

# DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO NO CONVENCIONAL DE DEPURACIÓN EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO

Implantación de un sistema combinado de  
lagunaje con lecho de turba



MASTER EN INGENIERIA Y GESTION DEL MEDIO AMBIENTE

Tutor del Proyecto: Jaime La Iglesia.

*Jose Luis Fernandez Castro.  
María Ontoso González.  
César García Carballés.  
Sandra González Díaz.*

## INDICE

1. INTRODUCCIÓN.
2. OBJETIVO DEL PROYECTO.
3. ESTUDIO DEL MEDIO FÍSICO.
  - 3.1.LOCALIZACIÓN.
  - 3.2.FISIOGRAFÍA.
  - 3.3.CLIMATOLOGÍA.
  - 3.4.HIDROLOGÍA.
  - 3.5.AREAS PROTEGIDAS.
  - 3.6.FLORA SILVESTRE.
  - 3.7.FAUNA SILVESTRE.
  - 3.8.ACTIVIDAD ECONÓMICA.
4. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.
  - 4.1.CONCLUSIÓN.
5. DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO NO CONVENCIONAL DE DEPURACIÓN.
  - 5.1.DATOS DE DISEÑO.
  - 5.2.PRE-TRATAMIENTO
    - 5.2.1.OBJETIVO Y FUNDAMENTO.
    - 5.2.2.BASE DEL DISEÑO.
    - 5.2.3. CÁLCULO DE PARÁMETROS.
    - 5.2.4.ACTIVIDADES DE LIMPIEZA Y MANTENIMIENTO.
  - 5.3.LAGUNA ANAEROBIA
    - 5.3.1.OBJETIVO Y FUNDAMENTO.
    - 5.3.2.BASE DEL DISEÑO
    - 5.3.3.CÁLCULO DE PARÁMETROS
  - 5.4.TRATAMIENTO DE FANGOS.
    - 5.4.1.OBJETIVO Y FUNDAMENTO.
    - 5.4.2.BASE DEL DISEÑO.
    - 5.4.3.CÁLCULO DE PARÁMETROS.

- 5.5. LECHOS DE TURBA
  - 5.5.1. OBJETIVO Y FUNDAMENTO.
  - 5.5.2. BASES DEL DISEÑO.
  - 5.5.3. CÁLCULO DE PARÁMETROS.
  - 5.5.4. ACTIVIDADES DE LIMPIEZA Y MANTENIMIENTO
- 5.6. LAGUNA DE MADURACIÓN.
  - 5.6.1. OBJETIVO Y FUNDAMENTO.
  - 5.6.2. BASES DEL DISEÑO.
  - 5.6.3. CÁLCULO DE PARÁMETROS.
  - 5.6.4. ACTIVIDADES DE LIMPIEZA Y MANTENIMIENTO
- 6. ACTIVIDADES PREVIAS A LA IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA DE DEPURACIÓN.
- 7. ANEXOS.
- 8. BIBLIOGRAFÍA.

## 1.-INTRODUCCIÓN

El recurso agua está cada vez más en peligro, y más que nunca en el centro de atención. El agua es escasa pero fundamental para los seres vivos y la actividad de cualquier región, y más cuando nos situamos en el contexto de países en vías de desarrollo, dónde aparte de la escasez del mismo, nos enfrentamos a problemas como la falta de infraestructuras básicas para su consumo o depuración. Por ello, la gestión del agua se hace necesaria, pretendiendo con ello su conservación, la mejora en su calidad y su posible reutilización. Para conseguir este propósito, se hace necesario optimizar su uso y consumo, almacenándola y depurándola después de su uso para darle posibles aplicaciones posteriores.

La gestión del agua debe abarcar todo su ciclo, pero de todas las medidas protectoras quizá sea la depuración la más importante porque nos permite dar nuevos usos a volúmenes importantes de agua, impidiendo además el deterioro ambiental de los cauces de los ríos y del entorno natural.

## 2.-OBJETIVO DEL PROYECTO

La finalidad de este proyecto es la depuración de las aguas residuales de la ciudad Totorá, situada en el Altiplano Boliviano que actualmente no siguen ningún tratamiento de depuración de aguas. La depuración se hará mediante el diseño de un sistema de tratamiento no convencional, ya que tras analizar todos los parámetros, tanto de las aguas residuales como del propio entorno donde se ubica la ciudad, se ha concluido que este tratamiento, permite alcanzar los objetivos marcados por la legislación(Directiva Europea 91/271) en el vertido al cauce fluvial con un menor coste para la población, y se asegura una mayor sostenibilidad de las instalaciones, que si lo comparamos con los métodos convencionales de depuración usados masivamente en todas las grandes ciudades del mundo.

Esta actuación sobre las aguas posibilita a su vez la utilización de estas para posteriores usos como pudiera ser un filtro verde, usos piscícolas, agua de riego o su vertido directo al cauce fluvial en última instancia, con lo que se conseguiría no solo una mejora ambiental sino una implementación en el desarrollo socio-económico local.

Para la planificación y ejecución de este proyecto de depuración de aguas residuales por métodos no convencionales se partirá con la premisa de que dicho proyecto es realizado por una empresa española del sector que pretende hacerse con la concesión en el tratamiento y depuración de las aguas residuales de la ciudad de Totorá.

Por ello se acuerda que el marco legal de aplicación para la calidad de las aguas que salgan de la estación depuradora deberá cumplir los parámetros que están establecidos en la legislación española que fueron transpuestos de la Directiva Europea 271/91/CE, al considerarse la legislación propia del país demasiado laxa a criterio de la empresa.

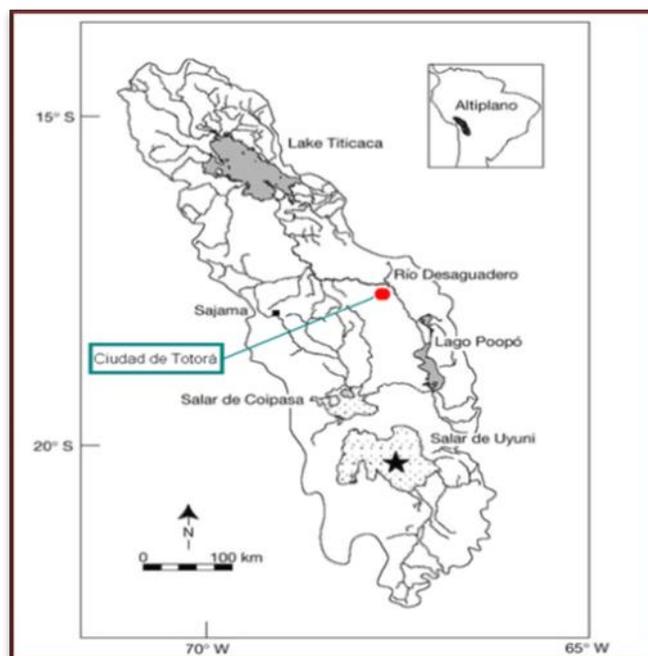
Este hecho condicionará todo el dimensionamiento posterior de la planta, de manera que se permitan alcanzar los rendimientos manteniendo adecuados y económicamente viables que garanticen el cumplimiento de dichos niveles de contaminación en el efluente de la depuradora

## 3. ESTUDIO DEL MEDIO FÍSICO

### 3.1 LOCALIZACIÓN

La zona elegida para el Proyecto, es la ciudad de Totorá, provincia de San Pedro Totorá, en el Departamento de Oruro en el Altiplano boliviano, planicie extensa y desértica, a una altura aproximada de 3750 metros sobre el nivel del mar.

Es una ciudad encajonada entre dos cordilleras, la cordillera Occidental que representa el límite entre Chile y Bolivia, y la cordillera Oriental.



Mapa I.- Localización de la ciudad de Totorá en el marco del altiplano Boliviano.

### 3.2 FISIOGRAFÍA

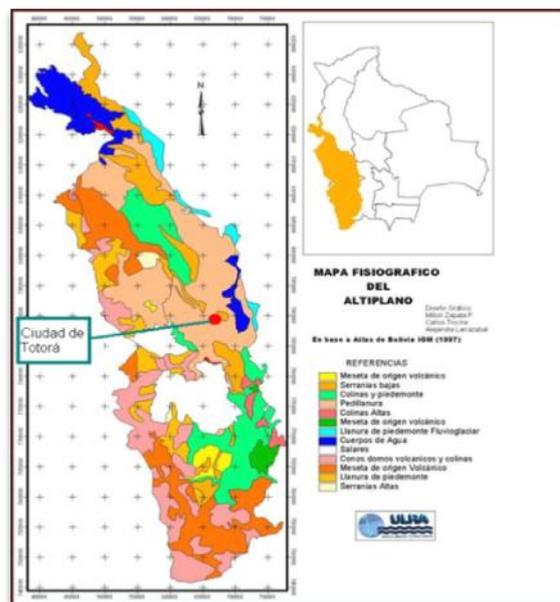
El Altiplano constituye 154.000 km<sup>2</sup> del territorio boliviano, es decir aproximadamente 14%. Es una gran peri-planicie, situada en medio de las cordilleras Occidental y Oriental, y está caracterizada por alargadas serranías inter altiplánicas.

La planicie del Altiplano está cubierta con sedimentos de lagos desaparecidos (Ballivián, Minchín, Tauca), o parcialmente desecados (Titicaca y Poopó) y restos de los grandes salares de Uyuni y Coipasa. El Altiplano Boliviano puede dividirse en una parte semi-húmeda en el norte, y el Altiplano árido y semiárido al sur. Generalmente, se distingue las 3 sub unidades:

- Altiplano Norte.
- Altiplano Sur.
- Las serranías inter-altiplánicas.

De estas tres subunidades, son las serranías, dónde se ubica Totorá.

Totorá se sitúa entre la unidad fisiográfica denominada Pedillanura y la llanura piedemonte. Es una zona de gran extensión árida y seca.



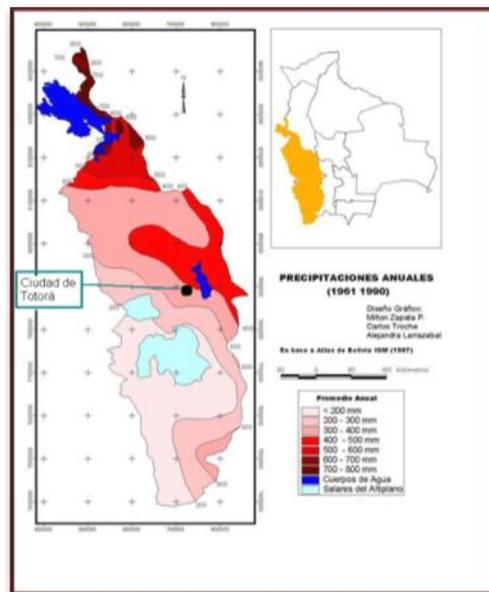
Mapa II.-Fisiografía de la región del altiplano donde se ubica Totorá

### 3.3 CLIMATOLOGÍA

Presenta una marcada estacionalidad, una de ellas coincide con el período máximo de lluvias que es el verano, dónde un total del 60 a 80% de las precipitaciones se presenta durante los cuatro meses más lluviosos de diciembre a marzo. La otra estación, más seca se corresponde con el invierno.

Las condiciones climáticas que caracterizan esta zona son extremas. Totorá se corresponde con un clima semiárido. Las condiciones climáticas dependen de la latitud, altitud, de la presencia de zonas planas, la circulación del aire y el fenómeno El Niño. La altura determina que no exista un clima tropical, como se esperaría en esta latitud, sino más bien un clima frío y seco. Además de las sequías prolongadas, las granizadas pueden ocasionar daños considerables en la agricultura.

La variabilidad interanual que presenta Totorá ronda en torno los 350mm, que se corresponde con la estación de menos lluvias o invierno, y los 500mm alcanzados en verano.



Mapa III.- Mapa climatológico de la región del altiplano.

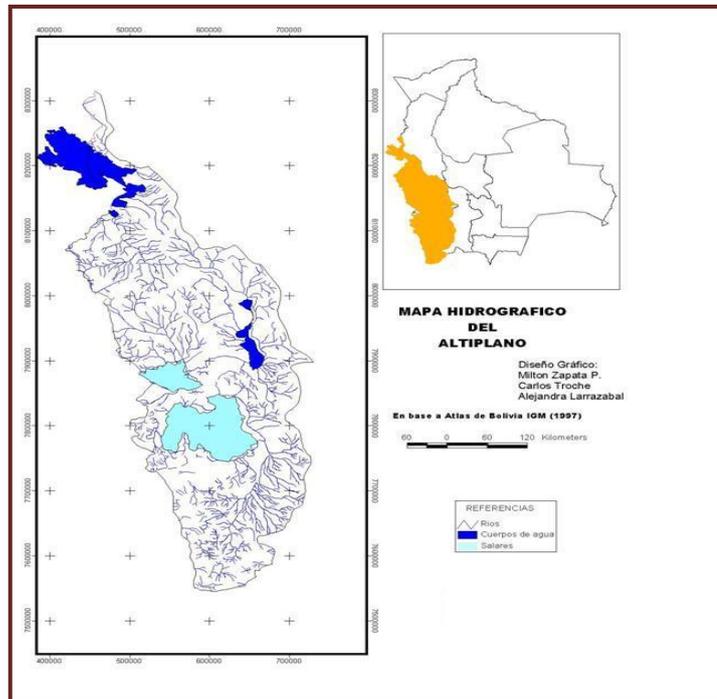
### 3.4 HIDROLOGÍA

La ciudad de Totorá está ubicada directamente en la cuenca del río Desaguadero.

El río Desaguadero comienza en el lago Titicaca (lago Menor) y después de un recorrido de 383 km desemboca en los lagos Uru Uru y Poopó, con una diferencia en altura de 124 m y una pendiente media de 0.03%. El río lleva un promedio de 20 m<sup>3</sup>/s de las aguas del lago Titicaca hacia el lago Poopó, y forma varias sub-cuencas al atravesar el altiplano norte y parte de las serranías inter-altiplánicas. El área de drenaje del río Desaguadero, hasta donde se junta con el río Mauri, tiene una extensión de 9000 km<sup>2</sup>. El río Mauri es el principal afluente del Desaguadero. En la época de estiaje alcanza un caudal de 5 m<sup>3</sup>/s.

Al inicio, los ríos tienen mayor pendiente, pero ya en el Altiplano, las pendientes son muy bajas. El tipo de valle, de fondo plano, corresponde a la condición fisiográfica de la zona. El sustrato de estos ríos es arenoso.

El pH del agua de los ríos es mayor a 7.8 (alcalina), típico para ríos de climas xéricos. La conductividad muestra valores altos hasta muy altos (entre 435 y 2512  $\square$  S/cm), igual que en la zona volcánica de la cordillera oriental. En los ríos se encuentran aguas con elevadas concentraciones de casi todos los iones, y se distinguen particularmente por las concentraciones relativamente importantes de potasio.



