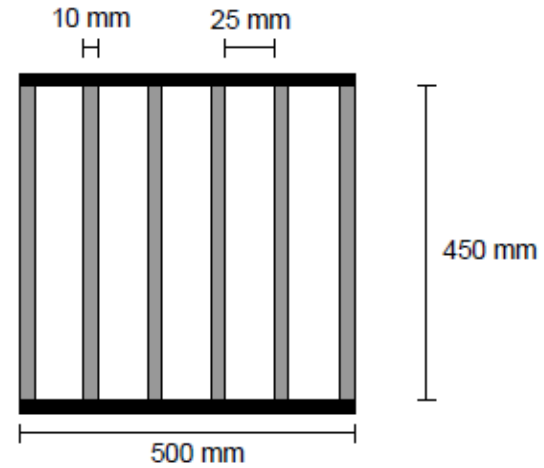


DESBASTE

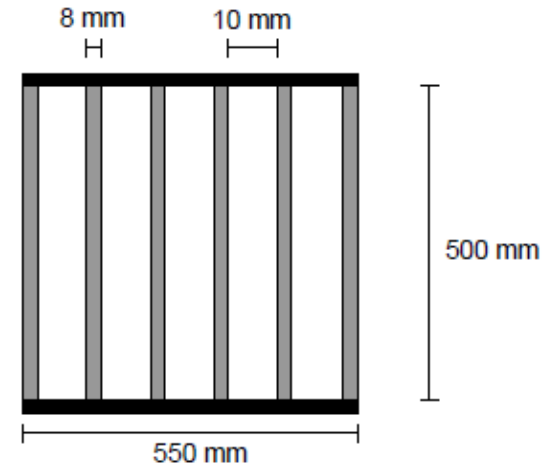
DISEÑO

CRITERIOS DE DISEÑO	
Velocidad mín. canal Q_{med}	0,3 m/s
Velocidad mín. canal $Q_{máx}$	0,9 m/s
Velocidad máx. rejas Q_{med}	1 m/s
Velocidad máx. rejas $Q_{máx}$	1,4 m/s
Colmatación	30%
Inclinación	60°

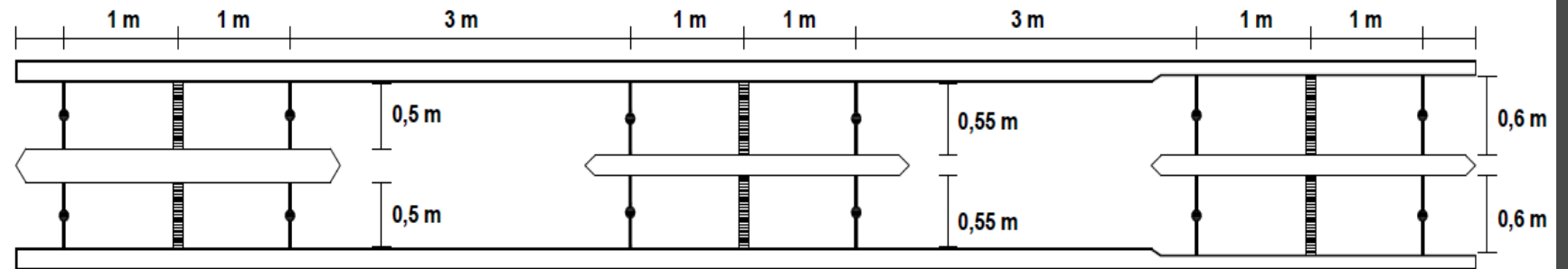
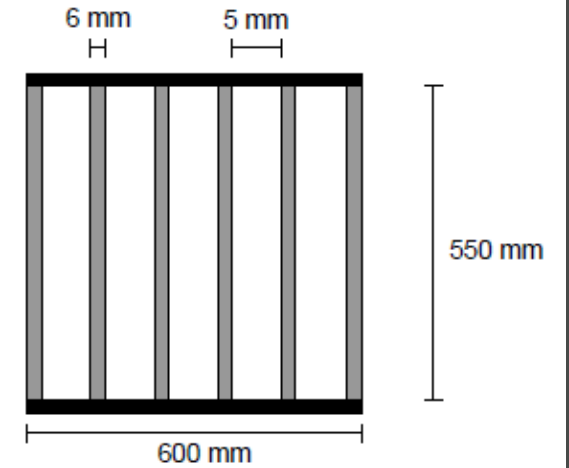
REJA GRUESOS



REJA MEDIOS



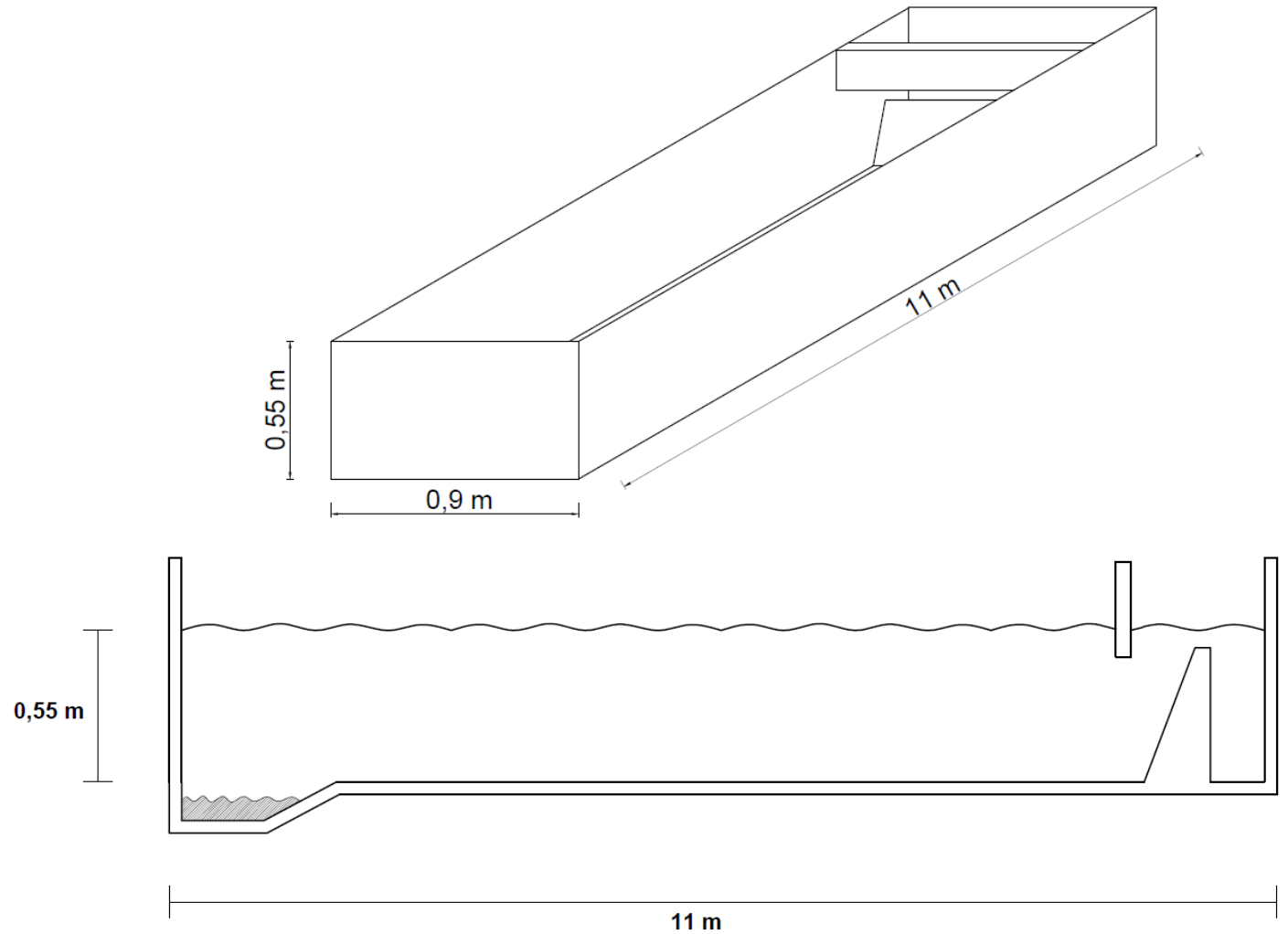
REJA FINOS



DESARENADOR

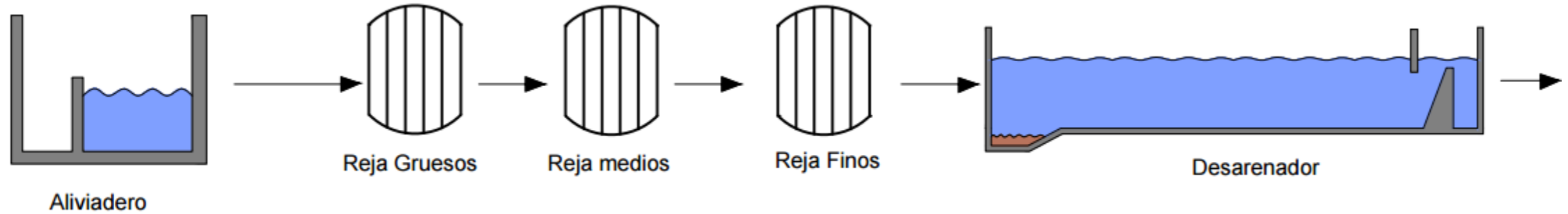
DISEÑO

CRITERIOS DE DISEÑO	
Velocidad máx.	0,3 m/s
Diámetro de partícula	0,2 mm
Velocidad sedimentación	65 m/h
Densidad partícula	2,65 kg/l



PRETRATAMIENTO

RENDIMIENTO DE ELIMINACIÓN



ENTRADA

DQO	392 mg/l
DBO ₅	248 mg/l
SS	232 mg/l

DQO	30%
DBO ₅	10%
SS	30%

SALIDA

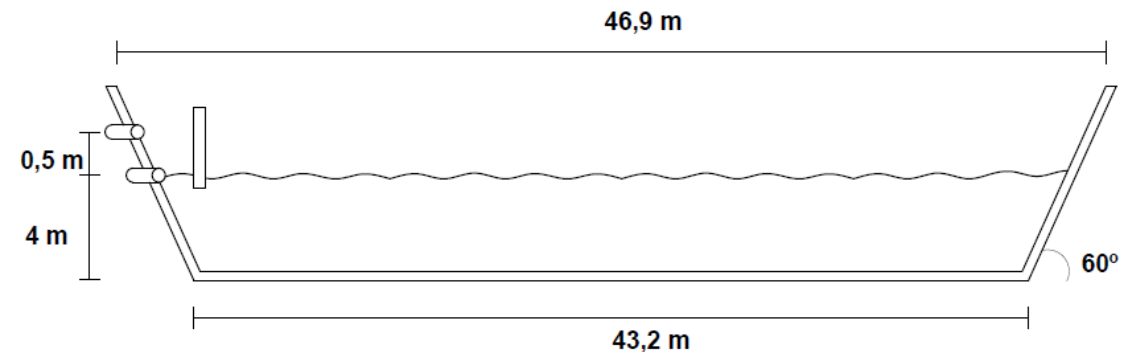
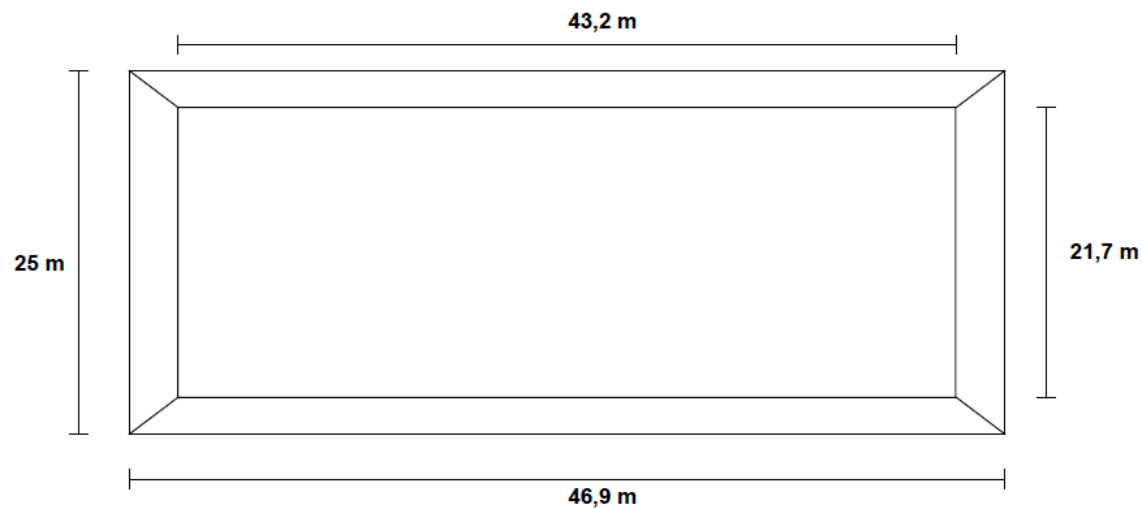
DQO	274 mg/l
DBO ₅	223 mg/l
SS	162 mg/l

LAGUNAS ANAEROBIAS

DISEÑO

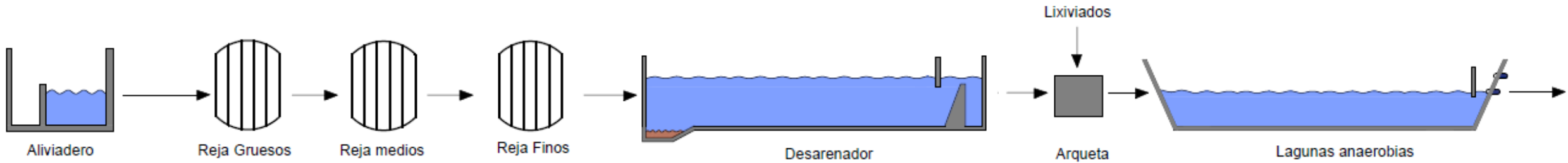
PARÁMETROS DE DISEÑO	
Tiempo de retención	3 d
Carga volumétrica	180 gDBO ₅ /m ³ /d
Profundidad	4 m
DBO ₅	246 mg/l
Caudal diseño	4.170 m ³ /d