Mapa IV.- Mapa hidrográfico de la región

### 3.5 AREAS PROTEGIDAS

El conjunto de áreas protegidas próximas a nuestra zona de estudio, albergan una muestra representativa de la biodiversidad del altiplano. Las áreas protegidas situadas próximas a Tororá, en el Departamento de Oruro son:

- **El Parque Nacional Sajama (superficie 100 230 ha).** Se encuentra en el sudoeste del departamento de Oruro, a una altitud de 4200 a 6542 msnm. En la frontera con Chile colinda con el Parque Nacional Lauca. El parque es representativo de la cordillera occidental, incluyendo pajonales alto-andinos altiplánicos (tholar), vegas y bofedales altoandinos, bosque microfoliado y pulvinales de yareta Azorella compacta. En los bofedales destacan grandes pulvínolos de *Distichia muscoides*, *Plantago tubulosa* y

Oxycloen andina. La ubicación hidrográfica corresponde a la cuenca del Salar de Coipasa. Tiene como río importante el río Sajama. Entre los animales que dependen de los bofedales, se destaca la vicuña (*Vicugna vicugna*).

- **La Reserva de Vida Silvestre Huancaroma (11000 ha).** Se encuentra en el norte del Departamento de Oruro, entre 3 720 y 3 802 msnm. Está ubicada en el norte de la extensa planicie altiplánica con suelos arenosos y arcillosos. Forma parte de la cuenca del Lago Poopó-Desaguadero. La vegetación está conformada por una pradera alto-andina. Una de sus especies más importantes la vicuña (*Vicugna vicugna*).
- **El Santuario de Vida Silvestre Flavio Machicado Vizcarra (37 ha).** Pertenece a la cuenca del río Desaguadero. Una parte del Parque Nacional de Tuni Condoriri (30 000 ha) forma parte de la cuenca del lago Titicaca. Estas áreas protegidas contienen algunos componentes faunísticos altiplánicos.

### 3.6 FLORA SILVESTRE

Generalmente, la vegetación local se caracteriza por un número reducido de especies, bajos valores de cobertura, y abundancia relativa de especies xerófitas, que toleran condiciones prolongadas de sequía. La vegetación de la cuenca del Desaguadero se caracteriza por una cubierta de gramíneas duras (*Stipa ichu*, *Festuca spp.*) y arbustos resinosos de bajo porte (*Baccharis incarum*, *Baccharis boliviensis* y *Parastrephia lepidophylla*), formando matorrales de “thola”. Las serranías presentan numerosos microclimas rocosos donde se encuentran especies como *Satureja boliviensis*, *Calceolaria spp.*, *Mutisia ledifolia*, *Senecio spp.*, *Senna aumara*, *Ephedra americana*. Las especies de árboles que se observan en ciertos microclimas del altiplano son la kishuara (*Buddleja coriacea*) y la keñua (*Polylepis spp.*).

La vegetación acuática característica y predominante en la zona de estudio son los Totorales (vegetación acuática de zonas someras) y los Bofedales (Vegetación altiplánica de escasa altura que crecen en humedales, en suelos embebidos en agua. Recurso especialmente útil para la crianza de ganado).

Los totorales (*Schoenoplectus tatora*) son característicos para lagos (Titicaca, Poopó y Uru Uru) así como para el río desaguadero.

Los bofedales, se constituyen en la base de la ganadería, especialmente de camélidos (alpaca). Están inundados permanentemente, y los suelos de los bofedales son de características hidromórficas con alta acumulación de materia orgánica y humus. Las aguas de los bofedales son generalmente de buena calidad proveniente de manantiales o derivada de ríos. Es importante notar que la productividad de los bofedales está sujeta a la disponibilidad del recurso hídrico permanente, y como tal uno de los problemas más relevantes son las sequías que constantemente afectan la zona y los períodos de estiaje anuales.



Las condiciones sociales y económicas de la población asentada en la región son precarias. Las ineficientes estructuras de producción han limitado aumentos significativos en oportunidades de empleo y en los ingresos de los pequeños agricultores y ganaderos. Dos de las causas son la parcelación de la tierra y los movimientos migratorios campo-ciudad.

El uso del agua derivado de la actividad económica se resume en:

- **Agua potable y uso doméstico:** se establece la existencia de abastecimiento de agua.
- **Irrigación:** la mayoría de las tierras regadas están ubicadas en las regiones áridas y semiáridas, donde hay un déficit de agua durante el período agrícola.

Los usos del agua y el incremento de la demanda de agua generan conflictos entre los usuarios. Muchos de los conflictos sobre el uso de agua surgen por la intrusión de actores nuevos, o por la implementación de nuevos proyectos o por el uso de determinados volúmenes de agua.

En algunos casos se hace un doble o un triple uso del agua. En el caso de las aguas residuales urbanas, el único uso que se hace de ellas es con fines de riego para la producción agrícola. En Totorá, el uso de las aguas residuales es indirecto, se refiere al uso del agua de ríos donde se descargan las aguas residuales, una minoría con previo tratamiento y una mayoría no tratadas. Generalmente, los regantes consideran la contaminación del río con aguas residuales como negativo y de gran perjuicio para sus actividades agrícolas.

#### 4.-ESTUDIO DE ALTERNATIVAS Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La ciudad de Totorá, se sitúa en una de las zonas más secas de América Latina. Es por su sequedad, que la gestión correcta del uso del agua, se vuelve indispensable, haciéndose mucho más acusado en zonas rurales y de situación de pobreza extrema, como es este caso.

En resumen a lo expuesto en el análisis del medio físico, la ciudad de Totorá es una pequeña comunidad básicamente rural con casi nula actividad industrial, cuyas aguas residuales poseen altos valores de cargas contaminantes que se vierten directamente al cauce fluvial a través del sistema colector del que dispone la ciudad. Es importante el dato de que no exista prácticamente industria que pueda verter metales pesados u otras sustancias tóxicas para la micro fauna en las aguas residuales, ya que nuestro proceso se cimenta en la actividad de los microorganismos y sería imposible ejecutarlo si hubiera tóxicos en el influente.

Para lograr el objetivo de la eliminación de la carga contaminante de las aguas residuales y cumpliendo con los parámetros exigidos por la legislación (Directiva Europea 91/271), se han estudiado una serie de alternativas, cada una de ellas con sus aspectos positivos y negativos, los cuales analizaremos a continuación para determinar cuál será finalmente la alternativa escogida.

Si bien es cierto, las alternativas posibles para lograr dicho objetivo se encuentran en el marco de los tratamientos no convencionales, ya que tanto, las condiciones climáticas como el tamaño de la población para la cual se estima la construcción de esta instalación es 12500 habitantes equivalentes en el año 2029, permiten la aplicación de dichos tratamientos. El uso de los tratamientos no convencionales, ofrece frente a los convencionales, una solución a las poblaciones como la definida en este proyecto. En el siguiente cuadro se presentan las ventajas e inconvenientes de cada de los dos tipos de tratamientos.

	CONVENCIONALES	NO CONVENCIONALES
<b>Ventajas</b>	Capacidad para tratar grandes poblaciones	Fácil explotación, menos costes.
	Rapidez de los procesos(horas)	Ausencia de elementos electromecánicos.
	Baja necesidad de espacio	Mantenimiento menos técnico.
		Efluente utilizable para regadíos por su alta carga en nutrientes
	Buen rendimiento de los procesos en la eliminación	
<b>Inconvenientes</b>	Ausencia de técnicos necesarios en la zona	Mayor duración de los procesos(días)
	Coste de inversión económica elevados tanto en construcción como en explotación	Alta dependencia climatológica
	Insostenibilidad en el tiempo	

Tabla I.- Ventajas e inconvenientes de los tratamientos convencionales frente a los no convencionales.

Una vez centrados en los tratamientos no convencionales, se analizara cada una de las posibles disposiciones de funcionamiento que se pueden encontrar.

Para hacer más fácil el análisis y la comprensión de cada una de ellas se expondrá una tabla a continuación que explica los distintos componentes de que dispondrá cada alternativa.

<b>ALTERNATIVAS</b>				
<i>Disposiciones en el proceso</i>				
<b>A</b>	Pre tratamiento	Laguna anaerobia	Lecho de turba	Laguna de maduración
<b>B</b>	Pre tratamiento	Laguna anaerobia	Laguna facultativa	Laguna de maduración
<b>C</b>	Pre tratamiento	Laguna facultativa	Laguna maduración	
<b>D</b>	Pre tratamiento	Lecho de turba	Laguna maduración	
<b>E</b>	Pre tratamiento	Laguna anaerobia	Lecho de turba	

F	Pre tratamiento	Laguna anaerobia	Biodiscos	Laguna de maduración
---	-----------------	------------------	-----------	----------------------

Tabla II.- Diferentes disposiciones en el proceso enumeradas de la A a la F

Como se puede observar el proceso de pre-tratamiento es común a todas las diferentes disposiciones, ya que como se explicará en un apartado posterior, es básico para el buen funcionamiento de los sistemas que le siguen, la eliminación de los grandes sólidos en suspensión y aquellos otros componentes que son arrastrados por los colectores hasta estas instalaciones (véase restos de animales muertos, electrodomésticos usados, etc.) los cuales deberán ser tratados como a su naturaleza corresponda fuera de la planta de depuración de aguas.

En cuanto a los demás sistemas, a continuación se realizara un estudio comparativo de las diversas alternativas de la *tabla II*, para concluir con la elección adoptada por el proyecto.

La disposición de los diferentes sistemas de tratamiento de agua de que disponen tanto la alternativa A como la B permiten la posibilidad de tratar gran cantidad de carga contaminante presente en el caudal influente a la estación depuradora y pueden adaptarse a grandes variaciones de caudal, asegurando un alto rendimiento de los procesos de eliminación de DBO<sub>5</sub> y SS así como un bajo grado de mantenimiento de las instalaciones. Esto es así, ya que los sistemas tienen la capacidad de funcionar con un mantenimiento prácticamente nulo durante grandes periodos de tiempo, debido a la simplicidad de las construcciones.

La gran diferencia entre ambos procesos radica principalmente en la disponibilidad de espacio libre para construcción, ya que las lagunas facultativas necesitan de una gran superficie para poder operar, mientras que los lechos de turba pueden hacerlo en dimensiones mucho más reducidas ocupando menos espacio. Además, una cierta ventaja añadida a los lechos de turba frente a las lagunas facultativas es la capacidad de estos de eliminar bacterias de contaminación fecal y evitar totalmente los problemas de olores que pueden asociarse algunas veces cuando existen problemas en las lagunas facultativas.

La alternativa F comparte las virtudes de las dos anteriormente citadas en el marco del rendimiento en la eliminación de DBO<sub>5</sub> y SS, sin embargo los costes de instalación de los biodiscos, así como los de mantenimiento y explotación son mayores. Pero no solo el coste de mantenimiento y explotación es un problema, sino que en el área donde se ha proyectado la estación depuradora no existe personal cualificado para realizar tales operaciones y el importar a un experto o dar formación a la población local dispararía la inversión del proyecto.

Las alternativas C y D carecen de una laguna anaerobia en cabecera del proceso, lo que por un lado, supone una reducción en la inversión económica pero que sin embargo genera graves problemas de colmatación tanto de las lagunas facultativas como de los lechos de turba que reciben las aguas residuales con una gran cantidad de SS y DBO<sub>5</sub>, haciendo disminuir muy considerablemente los rendimientos de tales procesos y aumentando de manera muy importante

las labores de eliminación de lodos, en el caso de las lagunas facultativas, y de rastrillado, eliminación de la capa colmatada y reposición de los lechos de turba.

Esa pérdida de los rendimientos, tanto de los lechos de turba como de las lagunas facultativas, puede obligar a las lagunas de maduración, dispuestas a continuación de ellas, a trabajar fuera de su rango de diseño con cierta cantidad de cargas orgánicas lo que produciría problemas de funcionamiento que impedirían que se eliminasen los patógenos, ya que actuaría como una facultativa más.

La última alternativa tratada es la E, comparte con la A todo lo anteriormente dispuesto pero que al carecer de una laguna de maduración en la cola del proceso no asegura una gran calidad en la eliminación de patógenos, como en nuestro caso requiere este proyecto.

### 4.1.-CONCLUSIÓN

Tras el análisis realizado de las alternativas y con los datos que se han obtenido previamente en el apartado sobre el medio físico, se ha determinado que la alternativa que permite alcanzar los niveles deseados de  $DBO_5$  SS y patógenos en el efluente de la estación, con menores costes, teniendo en cuenta el global de construcción y explotación, es la alternativa A.

Esta alternativa permite adaptarse y trabajar con buenos rendimientos en el proceso durante las situaciones que el medio físico presenta como más limitantes del proceso, que son, la fuerte estacionalidad de las precipitaciones con una época seca en invierno y una húmeda en verano, que obliga a la estación a trabajar con caudales que difieren bastante de una época a la otra. Esto conlleva el consiguiente problema de concentración o excesiva dilución de las cargas contaminantes y de dimensionamiento de los sistemas del proceso.

La ventaja que ofrece la alternativa elegida para ser eficaz en estas condiciones radica en la disposición de la laguna anaerobia en cabecera del proceso, ya que al ser esta laguna de gran capacidad actúa a su vez como tanque homogenizador de los parámetros físico-químicos y biológicos, mediante un reajuste de los tiempos de retención hidráulica de la misma como ya se explicará más adelante cuando se trate a fondo el diseño de la laguna anaerobia, permitiendo que los demás elementos del proceso que se sitúan a continuación, como son los lechos de turba y la laguna de maduración puedan trabajar con las cargas de material contaminante que aseguren el máximo rendimiento para el que fueron diseñados.

Otro aspecto del medio físico que fue limitante para la elección de la alternativa A como la idónea para la ejecución del proyecto, es la limitación de espacio útil que tiene la región.

Más concretamente que carencia de terreno para instalar la estación depuradora, se carecía de un terreno con grandes superficies horizontales, presentando en su mayoría un relieve abrupto. La transformación de dicho terreno para su adecuación para la construcción de lagunas facultativas mediante maquinaria, habría aumentado tanto los costes que habría hecho inviable el proyecto entero. De aquí se infiere la segunda gran ventaja de la alternativa elegida frente a otras alternativas, la elección del lecho de turba como segundo proceso tras la laguna anaerobia en

lugar de lagunas facultativas. Esto hace reducir considerablemente la superficie empleada y con ello el gasto, reservándose solo la pequeña parcela de superficie horizontal para la construcción de la laguna de maduración, que es la que acaba dando al agua efluente la calidad deseada por la empresa.

### 5. -DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO NO CONVENCIONAL DE DEPURACIÓN

#### 5.1- DATOS DE PARTIDA.

Una vez analizados todos los parámetros del medio físico que pueden afectar a este proyecto, se estudiarán en detalle las características del caudal que llegará a la estación de depuración.