DIMENSIONAMIENTO		
	ORDINARIO	LIMPIEZA
Unidades	3	2
Profundidad	4 m	4,5 m
Tiempo de retención	3,0 d	2,3 d
Carga volumétrica	82,2 gDBO ₅ /m ³ /d	108,3 gDBO ₅ /m ³ /d



LAGUNAS ANAEROBIAS

RENDIMIENTO DE ELIMINACIÓN



ENTRADA

DQO	302 mg/l
DBO ₅	246 mg/l
SS	179 mg/l

DQO	60%
DBO ₅	80%
SS	80%

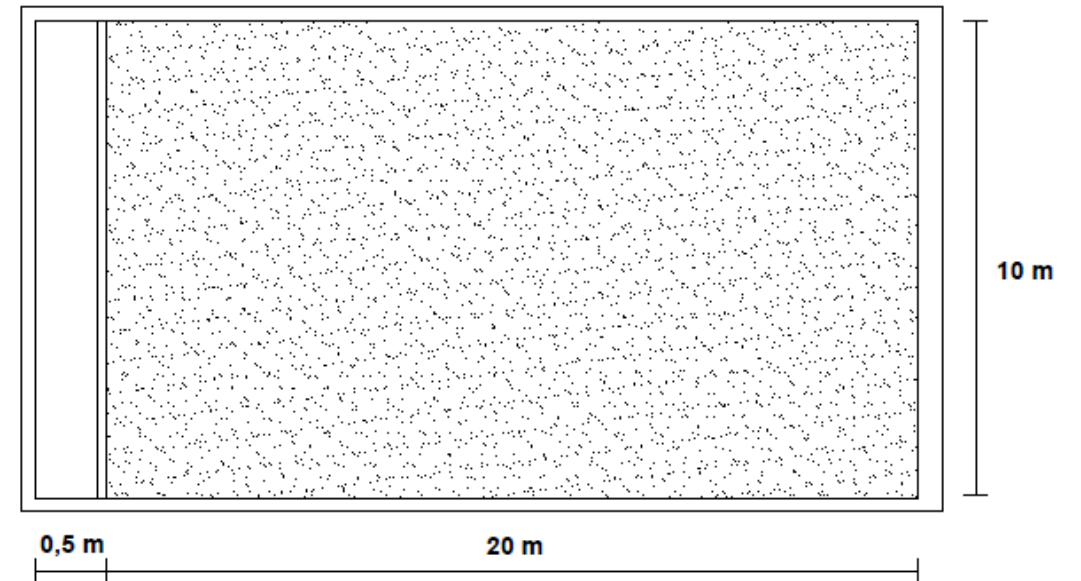
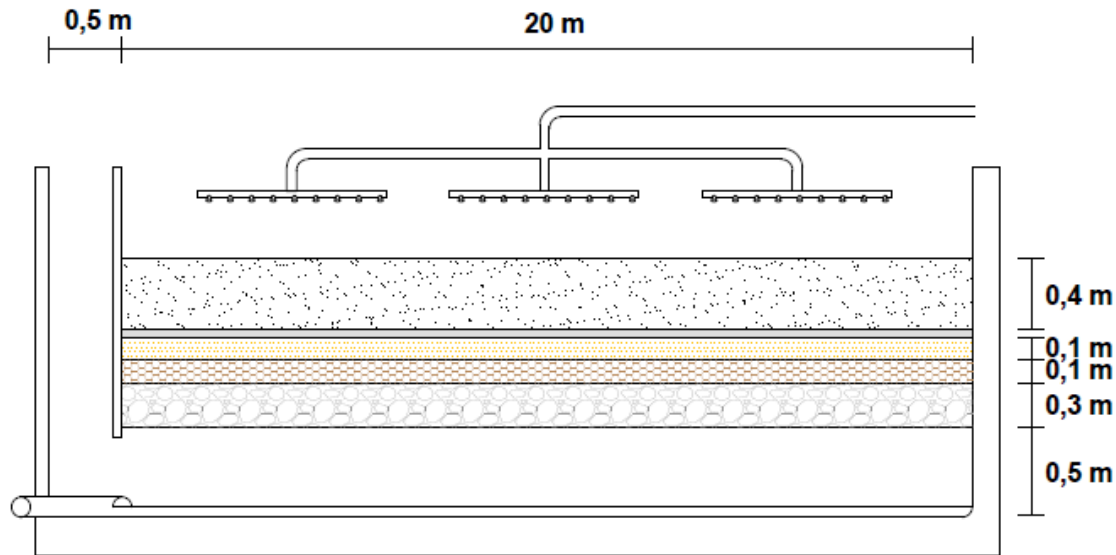
SALIDA

DQO	121 mg/l
DBO ₅	98 mg/l
SS	36 mg/l

LECHOS DE TURBA

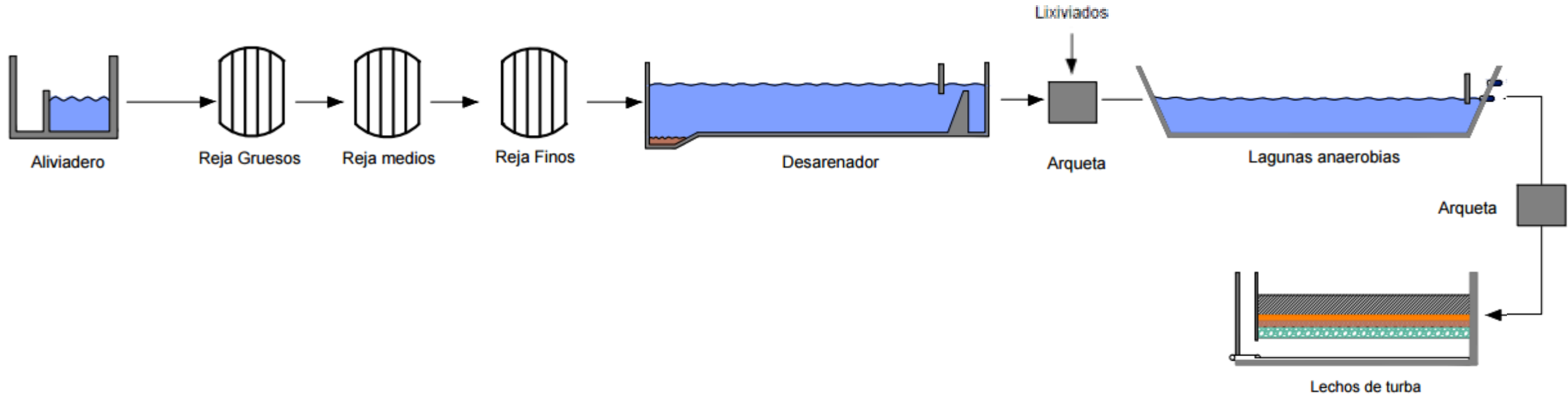
DISEÑO

PARAMETROS DE DISEÑO	
Tipo de turba	clara
Percolación	65 l/h/m ²
Carga hidráulica	1,5 m/d
Carga orgánica	0,5 kg DBO ₅ /m ² /d
Carga de solidos	0,5 Kg ss/m ² /d
Reserva labores limpieza	30%



LECHOS DE TURBA

RENDIMIENTO DE ELIMINACIÓN



ENTRADA

DQO	121 mg/l
DBO ₅	98 mg/l
SS	36 mg/l
CF	10 ⁶ UFC/100 ml

DQO	80%
DBO ₅	85%
SS	95%
CF	80%

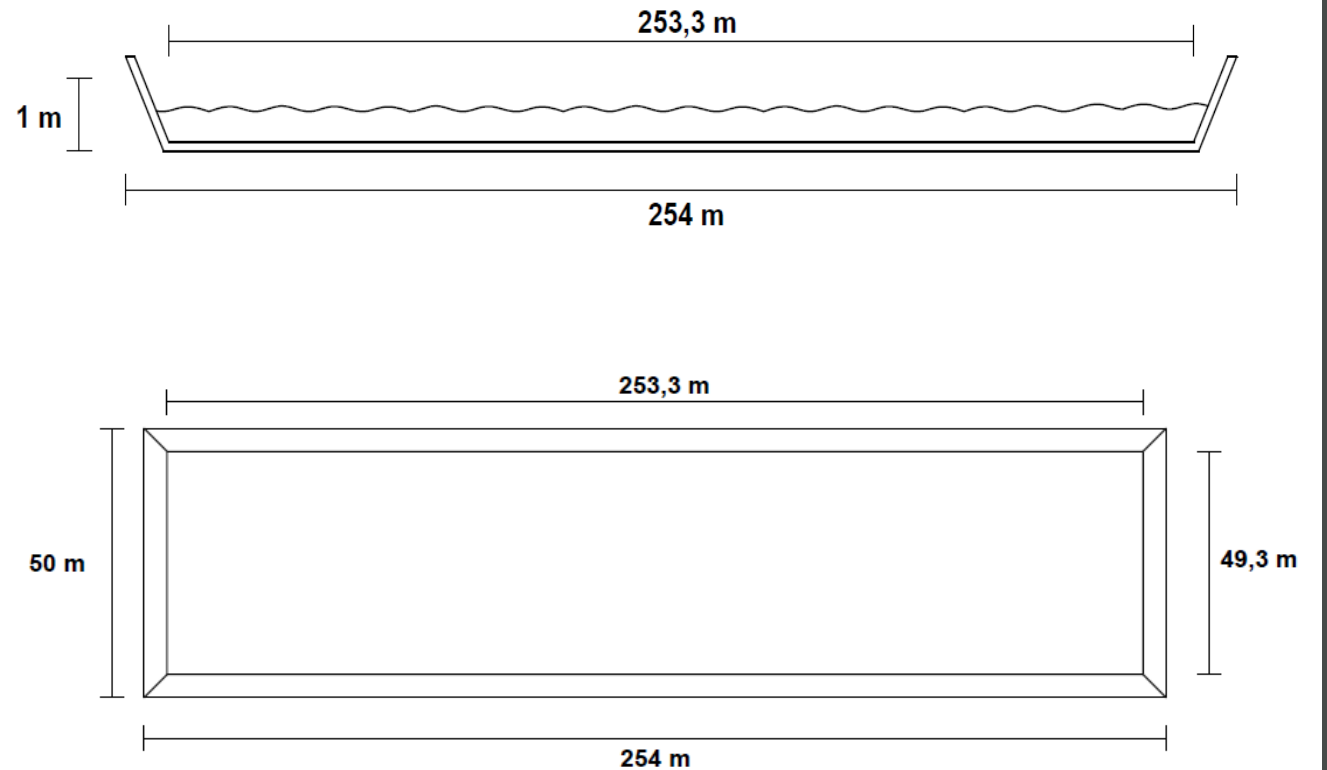
SALIDA

DQO	24 mg/l
DBO ₅	15 mg/l
SS	2 mg/l
CF	2.10 ⁵ UFC/100 ml

LAGUNA DE MADURACIÓN

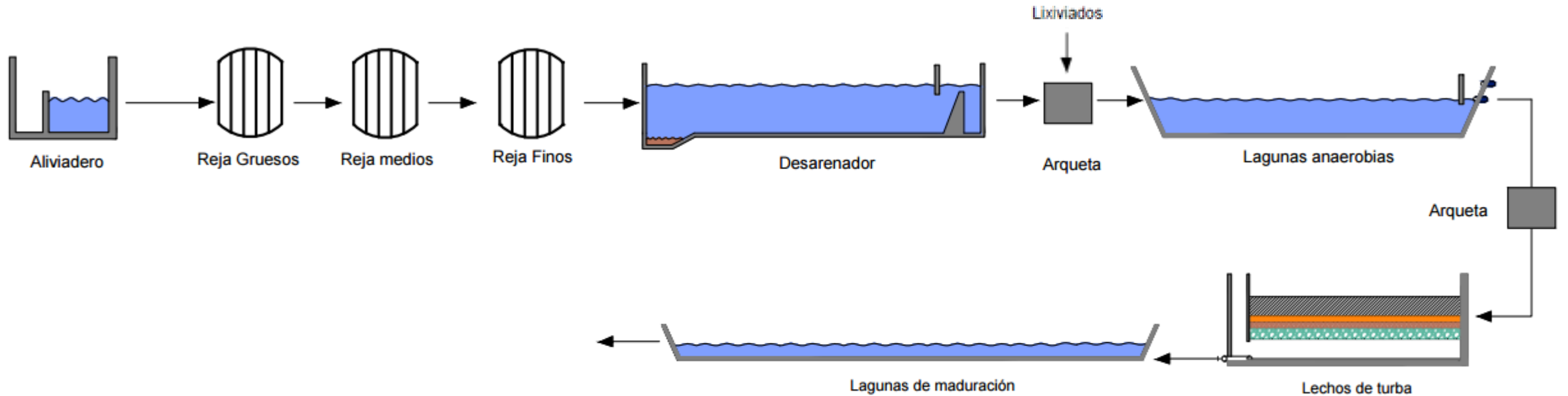
DISEÑO

PARÁMETROS	VALORES SELECCIONADOS
Tiempo de retención	3 d
Temperatura del agua	22 °C
Profundidad	1 m
Funcionamiento	En serie
Constante de velocidad	2,6 d ⁻¹
Coefficiente de T ^a (φ)	1,19
Constante cinética eliminación de coliformes	1,84