Primeramente se comenzará analizando la dotación de agua por habitante de la ciudad de Totorá. Los estudios han mostrado que la dotación utilizada por los habitantes de esta ciudad es de 120 litros de agua por habitante y por día. Esta dotación que puede parecer en un principio muy baja si se comparan con los 250-350l/hab.día que presentan de media el conjunto de las ciudades españolas, tiene su justificación en la naturaleza agrícola propia de la región donde se asienta la ciudad y en el bajo grado de desarrollo de las infraestructuras de canalización de aguas hasta los domicilios, que implican que no todas las viviendas posean agua corriente reduciéndose así drásticamente el consumo de agua por habitante.

Para el dimensionamiento de la planta depuradora es muy importante tener en cuenta que esta a de proyectarse teniendo presente la evolución de la población de la ciudad en el tiempo, ya que de no ser así se podrá quedar rápidamente obsoleta. Por ello, se ha estimado mediante modelos de estimación poblacional, la situación demográfica que presentará esta ciudad en el plazo de 20 años, ya que se considera que para esta fecha las inversiones necesarias para la construcción y puesta en marcha de la instalación habrán sido plenamente rentabilizadas. Pese a que el proceso de depuración por lagunaje se recomienda para poblaciones entre 3.000-10.000 habitantes equivalentes y la población a tratar supera ligeramente esta cifra, no es problema alguno para el funcionamiento de la planta, ya que este ligero aumento en la población se compensa con la reducida dotación de agua que es empleada, haciendo que el dimensionamiento de los procesos de eliminación siga permaneciendo dentro de los márgenes aceptables de aplicación de este tipo de sistemas de depuración.

A continuación se presentarán los datos de evolución demográfica obtenidos para el horizonte 2029, tras la aplicación del modelo matemático de estimación del MOPU (Ministerio de Obras Publicas de España), que es el siguiente:

$$Pa = Pa-10 (1-BETA)^{10}$$
$$Pa = Pa-20 (1-GAMMA)^{20}$$

$$ALFA = \frac{(2 \times BETA + GAMMA)}{3}$$

$$P = Pa(1 + ALFA)^t$$

Tras la aplicación de las fórmulas matemáticas y con los datos de partida de los años 2005, 2006, 2007, 2008 los resultados son los siguientes:

PARÁMETROS DEL MODELO	
<b>BETA</b>	0,002278521
<b>GAMMA</b>	0,00593158
<b>ALFA</b>	0,003496207

Tabla III.-Parámetros utilizados del modelo MOPU para proyección poblacional.

PROYECCIÓN DE LA POBLACION(MODELO MOPU)	
Año	Población
<b>2005</b>	5.236
<b>2006</b>	5.327
<b>2007</b>	5.430
<b>2008</b>	5.555
<b>2009</b>	5.712
<b>2011</b>	5.752
<b>2014</b>	5.813
<b>2017</b>	5.874
<b>2020</b>	5.936
<b>2023</b>	5.998
<b>2026</b>	6.061
<b>2029</b>	6.125

Tabla IV.-Evolución de la población de la ciudad Totorá según modelo del MOPU.

La gráfica de crecimiento poblacional que se obtiene de Totorá, aplicando dicho modelo es la siguiente:

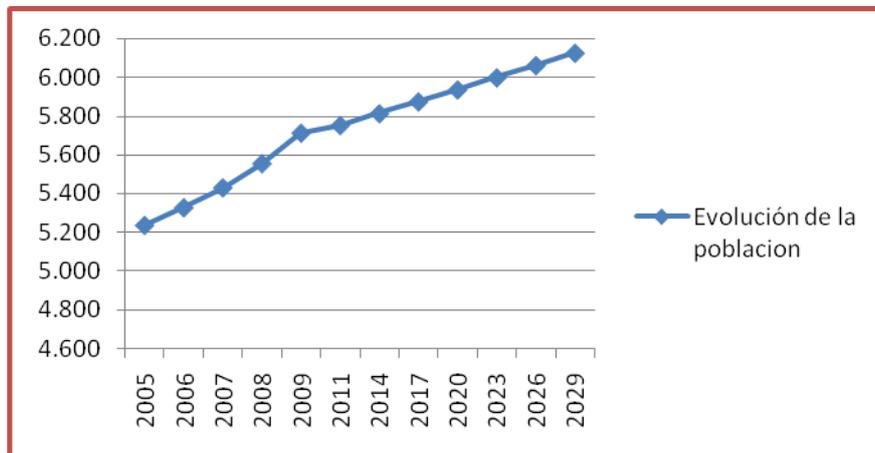


Gráfico I.-Tendencia de crecimiento de la población según el modelo del MOPU

Una vez calculada la población para el 2029, es necesario calcular también la carga contaminante que recibirá la planta depuradora en ese momento.

Para ello primeramente se calcula la cantidad de habitantes equivalentes que corresponden a los 6.125 habitantes. Ello se puede calcular mediante una simple aproximación de que los habitantes equivalentes corresponden al doble de los habitantes de la ciudad.

Así pues tenemos 12250 habitantes equivalentes para el año 2029.

Una vez claros los datos de población equivalente es necesario calcular los caudales que va a recibir la estación de depuración, los cuales están estrechamente relacionados con la población equivalente que se acaba de calcular para el año 2029.

Asumiendo que la ciudad no presenta variaciones demográficas por estacionalidad, al no ser esta una región con un importante flujo turístico que haga aumentar la población considerablemente en unos pocos meses del año, el caudal que se calcule a continuación será aplicable a todo el año, solamente siendo influido en algunos periodos del mismo por la estacionalidad de las lluvias.

Así pues se harán tres distinciones, ya que habrá que calcular tres tipos de caudales básicos para el dimensionamiento de la planta, que son el caudal medio de entrada, el caudal máximo y el caudal punta.

Primeramente calcularemos el caudal diario mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{D \times Pob}{1000} (m^3/d)$$

Siendo:

D=Dotación (l/d).

Pob.=Población equivalente.

$$Q = (120 \times 12250) / 1000 = 1470 \text{ m}^3/d$$

El caudal medio entonces vendrá definido por:

$$Q_{med} = Q / 24 (m^3/h)$$

$$Q_{med} = 1470 / 24 = 61,25 \approx 61 \text{ m}^3/h$$

Este caudal medio será el caudal para el que se diseñarán todos los procesos de la planta depuradora, ya que durante la mayor parte del año el caudal que recibirá será este. Sin embargo no se deben dejar de lado otras situaciones de caudal que pueden presentarse y afectar al rendimiento de los procesos de depuración. Por ello se calcula tanto el caudal máximo como el caudal punta para prever y tomar medidas ante estas situaciones extraordinarias de aumento del caudal.

El caudal máximo se calculará de esta manera:

$$Q_{max} = Q_{med} \left( 1,15 + \frac{2,575}{Q_{med}^{0,25}} \right) (m^3/h)$$

$$Q_{max}=61(1,15+2,575/61^{0,25})=126,44\approx 126 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para calcular el caudal punta se usará el coeficiente de mayorización, que usa el MOPU que es generalmente el más adoptado y cuyo valor es de 2,4 sobre el caudal medio, dando como resultado lo siguiente:

$$Q_{punta} = 2,4 \times Q_{medio} \text{ (m}^3/\text{h)}$$

$$Q_{punta} = 2,4 \times 61 = 146,4 \approx 146 \text{ m}^3/\text{h}$$

Tras los cálculos efectuados, los caudales resultantes son los resumidos en la siguiente tabla:

RESÚMEN DE CAUDALES			
Caudal diario(m3/día)	Caudal medio(m3/h)	Caudal máximo(m3/h)	Caudal punta(m3/h)
1.470	61	126	146

Tabla V.- Resumen del cálculo de caudales.

El siguiente paso a continuación, será la determinación de la carga contaminante que produce la ciudad y que será con la que trabaje la planta depuradora.

Esta carga contaminante está, al igual que la dotación de agua, ligada a hábitos de la población, y la proyección futura estima que las mejoras en educación y hábitos de la región harán disminuir la cantidad de residuos que, sin ser propios de las aguas residuales, son arrojados a ellas (como papeles, cartones, algunos residuos agrarios, etc...). Este hecho, sin embargo no produce ningún efecto negativo sobre el funcionamiento de la estación, ya que como se mostrará a continuación en el dimensionamiento de cada uno de los procesos, este hecho ya ha sido resuelto, ampliando el número de unidades que actúan en cada proceso, lo que da una versatilidad de funcionamiento amplia a la depuradora para hacer frente a diversas situaciones manteniendo un alto rendimiento de todo el sistema.

En cuanto a la carga contaminante, los valores a la salida de la estación depuradora para la DBO<sub>5</sub> y los SS serán los establecidos por la Directiva Europea 271/91/CE, ya que estos serán los únicos parámetros que se habrán de controlar.

COMPOSICIÓN A LA SALIDA	
Parámetros	Ppm
DBO <sub>5</sub>	25
SS	35

Tabla VI.- Composición a la salida según la Dir.271/91/CE

La carga contaminante que se ha extraído es:

COMPOSICIÓN AGUA RESIDUAL	
Parámetros	Ppm
DBO <sub>5</sub>	400
SS	350
NTK	40
P-total	13

Tabla VII.-Parámetros de composición del agua residual de la ciudad de Totorá.

Los rendimientos alcanzados por la estación depuradora para la DBO<sub>5</sub> y los SS, vendrán determinados por la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento}(\%) = \frac{(DBO_{in} - DBO_{out})}{DBO_{in}} \times 100$$

$$\text{Rendimiento DBO5 \%} = (400-25)/400 \times 100 = 93,75 \approx 94 \%$$

$$\text{Rendimiento SS \%} = (350-35)/350 \times 100 = 90 \%$$

Para posteriores operaciones de diseño de la planta depuradora, es recomendable expresar tanto la DBO<sub>5</sub> como los SS en Kg/día, por lo que se usa esta simple transformación para lograrlo:

$$\frac{Kg}{día} = \left( \frac{ppm \times Q_{med}}{1000} \right)$$

Kg DBO<sub>5</sub>/día= (400x 1470)/1000=588 Kg DBO<sub>5</sub>/día

Kg SS/día= (350x1470)/1000=514,5≈514 Kg SS/día

Kg NTK/día= (40x1470)/1000=58,8≈59 Kg NTK/día

Kg P-total/día= (13x1470)/1000= 19,11≈ 19 Kg P-total/día

En las siguientes tablas, se resumen los datos anteriormente calculados:

PARÁMETROS BÁSICOS					
Dotación(l/d)	Población equivalente(2029)	Caudal diario(l/día)	Caudal medio(m <sup>3</sup> /h)	Caudal máximo(m <sup>3</sup> /h)	Caudal punta(m <sup>3</sup> /h)
120	12.250	1.470	61	126	146

Tabla VIII.-Tabla resumen parámetros básicos.

COMPOSICIÓN AGUA RESIDUAL		
Parámetros	ppm	Kg/día
DBO <sub>5</sub>	400	588
SS	350	514
NTK	40	59
P-total	13	19

Tabla IX.-Tabla resumen parámetros básicos

## 5.2- PRE-TRATAMIENTO

Como se ha dicho anteriormente el proceso de pre-tratamiento es vital, para el buen funcionamiento posterior del resto de sistemas situados a continuación en la línea tratamiento de la estación depuradora. Son en su mayoría un conjunto de procesos físicos que tienen como objeto, la eliminación de los cuerpos de gran tamaño que pudieran acompañar al agua residual y que son arrastrados a través de la red de colectores produciendo obstrucciones en líneas y canales que alterarían el régimen hidráulico de la instalación.

### 5.2.1-OBJETIVO Y FUNDAMENTO DEL PROCESO DE DESBASTE.

La primera operación que tiene lugar en toda depuradora, es el proceso de desbaste. Consistirá en separar los sólidos de gran volumen, que pueden producir graves alteraciones en el correcto funcionamiento de la planta.

Principales objetivos que pretende el desbaste:

- Protección mecánica de equipos.
- Evitar posibles alteraciones a la circulación de agua residual a través de la depuradora.
- Evitar la presencia de sólidos inertes de gran tamaño en el tratamiento de fangos.
- Obstrucción de las líneas y canales de la planta.
- Evitar la deposición de estos residuos en los canales y equipos.

### 5.2.2- BASE DEL DISEÑO

Para llevar a cabo los objetivos principales del desbaste, los elementos que se van a implantar en la planta de tratamiento son:

- Arqueta con aliviadero.
  - Pozo de gruesos.
  - Rejas de gruesos.
  - Rejas de finos.
  - Canal Parshal.
- **Arqueta y aliviadero:** Sirve para conducir el agua residual hasta la planta de tratamiento que procede de un colector unitario. El colector llega a la arqueta que dispone de un aliviadero para caudales que se determinarán posteriormente. Esto es necesario puesto que la red de saneamiento es unitaria y en caso de lluvia es muy fácil superar el caudal de diseño. En caso de que se evacue agua por el aliviadero, ésta será conducida por una tubería de by-pass y será vertido al cauce público sin tratamiento.
- **Pozo de gruesos:** Consiste en un foso excavado, que permitirá hacer un pre-desarenado, eliminando arenas y sólidos de alta densidad fruto de su acumulación en épocas secas y

también permite eliminar objetos de gran tamaño, que puedan dañar u obstaculizar zonas posteriores del sistema.

- **Rejas:** consisten en un conjunto de barras metálicas de sección regular, paralelas y con cierta inclinación, situadas en un canal en posición transversal al flujo, de tal manera, que el agua al pasar a través de ellas, quedan retenidos los sólidos presentes, con un tamaño superior a la reja.

Para aumentar la efectividad del sistema y que mayor número de sólidos queden retenidos, se va a combinar dos tamaños diferentes de rejas, en concreto dispondremos previamente de rejas de gruesos, con una luz y espesor que se determinaran y seguidamente se situarán las rejas de finos, con luz y espesor menor que las anteriores.

Para una optimización del proceso, y evitando posibles situaciones de emergencia, se diseñan tres canales de paso, dos de ellos, dispuestos para el funcionamiento normal de la planta y un tercero de emergencia. Dichos canales tendrán la disposición de las rejas descritas anteriormente.

- **Caudal Parshal:** Es un tipo de caudalímetro, que determinará la medida del caudal de agua pre-tratada, ya que las variaciones en el caudal, pueden alterar el tiempo de residencia de las aguas en las diferentes lagunas, las cargas del proceso y todo esto puede influir directamente sobre el rendimiento de nuestra planta. Con este tipo de sistemas se mide la altura de la columna de agua en un canal de dimensiones conocidas, dónde se calculará el caudal, sin necesidad de tener que medir la velocidad del fluido.