LAGUNA DE MADURACIÓN

RENDIMIENTO DE ELIMINACIÓN



ENTRADA

DQO	24 mg/l
DBO ₅	15 mg/l
SS	2 mg/l
CF	2.10 ⁵ UFC/100 ml

DQO	65%
DBO ₅	65%
SS	45%
CF	99%

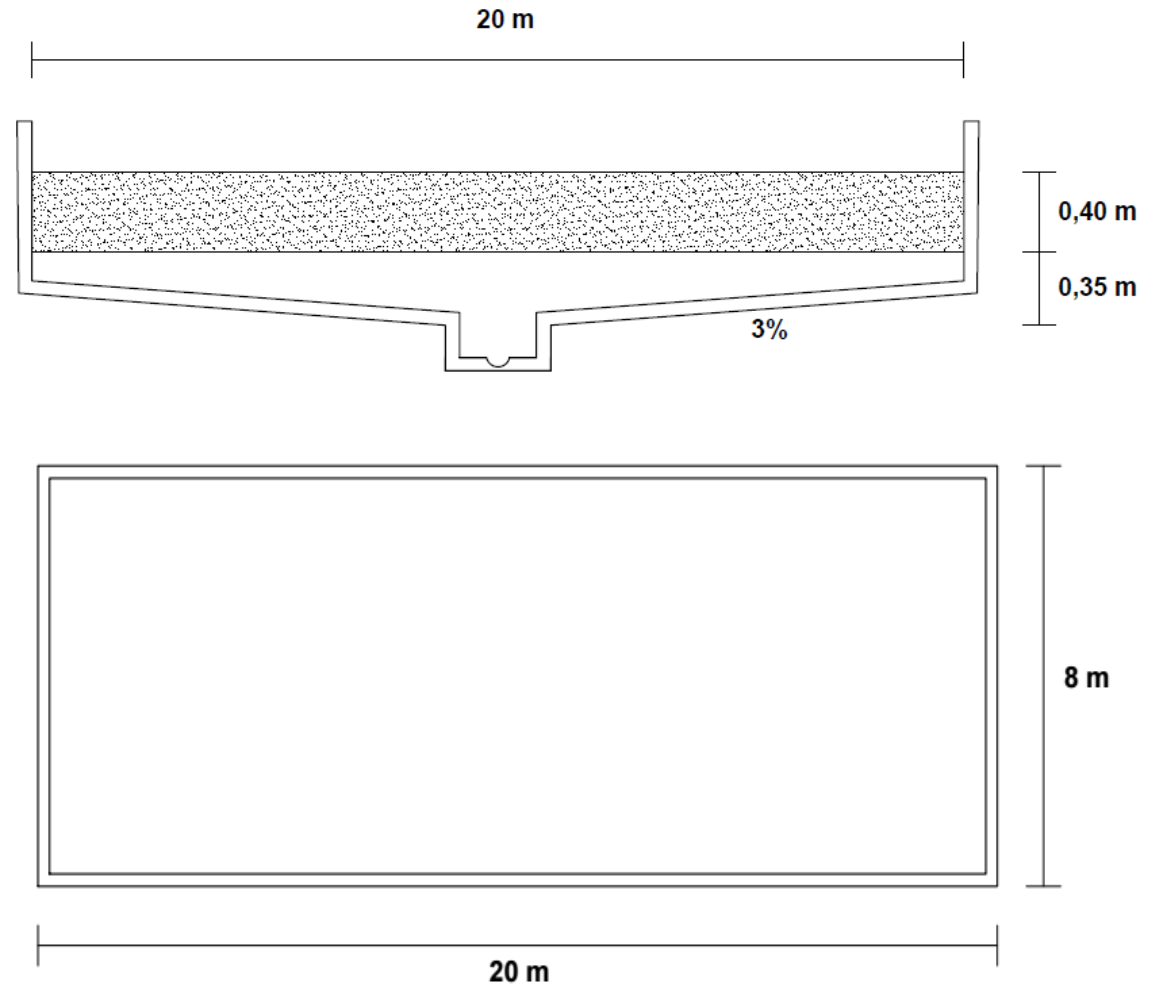
SALIDA

DQO	9 mg/l
DBO ₅	5 mg/l
SS	1 mg/l
CF	1,4.10 ³ UFC/100 ml

ERAS DE SECADO

DISEÑO

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	
Fangos de lagunas anaerobias	1.100 m ³ /ciclo
Concentración fangos	1%
Nº eras	17
Espesor capa fangos	40 cm
Resguardo sobre la arena	60 cm
Granulometría arenas	0,2 - 0,8 mm
Coefficiente uniformidad arenas	< 4
Concentración fangos secos	80%
Tiempo necesario para secado	7 d



ERAS DE SECADO

RECIRCULACIÓN

CAUDAL DE LIXIVIADOS	
Velocidad de drenaje 8 primeras horas	4 l/h/m ²
Velocidad de drenaje resto del tiempo	1 l/h/m ²
Superficie máx llenada cada día	210 m ²
Superficie máx funcionando a 4 l/h/m ²	210 m ²
Superficie máx funcionando a 1 l/h/m ²	1.051 m ²
Caudal máximo de lixiviados	1,9 m ³ /h

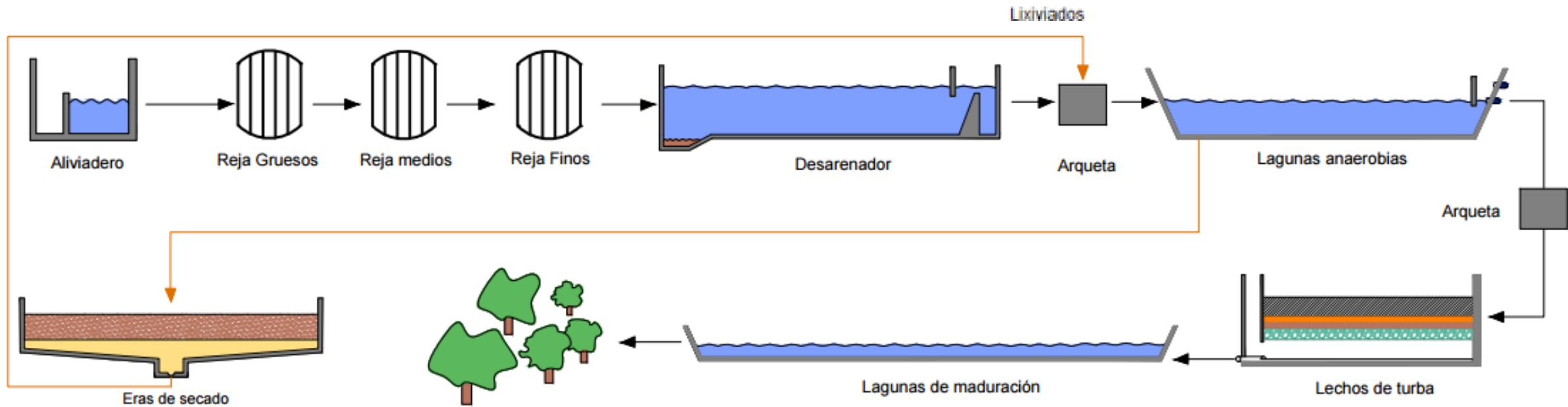
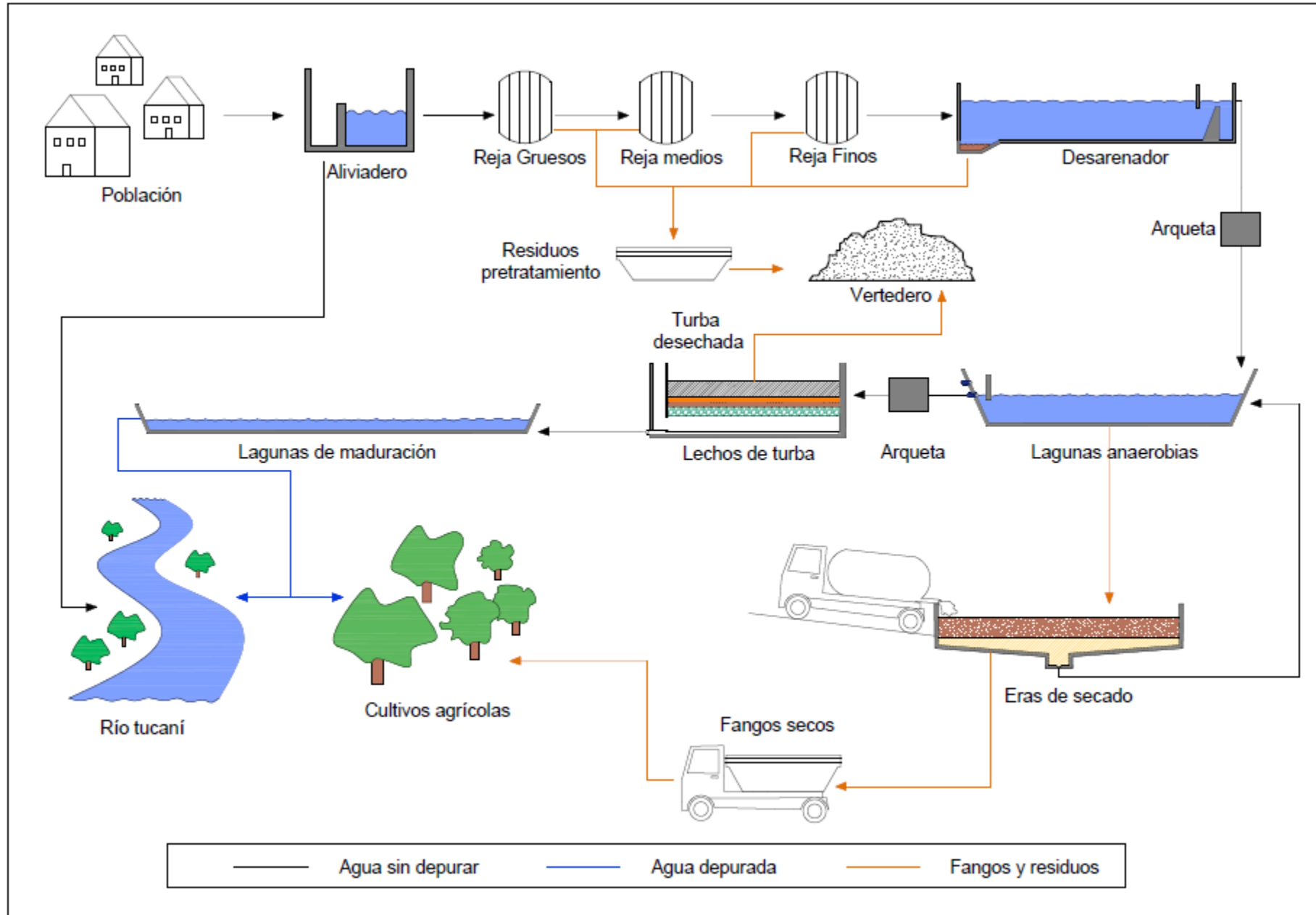