Un esquema general del desbaste de la planta de tratamiento no convencional es:

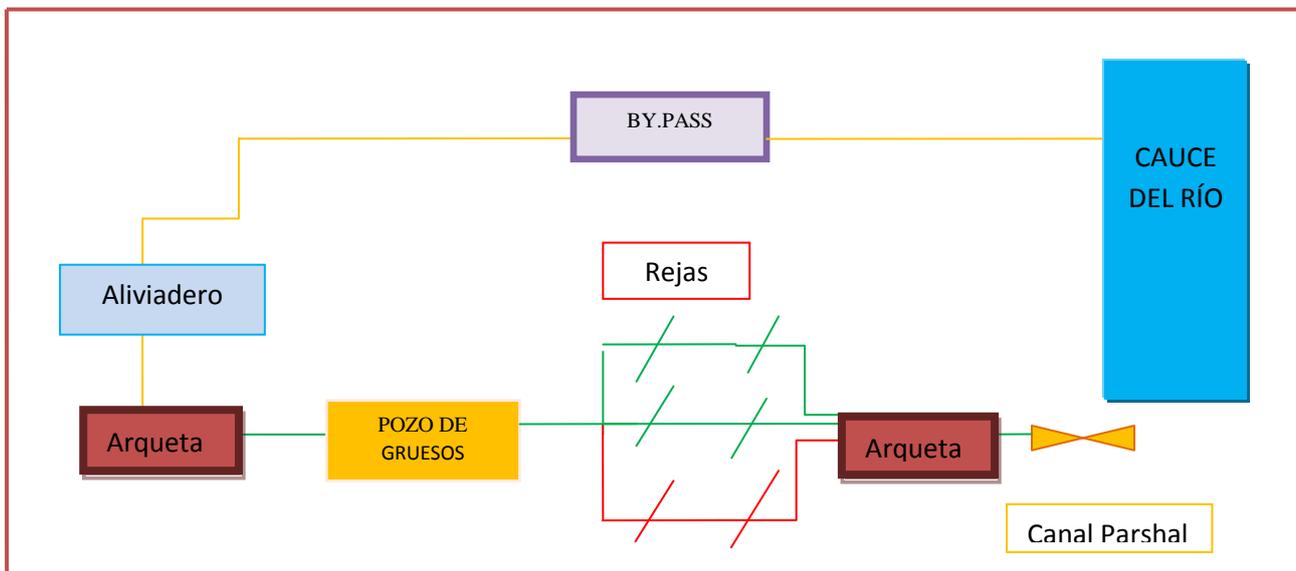


Diagrama I. -Diagrama de desbaste

5.2.3-CÁLCULO DE PARÁMETROS

Arqueta:

El colector llega a una arqueta que dispone de un aliviadero para caudales que estimamos superen los  $2 \times Q_{med}$ , es decir  $2 \times 61 = 122 \text{m}^3/\text{h}$ .

Pozo de gruesos:

Se diseña en base al tiempo de retención (Tr) y la Carga hidráulica (CH). Los valores predeterminados de estos valores van a ser:

Tr= 1,5 min a Caudal máximo.

Ch=  $1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{min}$ .

El volumen del pozo viene dado por:

$$Vol(\text{m}^3) = \frac{Q_{max} \times Tr}{60(\text{min}/\text{h})}$$

$$Vol = \frac{126 \text{m}^3/\text{h} \times 1,5 \text{min}}{60 \text{min}/\text{h}} = 3,15 \text{m}^3$$

La superficie del pozo de gruesos se determina:

$$S(\text{m}^2) = \frac{Q_{max}}{60 \text{min}/\text{h} \times Ch}$$

$$S(\text{m}^2) = \frac{126 \text{m}^3/\text{h}}{60 \text{min}/\text{h} \times 1 \text{m}^3/\text{m}^2 \times \text{min}} = 2,1 \text{m}^2$$

La profundidad del pozo vendrá dada por:

$$h(\text{m}) = \frac{Vol}{S}$$

$$h(\text{m}) = \frac{3,15 \text{m}^3}{2,1 \text{m}^2} = 1,5 \text{m}$$

Rejas:

El desbaste va a tener dos canales funcionales por los que circulará nuestro caudal en condiciones normales, y otro de emergencia. Con esta premisa, tenemos que tener en cuenta que antes del cálculo de las dimensiones de la reja, hay que dividir el caudal por el número de canales por los que va a circular. En el caso de la planta de depuración, establecemos dos canales, por lo que:

$$Q_{med}/2 = 61/2 = 30,5 \text{ m}^3/\text{h}.$$

$$Q_{max}/2 = 126/2 = 63 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Las dimensiones de reja que se establecen para la depuradora son:

REJAS		
DIMENSIONES	GRUESA	FINA
Luz(L)	25mm	10
Espesor(e)	8mm	6
Velocidad Qmax( m/s)	1,2	1,2
Velocidad Qmed(m/s)	0,8	0,8
Coefficiente de colmatación(C)	0,7	0,7

Tabla X.- Parámetros pre-determinados para cálculo de rejas

La superficie se calcula para el caudal medio y máximo, adoptándose para ambas rejas, el mayor de los valores obtenidos entre dichos caudales:

$$S = \frac{Q(\text{m}^3/\text{h})}{3600(\text{s}/\text{h})} \times \frac{L(\text{mm}) + e(\text{mm})}{L(\text{mm})} \times \frac{1}{C}$$

Rejas de gruesos:

$$SQ_{med} = \frac{30,5}{3600} \times \frac{25 + 8}{25} \times \frac{1}{0,7} = 0,018 \text{ m}^2$$

$$SQ_{max} = \frac{63}{3600} \times \frac{25 + 8}{25} \times \frac{1}{0,7} = 0,026 \text{ m}^2$$

Para la reja de gruesos se elije la SQmax: 0,026m<sup>2</sup>.

Esta superficie se corresponde a una reja en posición perpendicular, pero se a proceder a colocar la reja con cierto ángulo, que facilite su limpieza manual. En ese sentido el valor de la superficie es:

$$S_{mojada} = \frac{S(m^2)}{\text{sen}\alpha}$$

$$S_{mojada} = \frac{0,026(m^2)}{\text{sen}60} = 0,030m^2$$

Reja de finos:

$$SQ_{med} = \frac{30,5}{3600} \times \frac{10 + 6}{10} \times \frac{1}{0,7} = 0,02m^2$$

$$SQ_{max} = \frac{63}{3600} \times \frac{10 + 6}{10} \times \frac{1}{0,7} = 0,033m^2$$

Para la reja de finos se elije la SQmax: 0,033m<sup>2</sup>.

Esta superficie se corresponde a una reja en posición perpendicular, pero al colocarla con cierto ángulo, el valor de la superficie es:

$$S_{mojada} = \frac{S(m^2)}{\text{sen}\alpha}$$

$$S_{mojada} = \frac{0,033(m^2)}{\text{sen}60} = 0,038m^2$$

Los datos totales de debaste se resumen en la siguiente tabla:

Parámetro	Pozo de gruesos	Rejas de gruesos	Rejas de finos
Superficie (m <sup>2</sup> )	2,1	0,030	0,038
Altura (m)	1,5		
Volumen (m <sup>3</sup> )	3,15		

Tabla XI.- Resumen dimensiones de debaste

### 5.2.4.- ACTIVIDADES DE LIMPIEZA Y MANTENIMIENTO

Entre las principales actividades que se van a tener en cuenta en la fase de pre-tratamiento, distinguimos las siguientes:

#### Limpieza del colector y arqueta de reparto:

La inspección de la arqueta y el colector unitario que llega a la planta, como las conducciones de salida a cada laguna anaerobia, debe llevarse a cabo diariamente, para vigilar si existen plásticos, costras, hojas, trapos u otras materias que hayan accedido a la depuradora y puedan originar obstrucciones. Como regla general, debe efectuarse la limpieza de estos elementos una vez por semana, siempre que la inspección diaria muestre la presencia de materiales acumulados y después de lluvias.

#### Pozos de gruesos:

La limpieza del pozo debe ser periódica, con el fin de evitar acumulaciones importantes de basuras en los barros, que podrían producir desbordamientos del agua residual por colmatación de la superficie de paso del agua.

La forma de evacuar los materiales retenidos en el pozo de gruesos, es de manera manual.

Todo el material retirado, se recoge y se lleva a un contenedor, del tipo de los utilizados para transporte de escombros de construcción, siendo conveniente realizar una serie de perforaciones en el fondo del mismo, para permitir el escurrido de los materiales extraídos.

#### Rejas:

Las rejas las instalaremos sobre el canal de sección rectangular, con el fondo horizontal o ligera pendiente descendente en la dirección del flujo, y en un tramo recto, con el fin de conseguir que la velocidad sea lo más homogénea posible, ya que la existencia de turbulencias en las cercanías de dicho equipos, puede hacer que la atraviesen sólidos que quedarían retenidos en otras condiciones.

La instalación debe realizarse de tal forma que disponga de accesos fáciles para la evacuación de la basura que quede retenida en la reja, que al ser de limpieza manual, esta eliminación debe efectuarla el operador, utilizando para ello un rastrillo que encaja entre los barros y se almacene en los contenedores de residuos correspondientes. Dispondremos de rejas de reserva del mismo tamaño calculado tanto de finos como de gruesos.

Colocaremos compuertas de aislamiento de cada canal, con el fin de proceder a su reparación en caso de avería.

El material de la rejas será de acero al carbono o inoxidable. Los elementos de acero al carbono deberán estar pintados con dos capas de imprimación y dos de pintura epoxi bituminosa.

### Limpieza de los medidores de caudal:

Es esencial mantenerlo limpio de acumulaciones de residuos, ya que de lo contrario las lecturas de caudal son erróneas. Esta limpieza debe efectuarse una vez a la semana, y los sólidos recogidos deben eliminarse en la misma forma descrita para las distintas etapas del pre-tratamiento.

### Residuos generados:

Para calcular la cantidad de basura generada, se estima que se generan 10 litros de basuras anuales por cada 1.000 habitantes. Entonces para 12.250 habitantes estimados se producen al día:

Litros de basura año =  $(12.250 \text{ hab.} \times 10 \text{ litros}) / 1.000 \text{ hab.} = 122,5 \text{ litros de basura.}$

### Destino de los residuos:

Con el residuo una vez escurrido, debido a la falta de sistemas de recogida eficiente de basuras en la región de Totorá, cogemos los residuos generados y los eliminaremos en forma de relleno del terreno mediante enterramiento, cada vez que se llene el contenedor, siendo preciso una capa de tierra compactada de espesor superior a 20-30 cm con el fin de evitar malos olores, proliferación de roedores, moscas, etc.

La eliminación de los residuos del proceso de desbaste va a ser importante que se realice a diario en nuestra planta debido a que con el calor aumenta el grado de descomposición y por tanto de malos olores dentro de las instalaciones.

## 5.3.-LAGUNA ANAEROBIA

### 5.3.1.-OBJETIVO Y FUNDAMENTO

Las lagunas anaerobias juegan un papel fundamental como proceso biológico de depuración de las aguas residuales, ya que a través de la actividad microbiana por la que eliminan la carga orgánica entrante, que se traduce en una reducción de la DBO<sub>5</sub>, actúan por su diseño físico como decantadores de grandes cantidades de SS. Tanto los SS entrantes como los SS resultantes de la digestión de la materia orgánica se acumulan en el fondo de la laguna formando lodos, de los cuales ya se hablará específicamente en otros apartados.

Este mismo diseño es el que posibilita que gran parte de la columna de agua presente condiciones de anaerobiosis que generan la aparición de bacterias anaerobias que son las que se

encargarán de la posterior reducción de la materia orgánica. Las fases del proceso de digestión anaerobia son hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis que se mantienen en funcionamiento mediante un delicado equilibrio entre los compuestos resultantes de las diversas fases intermedias.

Estas reacciones son muy sensibles a:

- **La temperatura:** Aumentando la velocidad de las mismas con un límite inferior de 10°C, a la que no hay reducción de materia orgánica y un límite superior de 40°C a la que la velocidad de reducción de materia orgánica es máxima. Este rango está referido a las bacterias anaerobias mesófilas que son las que serán empleadas en este proyecto.
- **Presencia de tóxicos o inhibidores.** Como metales pesados y compuestos organoclorados. Aunque en el agua residual de la ciudad de Totorá no se ha registrado presencia alguna de ninguno de los dos, como ya se ha comentado anteriormente.
- **Variaciones del pH:** Para conseguir una correcta velocidad de las reacciones de digestión se mantendrá el pH entre 6,8 y 7,6, ya que disminuciones de pH provocan un descenso de la velocidad de las reacciones e incluso la parada de las mismas.

El fundamento del proceso consiste en el almacenamiento de éste agua entrante durante un tiempo variable, en función de la carga aplicada y las condiciones climáticas, de forma que la materia orgánica se degrade por la actividad bacteriológica, en concreto, por bacterias heterótrofas, presentes en el medio. Al ser un proceso puramente biológico, dónde la intervención del hombre es nula, los rendimientos de depuración que se alcanzan, van a depender de las condiciones climáticas en las que se sitúan las lagunas.

Al final del proceso de depuración, se obtendrá una eliminación de la materia orgánica presente, de una manera económica sin prescindir de la reducción de gérmenes patógenos.

### 5.3.2.- BASES DE DISEÑO

En esta parte del sistema de tratamiento, vamos a disponer de cuatro lagunas anaerobias, dispuestas en paralelo, para asegurar la continuidad de operación en caso de parada por emergencia, limpieza o retirada de fangos. Atendiendo a la estacionalidad tan marcada presente en la región dónde se ubica Totorá, el funcionamiento de las cuatro lagunas anaerobias va a ser diferente, de tal manera que se va a utilizar las lagunas I, II y III en el período de lluvias (Diciembre a Marzo) y las lagunas I y IV en el período seco (Abril a Noviembre). De esta manera aseguramos que la limpieza de cada laguna para retirar fangos no coincide en el tiempo, y en caso de emergencia podemos seguir en funcionamiento normal sin miedo a detener el proceso completo, utilizando las lagunas que no están en funcionamiento en ese momento.