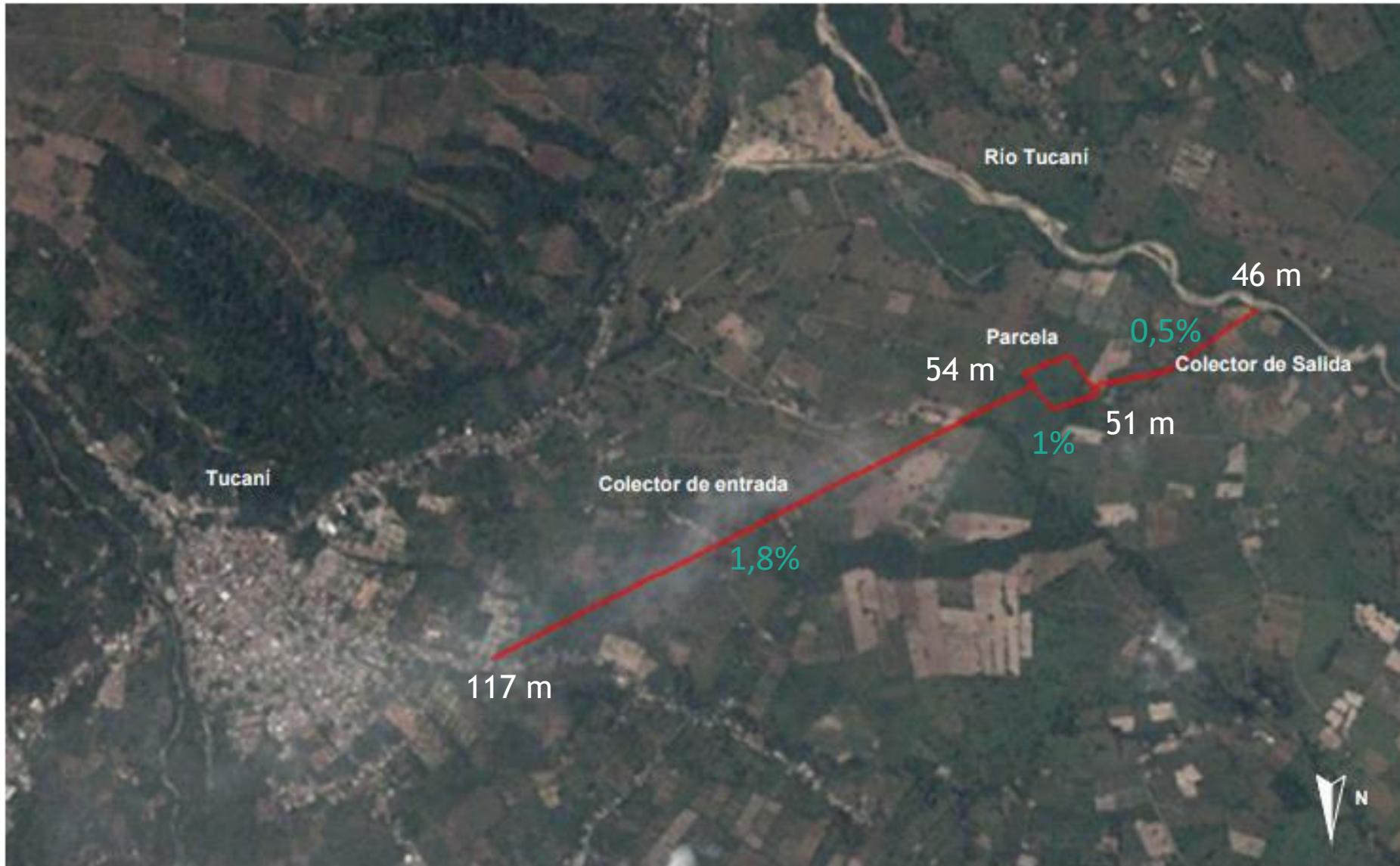
DIAGRAMA DE FLUJO



CONSTRUCCIÓN, PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN



TOPOGRAFÍA



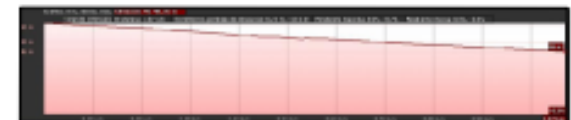
Perfil longitudinal colector de entrada



Perfil longitudinal parcela de la planta

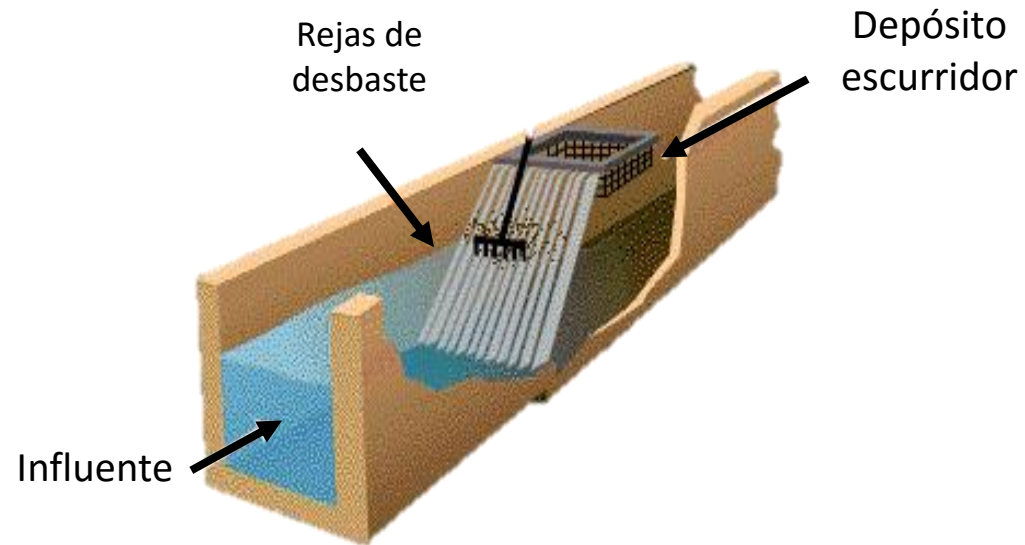


Perfil longitudinal colector de salida



OBRA DE LLEGADA Y PRETRATAMIENTO

CONSTRUCCIÓN, PUESTA EN MARCHA Y MANTENIMIENTO



Generación residuos 770 kg/d



Generación residuos 20 m³/d

LAGUNAS ANAEROBIAS Y DE MADURACIÓN

CONSTRUCCIÓN, PUESTA EN MARCHA Y MANTENIMIENTO



Desbroce



**Excavación y
movimiento de tierras**



Terraplenado



**Impermeabilización
de fondo y taludes**

Remoción de
materia
flotante

Control de
vegetación
acuática

Mantenimiento
de taludes

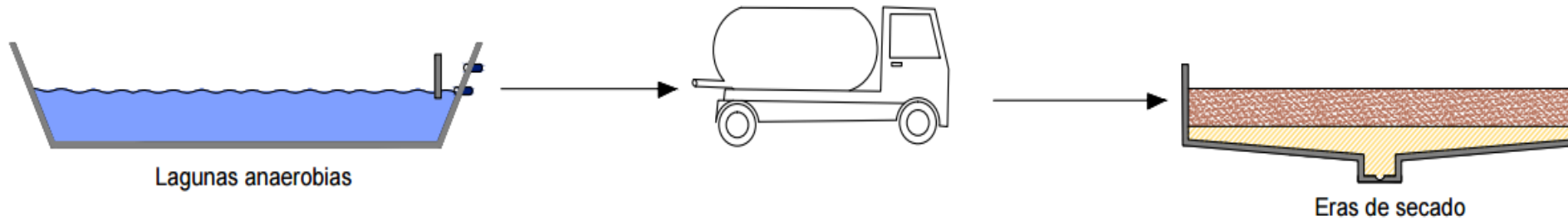
Nivel de agua

Control
Biológico

Limpieza de
estructuras

REMOCIÓN DE FANGOS

CONSTRUCCIÓN, PUESTA EN MARCHA Y MANTENIMIENTO

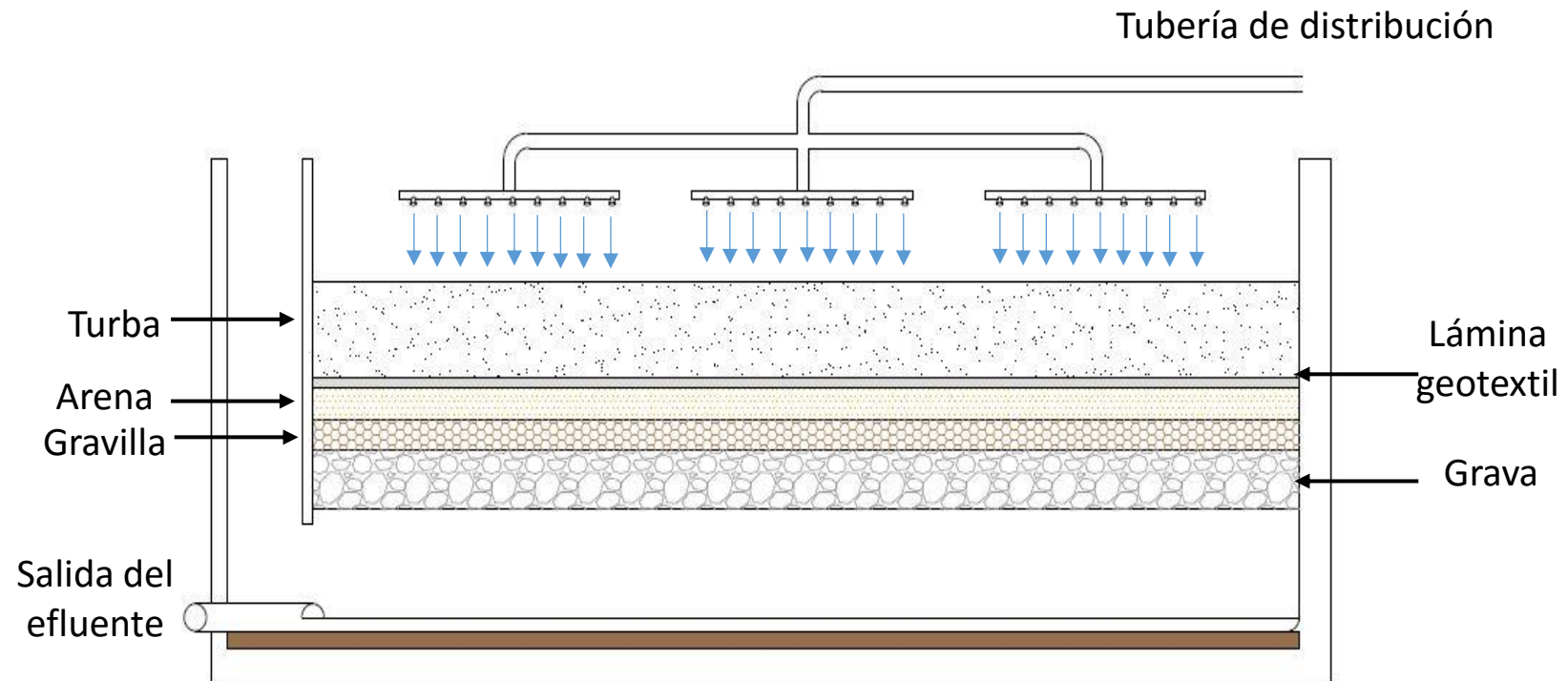


DETALLES OPERACIÓN DE LIMPIEZA	
Capacidad camión	20 m ³
Nº de viajes	55
Caudal de la chupona	1.000 m ³ /h
Caudal de vaciado	215 l/min
Tiempo de llenado	1,2 min
Tiempo de vaciado	93 min
Tiempo recorrido entre lagunas y eras de secado	10 min
Tiempo neto ciclo de limpieza	105 h
Tiempo real ciclo de limpieza	13 d hábiles
Tiempo real ciclo de limpieza	18,3 d naturales

LECHOS DE TURBA

CONSTRUCCIÓN, PUESTA EN MARCHA Y MANTENIMIENTO