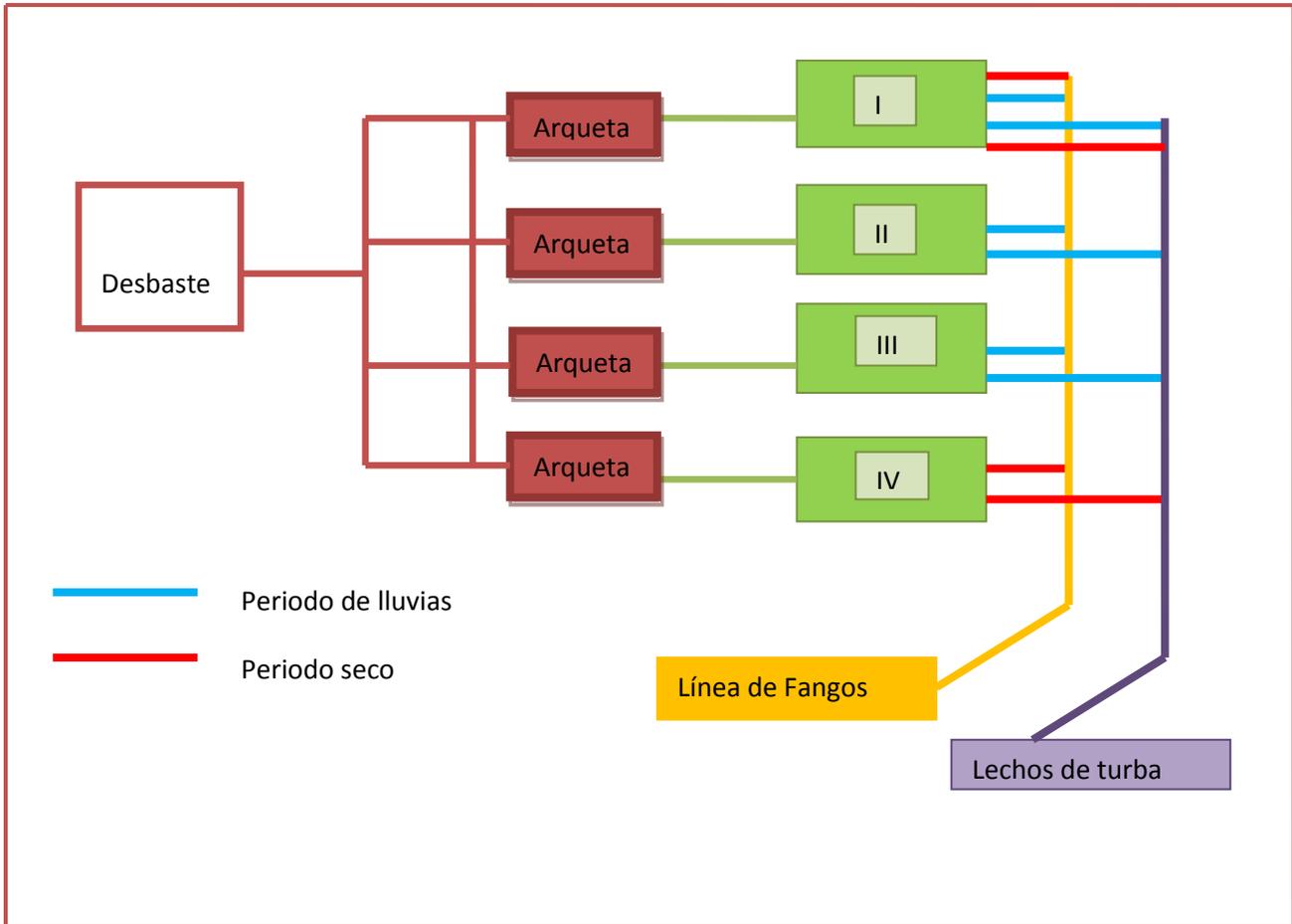


Diagrama II.-Diagrama de la laguna anaerobia.

### 5.3.3.-CALCULO DE PARÁMETROS

El cálculo del dimensionamiento de las lagunas anaeróbicas, se lleva a cabo mediante procedimientos basados en la eliminación de la Materia orgánica como variable. Los parámetros en los que se basan estos cálculos son:

- Carga volumétrica, gr DBO/m<sup>3</sup>día.
- Tiempo de retención hidráulico, en días.

Basando la elección de dichos valores, en las condiciones específicas de ubicación de Totorá y las características de carga del caudal influente, los resultados más óptimos para el cálculo de las lagunas son:

BASES DE DISEÑO		
Profundidad (m)	Tiempo de retención hidráulica (días)	Carga Volumétrica ( gr DBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> día)
5(4,5 útiles)	4	100-120

Tabla XII.- Parámetros convencionales de diseño para lagunas anaerobias.

De los parámetros de la tabla anterior el tiempo de retención hidráulico y la carga volumétrica son los parámetros más adecuados para determinar el dimensionamiento de las lagunas, ya que, la digestión anaerobia es independiente de los fenómenos de superficie.

Sin embargo, estos datos se han obtenido mediante procedimientos empíricos y en este proyecto se variará la carga volumétrica, adoptando valores entre 100-120 gr DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup> día que unidos a los tiempos de retención hidráulica altos que se han determinado, permitirán jugar con un margen de maniobra en caso de lluvias intensas y dotar de una cierta versatilidad a la instalación con una simple variación del tiempo de retención hidráulica. Todo esto se explicará con más detalle en el siguiente apartado de cálculo de parámetros.

Se estima que una profundidad de 4,5 m es más que suficiente para alcanzar las condiciones de anaerobiosis que permitan la digestión anaerobia de la materia orgánica, que presenta el influente de aguas residuales, dejando un 0,5 m de margen de seguridad para evitar el desbordamiento de la laguna.

Con estos dos parámetros y sabiendo el volumen del caudal influente diario (1470 m<sup>3</sup>/día), podemos dimensionar perfectamente las lagunas anaerobias siguiendo el siguiente procedimiento:

Para el cálculo del volumen, utilizamos la siguiente fórmula:

$$Vol(m^3) = Q(m^3/d) \times TRH(días)$$

$$Q_{med} = 1470 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$TRH = 4 \text{ días}$$

$$Vol(m^3) = 1470 \times 4 = 5880m^3$$

El área viene determinada por:

$$A(m^2) = \frac{Vol(m^3)}{Profundidad(m)}$$

$$A(m^2) = \frac{5880m^3}{4,5 m} = 1306,6m^2$$

Una vez calculados las dimensiones de dicha laguna, hay que comprobar que el parámetro de carga volumétrica este comprendido entre 100-120 gr DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup> día tal y como se había dicho y puesto que se conoce la carga orgánica influente a laguna, el cálculo resultara de la siguiente manera:

$$Cv \left( gr \frac{DBO5}{m^3} dia \right) = \frac{DBO_{5in} \times 1000}{Vol.laguna(m^3)}$$

DBO<sub>5</sub> influente= 588 Kg DBO<sub>5</sub>/día

Volumen laguna = 5880m<sup>3</sup>

$$Cv \left( gr \frac{DBO5}{m^3} dia \right) = \frac{588 \times 1000}{5880(m^3)} = 100 gr \frac{DBO5}{m^3} dia$$

Como se puede ver, se usa la carga de DBO<sub>5</sub> que entra en la estación depuradora sin tener en cuenta el 5% de reducción de DBO<sub>5</sub> y SS que genera el proceso de desbaste en el pre tratamiento. Esto es así ya que se considera ese 5% como un margen de seguridad de que se dota a la estación y por ello para estos cálculos no ha sido descontado del total.

En cuanto a la carga volumétrica como se puede observar el valor está perfectamente encuadrado dentro del rango que se determino previamente, dotando de la versatilidad antes definida que podrá mostrar la laguna para tratar diversos escenarios. Así pues, si se produjeran fuertes lluvias, como según el análisis climatológico es frecuente en la época de verano, se disminuiría el tiempo de retención y la carga volumétrica aumentaría manteniéndose siempre dentro de los parámetros de funcionamiento de la laguna anaerobia.

Para aumentar las posibilidades del buen funcionamiento de las lagunas anaerobias, se cuenta con la disposición de más de una unidad trabajando en paralelo.

En concreto se van a dimensionar 4 lagunas en paralelo. Tres de ellas, está previsto que trabajen en situaciones normales y la restante en situaciones de emergencia o limpieza de alguna de las otras. Aunque se dispone de tres lagunas para el funcionamiento diario de la planta, su uso vendrá condicionado por la estacionalidad de la zona, así dependiendo en que estación se esté, se podrá trabajar con dos o con tres. Los cálculos de diseño han sido los siguientes:

$$\frac{\text{Vol}(m^3)\text{de cada unidad}}{3} = \frac{5880m^3}{3} = 1960m^3$$

$$\frac{\text{Area}(m^2)\text{de cada unidad}}{3} = \frac{1306,6m^2}{3} = 435,5m^2$$

La reducción de parámetros conseguida en las lagunas anaerobias varía según lo expresado en la siguiente tabla:

PORCENTAJE DE REDUCCION DE PARAMETROS			
% DBO <sub>5</sub>	% SS	% NTK	% P-total
50—75	50—80	0—15	0—30

Tabla XIII.- Porcentaje de reducción de parámetros que se produce en las lagunas anaerobias.

Se ha determinado que la reducción de DBO<sub>5</sub> sea del 50% debido a las variantes oscilaciones climatológicas (sobre todo las térmicas), que impiden que el rendimiento de este proceso sea superior. En cuanto a la reducción en SS, al trabajar con altos tiempos de retención la decantación de SS alcanza grandes valores llegando a rendimientos del 80%.

La reducción de NTK y P-total alcanza valores medios siendo, de un 10% en el caso del NTK y un 15% para los P-totales.

Tras la aplicación de dichos porcentajes de reducción, el caudal efluente de las lagunas anaerobias presenta la siguiente composición de estos parámetros:

COMPOSICIÓN DEL EFLUENTE DE LAS LAGUNAS ANAEROBIAS (Kg/día)			
DBO <sub>5</sub>	SS	NTK	P-totales
294	105	53	16

Tabla XIV.- Composición del efluente en Kg/día

Toda esta materia orgánica digerida se acumula en el fondo de las lagunas, generando unos lodos que presentan altos tiempos de maduración por lo que están completamente mineralizados, lo cual es una gran ventaja para el manejo posterior de los mismos.

Esta acumulación de lodos requiere que se lleven a cabo periódicamente labores de extracción para evitar la colmatación de las lagunas. Estas actividades se explicarán más detalladamente en el apartado específico de tratamiento de lodos.

En las siguientes tablas se resumen los datos de dimensionamiento del sistema de lagunas de estabilización y su composición:

DISPOSICIÓN	TRH (días)	C.V (gr DBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> día)	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	PROFUNDIDA D(m)
En paralelo	4	100	1960	435,5	4,5

Tabla XV.- Resumen de parámetros de la laguna de estabilización.

Parámetros	DBO (kg/día)	SS (kg/día)	NTK (kg/día)	P-TOTALES (kg/día)
Composición de entrada	588	514	59	19
Rendimiento%	50	80	10	15
Composición de salida	294	105	53	16

Tabla XVI.- Resumen de la composición de la laguna.

## 5.4.- TRATAMIENTO DE FANGOS

### 5.4.1.- OBJETIVO Y FUNDAMENTO DEL PROCESO

A lo largo del proceso de depuración y en concreto en la laguna anaerobia, se producen fangos con determinadas concentraciones de sólidos en suspensión. El principal objetivo del proceso de los tratamientos de fangos, es la obtención de un sólido estable, con un grado de deshidratación adecuado, obteniendo un lodo de fácil evacuación de la planta depuradora.

Las principales funciones que tienen asignados los diferentes procesos de tratamiento de fangos, son los siguientes:

- Concentrado, aumentando la concentración de sólidos en suspensión.
- Degradación de materia orgánica, para aumentar su estabilidad.
- Deshidratación de los fangos estabilizados.

Los fangos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales no serán un gran problema a la hora de darles tratamiento por dos motivos:

- Los fangos resultantes se producen únicamente en la laguna anaerobia, con concentraciones de 40 litros/ hab. Año.
- Son fangos con un elevado grado de mineralización, por lo que no requieren de una etapa de estabilización.

El sistema elegido para la deshidratación del fango dado el grado de mineralización que tiene son las eras de secado. Sistema muy empleado en pequeñas plantas de depuradoras urbanas como la diseñada.

Una era de secado consiste en un lecho de arena sobre el que se vierte el fango, teniendo lugar dos efectos complementarios:

- Primera etapa: deshidratación por filtración del agua sobre la arena. Esta fase suele durar aproximadamente dos días y es la que se pierde una mayor cantidad de agua.
- Segunda etapa: evaporación de una parte del agua ligada al fango por la acción del sol y del aire. Esta fase es de mayor duración entre 15 y 20 días.

Las ventajas que se consiguen son un bajo coste de implantación, necesidad de un bajo mantenimiento y un grado de sequedad elevado.

A la hora de implantar un sistema de deshidratación de lodos por eras de secado, es importante el conocimiento de la climatología de la zona, ya que este sistema necesita de un elevado grado de radiación solar para que resulte eficaz.

### 5.4.2.-BASES DE DISEÑO

La extracción del fango de las lagunas anaerobias, se realizará mediante dos bombas “chupona” que se encargarán de sacar el lodo del interior de la laguna para enviarlo a las eras de secado, para que el fango con un elevado grado de mineralización se deshidrate por radiación solar. Una vez seco, el fango mineralizado y estable, constituye un excelente compost, que puede ser utilizado como abono para los agricultores locales. Los lixiviados obtenidos del secado de los fangos, son re-circulados al sistema desde la cabecera del mismo.

La superficie de la eras de secado viene estimada por cada 15 habitantes corresponde a 1 metro cuadrado de superficie de era de secado. Para la población de Totorá, sabiendo el volumen de lodos que generan, y sabiendo la mínima superficie útil, que deben tener las eras de sacado, se ha determinado la construcción de 12.

La altura del fango en el momento del vertido será próxima a 30-35 cm. Y las dimensiones unitarias por era serán de 6 metros de ancho por 12 metros de largo, sin sobrepasar estas dimensiones con el fin de conseguir una buena distribución del lodo sobre toda la superficie.

La rotación de la eras se realizará entre 18 y 20 días.

La era de secado consta de una excavación donde se acopla un tanque. En su interior se coloca un lecho filtrante, la capa de soporte y el sistema de drenaje:

- **Lecho filtrante:** conformado por material granulado de variado tamaño de partículas. La disposición de esta en nuestra era es de:
  - 15 cm de arena.
  - 20 cm de grava.
- **Capa de soporte:** Puede estar formada por ladrillos recocidos u otro elemento resistente a la eliminación del lodo seco.
- **Sistema de drenaje:** la superficie de las eras debe tener una pendiente de fondo como mínimo de 1% hacia un aliviadero donde se recogerá el agua infiltrada para reconducirla a cabecera de proceso.

El proceso de extracción de fango de las lagunas anaerobias, se realizara mediante dos bombas “chupona” que se encargara de sacar el lodo del interior de la laguna para enviarlo a las eras de secado, para que el fango con un elevado grado de mineralización se deshidrate por radiación solar.

Dispondremos de dos bombas, una en funcionamiento y otra de repuesto averías. La bomba se conectara a un panel solar. La limpieza de cada una de las lagunas durara entorno a los 6-7 días.