Volumen unitario turba	80 m ³
Volumen unitario arena fina	20 m ³
Volumen unitario turba	20 m ³
Volumen unitario turba	60 m ³



ERAS DE SECADO

CONSTRUCCIÓN, PUESTA EN MARCHA Y MANTENIMIENTO



Desbroce



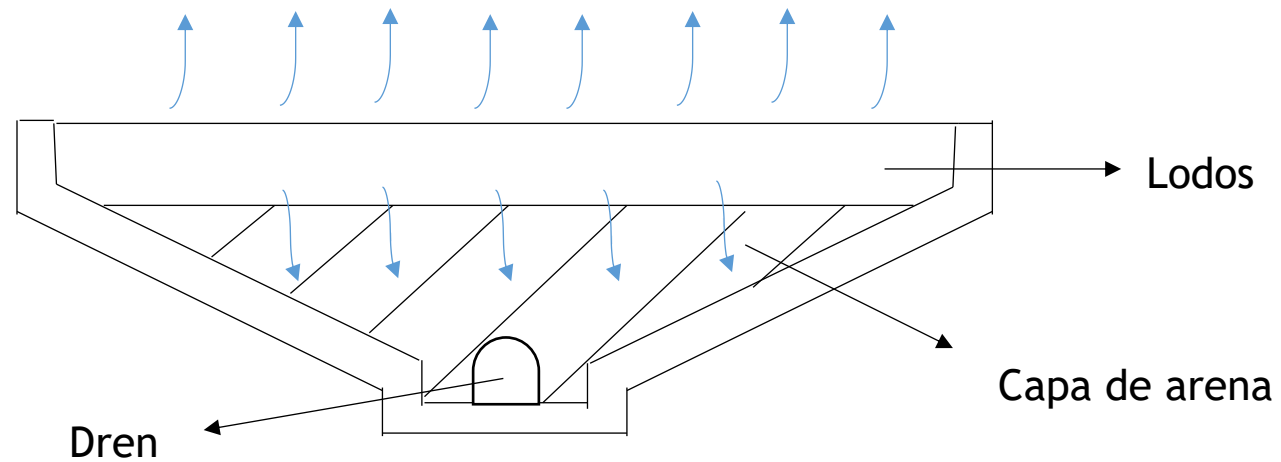
**Excavación y
movimiento de tierras**



Terraplenado



Hormigonado



REUTILIZACIÓN



REUTILIZACIÓN



Agua para riego



Fangos en agricultura

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL



IMPACTO AMBIENTAL



Social



Hidrológico



Atmosférico



Biodiversidad



Suelo



Paisaje



Infraestructuras

ANÁLISIS ECONÓMICO



CAPEX

Terreno	36.000,00 €
Obra de llegada	412.547,48 €
Desbaste	7.765,79 €
Desarenado.....	5.474,38 €
Laguna anaerobia	266.980,63 €
Lecho de turba	239.910,11 €
Laguna maduración.....	742.658,47 €
Eras de secado.....	173.448,83 €
Cerramiento	19.839,95 €
Gastos generales (6%)	102.693,17 €
Beneficio industrial (10%)	171.155,285 €
Total	2.178.474,10€

OPEX

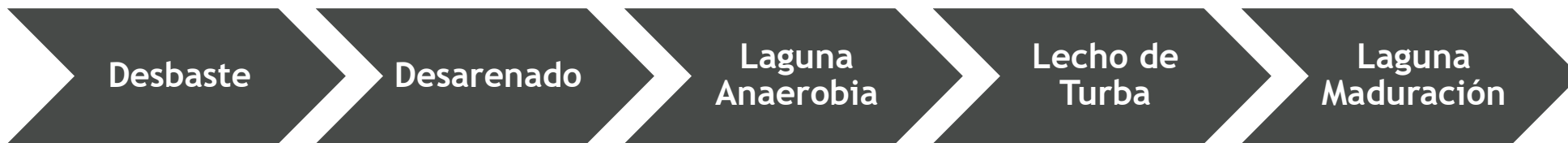
Materiales	17.950,35 €/año
Maquinaria	15.620 €/año
Personal	13.620 €/año
Mantenimiento	503,88 €/año
Gastos varios.....	14.308,27 €/año
Total	62.002,51 €/año

COSTE FINAL DE DEPURACIÓN..... 0,04 €/m³

CONCLUSIONES



1



2

Reutilización de agua y fango

3

Mejores técnicas disponibles y materiales inocuos

4

Impacto Ambiental Positivo

5

CAPEX	2.178.474 €
OPEX	62.002 €/año
COSTE FINAL DE DEPURACIÓN	0,04 €/m³

MUCHAS
GRACIAS