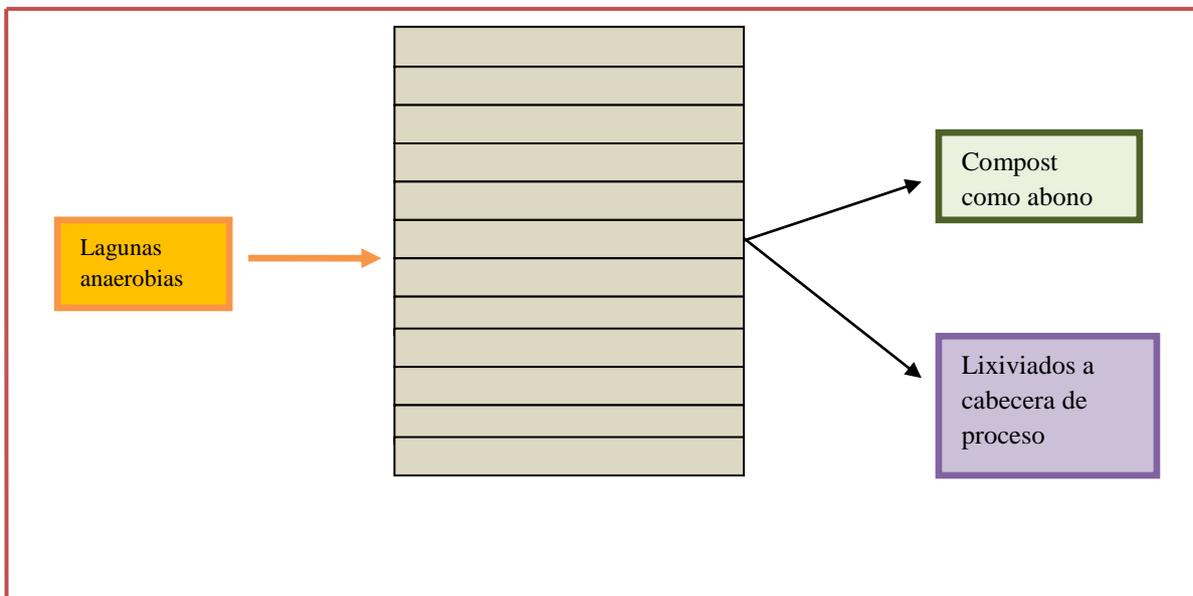


Diagrama III.-Diagrama eras de secado.

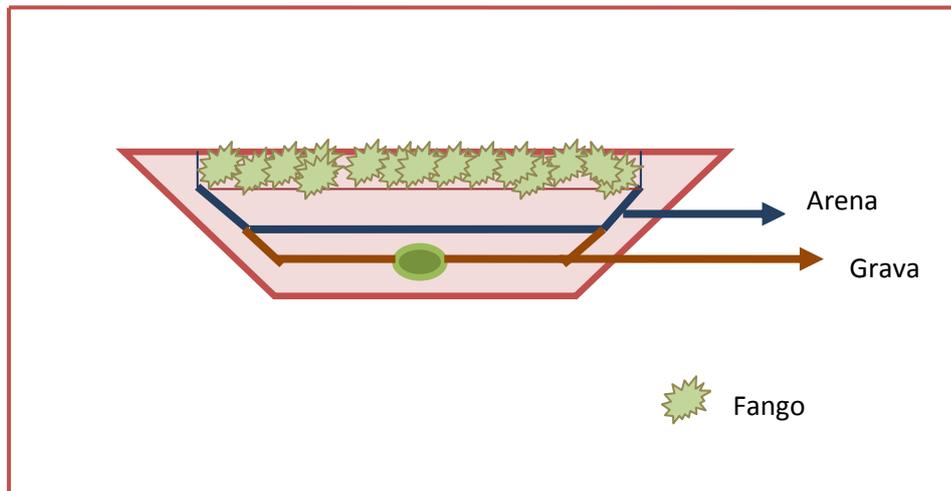


Diagrama IV.-Perfil era de secado

### 5.4.3.-CÁLCULO DE PARÁMETROS

Los datos previos que se van a determinar hacen referencia a los fangos que se generan en cada una de las lagunas anaerobias, para determinar con cuanta periodicidad hay que extraerlos y transportarlos a las eras de secado.

Los datos preliminares para la determinación de los fangos generados son:

BASES DE DISEÑO	
Generación de lodos laguna anaerobia	40l/hab.año
Volumen de cada laguna anaerobia	1.960 m <sup>3</sup>
Carga de sólidos (Fango mineralizado)	120 - 160 MS Kg/m <sup>2</sup> *año
Superficie por 15 hab	1 m <sup>2</sup>
Rotación eras	18 - 20 días

Tabla XVII.-Datos preliminares para cálculo de generación de fangos.

Con estos datos de diseño y las consideraciones a tener en cuenta a en nuestro sistema de fangos procederemos a los cálculos necesarios para implantar la línea de fangos.

El principal punto de producción de fangos en la planta se encuentra en las lagunas anaerobias, y el valor de generación de fangos es de 40 gr/l por habitante equivalente y año. El volumen de fangos generados para la población estimada vendrá dado por:

$$\text{Volumen de fangos generados} = 40 \frac{\text{gr}}{\text{l} \times \text{hab}} \times 12250 \text{hab} = 490 \text{m}^3$$

Se generarán 490 m<sup>3</sup> de fangos que se generan en Totorá durante un año.

Para conocer el tiempo de evacuación de los fangos en cada laguna anaerobia necesitamos conocer el volumen de fangos generados al año (490 m<sup>3</sup>) y el volumen de fango a evacuar para el que tomaremos como referencia como valor máximo de colmatación 1/4 del volumen de cada una de las lagunas anaerobias. Si cada laguna anaerobia tiene un volumen de 1.960 m<sup>3</sup>, el volumen de colmatación y por tanto a evacuar en cada laguna será:

$$\text{Volumen de fangos a evacuar} = \frac{1960}{4} = 490 \text{m}^3$$

En cada laguna se generarán 490 m<sup>3</sup>.

Para conocer el volumen que se genera de fango en cada una de las lagunas anaerobias, diferenciaremos la entrada de caudal en función de la estacionalidad, donde vamos a utilizar las lagunas I, II y III en periodo de lluvia, y las lagunas I y IV durante el periodo seco. De esta forma nos aseguramos que la limpieza de cada laguna no coincide entre sí, manteniendo el grado adecuado de funcionamiento de la planta en todo momento. De tal modo distinguimos los periodos en:

- Periodo de lluvias: Diciembre a Marzo (4 meses).
- Periodo seco: Abril a Noviembre (8 meses).

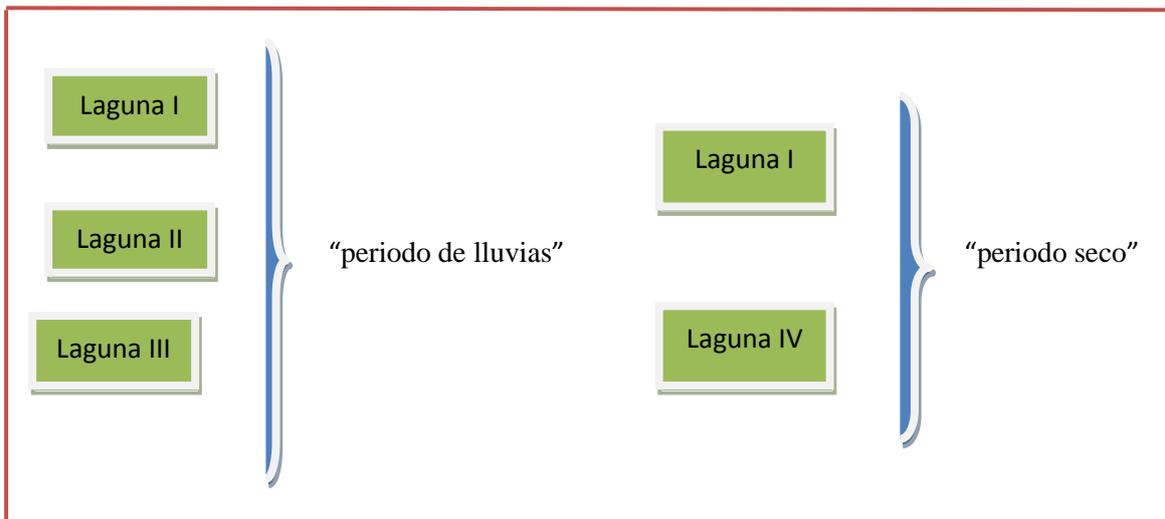


Diagrama V.-Uso de lagunas atendiendo a la estacionalidad climatológica.

A partir de esta disposición iremos calculando el tiempo de colmatación en cada laguna, es decir hasta que se alcancen los 490 m<sup>3</sup> de fango (1/4 del volumen de cada laguna).

Si el volumen total medio de fango generado al año en la planta es de 490 m<sup>3</sup>, durante el periodo seco (8 meses) se generan 326,66 m<sup>3</sup> y durante el periodo húmedo (4 meses) se generan 163,33 m<sup>3</sup>.

Para el primer año de funcionamiento.

- **Periodo seco:** los 326,66 m<sup>3</sup> de fango generado en el periodo seco se reparten en la laguna I y laguna IV.
  - Laguna I= 163,33 m<sup>3</sup>.
  - Laguna IV = 163,33 m<sup>3</sup>.
- **Periodo húmedo:** los 163,33 m<sup>3</sup> de fango generado en el periodo húmedo se reparten en la laguna I, laguna II y laguna III.
  - Laguna I=54,44 m<sup>3</sup>.
  - Laguna II=54,44m<sup>3</sup>.
  - Laguna III=54,44m<sup>3</sup>

El total de lodos por laguna será:

- Laguna I = periodo seco (163,33m<sup>3</sup>) + periodo húmedo (54,44m<sup>3</sup>)= 217,77m<sup>3</sup>.
- Laguna II = periodo húmedo = 54,44 m<sup>3</sup>.
- Laguna III= periodo húmedo = 54,44 m<sup>3</sup>.
- Laguna IV = periodo seco = 163,33 m<sup>3</sup>

Para el segundo año de funcionamiento, al segundo año se le sumarian las cargas de lodo que se nos generaron en el primer año siempre para cada laguna, de tal modo que:

- Laguna I = periodo seco año 2 + periodo húmedo año 2+ lodos generados en el 1er año en laguna I= 435,54 m<sup>3</sup>.
- Laguna II= periodo húmedo año 2 + lodos generados en el 1er año en laguna 2 = 108,88m<sup>3</sup>.
- Laguna III= periodo húmedo año 2 + lodos generados en el 1er año en laguna 3 = 108,88m<sup>3</sup>.
- Laguna IV = periodo húmedo año 2 + lodos generados en el 1er año en laguna 4= 326,66 m<sup>3</sup>.

Como podemos observar, la laguna I va a ser la primera laguna en alcanzar 1/4 de su volumen en fango.

En un año se generan 490 m<sup>3</sup> (volumen de colmatación), con 217,77 m<sup>3</sup> de fangos, tardaremos X ≈ 2 años y 3 meses para que llegue la colmatación de laguna I. Una vez alcanzado este volumen, el proceso se detiene para la laguna 1 con el cierre de la arqueta, poniendo en funcionamiento el resto de lagunas, en función de si es periodo seco o húmedo.

La segunda laguna más cerca de colmatarse es laguna IV con 326,66 m<sup>3</sup> de fango. Su colmatación tendría lugar en 3 años desde el inicio de la puesta en marcha de la depuradora, siempre que se mantenga en “periodo seco” únicamente.

Las lagunas II y III irán cambiado de periodo húmedo a periodo seco de tal modo que a la hora de realizar su limpieza no coincida entre sí. Se trata de ir jugando con las lagunas anaerobias de la planta para mantener las condiciones adecuadas de funcionamiento cuando tenga lugar su limpieza o surjan distintos imprevistos.

El proceso de limpieza del fango se realizara mediante dos bombas “chupona” que se encargara de sacar el lodo del interior de la laguna para enviarlo a las eras de secado, para que el fango con un elevado grado de mineralización se deshidrate por radiación solar.

Dispondremos de dos bombas de de 1kw a 8 m.c.a. una en funcionamiento y otra de repuesto para salvaguardarnos de una posible avería, la bomba recogerá un caudal de de 20 m<sup>3</sup>/h a 1 kw. La bomba se conectara a un panel solar.

Una vez extraído el lodo se distribuirá sobre una era secado, que dimensionaremos a continuación teniendo en cuenta las bases de diseño y consideraciones comentadas anteriormente.

Para el cálculo de la superficie de las eras de secado se parte de que por cada 15 habitantes se necesita una superficie de un metro cuadrado. Por tanto para 12.250 habitantes que hemos estimado la superficie será:

$$Superficie\ era\ de\ secado = \frac{12250\ hab \times 1m^2}{15hab} = 816,66m^2$$

Teniendo en cuenta que las dimensiones unitarias de cada era son de 6x12 m (72 m<sup>2</sup> por era) con el fin de conseguir una buena distribución del lodo. Tenemos que el número de eras de secado viene dado a partir de:

$$Numero\ de\ eras\ de\ secado = \frac{Superficie\ estimada}{dimension\ por\ ere}$$

$$\text{Numero de eras de secado} = \frac{816,66\text{m}^2}{72\text{m}^2} \approx 12 \text{ eras de secado}$$

Con este resultado se obtiene una superficie total del conjunto de las eras:

$$\text{superficie total} = \text{Numero de eras} \times \text{dimension de cada era}$$

$$\text{superficie total} = 12 \times 72 = 864\text{m}^2$$

A continuación se resumen los datos anteriormente calculados de los fangos y tratamiento en eras de secado:

Volumen fangos generados en un año (m <sup>3</sup> )	Volumen de fangos en estación seca (m <sup>3</sup> )	Volumen de fangos en estación de lluvias (m <sup>3</sup> )	Volumen de extracción de fangos(m <sup>3</sup> )	Primera extracción de fangos	Grado de colmatación
490	326,66	163,33	490	2 años y 3 meses para la Laguna I	25%

Tabla XVIII.-Tabla resumen generación de fangos.

superficie de eras de secado (m <sup>2</sup> )	Numero de eras de secado (m <sup>2</sup> )	Mecanismo extracción de lodos
864	12	Dos bombas chuponas

Tabla XIX.-Tabla resumen eras de secado

## 5.5-LECHOS DE TURBA

### 5.5.1.- OBJETIVO Y FUNDAMENTO DEL PROCESO

La depuración con lechos de turba es un proceso de autodepuración natural que logra reducir la carga contaminante con unos costes mínimos de operación y mantenimiento.

El fundamento de la depuración se basa en la retención de los materiales en suspensión y la adsorción en el seno del tejido vegetal fibroso.

Se trata de un dispositivo de drenaje que consta de un lecho de turba a través del cual circula una capa de agua residual. El sistema funciona como lecho de percolación, ya que si se utiliza un sistema de lecho inundado puede entrar en anaerobiosis.

La acción depuradora se basa en la infiltración del agua a través de la turba, que sirve de soporte físico para que en ella se desarrollen bacterias y microorganismos y pone en contacto esta masa microbiana con los compuestos y elementos que el agua residual lleva disuelta. Dado este contacto, se dan lugar reacciones físico-químicas y de estabilización y síntesis biológica a través de las cuales muchos materiales en suspensión son retenidos y transformados por oxidación-reducción de tipo aeróbico en compuestos más simples. Aparte de la reducción de la contaminación física y orgánica los lechos de turba logran reducir la concentración bacteriana ("*E. colis*").

### 5.5.2-BASES DE DISEÑO

El diseño se basa en los datos del caudal de percolación a través de la turba en litros por hora por metro cuadrado de superficie del lecho.

Se empleará un lecho de turba mixto, que se extrae de unas formaciones naturales, denominadas Bofedales, muy abundantes en la región donde se asienta Totorá. Dicho lecho contará con una profundidad de 40 cm.

Se realizará una separación de la turba del sistema de drenaje mediante una capa filtrante. La mitad superior de arena y la inferior de grava.

La sección del lecho será de la siguiente manera:

- 0,40cm de espesor de turba mixta, mezclando clara y parda.
- Lámina geotextil.
- 0,10cm de espesor de arena fina.
- 0,10cm de espesor de gravilla.
- 0,30cm de espesor de grava.
- lámina de polietileno de alta densidad.

En la superficie del lecho se distribuye una tubería que será la que reparta el área residual sobre la turba.

El tamaño máximo recomendable para el buen funcionamiento de los lechos de turba es de 200 m<sup>2</sup> cada uno. Se construirán 4 pares de lechos de turba que trabajarán en paralelo y se usará la materia orgánica resultante de las labores de limpieza del rastrillado como enmienda orgánica en áreas de cultivo para aumentar la productividad de estas tierras cuando sean cultivadas.

Se ha dispuesto de un 50% más de superficie de lecho para facilitar las labores de rastrillado y reposo de los lechos sin interrumpir el proceso de depuración.

Los lechos de turba al igual que se explicó con las lagunas anaerobias, tendrán un funcionamiento estacional de sus unidades constituyentes en base. Por ello se diseñaran dos periodos de funcionamiento, funcionamiento en estación seca y funcionamiento en estación húmeda.

- **Funcionamiento en estación seca:** Durante la estación seca la escasa pluviometría, disminuirá los caudales de entrada en la depuradora, por lo que para mantener constantes los parámetros de cargas, tanto hidráulica como orgánica, en los lechos de turba se pondrán en marcha solo 2 de los 4 pares.

El caudal que trabajará cada lecho de turba será la cuarta parte del influente lo que permite asegurar los mismo parámetros de carga volumétrica para un caudal que sea el 50% del caudal de la estación húmeda, para los que se realizó el diseño con 4 pares de lechos de turba.

- **Funcionamiento en estación húmeda:** En la estación húmeda será necesario trabajar a pleno rendimiento, con la puesta en marcha de los 4 pares de lechos de turba que se han diseñado previamente.

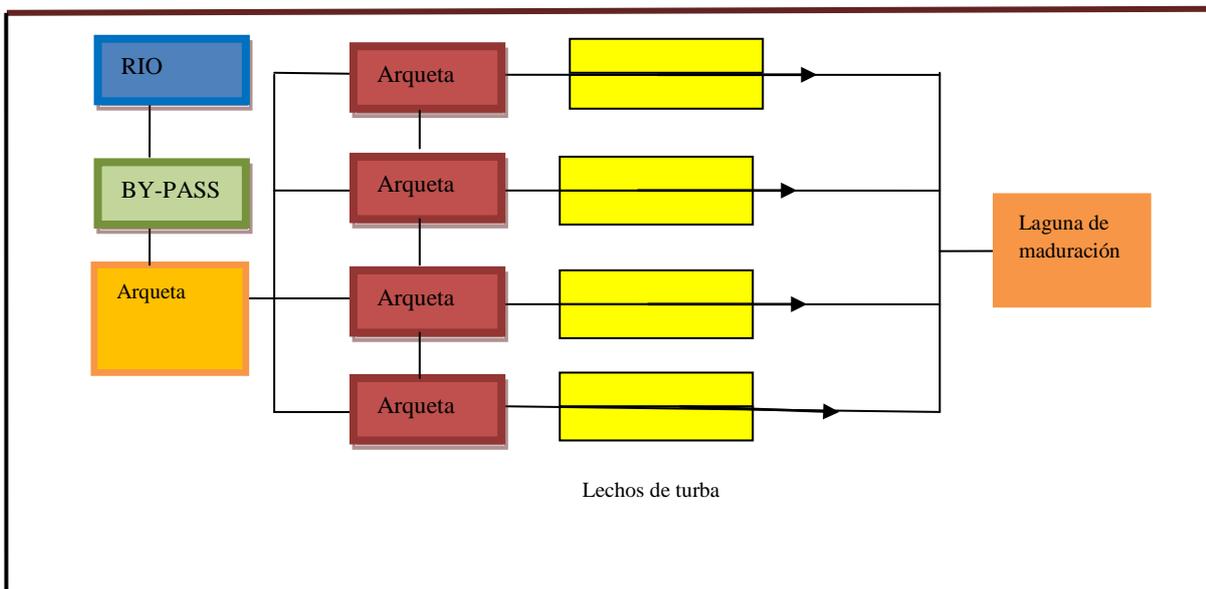


Diagrama VI.-Diagrama lechos de turba.

5.5.3.-CÁLCULO DE PARÁMETROS

El diseño se hará siguiendo los siguientes parámetros:

PARÁMETROS DE DISEÑO		
Carga superficial (l/h m <sup>2</sup> )	Carga orgánica (Kg DBO <sub>5</sub> / m <sup>2</sup> día)	Carga hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> día)
40	<0,5	<2,5

Tabla XVII.-Parámetros de diseño

El área del lecho se calcula mediante la ecuación:

$$\text{Área (m}^2\text{)} = \frac{Q(l/h)}{Q \text{ de percolación}(\frac{l}{\text{hora}} \text{m}^2)}$$

$$\text{Área (m}^2\text{)} = \frac{(1470/24) \times 1000}{40(\frac{1}{\text{hora}} \text{m}^2)} = \frac{61000l}{40h} = 1525\text{m}^2$$

El tamaño máximo recomendable para el buen funcionamiento de los lechos de turba es de 200 m<sup>2</sup> cada uno, por tanto:

$$\text{Numero de lechos de turba} = \frac{1525}{200} = 7,65 \approx 8 \text{ lechos}$$

Se construirán 4 pares de lechos de turba que trabajarán en paralelo.

Como se disponen de un 50% más de superficie de lecho para facilitar las labores de rastrillado y reposo de los lechos, el área final será:

$$\text{Area(m}^2\text{)} = \frac{1525}{2} = 762\text{m}^2$$

$$\text{Area final (m}^2\text{)} = 1525 + 762 = 2287\text{m}^2$$

Sin embargo el diseño de los lechos de turba debe responder no solo a parámetros de carga superficial, sino que deben cumplir los valores de carga hidráulica y carga orgánica, antes citados.

Teniendo en cuenta que a la entrada de los lechos de turba se tienen los siguientes valores de carga contaminante:

COMPOSICIÓN DEL INFLUENTE A LOS LECHOS DE TURBA (Kg/día)			
DBO <sub>5</sub>	SS	NTK	P-totales
294	105	53	16

Tabla XVIII.-Composición de influente

$$Carga\ orgánica\ (Kg/m^2\ día) = \frac{DBO5\ in\ (\frac{Kg}{día})}{Área\ total\ lechos\ turba(m^2)}$$

$$Carga\ orgánica\ (Kg/m^2\ día) = \frac{294\ in\ (\frac{Kg}{día})}{1525(m^2)} = 0,19 \approx 0,20\ Kg/m^2\ día$$

$$Carga\ hidráulica\ (\frac{m^3}{m^2}\ día) = \frac{Q_{med}\ (\frac{m^3}{día})}{Área\ total\ lechos\ turba(m^2)}$$

$$Carga\ hidráulica\ (\frac{m^3}{m^2}\ día) = \frac{1470\ (\frac{m^3}{día})}{1525(m^2)} = 0,96 \approx 1,00\ \frac{m^3}{m^2}\ día$$

Como se puede observar los valores están muy por debajo de los límites máximos de diseño lo que da un margen amplio de funcionamiento a la estación depuradora.

Los rendimientos en la depuración de las aguas efectuados por los lechos de turba son los siguientes:

RENDIMIENTOS LECHOS DE TURBA		
SS (%)	DBO <sub>5</sub> (%)	REDUCCIÓN DE E. COLIS
90	85	10 <sup>3</sup> --10 <sup>4</sup>

Tabla XIX.-Rendimientos de turba

Con estos rendimientos de depuración a la salida del lecho la calidad del agua residual será la siguiente:

COMPOSICIÓN CAUDAL EFLUENTE DE LOS LECHOS DE TURBA		
Unidades	DBO <sub>5</sub>	SS
Kg /día	44	11
Ppm	30	7

Tabla XX. –Composición de efluente.

Como se puede observar los parámetros del efluente ya están dentro de los límites legales establecidos por la Directiva 271/91/CE, que marca de 20 a 30 ppm para la DBO<sub>5</sub> y de 20 a 40 ppm de SS, sin embargo, la eliminación de coliformes fecales necesita de un proceso posterior para su eliminación, que en este caso serán las lagunas de maduración.

En la siguiente tabla se resumen los datos de cálculo, y composición atendiendo al rendimiento para los lechos de turba:

AREA(m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE LECHOS	CARGA HIDRAULICA (Kg/m <sup>2</sup> día)	CARGA ORGÁNICA(Kg/m <sup>2</sup> día)
2287	8(4 pares)	1,0	0,20

Tabla XXI.-Tabla resumen.

Parámetros	DBO(kg/día)	SS(kg/día)	NTK(kg/día)	P-TOTALES(kg/día)	E.colis
Composición de entrada	294	105	53	16	
Rendimiento%	85	90			10 <sup>3</sup> --10 <sup>4</sup>
Composición de salida	44	11			

Tabla XXII.-Resumen de composición del efluente

#### 5.5.4.-ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO

Para el mantenimiento de los lechos se requieren las actividades siguientes:

- **Rastrillado quincenal de los lechos:** de esta manera se restablece la estructura porosa original de la turba, rompiendo los agregados que se hayan podido formar y así garantizar el reparto homogéneo del agua residual en toda la superficie del lecho.

- **Eliminación de la capa colmatada:** tiende a formarse una capa impermeable al colmatarse la turba con la materia sólida residual que ha quedado tras el pre-tratamiento, esta será retirada con una pala.
- **Reposición de la turba:** con una frecuencia trimestral, dado que tras las sucesivas eliminaciones de la capa superficial el lecho pierde altura que habrá que reponer con turba nueva. La turba que se utiliza está en abundancia en la zona, ya que se encuentran grandes formaciones vegetales de turba, denominadas Bofedales.

### 5.6.-LAGUNA DE MADURACIÓN

#### 5.6.1.-OBJETIVO Y FUNDAMENTO

El objetivo fundamental de las lagunas de maduración es la reducción de las bacterias patógenas, clarificar el agua y finalizar la eliminación de D.B.O<sub>5</sub>. El agua aumenta de calidad química y bioquímica mediante la actuación de organismos aerobios que forman complejas redes tróficas.

El oxígeno en disolución del agua debe estar por encima de 4mg/l para que pueda existir una red trófica compleja. La concentración de algas no deberá de ser muy alta para que pueda entrar radiación solar al fondo de la laguna.

Los factores para la eliminación de patógenos en las lagunas se podrían dividir en dos categorías:

- Físicos: La temperatura y sedimentación.
- Físico-Químicos: El pH, la concentración de oxígeno disuelto y la intensidad de la luz solar

Como ocurre con todos los procesos biológicos, la temperatura es un factor muy importante en la velocidad de desaparición de microorganismos patógenos. La velocidad de eliminación de patógenos aumenta con la temperatura. Por tanto, la eficacia en la reducción de patógenos es máxima durante los meses de verano.

La sedimentación consiste en la incorporación al fondo de la laguna de agregados de microorganismos, debido a que su peso específico es mayor que el del agua. Una vez que se produce su depósito en el fondo, estos agregados son atacados por bacterias que se desarrollan en la capa de fango, y finalmente desaparecen.

La eliminación de patógenos aumenta con el pH de la laguna.

Uno de los principales factores es la intensidad de la luz. La eliminación de patógenos es mucho más rápida en presencia de luz, por lo que debe evitarse la construcción de lagunas de maduración profundas en las que buena parte de la columna de agua se encuentra en la oscuridad. Por la misma razón, la eliminación de patógenos es mucho más eficaz en días despejados, especialmente al comienzo del verano, cuando la duración del día es máxima.

El proceso de desinfección del agua en la laguna de maduración es sencillo, podríamos resumirlo de la siguiente manera: tras salir el agua de los lechos de turba pasa a una gran laguna

de maduración de poca profundidad, en ella el agua gracias a la acción de las algas, combinada con la alta concentración de oxígeno y la radiación ultravioleta del sol se consigue una eliminación de patógenos en el agua residual del 80%.

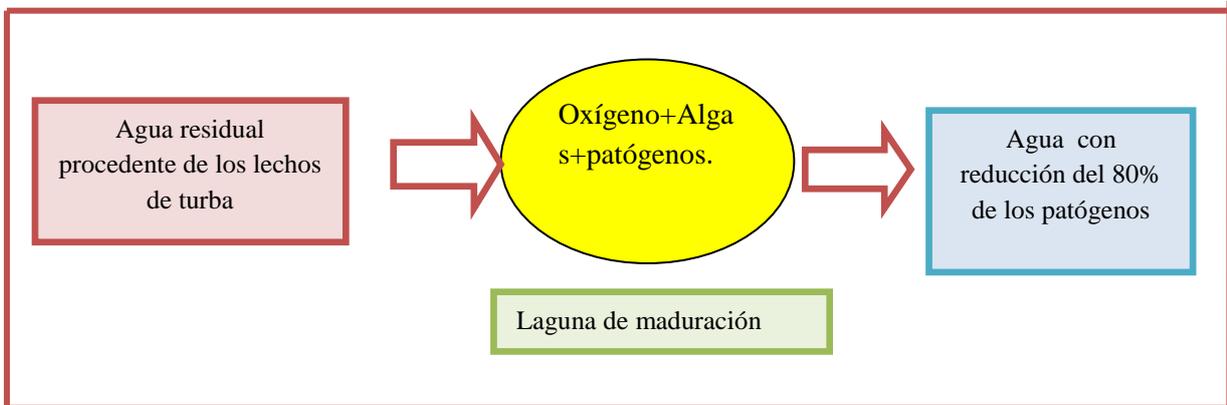


Diagrama VII.-Proceso en la Laguna de maduración

### 5.6.2.-BASES DE DISEÑO

Vamos a disponer de una gran laguna de maduración en funcionamiento. Las entradas de agua serán múltiples mediante tubos agujereados llamados tubos de flauta, dispuestos en el fondo de las lagunas

Los parámetros de diseño serán los siguientes:

- Tiempo de retención mayor a 5 días si funciona 1 sola laguna.
- Profundidad entre 0,5 y 1,2 metros.
- Producción de fangos prácticamente inapreciable.

Para el diseño de las lagunas de maduración se tendrá en cuenta la concentración de coliformes fecales en el agua a tratar. La concentración de coliformes presentes en el agua residual de Totorá ronda una concentración de  $7,4 \times 10^6 / 100\text{ml}$ . Al ser agua residual que previamente al paso por la laguna de maduración, ha pasado por otros tratamientos, la concentración de coliformes se reduce. Hay que determinar esa reducción en coliformes, y una vez determinada se pasará a calcular el tiempo de retención que deberá estar el agua en la laguna. Una vez determinado ese tiempo de retención, se procederá al dimensionamiento de la laguna, que vendrá determinado por el Qmed y el tiempo de retención. Al final se obtendrá un efluente con una carga menor de coliformes, en torno a un 80% menos, por su paso por dicha laguna de maduración.

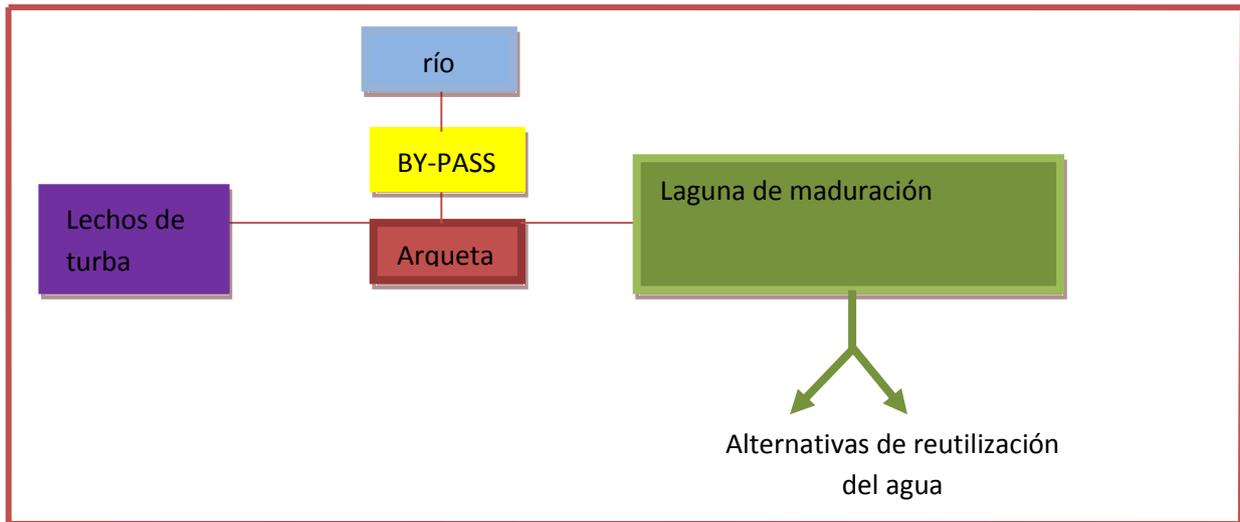


Diagrama VIII.- laguna de maduración.

### 5.6.3.-CÁLCULO DE PARÁMETROS

Para determinar la cantidad de coliformes presentes, partimos con la premisa de la concentración en el influente de  $7,4 \times 10^6/100\text{ml}$ .

Al someter el agua que llega a la laguna de maduración a un pre- tratamiento anterior a la laguna de maduración, la concentración de coliformes disminuye aproximadamente en un 75%. Por lo tanto la concentración de coliformes a la entrada de la laguna de maduración será la siguiente:

$$\text{Coliformes en el influente} = 7,4 * \frac{10^6}{100\text{ml}} * \left(\frac{25}{100}\right) = 1,8 \times 10^6/100\text{ml}.$$

El agua a la salida de la laguna de maduración habrá reducido sus coliformes totales en un 90%, resultando la concentración del efluente:

$$\text{Coliformes en el efluente} = 1,8 * 10^6/100\text{ml} * \left(\frac{10}{100}\right) = 1,8 \times 10^5/100\text{ml}.$$

Para calcular el tiempo de retención lo despejamos de la ecuación de Mara:

$$N_e = \frac{N_i}{1 + k_d t}$$

El valor de  $k_d$  depende de la temperatura media del agua que ronda los  $16^\circ\text{C}$ .

$$k_b = k_{20} \theta^{(T-20)}$$

Donde:

$K_{20}$ =constante de velocidad a 20°C, día<sup>-1</sup>=2,6

$\theta$ = coeficiente de temperatura= 1,19

T= temperatura media anual del agua, C<sup>0</sup>.

Resolviendo la ecuación:

$$k_b = 2,6 * 1,19^{(16-20)} = 1,3$$

Despejando el tiempo de retención de la ecuación de Mara, t (tiempo de retención)

$$t = \left( \frac{N_i}{N_e} - 1 \right) / k_b$$

Dónde:

$N_e$ =número de coliformes fecales/100ml en el efluente.

$N_i$ =número de coliformes fecales /100ml en el influente.

$K_b$ =constante de eliminación de coliformes, día<sup>-1</sup>, 1,3

t=tiempo de retención en días.

$$t = \left( \frac{1,8 * \frac{10^6}{100ml}}{1,8 * \frac{10^5}{100ml}} - 1 \right) / 1,3 = 6,9 \approx 7 \text{ días de tiempo de retención}$$

La Organización Mundial de la Salud recomienda un tiempo de retención mínimo de 5 días para el funcionamiento de una sola laguna de maduración por lo que la laguna de maduración proyectada cumple con los parámetros recomendados por la OMS.

El volumen de la laguna de maduración se determina mediante la siguiente expresión:

$$Volumen(m^3) = Q_{medio} \left( \frac{m^3}{d/a} \right) * t(día)$$

$$\text{Volumen} = 1470(\text{m}^3/\text{día}) \times 7 \text{ días} = 10290\text{m}^3$$

La profundidad de la laguna será de 0,6m, entrando dentro de los parámetros de diseño.

A continuación se resumen los datos obtenidos para la laguna de maduración:

Composición de entrada y salida		
Unidades	Influyente	Efluente
$\frac{[\text{coliformes}]}{100} \text{ ml}$	$1,8 \times 10^6$	$1,8 \times 10^5$

Tabla XXIII.-Resumen parámetros para laguna de maduración.

Parámetros de diseño		
Profundidad (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Tiempo de retención(días)
0,6	10290	7

Tabla XXIV.-Resumen datos de dimensionamiento de la laguna de maduración.

#### 5.6.4.- ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento de las lagunas (anaerobia como de maduración) se basa en dos aspectos fundamentales:

- Cuidado de la obra civil (sistema hidráulico, jardinería, etc.).
- Detección de problemas de funcionamiento y adopción de medidas correctoras.

Las tareas básicas para el mantenimiento de las lagunas son las siguientes:

- Corte, poda y retiro de pasto y vegetación que crezca sobre los terraplenes. Esto se hace para evitar que la vegetación caiga en la laguna y genere micro-ambientes propicios para la proliferación de mosquitos. Se recomienda, por lo tanto, el uso de vegetación o pastos de crecimiento lento para minimizar la frecuencia de esta actividad.
- Eliminación de material flotante y plantas macrófitas flotantes de las laguna facultativas y las lagunas de maduración. Esto se hace para maximizar la tasa de fotosíntesis, y prevenir la proliferación de moscas y mosquitos.

- Eliminación de cualquier material sólido acumulado en las estructuras de entrada y salida de las lagunas.
- Reparación de cualquier daño causado a los terraplenes por roedores u otros animales.

Reparación de cualquier daño en las obras de encerramiento y puertas o sitios de acceso al sistema.

## 6.-ACTIVIDADES PREVIAS A LA IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA DE DEPURACIÓN

Antes del diseño del sistema de tratamiento, deben considerarse una serie de actividades previas, que como objetivo tienen el acondicionar el medio dónde se ubicará la planta de tratamiento. La mayoría de estas actividades se orientan a la ejecución de las lagunas, que son las que más obras de construcción requieren.

El lecho de turba, no requiere una movilización ni actividad previa a considerar, debido a que el material básico, que son las turbas, se consiguen de manera inmediata en el entorno de Totorá.

Entre las actividades que deberán tenerse en cuenta antes del diseño, distinguimos:

- **Movimiento de tierras:** antes de iniciar el movimiento de tierras es necesario podar la capa vegetal existente que podrá utilizarse posteriormente para el ajardinamiento de los taludes exteriores. Los aspectos más importantes a tener en cuenta son:
  - Guardar el equilibrio entre desmonte y terraplén para minimizar los transportes vertedero o bien a la tierra de aportación. Pendiente de taludes 3/1 o 2/1 con protección mediante escolleras y resguardo mínimo de 0,5 m.
  - Adecuada compactación con la maquinaria acorde con las características de terreno y con el grado de compactación recomendada.
  - Dar la pendiente adecuada a los taludes según la definición del proyecto.
- **Conducciones:** Las conducciones junto con las unidades de entrada y salida y arquetas de reparto, constituyen el sistema hidráulico de la planta. Su función es transportar el agua entre las diferentes lagunas o procesos. El agua cae en lámina libre por gravedad. Para la conducción se suelen utilizar tuberías convencionales de saneamiento (P.V.C., fibrocemento, hormigón) cuidando la estanqueidad de las juntas para evitar que las fugas pongan en peligro la estabilidad de los taludes.
- **Unidades especiales:** este apartado engloba las arquetas de reparto y las unidades de entrada y de salida de las diferentes balsas. Las arquetas de reparto tienen como función

dividir el caudal de entrada entre las diferentes lagunas de un mismo proceso. Estas se ejecutarán con hormigón armado y el reparto se realiza con vertederos rectangulares de acero inoxidable o aluminio. Las unidades de entrada a las diferentes lagunas constan en general de una arqueta receptora y una tubería que conduce el agua hasta el fondo de la laguna siguiendo el talud. La arqueta se realizará en hormigón o fábrica de ladrillo y la tubería cogeremos cualquiera de los materiales utilizados para agua a presión pero con el timbraje más bajo.

Las unidades de salida para todas las lagunas constan de una arqueta a la cual se le acopla una chapa deflectora para evitar que salga la capa de agua superficial. Estas arqueta también van a ser de hormigón y la chapa deflectora en acero inoxidable.

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.

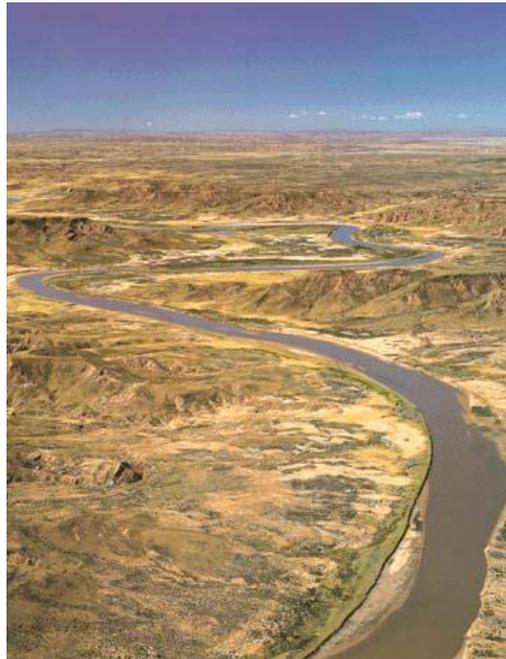
- **Impermeabilización:** impermeabilizaremos todas las lagunas de la planta mediante láminas artificiales. Existen diferentes tipos de láminas aplicables, la más adecuada para nuestro caso y por tanto que emplearemos es de polietileno de alta densidad (con espesores de 1 – 1,5 mm). Es muy importante que la ejecución de esta unidad sea muy cuidadosa fundamentalmente en las uniones entre los diferentes paños y en la unión de estos con las obras de fábrica, pues una pequeña fuga puede causar la ruina de la obra. Es necesario perfilar muy bien los taludes y se puede colocar una capa de geotextil para evitar roturas en la lámina.

También tenemos que tener en cuenta las unidades complementarias de urbanización de la instalación, como caseta de servicio, cerramiento, alumbrado y jardinería, además de otros servicios, prever accesos para las tomas de muestras.

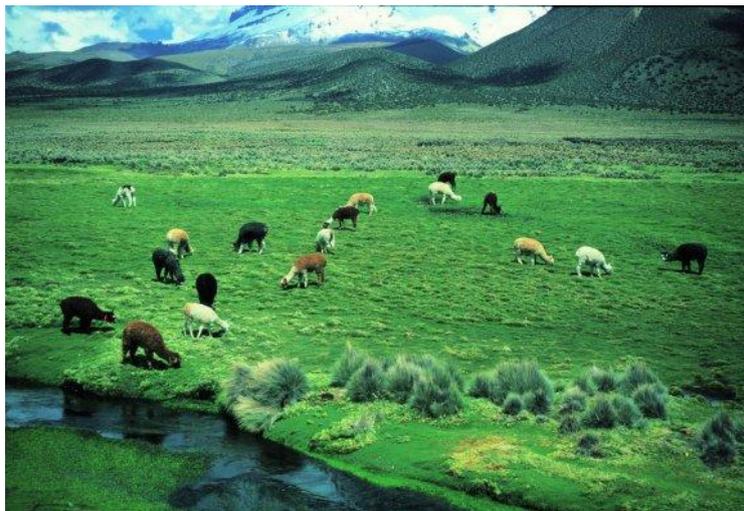
7. ANEXOS.



*Anexo I.-Entorno de Totorá*



*Anexo II.-Río Desaguadero.*



*Anexo III.- Bofedales y ganado local.*



*Anexo IV.-Mujeres trabajando la artesanía local.*



*Anexo V.-Población indígena Aymara local.*



*Anexo VI.-Ejemplo de uso directo de aguas residuales para riego.*



*Anexo.-VI I.-Ejemplo de Pre-tratamiento (rejas).*



*Anexo VIII.-Impermeabilización de lagunas*



*Anexo IX.-Ejemplo de laguna anaerobia.*



*Anexo X.-Ejemplo de laguna de maduración.*



*Anexo XI.-Fango de laguna anaerobia.*



*Anexo XII.-Ejemplo de era de secado.*



*Anexo XIII.- Ejemplo de bomba conecta a panel solar.*

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

- Ramón Collado Lara (1992): “*Depuración de aguas residuales en pequeñas comunidades*”. Nº12 Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Depuración de aguas residuales. MOPU (Unidades Temáticas Ambientales de la Dirección General de Medio Ambiente.
- EOI. “*Documentación modulo de Procesos, operaciones y diseño en la depuración de aguas*“.2008.
- Sainz Sastre J.A. “*Tecnologías para la sostenibilidad. Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*“. Colección EOI Medio ambiente.2005.

### Direcciones de Internet

- [www.aguabolivia.org](http://www.aguabolivia.org).
- [www.es.wikipedia.org/wiki/Bolivia](http://www.es.wikipedia.org/wiki/Bolivia).
- [www.derecho.com](http://www.derecho.com)
- [www.ambientum.com](http://www.ambientum.com)
- [www.geocities.com](http://www.geocities.com)
- [www.es.irc.nl](http://www.es.irc.nl)